



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE SOBRAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**AMINADABE SOUSA NASCIMENTO**

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS COM CRITÉRIOS N-1 E N-2 EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**SOBRAL**

**2023**

AMINADABE SOUSA NASCIMENTO

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS COM CRITÉRIOS N-1 E N-2 EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Juan Carlos Pequena Suni

SOBRAL

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

N193s Nascimento, Aminadabe.  
Simulação e análise de contingências com critérios N-1 e N-2 em sistemas elétricos de potência /  
Aminadabe Nascimento. – 2023.  
94 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,  
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2023.  
Orientação: Prof. Juan Carlos Pequeña Suni.

1. Sistemas-teste. 2. Fluxo de potência. 3. Algoritmo. 4. Contingências. 5. Limiares de operação. I.  
Título.

CDD 621.3

---

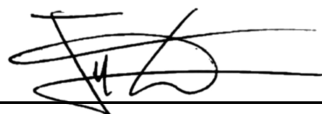
AMINADABE SOUSA NASCIMENTO

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS COM CRITÉRIOS N-1 E N-2 EM  
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica  
do Campus de Sobral da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 14/07/2023

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Me. Juan Carlos Pequena Suni (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Márcio André Baima Amora  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## RESUMO

A complexidade dos sistemas elétricos de potência demanda mecanismos para facilitar os estudos relacionados a esta área. Assim, é comum a elaboração de topologias reduzidas para auxiliar nas análises computacionais das redes de energia elétrica. Dentre as topologias reduzidas mais utilizadas em análises de sistemas de potência, destacam-se os sistemas-teste normalizados pelo IEEE. O presente trabalho aborda o fluxo de potência em regime permanente e a análise de contingências com critérios N-1 e N-2 para sistemas elétricos de potência, tanto no aspecto teórico-conceitual quanto na simulação. A análise apresenta o desenvolvimento do cálculo do fluxo de potência de Newton-Rahpson sem controles e limites, mediante uma rotina computacional feita no software MATLAB, considerando limiares de tensão e geração de potência ativa e reativa nas barras e restrições de capacidade nas linhas de transmissão. Inicialmente, para validar o algoritmo desenvolvido, calculou-se o fluxo de potência do sistema de 3 barras do IEEE e comparou-se os resultados com aqueles encontrados pelo algoritmo. Em seguida, com os valores da topologia de 118 barras do IEEE calculados pelo algoritmo, extraiu-se índices de desempenho das linhas de transmissão e transformadores. Assim, foram definidas as contingências com critérios N-1 e N-2, ou seja, as possíveis perdas de um ou dois ramos, visando avaliar melhorias e ampliações no sistema IEEE 118 barras que atendam os dois critérios. Para as contingências mais relevantes, foram simuladas ações de controle que possibilitaram que o sistema operasse novamente dentro dos limiares de operação de geração, tensão e fluxo de potência.

**Palavras-chave:** Sistemas-teste. Fluxo de potência. Algoritmo. Contingências. Limiares de operação.

## ABSTRACT

The complexity of electrical power systems demands mechanisms to facilitate studies related to this field. Thus, it is common to develop reduced topologies to help computational analysis of electrical energy networks. Among the most used reduced topologies in power system analysis, the standardized test systems of the IEEE stand out. The present work deals with the steady-state power flow and the analysis of contingencies with N-1 and N-2 criteria for electrical power systems, both in the theoretical-conceptual aspect and in the simulation. The analysis presents the development of the calculation of the Newton-Raphson power flow without controls and limits, through a computational routine made in the MATLAB software, considering voltage and active and reactive power limits besides capacity restrictions in the transmission lines. Initially, in order to validate the developed algorithm, the power flow of the IEEE 3-bus system was calculated and the results were compared with those found by the algorithm. Then, with the values of the 118-bus IEEE topology from the algorithm, performance indices of the transmission lines and transformers were extracted. Thus, contingencies were defined with criteria N-1 and N-2, that is, the possible losses of one or two branches, in order to evaluate improvements and expansions in the IEEE 118-bus system that meet the two criteria. For the most relevant contingencies, control actions were simulated and they allowed the system to operate again within the generation, voltage and power flow operation limits.

**Palavras-chave:** Test-systems. Power flow. Algorithm. Contingencies. Operation limits.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Sistema-teste de 14 barras do IEEE . . . . .   | 14 |
| Figura 2 – Sistema-teste de 30 barras do IEEE . . . . .   | 14 |
| Figura 3 – Sistema-teste de 57 barras do IEEE . . . . .   | 15 |
| Figura 4 – Modelo $\pi$ de uma LT . . . . .   | 19 |
| Figura 5 – Transformador em fase . . . . .  | 19 |
| Figura 6 – Fluxograma do algoritmo de Newton-Raphson . . . . .  | 26 |
| Figura 7 – Sistema-teste IEEE 3 Barras . . . . .  | 27 |
| Figura 8 – Resultados do exemplo de 3 barras em MATLAB . . . . .  | 48 |
| Figura 9 – Resultados das barras do exemplo de 3 barras em PowerWorld . . . . .                             | 48 |
| Figura 10 – Resultados das linhas do exemplo de 3 barras em PowerWorld . . . . .                            | 48 |
| Figura 11 – Sistema-teste de 118 barras do IEEE . . . . .   | 49 |
| Figura 12 – Relatório de contingências do sistema IEEE 118 barras . . . . .                                 | 51 |
| Figura 13 – Posição do Transformador 8-5 e das novas componentes do sistema . . . . .                       | 54 |
| Figura 14 – Posição da LT 9-10 e das novas componentes do sistema . . . . .                                 | 56 |
| Figura 15 – Posição da LT 34-43 e das novas componentes do sistema . . . . .                                | 57 |
| Figura 16 – Posição da LT 45-46 e das novas componentes do sistema . . . . .                                | 59 |
| Figura 17 – Posições das LT's 9-10 e 38-65 e das novas componentes no diagrama unifilar . . . . .           | 63 |
| Figura 18 – Posições dos Transformadores 8-5 e 30-17 e das novas componentes no diagrama unifilar . . . . . | 65 |
| Figura 19 – Posições das LT's 34-43 e 45-46 e das novas componentes no diagrama unifilar . . . . .          | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Tipos de barra . . . . .  | 18 |
| Tabela 2 – Dados iniciais de barra . . . . .   | 27 |
| Tabela 3 – Dados de linha . . . . .  | 27 |
| Tabela 4 – Valores atualizados . . . . .   | 34 |
| Tabela 5 – Valores atualizados . . . . .   | 38 |
| Tabela 6 – Valores atualizados . . . . .   | 43 |
| Tabela 7 – Dados de barra em regime permanente . . . . .                                     | 45 |
| Tabela 8 – Fluxo de potência em regime permanente . . . . .                                  | 47 |
| Tabela 9 – Perdas de potência em regime permanente . . . . .                                 | 47 |
| Tabela 10 – Violações após perda do Transformador 8-5 . . . . .                              | 53 |
| Tabela 11 – Soluções das violações após perda do Transformador 8-5 . . . . .                 | 54 |
| Tabela 12 – Violações após perda da Usina 10 . . . . .                                       | 55 |
| Tabela 13 – Soluções das violações após perda da Usina 10 . . . . .                          | 56 |
| Tabela 14 – Violações após perda da LT 34-43 . . . . .                                       | 57 |
| Tabela 15 – Soluções das violações após perda da LT 34-43 . . . . .                          | 58 |
| Tabela 16 – Violações após perda da LT 45-46 . . . . .                                       | 58 |
| Tabela 17 – Soluções das violações após perda da LT 45-46 . . . . .                          | 58 |
| Tabela 18 – Violações após perda da Usina 10 e da LT 38-65 . . . . .                         | 59 |
| Tabela 19 – Soluções das violações após perda da Usina 10 e da LT 38-65 . . . . .            | 61 |
| Tabela 20 – Violações após perda dos Transformadores 8-5 e 30-17 . . . . .                   | 63 |
| Tabela 21 – Soluções das violações após perda dos Transformadores 8-5 e 30-17 . . . . .      | 66 |
| Tabela 22 – Violações após perda das LT's 34-43 e 45-46 . . . . .                            | 67 |
| Tabela 23 – Tentativa de correções das violações após perda das LT's 34-43 e 45-46 . . . . . | 67 |
| Tabela 24 – Correções finais das violações após perda das LT's 34-43 e 45-46 . . . . .       | 68 |



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|       |   |
|-------|---|
| CEPEL | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica             |
| ERAC  | Esquema Regional de Alívio de Carga                 |
| IEEE  | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| LT    | Linha de Transmissão                                |
| NR    | Newton-Raphson                                      |
| ONS   | Operador Nacional do Sistema Elétrico               |
| SEP   | Sistema Elétrico de Potência                        |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $b_k^{sh}$                 | Susceptância shunt na barra $k$  |
| $b_{km}^{sh}$              | Susceptância shunt do ramo $km$  |
| $g_{km}$                   | Condutância série do ramo $km$   |
| $b_{km}$                   | Susceptância série do ramo $km$  |
| $a_{km}$                   | Relação de transformação em um transformador entre as barras $k$ e $m$ |
| $G$                        | Matriz condutância série   |
| $B$                        | Matriz admitância série  |
| $Y$                        | Matriz admitância nodal  |
| $G_{km} + jB_{km}$         | Elemento $km$ da matriz admitância nodal                               |
| $\dot{Y}_{bus}^{kk}$       | Admitância da diagonal principal                                       |
| $\dot{Y}_{bus}^{mm}$       | Admitância da diagonal principal                                       |
| $\dot{Y}_{bus}^{km}$       | Admitância da diagonal secundária                                      |
| $N_B$                      | Número de barras   |
| $N_L$                      | Número de ramos  |
| $P_k + jQ_k$               | Potência aparente líquida na barra $k$                                 |
| $P_g + jQ_g$               | Potência aparente gerada na barra $k$                                  |
| $P_l + jQ_l$               | Potência aparente injetada na barra $k$                                |
| $P_{km} + jQ_{km}$         | Potência aparente que flui de uma barra $k$ para uma barra $m$         |
| $v$                        | Número de iterações  |
| $V_k$                      | Módulo da tensão na barra $k$  |
| $\theta_k$                 | Ângulo da tensão na barra $k$  |
| $\Delta P_k + j\Delta Q_k$ | Potência residual aparente na barra $k$                                |
| $\Delta V_k$               | Incremento do módulo da tensão na barra $k$                            |
| $\Delta \theta_k$          | Incremento do ângulo da tensão na barra $k$                            |
| $PI_P$                     | Índice de desempenho de fluxo de potência ativa                        |
| $PI_V$                     | Índice de desempenho de tensão   |
| $PI_{VQ}$                  | Índice de desempenho de tensão e geração de potência reativa           |

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>13</b> |
| <b>1.1</b>   | <b>Conceitos básicos</b>                                    | <b>13</b> |
| <i>1.1.1</i> | <i>Fluxo de potência</i>                                    | <i>13</i> |
| <i>1.1.2</i> | <i>Sistemas-teste</i>                                       | <i>13</i> |
| <i>1.1.3</i> | <i>Controles e limites</i>                                  | <i>15</i> |
| <b>1.2</b>   | <b>Objetivos</b>  | <b>16</b> |
| <b>1.3</b>   | <b>Metodologia</b>  | <b>16</b> |
| <b>1.4</b>   | <b>Justificativa</b>  | <b>17</b> |
| <b>1.5</b>   | <b>Estrutura e descrição dos capítulos</b>                  | <b>17</b> |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                | <b>18</b> |
| <b>2.1</b>   | <b>Tipos de barra</b>                                       | <b>18</b> |
| <b>2.2</b>   | <b>Modelagem de linhas de transmissão e transformadores</b> | <b>18</b> |
| <b>2.3</b>   | <b>Equações de balanço de potência</b>                      | <b>20</b> |
| <b>2.4</b>   | <b>Equações de fluxo de potência</b>                        | <b>20</b> |
| <b>2.5</b>   | <b>Métodos de fluxo de potência</b>                         | <b>21</b> |
| <i>2.5.1</i> | <i>Método de Gauss-Seidel</i>                               | <i>21</i> |
| <i>2.5.2</i> | <i>Método de Newton-Raphson</i>                             | <i>22</i> |
| <i>2.5.3</i> | <i>Métodos desacoplados XB e BX</i>                         | <i>23</i> |
| <i>2.5.4</i> | <i>Fluxo de potência contínuo</i>                           | <i>24</i> |
| <b>2.6</b>   | <b>Índices de desempenho</b>                                | <b>24</b> |
| <b>3</b>     | <b>APLICAÇÃO DO MÉTODO NEWTON-RAPHSON</b>                   | <b>26</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>Procedimentos</b>  | <b>26</b> |
| <b>3.2</b>   | <b>Resolução analítica para efeitos de validação</b>        | <b>27</b> |
| <i>3.2.1</i> | <i>Iteração 1</i>   | <i>29</i> |
| <i>3.2.2</i> | <i>Iteração 2</i>   | <i>34</i> |
| <i>3.2.3</i> | <i>Iteração 3</i>   | <i>38</i> |
| <i>3.2.4</i> | <i>Iteração 4</i>   | <i>42</i> |
| <i>3.2.5</i> | <i>Geração de potência</i>                                  | <i>44</i> |
| <i>3.2.6</i> | <i>Resultados finais</i>                                    | <i>45</i> |
| <i>3.2.7</i> | <i>Fluxo de potência</i>                                    | <i>45</i> |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.8 | <i>Perdas de potência</i> . . . . .  | 47 |
| 3.2.9 | <i>Solução computacional</i> . . . . .                                     | 47 |
| 4     | <b>SIMULAÇÃO DO SISTEMA IEEE DE 118 BARRAS</b> . . . . .                   | 49 |
| 4.1   | <b>Características gerais</b> . . . . .                                    | 49 |
| 4.2   | <b>Seleção de contingências</b> . . . . .                                  | 50 |
| 4.2.1 | <i>Procedimentos</i> . . . . .   | 50 |
| 4.2.2 | <i>Cenários divergentes</i> . . . . .                                      | 51 |
| 4.2.3 | <i>Definição das situações-problema</i> . . . . .                          | 51 |
| 4.3   | <b>Estados de operação</b> . . . . .                                       | 52 |
| 4.4   | <b>Critério N-1</b> . . . . .  | 53 |
| 4.4.1 | <i>Perda do Transformador 8-5</i> . . . . .                                | 53 |
| 4.4.2 | <i>Perda da Usina 10</i> . . . . .   | 55 |
| 4.4.3 | <i>Perda da LT 34-43</i> . . . . .   | 57 |
| 4.4.4 | <i>Perda da LT 45-46</i> . . . . .   | 58 |
| 4.4.5 | <i>Iterações</i> . . . . .   | 59 |
| 4.5   | <b>Critério N-2</b> . . . . .  | 59 |
| 4.5.1 | <i>Perda simultânea da Usina 10 e da LT 38-65</i> . . . . .                | 59 |
| 4.5.2 | <i>Perda simultânea dos Transformadores 8-5 e 30-17</i> . . . . .          | 63 |
| 4.5.3 | <i>Perda simultânea das LT's 34-43 e 45-46</i> . . . . .                   | 66 |
| 4.5.4 | <i>Iterações</i> . . . . .   | 68 |
| 5     | <b>CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> . . . . .                         | 69 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .   | 70 |
|       | <b>APÊNDICES</b> . . . . .   | 71 |
|       | <b>APÊNDICE A – ARQUIVO DE DADOS DO SISTEMA DE 118 BARRAS</b>              | 71 |
|       | <b>APÊNDICE B – ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA</b> . . . . .               | 76 |
|       | <b>APÊNDICE C – IMPRESSÃO DE RESULTADOS DE FLUXO DE POTÊNCIA</b> . . . . . | 79 |
|       | <b>APÊNDICE D – FUNÇÃO PARA CRITÉRIO N-1</b> . . . . .                     | 81 |
|       | <b>APÊNDICE E – FUNÇÃO PARA CRITÉRIO N-2</b> . . . . .                     | 82 |
|       | <b>APÊNDICE F – IMPRESSÃO DAS CONTINGÊNCIAS MAIS GRAVES</b>                | 83 |
|       | <b>APÊNDICE G – POTÊNCIAS GERADAS EM REGIME PERMANENTE</b>                 | 85 |
|       | <b>APÊNDICE H – TENSÕES NODAIS EM REGIME PERMANENTE</b> . .                | 86 |

|   |    |
|---|----|
| <b>APÊNDICE I – FLUXO DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE</b>    |    |
| (K-M) . . . . .   | 87 |
| <b>APÊNDICE J – FLUXO DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE</b>    |    |
| (M-K) . . . . .   | 90 |
| <b>APÊNDICE K – PERDAS DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE</b>   | 93 |
| <b>ANEXOS</b> . . . . .                                       | 93 |
| <b>ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR ORIGINAL DO IEEE</b> . . . . . | 94 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Conceitos básicos

### 1.1.1 Fluxo de potência

O estudo do fluxo de potência é necessário para o controle, planejamento e expansão de um Sistema Elétrico de Potência (SEP). Borges (2005) define tal conceito da seguinte maneira:

É o mais frequente estudo feito nos sistemas elétricos de potência. É o estudo que fornece a solução de uma rede elétrica, em regime permanente, para uma dada condição de operação, isto é, para uma dada condição de carga e geração, sujeitas a restrições operativas e à ação de dispositivos de controle.

Ainda segundo Borges (2005), o fluxo de potência pode ser aplicado a partir de vários métodos iterativos e é parte essencial de diversos outros estudos, tais como:

- a) curto-circuito, no cálculo das tensões pré-falta nos barramentos de uma rede;
- b) análise de estabilidade, no cálculo da condição inicial e da solução da rede em cada passo de integração;
- c) estudo de confiabilidade, para conhecer a probabilidade de falha nas componentes do sistema e conseqüentemente no suprimento ao consumidor, a fim de torná-la menor que um percentual definido durante a análise de investimento do sistema;
- d) análise de contingência estática, para verificar como o sistema opera em situação de contingência, ou seja, na ausência de alguma componente;
- e) fluxo de potência ótimo, na aplicação de restrições de otimização para encontrar a configuração que melhor minimiza o custo de operação e as perdas.

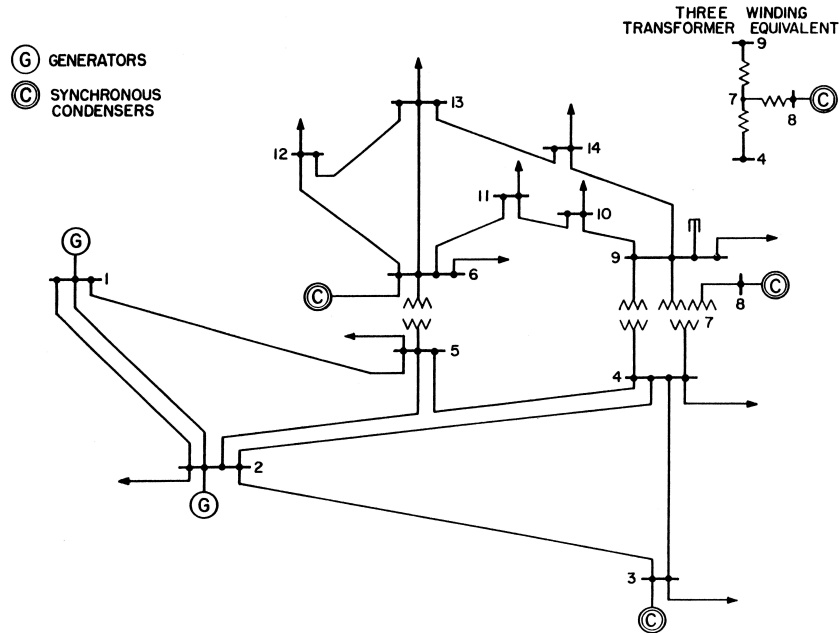
### 1.1.2 Sistemas-teste

A proposição de esquemas-teste de porte reduzido baseados em contextos reais é uma técnica bastante utilizada para facilitar as análises computacionais de sistemas de potência (PAI, 1979). Tais reduções permitem um bom controle sobre as diversas variáveis da situação-problema a ser solucionada, uma vez que é possível observar como esta se comporta diante de diversos cenários. Nelas, pode-se simular também fenômenos semelhantes aos de um sistema de grande porte e obter uma visão global sobre o ambiente de estudo.

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) padronizou vários casos-teste, muito utilizados em estudos. Tais esquemas representam uma porção do sistema interligado

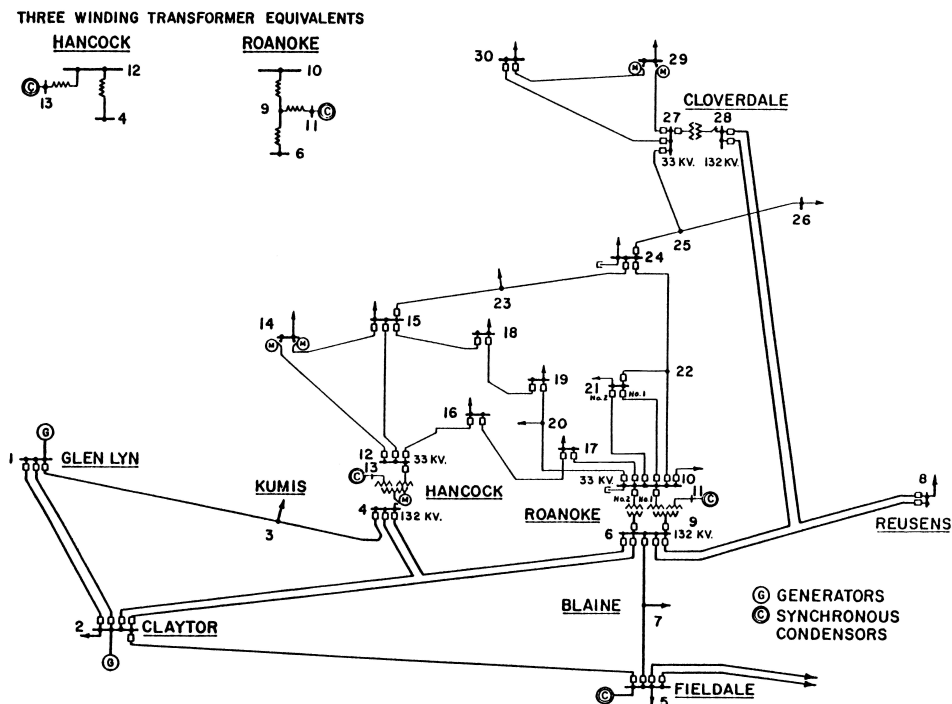
da região Centro-Oeste dos EUA, com dados do início da década de 1960 (CHRISTIE, 1993). Os sistemas em regime permanente padronizados pelo IEEE são de 14, 30, 57 e 118 barras, entre outros. Os diagramas unifilares para 14, 30 e 57 barras são mostrados nas Figuras 1 a 3.

Figura 1 – Sistema-teste de 14 barras do IEEE



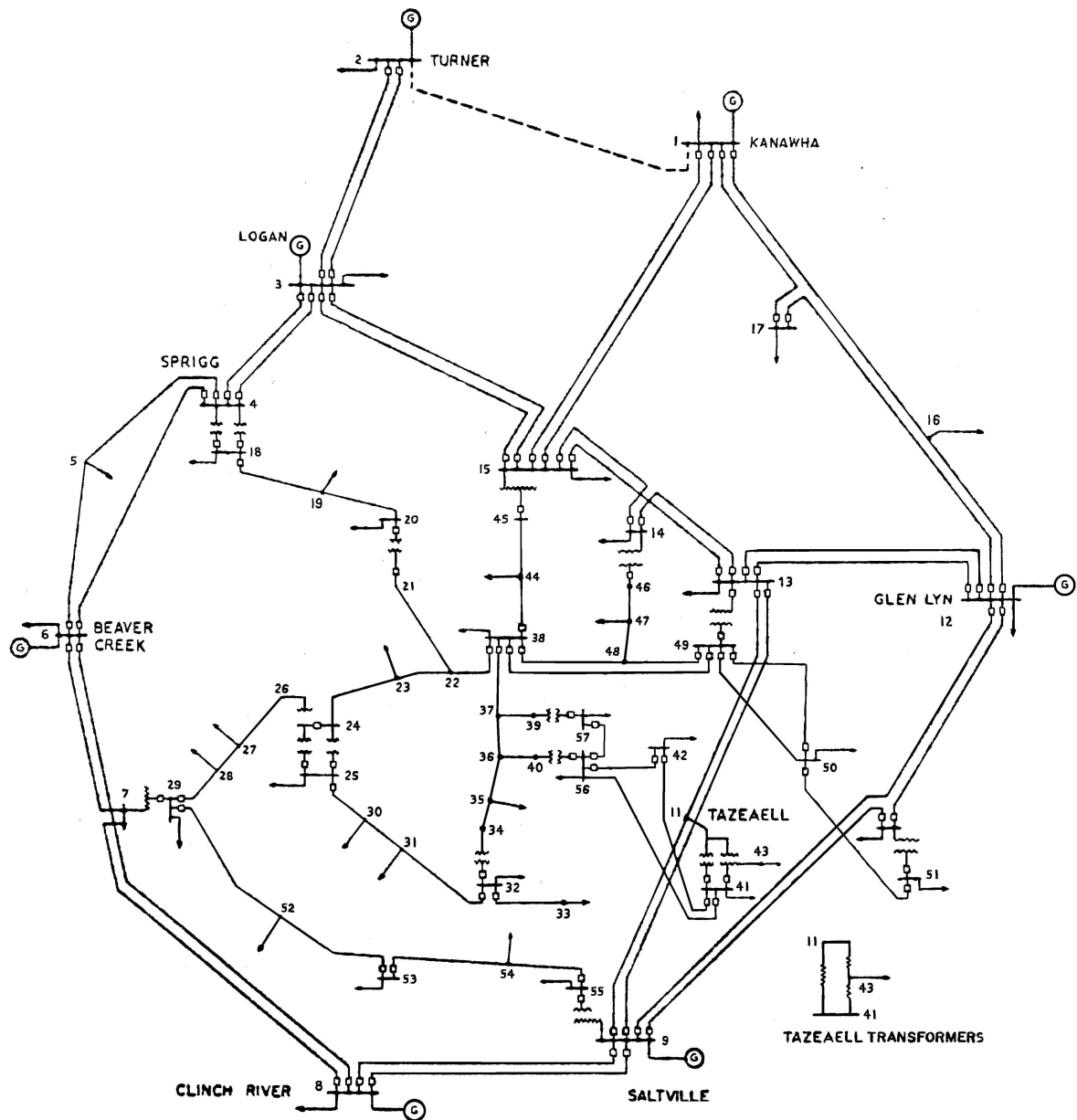
Fonte: Christie (1993).

Figura 2 – Sistema-teste de 30 barras do IEEE



Fonte: Christie (1993).

Figura 3 – Sistema-teste de 57 barras do IEEE



Fonte: Restaurado de Christie (1993).

### 1.1.3 Controles e limites

Um SEP real possui diversos dispositivos de controle que influenciam nas condições de operação e devem ser incluídos na modelagem do sistema para simular seu desempenho. Dessa forma, em estudos de fluxo de potência reais, são incorporadas à formulação básica do problema de fluxo de potência as variáveis que representam tais dispositivos de controle, assim como as inequações associadas aos limites de operação do sistema (MONTICELLI, 1983). Essas variáveis de controle podem transformar uma barra de carga em uma barra de tensão e os



limites de operação podem ser recalculados durante o processo iterativo. Tais modificações não ocorrem em uma simulação de fluxo de potência sem controles e limites. Nesse caso, as barras permanecem na mesma categoria e os limiares não mudam durante as iterações.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver estudo de fluxo de potência sem controles e limites e análise de contingências com critérios N-1 e N-2, a partir de ferramenta computacional em MATLAB. Nesse sentido, desdobram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) desenvolver e testar algoritmo de fluxo de potência sem controles e limites pelo método de Newton-Raphson (NR);
- b) investigar a topologia de 118 barras do IEEE em situações de contingência N-1 e N-2, ou seja, durante a perda de um ou dois ramos do sistema;
- c) determinar as contingências mais relevantes por meio de índices de desempenho;
- d) estudar o uso de limiares de geração, tensão e fluxo em um sistema de potência robusto.

## 1.3 Metodologia

A abordagem NR foi aplicada em rotina computacional em MATLAB desenvolvida neste trabalho, que calcula as potências geradas nas usinas, as tensões nas barras em módulo e fase, o fluxo de potência entre as barras e as perdas de potência nas linhas que conectam estas barras. Para validar a funcionalidade do algoritmo, este foi executado para um sistema-teste de três barras e os resultados foram comparados com os cálculos matemáticos deste sistema pelo método NR e com simulação realizada no *software* de fluxo de potência PowerWorld.

Além disso, a partir de índices de desempenho de fluxo de potência e tensão e geração de potência reativa, foi aplicada outra rotina computacional, também desenvolvida neste trabalho, para calcular a relevância de cada perda de uma ou duas linhas de transmissão ou transformadores, i.e., contingências com critério N-1 e N-2, na topologia de 118 barras do IEEE. Para os piores cenários, o fluxo de potência sem controles e limites foi executado com medidas corretivas que não afetaram o atendimento da demanda ou a integridade do sistema, tais como instalação de novas linhas, remanejamento de geração e instalação de capacitores *shunt*.

## 1.4 Justificativa

O estudo do fluxo de potência possui grande importância para encontrar mecanismos de melhoria e prevenção de danos em um sistema elétrico interligado. Para Grainger e Stevenson (1994), um engenheiro de sistemas de potência deve conhecer os métodos de fluxo de potência para estudar o projeto e funcionamento de um SEP. Nesse contexto, as topologias padronizadas pelo IEEE são largamente utilizadas em estudos de sistemas elétricos de potência devido à confiabilidade em trazer resultados interessantes sobre o ambiente real.

Para um engenheiro de sistemas de potência, é inviável analisar casos mais complexos como o de 118 barras sem o uso de soluções computacionais. Embora as concessionárias de energia utilizem *softwares* de análise automática de sistemas de potência, é importante para um acadêmico de engenharia elétrica entender as teorias aplicadas nesses programas. Dessa maneira, a elaboração de uma rotina computacional possibilita que um futuro engenheiro eletricitista tenha uma compreensão mais ampla sobre a formulação do fluxo de potência e a seleção de contingências, seja de critério N-1 ou N-2, pois as equações e os algoritmos permanecem visíveis e não se encontram fechados como nos programas previamente existentes.

## 1.5 Estrutura e descrição dos capítulos

Além do capítulo de Introdução, o trabalho possui mais quatro capítulos. No Capítulo 2, serão discutidas as teorias que nortearam os estudos. No Capítulo 3, será realizada uma aplicação de fluxo de potência pelo método NR para validar o algoritmo desenvolvido. No Capítulo 4, serão simuladas as contingências mais relevantes de critério N-1 e N-2 no sistema-teste de 118 barras. Por fim, o Capítulo 5 trará conclusões e considerações finais sobre o trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Tipos de barra

Em estudos de fluxo de potência, quatro grandezas são associadas com cada barramento do sistema: tensão em módulo  $|V|$  e ângulo de fase  $\theta$ , potência ativa gerada  $P$  e potência reativa gerada  $Q$  (GRAINGER; STEVENSON, 1994). Assim, de acordo com as grandezas conhecidas nas barras, estas são divididas em três categorias: V $\theta$ , PV e PQ.

- i) V $\theta$ : estabelece a referência angular do sistema, possui módulo de tensão constante e é uma barra na qual se conecta uma usina de maior porte;
- ii) PV: são barras em que a potência ativa gerada e o módulo da tensão são constantes;
- iii) PQ: são as barras com valores constantes de geração de potência ativa e reativa e podem ser barras de carga ou geradoras.

As grandezas conhecidas em cada tipo de barra definida em um estudo de fluxo de potência são resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos de barra

| Tipo       | $ V $     | $\theta$  | P         | Q         |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| V $\theta$ | Constante | Constante | Calculado | Calculado |
| PV         | Constante | Calculado | Constante | Calculado |
| PQ         | Calculado | Calculado | Constante | Constante |

Fonte: Grainger e Stevenson (1994)

### 2.2 Modelagem de linhas de transmissão e transformadores

Seja o modelo  $\pi$  equivalente de uma Linha de Transmissão (LT) visto na Figura 4, as Equações 1 e 2 são as correntes saindo das barras  $k$  e  $m$  (CASTRO, 2006). A linha apresenta uma impedância série  $Z_{km}$ , que resulta na admitância  $Y_{km}$ . Existe também uma susceptância  $B_{km}^{sh}$ , denominada susceptância *shunt*, que é dividida em duas partes.

$$\dot{I}_{km} = (\dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh})\dot{V}_k - \dot{Y}_{km}\dot{V}_m \quad (1)$$

$$\dot{I}_{mk} = -\dot{Y}_{km}\dot{V}_k + (\dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh})\dot{V}_m \quad (2)$$

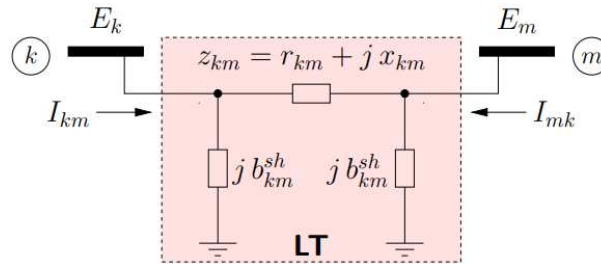
Além disso, seja o modelo de transformador em fase na LT mostrada na Figura 5, pode-se extrair as Equações 3 e 4, onde  $a_{km}$  é a relação de transformação e varia de acordo com a

derivação do transformador. Caso o ramo não seja de transformação,  $a_{km}$  é igual a 1.

$$\dot{I}_{km} = (a_{km}^2 \dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh}) \dot{V}_k + (-a_{km} \dot{Y}_{km}) \dot{V}_m \quad (3)$$

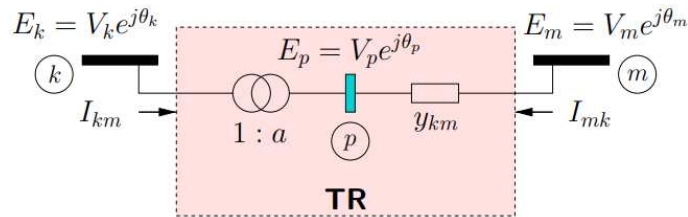
$$\dot{I}_{mk} = (-a_{km} \dot{Y}_{km}) \dot{V}_k + (\dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh}) \dot{V}_m \quad (4)$$

Figura 4 – Modelo  $\pi$  de uma LT



Fonte: Castro (2006).

Figura 5 – Transformador em fase



Fonte: Castro (2006).

Ao interpretar o sistema das Equações 3 e 4 como matriz, encontra-se a Equação 5.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{km} \\ \dot{I}_{mk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{km}^2 \dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh} & -a_{km} \dot{Y}_{km} \\ -a_{km} \dot{Y}_{km} & \dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_k \\ \dot{V}_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

Desse modo, pode-se constatar os efeitos das derivações dos transformadores do sistema na matriz de admitâncias, como observa-se nas Equações 6 a 8. As admitâncias  $\dot{Y}_{bus}^{kk}$  e  $\dot{Y}_{bus}^{mm}$ , referentes à diagonal principal, possuem termos iniciais  $\dot{Y}_{kk0}$  e  $\dot{Y}_{mm0}$ , correspondentes à soma das admitâncias de outras linhas conectadas às barras  $k$  e  $m$  antes de  $km$ .

$$\dot{Y}_{bus}^{kk} = \dot{Y}_{kk0} + a_{km}^2 (\dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh}) \quad (6)$$

$$\dot{Y}_{bus}^{km} = \dot{Y}_{bus}^{mk} = -a_{km} \dot{Y}_{km} \quad (7)$$

$$\dot{Y}_{bus}^{mm} = \dot{Y}_{mm0} + (\dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh}) \quad (8)$$

### 2.3 Equações de balanço de potência

Considerando um SEP de  $N_B$  barras, a corrente que entra em uma barra é representada pelas Equações 9 e 10 (GRAINGER; STEVENSON, 1994). Igualando as duas expressões, resulta-se a Equação 11.

$$\dot{I}_k = \sum_{m=1}^{N_B} \dot{Y}_{km} \dot{V}_m \quad (9)$$

$$\dot{I}_k = \frac{P_k - jQ_k}{\dot{V}_k^*} \quad (10)$$

$$P_k - jQ_k = \dot{V}_k^* \sum_{m=1}^{N_B} \dot{Y}_{km} \dot{V}_m \quad (11)$$

As Equações 12 e 13 se referem, respectivamente, à admitância da linha  $km$ , com a condutância  $G$  e a susceptância  $B$  representadas, e à tensão na barra  $k$ .

$$\dot{Y}_{km} = G_{km} + jB_{km} \quad (12)$$

$$\dot{V}_k = V_k \angle \theta_k = V_k (\cos \theta_k + j \sen \theta_k) \quad (13)$$

Substituindo 12 e 13 em 11, as Equações 14 e 15 representam, respectivamente, as potências ativa e reativa na barra  $k$ .

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^{N_B} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sen \theta_{km}) \quad (14)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^{N_B} V_m (G_{km} \sen \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (15)$$

### 2.4 Equações de fluxo de potência

Como visto na Seção 2.2, a corrente que sai de uma barra  $k$  para uma barra  $m$  é definida pela Equação 1. Por outro lado, tal corrente também pode ser expressa como na Equação 16 (GRAINGER; STEVENSON, 1994). Ao igualar as duas expressões, resulta-se a Equação 17.

$$\dot{I}_{km} = \frac{P_{km} - jQ_{km}}{\dot{V}_k^*} \quad (16)$$

$$\frac{P_{km} - jQ_{km}}{\dot{V}_k^*} = (\dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh}) \dot{V}_k - \dot{Y}_{km} \dot{V}_m \quad (17)$$

Substituindo a Equação 13 na Equação 17, obtém-se a Equação 18.

$$P_{km} - jQ_{km} = (\dot{Y}_{km} + jB_{km}^{sh}) V_k - \dot{Y}_{km} V_k V_m (\sen \theta_{km} - \cos \theta_{km}) \quad (18)$$

Logo, ao inserir a admitância da Equação 12 na Equação 18, a potência que flui de uma barra  $k$  para uma barra  $m$  é definida pelas Equações 19 e 20.

$$P_{km} = G_{km}V_k^2 - V_kV_m(G_{km}\cos\theta_{km} + B_{km}\sin\theta_{km}) \quad (19)$$

$$Q_{km} = -(B_{km} + B_{km}^{sh})V_k^2 - V_kV_m(G_{km}\sin\theta_{km} - B_{km}\cos\theta_{km}) \quad (20)$$

## 2.5 Métodos de fluxo de potência

O modelo de fluxo de potência de um SEP é construído usando dados relevantes de carga e geração. As saídas do modelo de fluxo de potência incluem tensões em diferentes barramentos, fluxos de linha na rede e perdas no sistema. Essas saídas são obtidas por meio das equações de balanço de potência nas barras, observadas nas Equações 14 e 15. Como essas equações são não-lineares, métodos iterativos como os de Newton-Raphson, de Gauss-Seidel, bem como os métodos de desacoplamento rápido, como os métodos XB e BX, são comumente usados para resolver esse problema. Na técnica de fluxo de potência CC, o problema é simplificado como um problema não-iterativo (WOOD; WOLLENBERG, 1996).

### 2.5.1 Método de Gauss-Seidel

Uma solução para o fluxo de potência é o método de Gauss-Seidel. Apesar de ser uma técnica relativamente simples, esta abordagem apresenta uma taxa de convergência lenta e nem tão garantida, o que demanda um grande número de iterações. Além disso, a escolha da barra de referência também influencia na convergência do algoritmo. Assim, esta metodologia é adequada somente para sistemas com poucas barras (WOOD; WOLLENBERG, 1996).

Durante todas as iterações, a barra de referência apresenta módulo e ângulo de tensão fixos. Assim, deve-se estabelecer os critérios iniciais para as demais  $N_B$  barras, cujas tensões serão calculadas pela Equação 21.

$$\dot{V}_i = \frac{1}{\dot{Y}_{ii}} \left( \dot{I}_i + \sum_{k=1}^{N_B} \dot{Y}_{ik}\dot{V}_k \right) = \frac{1}{\dot{Y}_{ii}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{\dot{V}_k^*} + \sum_{k=1}^{N_B} \dot{Y}_{ik}\dot{V}_k \right), \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (21)$$

O procedimento deve continuar até que o critério de parada seja atendido. Para tanto, o módulo da diferença entre os valores calculados na interação  $v + 1$  mais recente e na interação anterior  $v$  devem ser menores ou iguais a uma tolerância  $\varepsilon$  especificada, como na Equação 22.

$$|V_i^{v+1} - V_i^v| \leq \varepsilon, \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (22)$$

### 2.5.2 Método de Newton-Raphson

Dentre os métodos iterativos de fluxo de potência existentes na literatura, o mais utilizado é o de Newton-Raphson. Sua grande viabilidade em sistemas de diversos tamanhos é justificada pela baixa computação em comparação com outras abordagens e pela grande capacidade de convergência. Na abordagem NR, o uso de condições de partida adequadas reduz drasticamente o tempo de cálculo e garante uma convergência rápida. Ademais, as iterações não são afetadas pela escolha da barra de referência (WOOD; WOLLENBERG, 1996).

O método de Newton-Raphson começa com estimativas iniciais de todas as variáveis desconhecidas, ou seja, o módulo e ângulo da tensão nas barras PQ e os ângulos de tensão nas barras PV. Em seguida, uma série de Taylor é escrita, com os termos de ordem superior ignorados, para cada uma das equações de balanço de potência vistas nas Equações 14 e 15. O resultado é um sistema linear de equações que pode ser expresso como na Equação 23. A partir desta expressão, para um número  $\nu$  de iterações, são calculados os incrementos  $\Delta\theta$  e  $\Delta V$  para os ângulos e módulos de tensão desconhecidos.

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta^\nu \\ \Delta V^\nu \end{bmatrix} = (J^\nu)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^\nu \\ \Delta Q^\nu \end{bmatrix} \quad (23)$$

Os termos  $\Delta P$  e  $\Delta Q$  são as diferenças entre os valores especificados e calculados. Estes termos são chamados de potências residuais e são dados pelas Equações 24 e 25. As iterações deverão continuar até que os valores absolutos de todas as  $k$  potências residuais sejam menores que uma tolerância  $\epsilon$  especificada. Este é o critério de parada do algoritmo.

$$\Delta P_k^\nu = P_k - P_k^\nu \quad (24)$$

$$\Delta Q_k^\nu = Q_k - Q_k^\nu \quad (25)$$

$J$  é a Matriz Jacobiana, dada pela Equação 26. A Jacobiana é montada a partir das derivadas parciais da potência ativa nas barras PV e PQ e da potência reativa nas barras PQ com respeito aos ângulos de tensão nas barras PV e PQ e os módulos de tensão nas barras PQ.

$$J^\nu = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^\nu \quad (26)$$

Assim, a partir das potências residuais e da Jacobiana, é possível calcular os valores de  $\Delta\theta_k^\nu$  e  $\Delta V_k^\nu$  para a iteração  $\nu$  atual, como observa-se na Equação 27.  $H$ ,  $N$ ,  $M$  e  $L$  são os

acoplamentos da Jacobiana, iguais às derivadas parciais da matriz.

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^v \\ \Delta Q^v \end{bmatrix} \quad (27)$$

Com isso, os valores de fase e módulo das tensões na iteração seguinte serão dados pelas Equações 28 e 29.

$$\theta_k^{v+1} = \theta_k^v - \Delta\theta_k^v \quad (28)$$

$$V_k^{v+1} = V_k^v - \Delta V_k^v \quad (29)$$

### 2.5.3 Métodos desacoplados XB e BX

Os métodos desacoplados rápidos também são bastante utilizados. A vantagem dessas metodologias é o uso de matrizes constantes, embora possam ocorrer dificuldades na convergência do sistema quando a razão resistência/reatância é alta (MOURA; MOURA, 2012).

Utilizam-se as expressões da Equação 30 no fluxo de potência desacoplado rápido.  $B'$  e  $B''$  são matrizes formadas a partir das susceptâncias do sistema. Por não dependerem de nenhuma variável de estado, ambas são constantes ao longo de todo o processo iterativo.

$$\begin{cases} \frac{\Delta P}{V} = B' \Delta\theta \\ \frac{\Delta Q}{V} = B'' \Delta V \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \Delta\theta = (B')^{-1} \frac{\Delta P}{V} \\ \Delta V = (B'')^{-1} \frac{\Delta Q}{V} \end{cases} \quad (30)$$

Segundo Stott (1974), o uso das expressões das Equações 31 e 32 melhora a convergência do algoritmo. Na Equação 31, são omitidos elementos predominantemente relacionados ao fluxo de potência reativa, como susceptâncias *shunt*, por exemplo. Ademais, na Equação 32, omitem-se elementos predominantemente relacionados ao fluxo de potência ativa, tais como os transformadores. Esta versão do método desacoplado rápido é chamada de método XB.

$$\begin{cases} B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{1}{x_{km}} \\ B'_{km} = -\frac{1}{x_{km}} \\ B'_{mk} = -\frac{1}{x_{km}} \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = -b_{kk} \\ B''_{km} = -b_{km} \\ B''_{mk} = -b_{km} \end{cases} \quad (32)$$



Por outro lado, segundo Amerongen (1989), as resistências dos ramos devem ser desprezadas na matriz  $B''$  em vez da matriz  $B'$ . Além disso, não se deve omitir os elementos *shunt* na matriz  $B''$ . Esta versão é chamada de método BX e é representada pelas expressões das Equações 33 e 34. Em relação a XB, a versão BX é vantajosa quando a razão resistência/reatância é alta, embora demande um número levemente maior de iterações.

$$\begin{cases} B'_{kk} = -\sum_{m \in \Omega_k} b_{km} \\ B'_{km} = b_{km} \\ B'_{mk} = b_{km} \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} B''_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} \frac{1}{x_{km}} - 2(b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} b_{km}^{sh}) \\ B''_{km} = -\frac{1}{x_{km}} \\ B''_{mk} = -\frac{1}{x_{km}} \end{cases} \quad (34)$$

#### 2.5.4 Fluxo de potência contínuo

O fluxo de potência CC fornece estimativas do fluxo de potência nas linhas de sistemas CA. Tal metodologia considera apenas os fluxos de potência ativa e despreza os fluxos de potência reativa. Embora este método seja não-iterativo e sempre convergente, ele costuma ter resultados menos precisos que as soluções de fluxo de potência CA. Portanto, trata-se de uma abordagem utilizada somente quando são necessárias estimativas rápidas (SEIFI; SEPASIAN, 2011). Desse modo, para simplificar um sistema CA no fluxo de potência CC, assume-se que:

- as resistências e as perdas de potência ativa nas linhas são desprezadas, ou seja,  $R \ll X$ ;
- as diferenças nos ângulos de tensão são pequenas;
- os módulos de tensão nas barras são fixados em 1 pu;
- as derivações nos transformadores são ignoradas.

## 2.6 Índices de desempenho

A relevância de uma contingência, ou seja, da ausência de um ramo, pode ser avaliada por meio de índices de desempenho. A partir dos valores calculados pelos métodos iterativos, pode-se encontrar os índices de desempenho de fluxo de potência ativa e de tensão, dados pelas Equações 35 e 37, respectivamente. Os autores Ejebe e Wollenberg (1979), ambos do IEEE, investigaram diversos mecanismos de ranqueamento de contingências e concluíram que estes

índices apresentam melhor sensibilidade em relação às possíveis violações na rede. Assim, é possível testar as contingências mais severas e encontrar medidas de correção.

Cabe ressaltar que  $PI_V$  funciona apenas quando as potências reativas produzidas nos geradores se encontram dentro dos limites estabelecidos. Quando os geradores produzem mais potência reativa que o permitido, ocorrem desvios nas tensões das barras que não são detectados no fluxo de potência padrão, uma vez que os limites de geração reativa são variáveis especificadas de forma independente. Desse modo, o índice de tensão e geração de potência reativa  $PI_{VQ}$ , observado na Equação 38, reflete tais desvios nos geradores. Ressalta-se que, nas barras PQ e nos geradores dentro da faixa permitida de reativos, utiliza-se  $PI_V$  normalmente.

$$PI_P = \sum_{l=1}^{N_L} \left( \frac{W}{2n} \right) \left( \frac{P_l}{P_l^{\max}} \right)^{2n} \quad (35)$$

- a)  $P_l$  é o fluxo de potência ativa na linha  $l$ ;
- b)  $P_l^{\max}$  é a potência ativa máxima que pode ser atingida, onde  $V_k$  e  $V_m$  são as tensões nas barras após o fluxo de potência e  $X$  é a reatância na LT ou transformador, como na Equação 36;

$$P_l^{\max} = \frac{V_k \cdot V_m}{X} \quad (36)$$

- c)  $N_L$  é o número de linhas do sistema;
- d)  $W$  é um valor não-negativo de peso, o qual geralmente considera-se igual a 1;
- e)  $n$  é um expoente de função de penalidade, o qual também considera-se igual a 1.

$$PI_V = \sum_{i=1}^{N_B} \left( \frac{W}{2n} \right) \left( \frac{|V_i| - |V_i^{\text{esp}}|}{\Delta V_i^{\text{lim}}} \right)^{2n} \quad (37)$$

- a)  $|V_i|$  é o módulo da tensão na barra  $i$  após o fluxo de potência;
- b)  $|V_i^{\text{esp}}|$  é o módulo da tensão especificada na barra;
- c)  $N_B$  é o número de barras do sistema;
- d)  $\Delta V_i^{\text{lim}}$  é o desvio limite de tensão.

$$PI_{VQ} = \sum_{i=1}^{N_B} \left( \frac{W}{2n} \right) \left( \frac{|V_i| - |V_i^{\text{esp}}|}{\Delta V_i^{\text{lim}}} \right)^{2n} + \sum_{i=1}^{N_G} \left( \frac{W}{2n} \right) \left( \frac{Q_i}{Q_i^{\max}} \right)^{2n} \quad (38)$$

- a)  $Q_i$  é a potência reativa produzida no gerador  $i$ ;
- b)  $Q_i^{\max}$  ou  $Q_i^{\min}$  é o limiar de potência reativa que foi violado;
- c)  $N_G$  é o número de geradores do sistema.

### 3 APLICAÇÃO DO MÉTODO NEWTON-RAPHSON

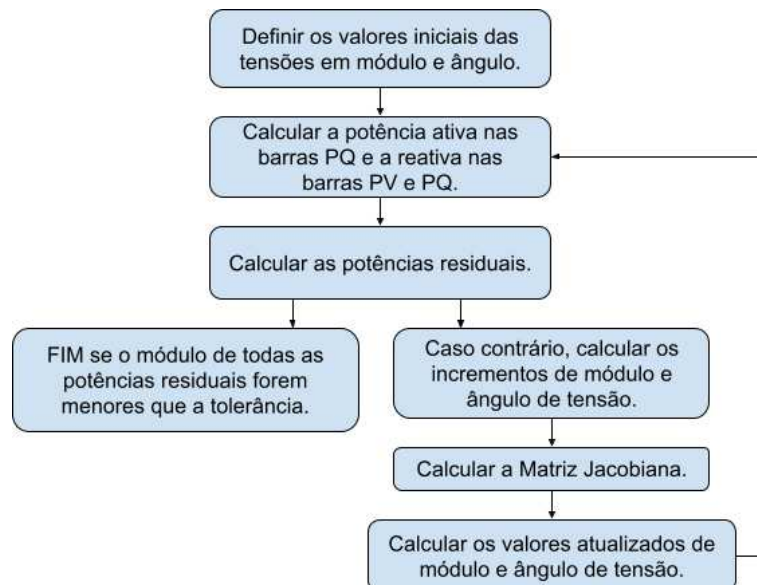
#### 3.1 Procedimentos

A partir da teoria discutida no capítulo anterior, os passos do algoritmo do método de Newton-Raphson para um número  $\nu$  de iterações podem ser definidos como:

- i) definir os valores iniciais das tensões em módulo e ângulo. É comum ajustá-los em 1 pu e 0 graus ou radianos, respectivamente;
- ii) calcular a potência ativa nas barras PQ e a reativa nas barras PV e PQ, a partir dos módulos e ângulos de tensão mais recentes;
- iii) calcular os resíduos  $\Delta P^\nu$  e  $\Delta Q^\nu$  e continuar as iterações até que o módulo de nenhum destes seja maior que uma tolerância  $\varepsilon$ ;
- iv) calcular a Matriz Jacobiana;
- v) a partir da Jacobiana e dos resíduos de potência, calcular os incrementos  $\Delta V^\nu$  e  $\Delta \theta^\nu$  e determinar a nova solução  $V^{\nu+1}$  e  $\theta^{\nu+1}$ ;
- vi) fazer  $\nu = \nu + 1$  e voltar para o passo ii).

Tais passos foram aplicados em rotina computacional em MATLAB, encontrada nos Apêndices B e C. A rotina segue o fluxograma da Figura 7, que apresenta o fluxo de potência pela abordagem NR. O algoritmo realiza o fluxo de potência através dos dados da rede, que devem possuir os dados das barras e ramos do sistema, conforme observa-se no Apêndice A.

Figura 6 – Fluxograma do algoritmo de Newton-Raphson

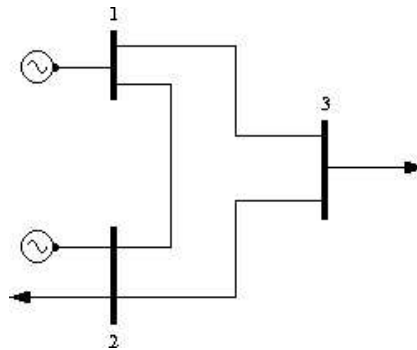


Fonte: Autoral, com base em Grainger e Stevenson (1994).

### 3.2 Resolução analítica para efeitos de validação

Com o objetivo de validar os resultados do algoritmo de fluxo de potência desenvolvido neste trabalho, será utilizado o sistema-teste de três barras do IEEE, observado na Figura 7. Os dados das barras e linhas desta topologia são vistos nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Para resolver o problema, divide-se o sistema em dois subsistemas. Os elementos em vermelho e azul são, respectivamente, os valores iniciais do primeiro subsistema e do segundo subsistema. As potências estão em MW e MVar e todas as tensões serão trabalhadas em pu.

Figura 7 – Sistema-teste IEEE 3 Barras



Fonte: Adaptado de Kaur *et al.* (2015).

Tabela 2 – Dados iniciais de barra

| Barra | Tipo       | $P_g$ | $Q_g$ | $P_l$ | $Q_l$ | $ V $ | $\theta$ |
|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 1     | V $\theta$ | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 1,04  | 0,00°    |
| 2     | PV         | 100,0 | 0,0   | 50,0  | 20,0  | 1,02  | 0,00°    |
| 3     | PQ         | 0,0   | 0,0   | 250,0 | 150,0 | 1,00  | 0,00°    |

Fonte: Adaptado de Kaur *et al.* (2015).

Tabela 3 – Dados de linha

| Linha | R    | X    | G       | B         | $B^{sh}$ |
|-------|------|------|---------|-----------|----------|
| 1-2   | 0,04 | 0,16 | 1,47059 | -5,88235  | 0,03     |
| 1-3   | 0,02 | 0,08 | 2,94118 | -11,76471 | 0,14     |
| 2-3   | 0,03 | 0,1  | 2,75229 | -9,17431  | 0,08     |

Fonte: Adaptado de Kaur *et al.* (2015).

A partir dos dados da Tabela 3, é possível calcular a matriz condutância do sistema:

$$G = \begin{bmatrix} g_{12} + g_{13} & -g_{12} & -g_{13} \\ -g_{12} & g_{12} + g_{23} & -g_{23} \\ -g_{13} & -g_{23} & g_{13} + g_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,41177 & -1,47059 & -2,94118 \\ -1,47059 & 4,22288 & -2,75229 \\ -2,94118 & -2,75229 & 5,69347 \end{bmatrix}$$

Além disso, pode-se determinar a matriz susceptância. Cabe ressaltar o acréscimo da susceptância *shunt* aos elementos da diagonal principal:

$$B_{11} = b_{12} + b_{13} + \frac{b_{12}^{sh} + b_{13}^{sh}}{2} = -17,56206$$

$$B_{22} = b_{12} + b_{23} + \frac{b_{12}^{sh} + b_{23}^{sh}}{2} = -15,00166$$

$$B_{33} = b_{13} + b_{23} + \frac{b_{13}^{sh} + b_{23}^{sh}}{2} = -20,82902$$

Assim, a matriz susceptância será dada por

$$B = \begin{bmatrix} -17,56206 & 5,88235 & 11,76471 \\ 5,88235 & -15,00166 & 9,17431 \\ 11,76471 & 9,17431 & -20,82902 \end{bmatrix}$$

Para realizar as iterações, deve-se calcular as equações de potência ativa nas barras PV e PQ e de potência reativa nas barras PQ, a partir das expressões mostradas nas Equações 14 e 15 do capítulo anterior. Para o primeiro subsistema, as potências são  $P_2$ ,  $P_3$  e  $Q_3$ .

A potência ativa na Barra 2 será, portanto,

$$P_2 = p_{21} + p_{22} + p_{23} \quad (39)$$

Onde:

$$\begin{aligned} p_{21} &= V_2 V_1 (G_{21} \cos \theta_{21} + B_{21} \sin \theta_{21}) = 1,02 \cdot 1,04 (-1,47059 \cos \theta_{21} + 5,88235 \sin \theta_{21}) \\ &= -1,56 \cos \theta_{21} + 6,24 \sin \theta_{21} \end{aligned}$$

$$p_{22} = V_2^2 G_{22} = 1,02^2 \cdot 4,22288 = 4,39348$$

$$\begin{aligned} p_{23} &= V_2 V_3 (G_{23} \cos \theta_{23} + B_{23} \sin \theta_{23}) = 1,02 \cdot V_3 (-2,75229 \cos \theta_{23} + 9,17431 \sin \theta_{23}) \\ &= V_3 (-2,80734 \cos \theta_{23} + 9,3578 \sin \theta_{23}) \end{aligned}$$

Ademais, a potência ativa na Barra 3 será dada por

$$P_3 = p_{31} + p_{32} + p_{33} \quad (40)$$

Onde:

$$\begin{aligned} p_{31} &= V_3 V_1 (G_{31} \cos \theta_{31} + B_{31} \operatorname{sen} \theta_{31}) = V_3 \cdot 1,04 (-2,94118 \cos \theta_{31} + 11,76471 \operatorname{sen} \theta_{31}) \\ &= V_3 (-3,05883 \cos \theta_{31} + 12,2353 \operatorname{sen} \theta_{31}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{32} &= V_3 V_2 (G_{32} \cos \theta_{32} + B_{32} \operatorname{sen} \theta_{32}) \\ &= V_3 \cdot 1,02 (-2,75229 \cos \theta_{32} + 9,17431 \operatorname{sen} \theta_{32}) \\ &= V_3 (-2,80734 \cos \theta_{32} + 9,3578 \operatorname{sen} \theta_{32}) \end{aligned}$$

$$p_{33} = V_3^2 G_{33} = V_3^2 \cdot 5,69347$$

Por fim, a potência reativa na Barra 3 será dada por

$$Q_3 = q_{31} + q_{32} + q_{33} \quad (41)$$

Onde:

$$\begin{aligned} q_{31} &= V_3 V_1 (G_{31} \operatorname{sen} \theta_{31} - B_{31} \cos \theta_{31}) \\ &= V_3 \cdot 1,04 (-2,94118 \operatorname{sen} \theta_{31} - 11,76471 \cos \theta_{31}) \\ &= V_3 (-3,05883 \operatorname{sen} \theta_{31} - 12,2353 \cos \theta_{31}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{32} &= V_3 V_2 (G_{32} \operatorname{sen} \theta_{32} - B_{32} \cos \theta_{32}) \\ &= V_3 \cdot 1,02 (-2,75229 \operatorname{sen} \theta_{32} - 9,17431 \cos \theta_{32}) \\ &= V_3 (-2,80734 \operatorname{sen} \theta_{32} - 9,3578 \cos \theta_{32}) \end{aligned}$$

$$q_{33} = -V_3^2 B_{33} = V_3^2 \cdot 20,82902$$

### 3.2.1 Iteração 1

Primeiramente, deve-se substituir nas Equações 39, 40 e 41 os valores iniciais definidos na Tabela 2.

Barra 2, potência ativa:

$$p_{21} = -1,56 \cos(0 - 0) + 6,24 \operatorname{sen}(0 - 0) = -1,56$$

$$p_{22} = 4,39348$$

$$p_{23} = -2,80734 \cos(0 - 0) + 9,3578 \operatorname{sen}(0 - 0) = -2,80734$$

$$P_2 = -1,56 + 4,39348 - 2,80734 = 0,02614$$

Barra 3, potência ativa:

$$p_{31} = -3,05883 \cos(0 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(0 - 0) = -3,05883$$

$$p_{32} = -2,80734 \cos(0 - 0) + 9,3578 \sin(0 - 0) = -2,80734$$

$$p_{33} = 5,69347$$

$$P_3 = -3,05883 - 2,80734 + 5,69347 = -0,1727$$

Barra 3, potência reativa:

$$q_{31} = -3,05883 \sin(0 - 0) - 12,2353 \cos(0 - 0) = -12,2353$$

$$q_{32} = -2,80734 \sin(0 - 0) - 9,3578 \cos(0 - 0) = -9,3578$$

$$q_{33} = 20,82902$$

$$Q_3 = -12,2353 - 9,3578 + 20,82902 = -0,76408$$

Em seguida, deve-se calcular os valores líquidos de  $P_2$ ,  $P_3$  e  $Q_3$ . Considerando uma base de 100 MVA, tais valores serão dados, em pu, por

$$P_k = P_g - P_l$$

$$P_2 = 1 - 0,5 = 0,5$$

$$P_3 = 0 - 2,5 = -2,5$$

$$Q_3 = 0 - 1,5 = -1,5$$

Assim, os resíduos de potência serão iguais a

$$\Delta P_2 = 0,5 - 0,02614 = 0,47386$$

$$\Delta P_3 = -2,5 - (-0,1727) = -2,3273$$

$$\Delta Q_3 = -1,5 - (-0,76408) = -0,73592$$

Para uma tolerância  $\varepsilon = 0,001$ , todos os valores absolutos dos resíduos estão fora da faixa adequada. Logo, os procedimentos devem continuar e será necessária mais uma iteração.

Desse modo, deve-se calcular a Jacobiana do sistema. Aplicando a Equação 26 do capítulo anterior, a matriz terá o seguinte formato:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Para encontrar os elementos da Jacobiana, deve-se derivar as Equações 39, 40 e 41 com respeito a  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  e  $V_3$ . Para tanto, a derivada da soma é igual à soma das derivadas parciais com respeito à mesma variável, como será visto posteriormente.

Linha 1, Coluna 1:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} = \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_2}$$

$$\frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_2} = 1,56 \sin \theta_{21} + 6,24 \cos \theta_{21} = 1,56 \sin(0 - 0) + 6,24 \cos(0 - 0) = 6,24$$

$$\frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_2} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_2} &= 1,02 \cdot V_3 (2,75229 \sin \theta_{23} + 9,17431 \cos \theta_{23}) \\ &= 2,80734 \sin(0 - 0) + 9,3578 \cos(0 - 0) = 9,3578 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} = 6,24 + 0 + 9,3578 = 15,5978$$

Linha 1, Coluna 2:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} = \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_3}$$

$$\frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_3} = \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_3} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_3} &= 1,02 \cdot V_3 (-2,75229 \sin \theta_{23} - 9,17431 \cos \theta_{23}) \\ &= -2,80734 \sin(0 - 0) - 9,3578 \cos(0 - 0) = -9,3578 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} = -9,3578$$

Linha 1, Coluna 3:

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3} = \frac{\partial p_{21}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{22}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{23}}{\partial V_3}$$

$$\frac{\partial p_{21}}{\partial V_3} = \frac{\partial p_{22}}{\partial V_3} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{23}}{\partial V_3} &= 1,02 \cdot (-2,75229 \cos \theta_{23} + 9,17431 \sin \theta_{23}) \\ &= -2,80734 \cos(0 - 0) + 9,3578 \sin(0 - 0) = -2,80734 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3} = -2,80734$$

Linha 2, Coluna 1:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} = \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2}$$



$$\begin{aligned}\frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2} = 0 \\ \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_2} &= V_3(-2,80734 \operatorname{sen} \theta_{32} - 9,3578 \cos \theta_{32}) \\ &= -2,80734 \operatorname{sen}(0 - 0) - 9,3578 \cos(0 - 0) = -9,3578 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} &= -9,3578\end{aligned}$$

Linha 2, Coluna 2:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} &= \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_3} &= V_3(3,05883 \operatorname{sen} \theta_{31} + 12,2353 \cos \theta_{31}) \\ &= 3,05883 \operatorname{sen}(0 - 0) + 12,2353 \cos(0 - 0) = 12,2353 \\ \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_3} &= V_3(2,80734 \operatorname{sen} \theta_{32} + 9,3578 \cos \theta_{32}) \\ &= 2,80734 \operatorname{sen}(0 - 0) + 9,3578 \cos(0 - 0) = 9,3578 \\ \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_3} &= 0 \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} &= 12,2353 + 9,3578 = 21,5931\end{aligned}$$

Linha 2, Coluna 3:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_3}{\partial V_3} &= \frac{\partial p_{31}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{32}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{33}}{\partial V_3} \\ \frac{\partial p_{31}}{\partial V_3} &= (-3,05883 \cos \theta_{31} + 12,2353 \operatorname{sen} \theta_{31}) \\ &= -3,05883 \cos(0 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(0 - 0) = -3,05883 \\ \frac{\partial p_{32}}{\partial V_3} &= (-2,80734 \cos \theta_{32} + 9,3578 \operatorname{sen} \theta_{32}) \\ &= -2,80734 \cos(0 - 0) + 9,3578 \operatorname{sen}(0 - 0) = -2,80734 \\ \frac{\partial p_{33}}{\partial V_3} &= 2V_3 \cdot 5,69347 = 11,38694 \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_3} &= -3,05883 - 2,80734 + 11,38694 = 5,52077\end{aligned}$$

Linha 3, Coluna 1:

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_2} = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_2} &= V_3 (-2,80734 \operatorname{sen} \theta_{32} - 9,3578 \cos \theta_{32}) \\ &= 2,80734 \cos(0 - 0) - 9,3578 \operatorname{sen}(0 - 0) = 2,80734\end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} = 2,80734$$

Linha 3, Coluna 2:

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} = \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_3}$$

$$\frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_3} = V_3 (-3,05883 \cos \theta_{31} + 12,2353 \operatorname{sen} \theta_{31})$$

$$= V_3 (-3,05883 \cos(0 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(0 - 0)) = -3,05883$$

$$\frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_3} = V_3 (-2,80734 \cos \theta_{32} + 9,3578 \operatorname{sen} \theta_{32})$$

$$= V_3 (-2,80734 \cos(0 - 0) + 9,3578 \operatorname{sen}(0 - 0)) = -2,80734$$

$$\frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_3} = 0$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} = -3,05883 - 2,80734 = -5,86617$$

Linha 3, Coluna 3:

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = \frac{\partial q_{31}}{\partial V_3} + \frac{\partial q_{32}}{\partial V_3} + \frac{\partial q_{33}}{\partial V_3}$$

$$\frac{\partial q_{31}}{\partial V_3} = -3,05883 \operatorname{sen} \theta_{31} - 12,2353 \cos \theta_{31}$$

$$= -3,05883 \operatorname{sen}(0 - 0) - 12,2353 \cos(0 - 0) = -12,2353$$

$$\frac{\partial q_{32}}{\partial V_3} = -2,80734 \operatorname{sen} \theta_{32} - 9,3578 \cos \theta_{32}$$

$$= -2,80734 \operatorname{sen}(0 - 0) - 9,3578 \cos(0 - 0) = -9,3578$$

$$\frac{\partial q_{33}}{\partial V_3} = 2 \cdot V_3 \cdot 20,82902 = 41,55801$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = -12,2353 - 9,3578 + 41,55801 = 20,06491$$

A partir desses resultados, a Jacobiana será, portanto,

$$J = \begin{bmatrix} 15,5978 & -9,3578 & -2,80734 \\ -9,3578 & 21,5931 & 5,52077 \\ 2,80734 & -5,86617 & 20,06491 \end{bmatrix}$$

Logo, para encontrar as variações dos ângulos e tensão, deve-se substituir a Jacobiana e a matriz de potências residuais na Equação 23:

$$\Delta \theta V = J^{-1} \Delta P Q$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0866 & 0,03798 & 0,00167 \\ 0,0378 & 0,05967 & -0,01113 \\ -0,00106 & 0,01213 & 0,04635 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,47386 \\ -2,3273 \\ -0,73592 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,04858 \\ -0,11277 \\ -0,06284 \end{bmatrix}$$

Sendo assim, ao somar os parâmetros iniciais  $\theta_2, \theta_3, V_3$  com as variações  $\Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta V_3$ , obtém-se os valores atualizados dos ângulos em radianos e da tensão em pu, na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores atualizados

|            | Início  | Iteração 1 |
|------------|---------|------------|
| $\theta_2$ | 0,00000 | -0,04858   |
| $\theta_3$ | 0,00000 | -0,11277   |
| $V_3$      | 1,00000 | 0,93716    |

Fonte: Autoral.

### 3.2.2 Iteração 2

Com os valores atualizados da Tabela 4, deve-se calcular novamente as potências do primeiro subsistema.

Barra 2, potência ativa:

$$p_{21} = -1,56 \cos(-0,04858 - 0) + 6,24 \operatorname{sen}(-0,04858 - 0) = -1,86118$$

$$p_{22} = 4,39348$$

$$\begin{aligned} p_{23} &= 0,93716 \cdot (-2,80734 \cos(-0,04858 + 0,11277) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,04858 + 0,11277)) \\ &= -2,06296 \end{aligned}$$

$$P_2 = -1,86118 + 4,39348 - 2,06296 = 0,46934$$

Barra 3, potência ativa:

$$\begin{aligned} p_{31} &= 0,93716 \cdot (-3,05883 \cos(-0,11277 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(-0,11277 - 0)) \\ &= -4,13874 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{32} &= 0,93716 \cdot (-2,80734 \cos(-0,11277 + 0,04858) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858)) \\ &= -3,18805 \end{aligned}$$

$$p_{33} = 0,93716^2 \cdot 5,69347 = 5,0004$$

$$P_3 = -4,13874 - 3,18805 + 5,0004 = -2,32639$$

Barra 3, potência reativa:

$$\begin{aligned} q_{31} &= 0,93716 \cdot (-3,05883 \operatorname{sen}(-0,11277 - 0) - 12,2353 \operatorname{cos}(-0,11277 - 0)) \\ &= -11,07102 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{32} &= 0,93716 \cdot (-2,80734 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858) - 9,3578 \operatorname{cos}(-0,11277 + 0,04858)) \\ &= -8,58293 \end{aligned}$$

$$q_{33} = 0,93716^2 \cdot 20,82902 = 18,29348$$

$$Q_3 = -11,07102 - 8,58293 + 18,29348 = -1,36047$$

Novamente, a partir dos valores líquidos de  $P_2$ ,  $P_3$  e  $Q_3$  calculados na primeira iteração, as potências residuais serão atualizadas para

$$\Delta P_2 = 0,5 - 0,46934 = 0,03066$$

$$\Delta P_3 = -2,5 - (-2,32639) = -0,17361$$

$$\Delta Q_3 = -1,5 - (-1,36047) = -0,13953$$

Como o módulo de nenhum resíduo é menor que a tolerância, os procedimentos continuam e será necessária mais uma iteração.

Assim, a partir dos novos valores, deve-se calcular a Jacobiana seguindo o mesmo formato da Equação 42. Os elementos da nova matriz serão calculados a seguir.

Linha 1, Coluna 1:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} = \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_2}$$

$$\frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_2} = 1,56 \operatorname{sen}(-0,04858 - 0) + 6,24 \operatorname{cos}(-0,04858 - 0) = 6,15688$$

$$\frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_2} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_2} &= 0,93716 \cdot (2,80734 \operatorname{sen}(-0,04858 + 0,11277) + 9,3578 \operatorname{cos}(-0,04858 + 0,11277)) \\ &= 8,92046 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} = 6,15688 + 0 + 8,92046 = 15,07734$$

Linha 1, Coluna 2:

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} = \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_3}$$

$$\frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_3} = \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_3} = 0$$

$$\frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_3} = 0,93716 \cdot (-2,80734 \operatorname{sen}(-0,04858 + 0,11277) - 9,3578 \cos(-0,04858 + 0,11277))$$

$$= -8,92046$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} = -8,92046$$

Linha 1, Coluna 3:

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3} = \frac{\partial p_{21}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{22}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{23}}{\partial V_3}$$

$$\frac{\partial p_{21}}{\partial V_3} = \frac{\partial p_{22}}{\partial V_3} = 0$$

$$\frac{\partial p_{23}}{\partial V_3} = -2,80734 \cos(-0,04858 + 0,11277) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,04858 + 0,11277)$$

$$= -2,20129$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial V_3} = -2,20129$$

Linha 2, Coluna 1:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} = \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2}$$

$$\frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_2} = \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2} = 0$$

$$\frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_2} = 0,93716 \cdot (-2,80734 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858) - 9,3578 \cos(-0,11277 + 0,04858))$$

$$= -8,58293$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} = -8,58293$$

Linha 2, Coluna 2:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} = \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_3}$$

$$\frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_3} = 0,93716 \cdot (3,05883 \operatorname{sen}(-0,11277 - 0) + 12,2353 \cos(-0,11277 - 0))$$

$$= 11,07102$$

$$\frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_3} = 0,93716 \cdot (2,80734 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858) + 9,3578 \cos(-0,11277 + 0,04858))$$

$$= 8,58293$$

$$\frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2} = 0$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} = 11,07102 + 8,58293 = 19,65395$$

Linha 2, Coluna 3:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_3}{\partial V_3} &= \frac{\partial p_{31}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{32}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{33}}{\partial V_3} \\ \frac{\partial p_{31}}{\partial V_3} &= -3,05883 \cos(-0,11277 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(-0,11277 - 0) = -4,41625 \\ \frac{\partial p_{32}}{\partial V_3} &= -2,80734 \cos(-0,11277 + 0,04858) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858) \\ &= -3,40182 \\ \frac{\partial p_{33}}{\partial V_3} &= 2 \cdot 0,93716 \cdot 5,69347 = 10,67138 \\ \frac{\partial P_3}{\partial V_3} &= -4,41625 - 3,40182 + 10,67138 = 2,85331\end{aligned}$$

Linha 3, Coluna 1:

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_2} = 0 \\ \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_2} &= 0,93716 \cdot (2,80734 \cos(-0,11277 + 0,04858) - 9,3578 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858)) \\ &= 3,18805 \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} &= 3,18805\end{aligned}$$

Linha 3, Coluna 2:

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} &= \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_3} &= 0,93716(-3,05883 \cos(-0,11277 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(-0,11277 - 0)) \\ &= -4,13874 \\ \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_3} &= 0,93716(-2,80734 \cos(-0,11277 + 0,04858) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858)) \\ &= -3,18805 \\ \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_3} &= 0 \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} &= -4,13874 - 3,18805 = -7,32679\end{aligned}$$

Linha 3, Coluna 3:

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = \frac{\partial q_{31}}{\partial V_3} + \frac{\partial q_{32}}{\partial V_3} + \frac{\partial q_{33}}{\partial V_3}$$

$$\frac{\partial q_{31}}{\partial V_3} = -3,05883 \operatorname{sen}(-0,11277 - 0) - 12,2353 \cos(-0,11277 - 0) = -11,81337$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{32}}{\partial V_3} &= -2,80734 \operatorname{sen}(-0,11277 + 0,04858) - 9,3578 \cos(-0,11277 + 0,04858) \\ &= -9,15845 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial q_{33}}{\partial V_3} = 2 \cdot 0,93716 \cdot 20,82902 = 39,04025$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = -11,81337 - 9,15845 + 39,04025 = 18,06843$$

A nova Jacobiana será, portanto,

$$J = \begin{bmatrix} 15,07734 & -8,92046 & -2,20129 \\ -8,58293 & 19,65395 & 2,85331 \\ 3,18805 & -7,32679 & 18,06843 \end{bmatrix}$$

Logo, seguindo novamente o procedimento da Equação 23, pode-se encontrar as novas variações dos ângulos e da tensão:

$$\begin{bmatrix} 0,08944 & 0,04217 & 0,00424 \\ 0,03905 & 0,06646 & -0,00574 \\ 0,00005 & 0,01951 & 0,05227 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,03066 \\ -0,17361 \\ -0,13953 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,00517 \\ -0,00954 \\ -0,01068 \end{bmatrix}$$

Sendo assim, ao somar os parâmetros iniciais  $\theta_2, \theta_3, V_3$  com as variações  $\Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta V_3$ , obtém-se os valores atualizados dos ângulos em radianos e da tensão em pu, na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores atualizados

|            | Início  | Iteração 1 | Iteração 2 |
|------------|---------|------------|------------|
| $\theta_2$ | 0,00000 | -0,04858   | -0,05375   |
| $\theta_3$ | 0,00000 | -0,11277   | -0,12231   |
| $V_3$      | 1,00000 | 0,93716    | 0,92648    |

Fonte: Autoral.

### 3.2.3 Iteração 3

Com os valores atualizados da Tabela 5, deve-se calcular novamente as potências do primeiro subsistema.

Barra 2, potência ativa:

$$p_{21} = -1,56 \cos(-0,05375 - 0) + 6,24 \operatorname{sen}(-0,05375 - 0) = -1,89299$$

$$p_{22} = 4,39348$$

$$\begin{aligned} p_{23} &= 0,92648 \cdot (-2,80734 \cos(-0,05375 + 0,12231) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,05375 + 0,12231)) \\ &= -2,0009 \end{aligned}$$

$$P_2 = -1,89299 + 4,39348 - 2,0009 = 0,49959$$

Barra 3, potência ativa:

$$\begin{aligned} p_{31} &= 0,92648 \cdot (-3,05883 \cos(-0,12231 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(-0,12231 - 0)) \\ &= -4,1958 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{32} &= 0,92648 \cdot (-2,80734 \cos(-0,12231 + 0,05375) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,12231 + 0,05375)) \\ &= -3,18877 \end{aligned}$$

$$p_{33} = 0,92648^2 \cdot 5,69347 = 4,88708$$

$$P_3 = -4,1958 - 3,18877 + 4,88708 = -2,49749$$

Barra 3, potência reativa:

$$\begin{aligned} q_{31} &= 0,92648 \cdot (-3,05883 \operatorname{sen}(-0,12231 - 0) - 12,2353 \cos(-0,12231 - 0)) \\ &= -10,90532 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{32} &= 0,92648 \cdot (-2,80734 \operatorname{sen}(-0,12231 + 0,05375) - 9,3578 \cos(-0,12231 + 0,05375)) \\ &= -8,47127 \end{aligned}$$

$$q_{33} = 0,92648^2 \cdot 20,82902 = 17,87891$$

$$Q_3 = -10,90532 - 8,47127 + 17,87891 = -1,49768$$

Novamente, a partir dos valores líquidos de  $P_2$ ,  $P_3$  e  $Q_3$  calculados na primeira iteração, as potências residuais serão atualizadas para

$$\Delta P_2 = 0,5 - 0,49959 = 0,00041$$

$$\Delta P_3 = -2,5 - (-2,49749) = -0,00251$$

$$\Delta Q_3 = -1,5 - (-1,49768) = -0,00232$$

Como apenas o módulo de  $\Delta P_2$  é menor que a tolerância, os procedimentos continuam e será necessária mais uma iteração.

Assim, a partir dos novos valores, deve-se calcular a Jacobiana seguindo o mesmo formato da Equação 42. Os elementos da nova matriz serão calculados a seguir.



Linha 1, Coluna 1:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_2} &= 1,56 \operatorname{sen}(-0,05375 - 0) + 6,24 \operatorname{cos}(-0,05375 - 0) = 6,14718 \\ \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_2} &= 0 \\ \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_2} &= 0,92648 \cdot (2,80734 \operatorname{sen}(-0,05375 + 0,12231) + 9,3578 \operatorname{cos}(-0,05375 + 0,12231)) \\ &= 8,82763 \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} &= 6,14718 + 0 + 8,82763 = 14,97481\end{aligned}$$

Linha 1, Coluna 2:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} &= \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial p_{21}}{\partial \theta_3} &= \frac{\partial p_{22}}{\partial \theta_3} = 0 \\ \frac{\partial p_{23}}{\partial \theta_3} &= 0,92648 \cdot (-2,80734 \operatorname{sen}(-0,05375 + 0,12231) - 9,3578 \operatorname{cos}(-0,05375 + 0,12231)) \\ &= -8,82763 \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} &= -8,82763\end{aligned}$$

Linha 1, Coluna 3:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_2}{\partial V_3} &= \frac{\partial p_{21}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{22}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{23}}{\partial V_3} \\ \frac{\partial p_{21}}{\partial V_3} &= \frac{\partial p_{22}}{\partial V_3} = 0 \\ \frac{\partial p_{23}}{\partial V_3} &= -2,80734 \operatorname{cos}(-0,05375 + 0,12231) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,05375 + 0,12231) \\ &= -2,15968 \\ \frac{\partial P_2}{\partial V_3} &= -2,15968\end{aligned}$$

Linha 2, Coluna 1:

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_2} &= \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2} = 0 \\ \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_2} &= 0,92648(-2,80734 \operatorname{sen}(-0,12231 + 0,05375) - 9,3578 \operatorname{cos}(-0,12231 + 0,05375))\end{aligned}$$

$$= -8,47127$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} = -8,47127$$

Linha 2, Coluna 2:

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} = \frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_3}$$

$$\frac{\partial p_{31}}{\partial \theta_3} = 0,92648 \cdot (3,05883 \operatorname{sen}(-0,12231 - 0) + 12,2353 \cos(-0,12231 - 0)) = 10,90532$$

$$\frac{\partial p_{32}}{\partial \theta_3} = 0,92648 \cdot (2,80734 \operatorname{sen}(-0,12231 + 0,05375) + 9,3578 \cos(-0,12231 + 0,05375))$$

$$= 8,47127$$

$$\frac{\partial p_{33}}{\partial \theta_2} = 0$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} = 10,90532 + 8,47127 = 19,37659$$

Linha 2, Coluna 3:

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_3} = \frac{\partial p_{31}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{32}}{\partial V_3} + \frac{\partial p_{33}}{\partial V_3}$$

$$\frac{\partial p_{31}}{\partial V_3} = -3,05883 \cos(-0,12231 - 0) + 12,2353 \operatorname{sen}(-0,12231 - 0) = -4,52875$$

$$\frac{\partial p_{32}}{\partial V_3} = -2,80734 \cos(-0,12231 + 0,05375) + 9,3578 \operatorname{sen}(-0,12231 + 0,05375)$$

$$= -3,44181$$

$$\frac{\partial p_{33}}{\partial V_3} = 2 \cdot 0,92648 \cdot 5,69347 = 10,54977$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial V_3} = -4,52875 - 3,44181 + 10,54977 = 2,57921$$

Linha 3, Coluna 1:

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} = \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_2} + \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_2}$$

$$\frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_2} = \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_2} 0$$

$$\frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_2} = 0,92648 \cdot (2,80734 \cos(-0,12231 + 0,05375) - 9,3578 \operatorname{sen}(-0,12231 + 0,05375))$$

$$= 3,18877$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} = 3,18877$$

Linha 3, Coluna 2:

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} = \frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_3} + \frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_3}$$

$$\frac{\partial q_{31}}{\partial \theta_3} = 0,92648(-3,05883 \cos(-0,12231 - 0) + 12,2353 \sin(-0,12231 - 0)) = -4,1958$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{32}}{\partial \theta_3} &= 0,92648(-2,80734 \cos(-0,12231 + 0,05375) + 9,3578 \sin(-0,12231 + 0,05375)) \\ &= -3,18877 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial q_{33}}{\partial \theta_3} = 0$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} = -4,1958 - 3,18877 = -7,38457$$

Linha 3, Coluna 3:

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = \frac{\partial q_{31}}{\partial V_3} + \frac{\partial q_{32}}{\partial V_3} + \frac{\partial q_{33}}{\partial V_3}$$

$$\frac{\partial q_{31}}{\partial V_3} = -3,05883 \sin(-0,12231 - 0) - 12,2353 \cos(-0,12231 - 0) = -11,7707$$

$$\frac{\partial q_{32}}{\partial V_3} = -2,80734 \sin(-0,12231 + 0,05375) - 9,3578 \cos(-0,12231 + 0,05375) = -9,1435$$

$$\frac{\partial q_{33}}{\partial V_3} = 2 \cdot 0,92648 \cdot 20,82902 = 38,59534$$

$$\frac{\partial Q_3}{\partial V_3} = -11,7707 - 9,1435 + 38,59534 = 17,68114$$

A nova Jacobiana será, portanto,

$$J = \begin{bmatrix} 14,97481 & -8,82763 & -2,15968 \\ -8,47127 & 19,37659 & 2,57921 \\ 3,18877 & -7,38457 & 17,68114 \end{bmatrix}$$

Logo, seguindo novamente o procedimento da Equação 23, pode-se encontrar as novas variações dos ângulos e da tensão:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,08998 & 0,0428 & 0,00475 \\ 0,03931 & 0,06759 & -0,00506 \\ 0,00019 & 0,02051 & 0,05359 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,00041 \\ -0,00251 \\ -0,00232 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,00008 \\ -0,00014 \\ -0,00018 \end{bmatrix}$$

Sendo assim, ao somar os parâmetros iniciais  $\theta_2, \theta_3, V_3$  com as variações  $\Delta \theta_2, \Delta \theta_3, \Delta V_3$ , obtém-se os valores atualizados dos ângulos em radianos e da tensão em pu, na Tabela 6.

### 3.2.4 Iteração 4

Com os valores atualizados da Tabela 6, deve-se calcular novamente as potências do primeiro subsistema.

Tabela 6 – Valores atualizados

|            | Início  | Iteração 1 | Iteração 2 | Iteração 3 |
|------------|---------|------------|------------|------------|
| $\theta_2$ | 0,00000 | -0,04858   | -0,05375   | -0,05383   |
| $\theta_3$ | 0,00000 | -0,11277   | -0,12231   | -0,12245   |
| $V_3$      | 1,00000 | 0,93716    | 0,92648    | 0,9263     |

Fonte: Autoral.

Barra 2, potência ativa:

$$p_{21} = -1,56 \cos(-0,05383 - 0) + 6,24 \sin(-0,05383 - 0) = -1,89348$$

$$p_{22} = 4,39348$$

$$p_{23} = 0,9263 \cdot (-2,80734 \cos(-0,05383 + 0,12245) + 9,3578 \sin(-0,05383 + 0,12245)) \\ = -1,99998$$

$$P_2 = -1,89348 + 4,39348 - 1,99998 = 0,50002$$

Barra 3, potência ativa:

$$p_{31} = 0,9263 \cdot (-3,05883 \cos(-0,12245 - 0) + 12,2353 \sin(-0,12245 - 0)) \\ = -4,19651$$

$$p_{32} = 0,9263 \cdot (-2,80734 \cos(-0,12245 + 0,05383) + 9,3578 \sin(-0,12245 + 0,05383)) \\ = -3,18866$$

$$p_{33} = 0,9263^2 \cdot 5,69347 = 4,88518$$

$$P_3 = -4,19651 - 3,18866 + 4,88518 = -2,49999$$

Barra 3, potência reativa:

$$q_{31} = 0,9263 \cdot (-3,05883 \sin(-0,12245 - 0) - 12,2353 \cos(-0,12245 - 0)) \\ = -10,90261$$

$$q_{32} = 0,9263 \cdot (-2,80734 \sin(-0,12245 + 0,05383) - 9,3578 \cos(-0,12245 + 0,05383)) \\ = -8,46943$$

$$q_{33} = 0,9263^2 \cdot 20,82902 = 17,87196$$

$$Q_3 = -10,90261 - 8,46943 + 17,87196 = -1,50008$$

Novamente, a partir dos valores líquidos de  $P_2$ ,  $P_3$  e  $Q_3$  calculados na primeira iteração, as potências residuais serão atualizadas para

$$\Delta P_2 = 0,5 - 0,50002 = 0,00002$$

$$\Delta P_3 = -2,5 - (-2,49999) = -0,00001$$

$$\Delta Q_3 = -1,5 - (-1,50008) = -0,00008$$

Finalmente, os módulos de todos os resíduos são menores que a tolerância. Logo, encerra-se o algoritmo e os valores finais de  $\theta_2$ ,  $\theta_3$  e  $V_3$  serão aqueles da Tabela 6.

### 3.2.5 Geração de potência

Com as iterações concluídas, pode-se encontrar as incógnitas das potências geradas. Novamente, aplicam-se as equações de balanço de potência. Assim, é necessário calcular as potências  $P_1$ ,  $Q_1$  e  $Q_2$  do segundo subsistema.

Barra 1, potência ativa:

$$p_{11} = V_1^2 \cdot G_{11} = 1,04^2 \cdot 4,41177 = 4,77176$$

$$\begin{aligned} p_{12} &= V_1 V_2 (G_{12} \cos \theta_{12} + B_{12} \operatorname{sen} \theta_{12}) \\ &= 1,04 \cdot 1,02 (-1,47059 \cos(0 + 0,05383) + 5,88235 \operatorname{sen}(0 + 0,05383)) \\ &= -1,22198 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{13} &= V_1 V_3 (G_{13} \cos \theta_{13} + B_{13} \operatorname{sen} \theta_{13}) \\ &= 1,04 \cdot 0,9263 (-2,94118 \cos(0 + 0,12245) + 11,76471 \operatorname{sen}(0 + 0,12245)) \\ &= -1,42781 \end{aligned}$$

$$P_1 = p_{11} + p_{12} + p_{13} = 4,77176 - 1,22198 - 1,42782 = 2,12196$$

Barra 1, potência reativa:

$$q_{11} = -V_1^2 \cdot B_{11} = 1,04^2 \cdot 17,56206 = 18,99512$$

$$\begin{aligned} q_{12} &= V_1 V_2 (G_{12} \operatorname{sen} \theta_{12} - B_{12} \cos \theta_{12}) \\ &= 1,04 \cdot 1,02 (-1,47059 \operatorname{sen}(0 + 0,05383) - 5,88235 \cos(0 + 0,05383)) \\ &= -6,31489 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{13} &= V_1 V_3 (G_{13} \operatorname{sen} \theta_{13} - B_{13} \cos \theta_{13}) \\ &= 1,04 \cdot 0,9263 (-2,94118 \operatorname{sen}(0 + 0,12245) - 11,76471 \cos(0 + 0,12245)) \\ &= -11,59483 \end{aligned}$$

$$Q_1 = q_{11} + q_{12} + q_{13} = 18,99512 - 6,31489 - 11,59483 = 1,0854$$

Barra 2, potência reativa:

$$q_{21} = V_2 V_1 (G_{21} \operatorname{sen} \theta_{21} - B_{21} \operatorname{cos} \theta_{21})$$

$$= 1,02 \cdot 1,04 (-1,47059 \operatorname{sen}(-0,05383 - 0) - 5,88235 \operatorname{cos}(-0,05383 - 0))$$

$$= -6,14702$$

$$q_{22} = -V_2^2 \cdot B_{22} = 1,02^2 \cdot 15,00166 = 15,60773$$

$$q_{23} = V_2 V_3 (G_{23} \operatorname{sen} \theta_{23} - B_{23} \operatorname{cos} \theta_{23})$$

$$= 1,02 \cdot 0,9263 (-2,75229 \operatorname{sen}(-0,05383 + 0,12245) - 9,17431 \operatorname{cos}(-0,05383 + 0,12245))$$

$$= -8,82607$$

$$Q_2 = q_{21} + q_{22} + q_{23} = -6,14702 + 15,60773 - 8,82607 = 0,63464$$

Desse modo, sabendo que a potência existente em uma barra é diferença entre a potência gerada e a potência injetada, pode-se calcular as potências geradas:

$$P_1 = P_{g1} - P_{l1} \Rightarrow P_{g1} = 2,12196 + 0 = 2,12196$$

$$Q_1 = Q_{g1} - Q_{l1} \Rightarrow Q_{g1} = 1,0854 + 0 = 1,0854$$

$$Q_2 = Q_{g2} - Q_{l2} \Rightarrow Q_{g2} = 0,63464 + 0,2 = 0,83464$$

### 3.2.6 Resultados finais

Com todos os valores calculados, pode-se finalmente completar a tabela de dados do sistema em regime permanente, como observa-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados de barra em regime permanente

| Barra | Tipo       | $P_g$ | $Q_g$ | $P_l$ | $Q_l$ | $ V $  | $\theta$ |
|-------|------------|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| 1     | V $\theta$ | 212,2 | 108,5 | 0,0   | 0,0   | 1,04   | 0,00°    |
| 2     | PV         | 100,0 | 83,5  | 50,0  | 20,0  | 1,02   | -3,08°   |
| 3     | PQ         | 0,0   | 0,0   | 250,0 | 150,0 | 0,9263 | -7,02°   |

Fonte: Autoral.

### 3.2.7 Fluxo de potência

A partir a tensão e dos ângulos encontrados, também pode-se calcular o fluxo de potência entre as linhas do sistema, a partir das Equações 19 e 20 do capítulo anterior. Assim, todos os fluxos de potência encontrados estão expostos na Tabela 8.

Barra 1:

$$P_{12} = 1,04^2 \cdot 1,47059 - 1,04 \cdot 1,02 (1,47059 \cos(0 + 0,05383) - 5,88235 \operatorname{sen}(0 + 0,05383)) \\ = 0,36861$$

$$Q_{12} = -1,04^2 \cdot (-5,88235 + 0,5 \cdot 0,03) - 1,04 \cdot 1,02 (1,47059 \operatorname{sen}(0 + 0,05383) + \\ 5,88235 \cos(0 + 0,05383)) = 0,03123$$

$$P_{13} = 1,04^2 \cdot 2,94118 - 1,04 \cdot 0,9263 (2,94118 \cos(0 + 0,12245) - 11,76471 \operatorname{sen}(0 + 0,12245)) \\ = 1,75336$$

$$Q_{13} = -1,04^2 \cdot (-11,76471 + 0,5 \cdot 0,14) - 1,04 \cdot 0,9263 (2,94118 \operatorname{sen}(0 + 0,12245) + \\ 11,76471 \cos(0 + 0,12245)) = 1,05417$$

Barra 2:

$$P_{21} = 1,02^2 \cdot 1,47059 - 1,02 \cdot 1,04 (1,47059 \cos(-0,05383 - 0) - 5,88235 \operatorname{sen}(-0,05383 - 0)) \\ = -0,36349$$

$$Q_{21} = -1,02^2 \cdot (-5,88235 + 0,5 \cdot 0,03) - 1,02 \cdot 1,04 (1,47059 \operatorname{sen}(-0,05383 - 0) + \\ 5,88235 \cos(-0,05383 - 0)) = -0,04263$$

$$P_{23} = 1,02^2 \cdot 2,75229 - 1,02 \cdot 0,9263 (2,75229 \cos(-0,05383 + 0,12245) - \\ 9,17431 \operatorname{sen}(-0,05383 + 0,12245)) = 0,86813$$

$$Q_{23} = -1,02^2 \cdot (-9,17431 + 0,5 \cdot 0,08) - 1,02 \cdot 0,9263 (2,75229 \operatorname{sen}(-0,05383 + 0,12245) + \\ 9,17431 \cos(-0,05383 + 0,12245)) = 0,67727$$

Barra 3:

$$P_{31} = 0,9263^2 \cdot 2,94118 - 0,9263 \cdot 1,04 (2,94118 \cos(-0,12245 - 0) - \\ 11,76471 \operatorname{sen}(-0,12245 - 0)) = -1,67291$$

$$Q_{31} = -0,9263^2 \cdot (-11,76471 + 0,5 \cdot 0,14) - 0,9263 \cdot 1,04 (2,94118 \operatorname{sen}(-0,12245 - 0) + \\ 11,76471 \cos(-0,12245 - 0)) = -0,86813$$

$$P_{32} = 0,9263^2 \cdot 2,75229 - 0,9263 \cdot 1,02 (2,75229 \cos(-0,12245 + 0,05383) - \\ 9,17431 \operatorname{sen}(-0,12245 + 0,05383)) = -0,8271$$

$$Q_{32} = -0,9263^2 \cdot (-9,17431 + 0,5 \cdot 0,08) - 0,9263 \cdot 1,02 (2,75229 \operatorname{sen}(-0,12245 + 0,05383) + \\ 9,17431 \cos(-0,12245 + 0,05383)) = -0,63187$$

Tabela 8 – Fluxo de potência em regime permanente

| Ramo | MW     | MVAr  |
|------|--------|-------|
| 1-2  | 36,9   | 3,1   |
| 1-3  | 175,3  | 105,4 |
| 2-1  | -36,3  | -4,3  |
| 2-3  | 86,4   | 67,7  |
| 3-1  | -167,3 | -86,8 |
| 3-2  | -82,7  | -63,2 |

Fonte: Autoral.

### 3.2.8 Perdas de potência

Na Tabela 9, são vistas as perdas nas linhas do exemplo de 3 barras. A perda de potência em uma linha equivale à soma dos fluxos de potência na linha. Ou seja, ao somar  $P_{km}$  e  $P_{mk}$ , obtém-se a potência perdida entre as barras  $k$  e  $m$ .

Tabela 9 – Perdas de potência em regime permanente

| Linha | MW    | MVAr   |
|-------|-------|--------|
| 1-2   | 0,512 | -1,140 |
| 1-3   | 8,045 | 18,604 |
| 2-3   | 3,640 | 4,540  |

Fonte: Autoral.

### 3.2.9 Solução computacional

Utilizando o algoritmo desenvolvido no mesmo sistema de três barras, executou-se o sistema na rotina de MATLAB, com a base de 100 MVA e a tolerância de  $10^{-3}$ . Os algoritmos podem ser encontrados nos Apêndices B e C e os procedimentos são os mesmos realizados durante este capítulo para os subsistemas 1 e 2. A divisão dos subsistemas sempre é realizada da mesma maneira no algoritmo, independente da quantidade de barras.

Após o cálculo dos ângulos e módulos de tensão nas barras pelo algoritmo de Newton-Raphson, os valores de geração, fluxo e as perdas de potência são calculados pela rotina. Os resultados da rotina para o SEP de exemplo são vistos na Figura 8. De fato, o número de iterações e de todos os valores condizem com as Tabelas 7, 8 e 9. Desse modo, a rotina computacional desenvolvida neste trabalho é satisfatoriamente validada.

Além disso, nas Figuras 9 e 10, são mostrados os resultados do exemplo de 3 barras



a partir de simulação no *software* PowerWorld (OVERBYE, 2023). Mais uma vez, todos os valores condizem aqueles observados nas Tabelas 7, 8 e 9. Portanto, a rotina computacional desenvolvida neste trabalho também é satisfatoriamente validada pelo *software*.

Figura 8 – Resultados do exemplo de 3 barras em MATLAB

```

1 No iteracoes : 4
2
3 1. Geracao de potencia nos geradores :
4 Gerador      MW      MVar
5 | 1      212.1963  108.5398 |
6 | 2      100.0000  83.4644 |
7
8 2. Tensoes nodais em pu:
9 Barra      Modulo      Angulo
10 | 1      1.0400      0.00 |
11 | 2      1.0200      -3.08 |
12 | 3      0.9263      -7.02 |
13
14 3. Fluxo de potencia nas linhas , de K para M:
15 De      Para      MW      MVar
16 | 1      2      36.8605  3.1229 |
17 | 1      3      175.3358  105.4168 |
18 | 2      3      86.3497  67.7271 |
19
20 4. Fluxo de potencia nas linhas , de M para K:
21 De      Para      MW      MVar
22 | 2      1      -36.3497  -4.2627 |
23 | 3      1      -167.2905  -86.8131 |
24 | 3      2      -82.7095  -63.1869 |
25
26 5. Perda de potencia nas linhas :
27 Linha      MW      MVar
28 | 1- 2      0.5108  -1.1398 |
29 | 1- 3      8.0453  18.6037 |
30 | 2- 3      3.6402  4.5403 |

```

Fonte: Autoral.

Figura 9 – Resultados das barras do exemplo de 3 barras em PowerWorld

| Number | PU Volt | Angle (Deg) | Gen MW | Gen Mvar |
|--------|---------|-------------|--------|----------|
| 1      | 1,04000 | 0,00        | 212,09 | 108,54   |
| 2      | 1,01999 | -3,08       | 100,00 | 83,42    |
| 3      | 0,92632 | -7,01       |        |          |

Fonte: Autoral.

Figura 10 – Resultados das linhas do exemplo de 3 barras em PowerWorld

| From Number | To Number | MW From | Mvar From | MW Loss | Mvar Loss |
|-------------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| 1           | 2         | 36,8    | 3,1       | 0,51    | -1,14     |
| 1           | 3         | 175,3   | 105,4     | 8,04    | 18,58     |
| 2           | 3         | 86,3    | 67,7      | 3,64    | 4,53      |

Fonte: Autoral.

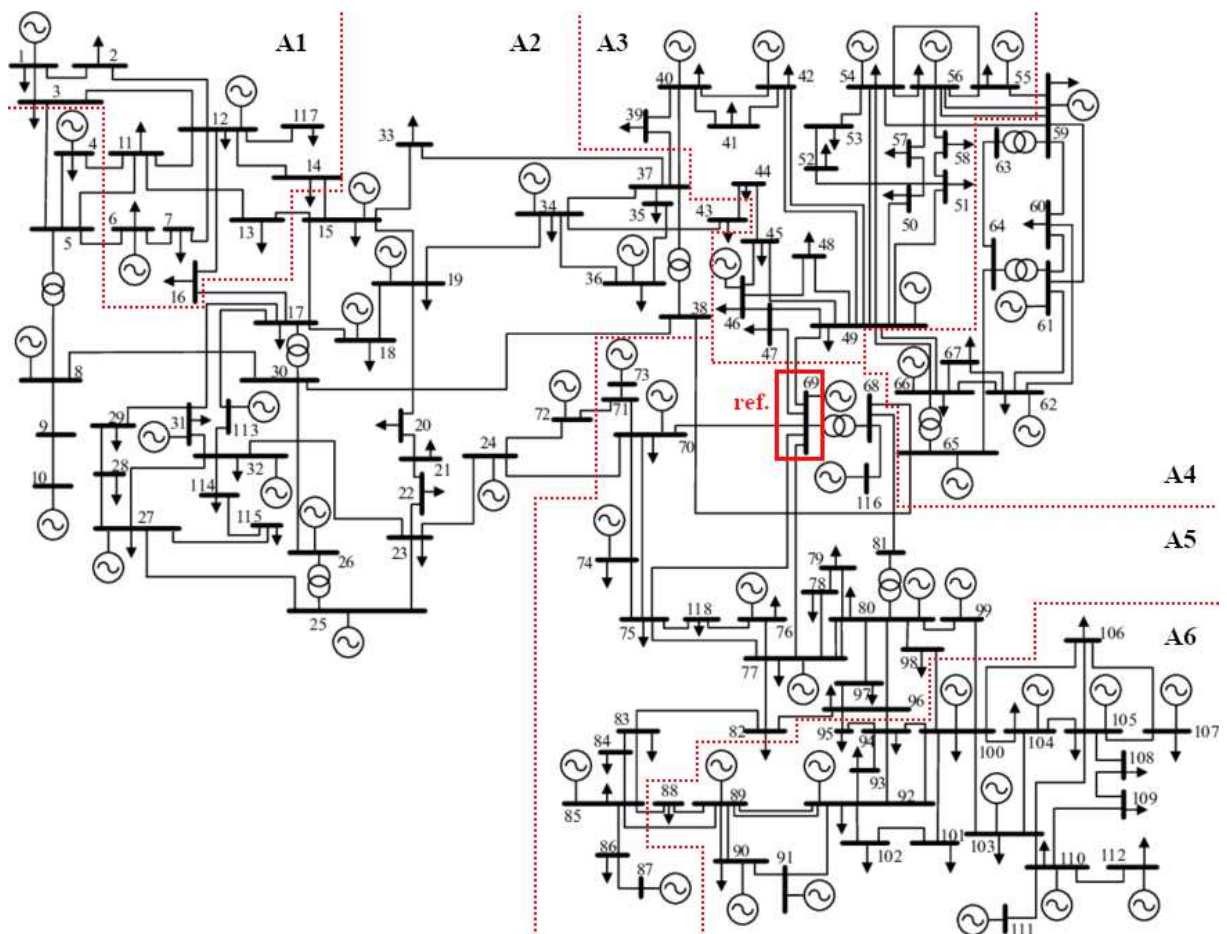
## 4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA IEEE DE 118 BARRAS

### 4.1 Características gerais

Para analisar o sistema-teste de 118 barras do IEEE, observado na Figura 11, utilizou-se mais uma vez a rotina de fluxo de potência pela abordagem NR vista nos Apêndices B e C. Dado o tamanho do sistema, é conveniente reparti-lo para visualização. Tal divisão, proposta por Yang *et al.* (2019) a partir dos dados originais de Christie (1993), separa a topologia em 6 áreas. Os dados da rede são encontrados no Apêndice A. O diagrama original se encontra no Anexo A.

O sistema é composto por 186 ramos, dentre os quais 9 são transformadores, além de 54 geradores e 91 cargas, que totalizam uma carga instalada de 3668 MW e 1438 MVar. A barra de referência é a Barra 69, localizada na Área 5 e a potência de base utilizada foi 100 MVA. Os resultados em regime permanente são vistos nos Apêndices G a K. O algoritmo convergiu após 4 iterações, para tolerância  $\varepsilon = 10^{-3}$ . Aplicou-se a mesma tolerância nas análises posteriores.

Figura 11 – Sistema-teste de 118 barras do IEEE



Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2019).

Ressalta-se que os limiares de potência dos geradores e de capacidade de carregamento  $S_n$  das linhas, vistos no Apêndice A, foram assumidos para este trabalho com base nos resultados do fluxo de potência em regime permanente, a fim de demonstrar o uso de limiares de operação em um SEP. Os dados originais do IEEE não definem estes limiares e tampouco apresentam parâmetros para se extrair os limiares por curvas de capacidade. Entretanto, para os limiares de módulo de tensão nas barras, que foram entre 0,95 e 1,05 pu, seguiu-se os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

## 4.2 Seleção de contingências

### 4.2.1 Procedimentos

A partir da teoria discutida na Seção 2.6 sobre os índices de desempenho em situações de perda de linhas de transmissão ou transformadores, pode-se definir os seguintes passos para seleção das contingências em um sistema de potência:

- i) executar o fluxo de potência para todas as combinações de contingências possíveis;
- ii) com os resultados do fluxo de potência de cada contingência, aplicar as Equações 35 e 38 para encontrar os índices de desempenho  $PI_P$  e  $PI_{VQ}$ ;
- iii) listar as contingências mais graves de acordo com os índices calculados e propor soluções;
- iv) realizar o fluxo de potência para as soluções propostas e verificar se o sistema consegue operar dentro dos limiares de geração, tensão e potência.

Tais procedimentos foram aplicados em rotina de MATLAB. Os algoritmos seguem estes mesmos passos e podem ser encontrados nos Apêndices D, E e F. A listagem das severidades foi feita para a perda de um ou dois ramos, ou seja, nos níveis de contingência N-1 e N-2. Para tanto, seguiu-se novamente os Procedimentos de Rede do ONS para fluxo de potência, os quais não apontam a necessidade de verificar contingências acima do nível N-2 (ONS, 2018).

Para desativar, no algoritmo de fluxo de potência, as linhas perdidas, estas recebem impedância que tende ao infinito, para funcionar como circuito aberto. Simplesmente comentar o código na linha perdida poderia divergir o algoritmo e inviabilizaria análises posteriores.

No critério N-1, a quantidade de cenários possíveis é o número de ramos. No critério N-2, são todas as combinações de dois ramos, conforme o binômio de Newton da Equação 43.

$$\binom{N_L}{2} = \frac{N_L}{2!(N_L - 2)!} = \frac{186}{2!(184)!} = \frac{186 \cdot 185}{2} = 17205 \quad (43)$$

#### 4.2.2 Cenários divergentes

No fluxo de potência em MATLAB, o algoritmo diverge quando sistema não se encontra interligado. Desse modo, durante a seleção de contingências, desconsideram-se os casos em que a rede se divide. Na topologia de 118 barras, dentre as 186 contingências N-1, isso ocorre apenas nas Linhas 8-9 (A2) e 85-86 (A5), pois elas separam as Linhas 9-10 e 86-87 de todo o restante do sistema. No critério N-2, todas as combinações de 8-9 e 85-86 com outros ramos irão divergir, exceto pelos arranjos com 9-10 e 86-87, respectivamente. Além disso, existem 21 outros arranjos que dividem o sistema, como 1-3 com 2-12, 5-6 com 7-12 e 8-5 com 8-30, por exemplo.

#### 4.2.3 Definição das situações-problema

Na Figura 12, é mostrado o relatório das cinco principais contingências com critério N-1 e N-2 pelos índices de fluxo e tensão para o sistema de 118 barras. No critério N-1, verifica-se que a perda das Linhas 8-5 e 9-10 se destacam pelo índice de fluxo de potência ativa, enquanto a perda das Linhas 34-43 e 45-56 se destacam pelo índice de tensão e geração reativa. No critério N-2, o par de Linhas 9-10 e 38-65 ocupa a primeira posição no índice de potência e a segunda no índice de tensão, o qual aponta o par 34-43 e 45-46 como a contingência mais grave.

Figura 12 – Relatório de contingências do sistema IEEE 118 barras

|    |                                       |                 |         |  |
|----|---------------------------------------|-----------------|---------|--|
| 1  | 1. Maiores índices de desempenho N-1: |                 |         |  |
| 2  | Ranking                               | Linha perdida   | PIp     |  |
| 3  | 1                                     | 8- 5            | 0.3463  |  |
| 4  | 2                                     | 9- 10           | 0.3403  |  |
| 5  | 3                                     | 25- 27          | 0.2198  |  |
| 6  | 4                                     | 26- 30          | 0.2163  |  |
| 7  | 5                                     | 38- 37          | 0.2123  |  |
| 8  | Ranking                               | Linha perdida   | PIvq    |  |
| 9  | 1                                     | 34- 43          | 3.3218  |  |
| 10 | 2                                     | 45- 46          | 3.1509  |  |
| 11 | 3                                     | 53- 54          | 3.0446  |  |
| 12 | 4                                     | 77- 78          | 3.0417  |  |
| 13 | 5                                     | 19- 20          | 2.8899  |  |
| 14 |                                       |                 |         |  |
| 15 | 2. Maiores índices de desempenho N-2: |                 |         |  |
| 16 | Ranking                               | Linhas perdidas | PIp     |  |
| 17 | 1                                     | 9- 10 38- 65    | 0.6695  |  |
| 18 | 2                                     | 9- 10 65- 68    | 0.5383  |  |
| 19 | 3                                     | 8- 5 30- 17     | 0.5312  |  |
| 20 | 4                                     | 9- 10 8- 30     | 0.5141  |  |
| 21 | 5                                     | 8- 5 16- 17     | 0.5127  |  |
| 22 | Ranking                               | Linhas perdidas | PIvq    |  |
| 23 | 1                                     | 34- 43 45- 46   | 11.0976 |  |
| 24 | 2                                     | 9- 10 38- 65    | 10.9941 |  |
| 25 | 3                                     | 23- 25 26- 30   | 8.2421  |  |
| 26 | 4                                     | 49- 51 56- 58   | 5.8736  |  |
| 27 | 5                                     | 100-103 100-104 | 5.8140  |  |

Fonte: Autoral.

Logo, para a análise de contingências N-1, escolheu-se os dois casos mais graves de potência e tensão, ou seja, 8-5 e 9-10 para o primeiro critério e 34-43 e 45-56 para o segundo critério. Portanto, as situações-problema a serem analisadas no critério N-1 são:

- a) perda do Transformador 8-5;
- b) perda da Usina 10;
- c) perda da LT 34-43;
- d) perda da LT 45-56.

Ademais, para as contingências N-2, escolheu-se a perda simultânea de 9-10 e 38-65, bem como de 8-5 e 30-17, pois estes são os casos mais graves nos quais as Linhas 9-10 e 8-5 são vistas no índice de potência. Do índice de tensão, será verificada a perda simultânea de 34-43 e 45-46, pois além de ocupar a primeira posição, esta é uma combinação de duas linhas selecionadas no caso simples. Portanto, as situações-problema no critério N-2 são:

- a) perda simultânea da Usina 10 e da LT 38-65;
- b) perda simultânea dos Transformadores 8-5 e 30-17;
- c) perda simultânea das LT's 34-43 e 45-46.

### **4.3 Estados de operação**

Para solucionar as contingências escolhidas na seção anterior, considerou-se os estados de operação de um SEP definidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Segundo Monticelli (1983), tais estados podem ser descritos como:

- a) seguro: as cargas injetadas nas barras são supridas, os limites de magnitude de tensão nas barras, de fluxo de potência nas linhas e de potência reativa dos geradores são respeitados e as possíveis contingências, caso ocorram, não levarão o sistema ao estado de emergência;
- b) alerta: as cargas injetadas são supridas e os limiares são respeitados, mas as possíveis contingências podem levar o sistema ao estado de emergência;
- c) emergência: com exceção das componentes perdidas, o sistema encontra-se intacto, mas os limites de operação são violados;
- d) restaurativo: os limites de operação são respeitados, mas partes do sistema se encontram desligadas.

Após uma contingência, para passar o sistema do estado de emergência para o de alerta, são necessárias medidas que não atinjam o atendimento da demanda ou a integridade do sistema. Ou seja, deve-se realizar apenas ações de controle, tais como remanejamento de geração, variação

das tensões nominais nas barras ou das derivações nos transformadores e instalação de bancos de capacitores *shunt* ou de novas linhas de transmissão. Quando essas ações são insuficientes para atender os limites de operação, então deve-se passar do estado de emergência para o restaurativo por um Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC), o que não foi preciso neste trabalho.

Ressalta-se que as linhas de transmissão reservas definidas nas análises a seguir são sugestões aproximadas de melhorias que podem ser feitas no sistema original. Tais linhas possuem parâmetros fictícios em por unidade e não seguem parâmetros específicos de nenhum fabricante. Dessa maneira, as análises apresentam apenas uma ideia aproximada das linhas reservas que o operador do sistema poderia definir com o fabricante a longo prazo.

#### 4.4 Critério N-1

##### 4.4.1 Perda do Transformador 8-5

A Tabela 10 mostra as violações nos limiares em situação de emergência com a perda do Transformador 8-5. Apesar de os geradores e barras não terem sido afetados, ocorreram 12 violações nos ramos, pois trata-se da contingência com maior índice de fluxo de potência.

Tabela 10 – Violações após perda do Transformador 8-5

| Violações nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 1-2                 | 32,0              | 111,67%          | 114,41%          |
| 7-12                | 65,0              | 112,50%          | 112,91%          |
| 8-30                | 300,0             | 138,11%          | 137,35%          |
| 11-13               | 65,0              | 120,69%          | 119,80%          |
| 12-14               | 65,0              | 159,83%          | 159,23%          |
| 12-16               | 130,0             | 108,35%          | 106,01%          |
| 13-15               | 65,0              | 156,32%          | 162,90%          |
| 14-15               | 65,0              | 178,67%          | 182,55%          |
| 15-17               | 130,0             | 181,25%          | 181,68%          |
| 16-17               | 130,0             | 121,20%          | 124,86%          |
| 22-23               | 65,0              | 106,38%          | 108,79%          |
| 30-17               | 300,0             | 168,28%          | 165,49%          |

Fonte: Autoral.

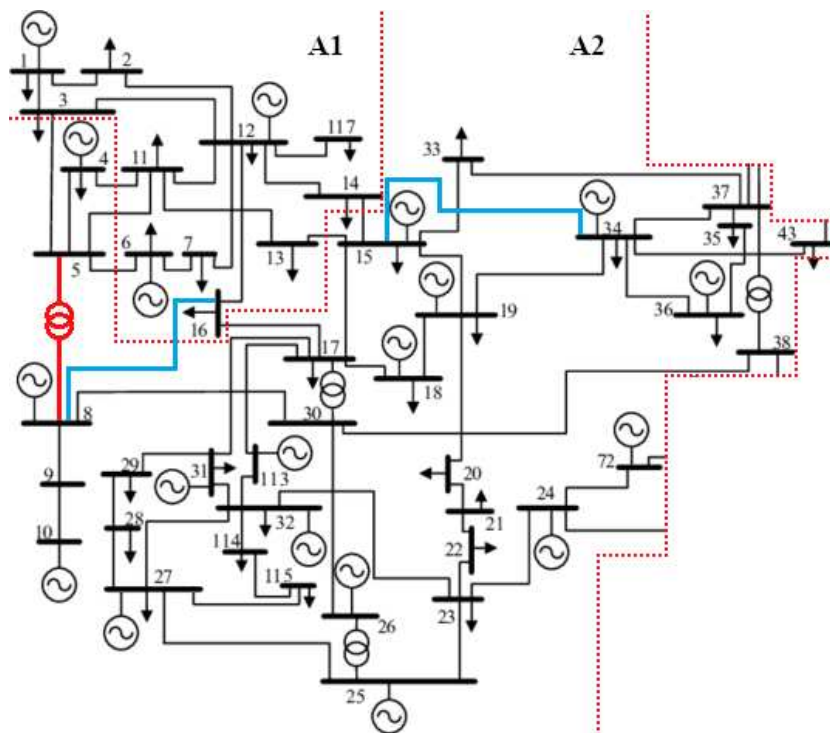
As ações de controle encontradas para solucionar essas violações e permitir que o sistema voltasse a operar dentro dos limites foram:

- a) instalação de novas linhas de transmissão:

- 8-16, com resistência  $R = 0,025$  pu, reatância  $X = 0,075$  pu e capacidade de carregamento de 200 MVA;
  - 15-34, com resistência  $R = 0,002$  pu, reatância  $X = 0,005$  pu e capacidade de carregamento de 130 MVA;
- b) remanejamento de geração de 225 MW da Usina 10 para as Usinas 1, 4, 6, 8 e 12, em que destina-se 45 MW para cada uma.

Ao executar o fluxo de potência com as ações de controle verificadas, as componentes violadas operaram dentro dos limites sem afetar as demais componentes do sistema, como observa-se na Tabela 11. A Figura 13 mostra a posição do Transformador 8-5 (em vermelho) e as posições das novas componentes instaladas (em azul) no diagrama unifilar.

Figura 13 – Posição do Transformador 8-5 e das novas componentes do sistema



Fonte: Autoral.

Tabela 11 – Soluções das violações após perda do Transformador 8-5

| Correções nos ramos (continua) |                   |                  |                  |
|--------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                           | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 1-2                            | 32,0              | 41,11%           | 45,70%           |
| 7-12                           | 65,0              | 51,53%           | 51,81%           |
| 8-30                           | 300,0             | 42,72%           | 33,18%           |

Tabela 11 – Soluções das violações após perda do Transformador 8-5

| Correções nos ramos (conclusão) |                   |                  |                  |
|---------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                            | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 11-13                           | 65,0              | 26,75%           | 28,21%           |
| 12-14                           | 65,0              | 2,30%            | 3,77%            |
| 12-16                           | 130,0             | 91,46%           | 90,86%           |
| 13-15                           | 65,0              | 31,65%           | 31,60%           |
| 14-15                           | 65,0              | 19,31%           | 21,26%           |
| 15-17                           | 130,0             | 97,78%           | 98,83%           |
| 16-17                           | 130,0             | 11,01%           | 8,38%            |
| 22-23                           | 65,0              | 81,87%           | 83,39%           |
| 30-17                           | 300,0             | 83,70%           | 81,32%           |

Fonte: Autoral.

#### 4.4.2 Perda da Usina 10

A Tabela 12 mostra as violações nos limiares em situação de emergência com a perda da Linha 9-10 e consequente desligamento da Usina 10. Observa-se que ocorreu uma violação de barra, embora tenham ocorrido menos violações nos ramos em relação à contingência anterior.

Tabela 12 – Violações após perda da Usina 10

| Violações nas barras |        |         |
|----------------------|--------|---------|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |
| 44                   | 0,9468 | -30,01° |

| Violações nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 22-23               | 65,0              | 107,14%          | 109,57%          |
| 23-32               | 130,0             | 106,65%          | 104,57%          |
| 38-65               | 300,0             | 147,23%          | 148,87%          |
| 45-49               | 65,0              | 100,08%          | 104,97%          |
| 56-59               | 65,0              | 102,58%          | 105,19%          |
| 68-69               | 200,0             | 185,29%          | 183,26%          |

Fonte: Autoral.

As ações de controle encontradas para solucionar essas violações e permitir que o sistema voltasse a operar dentro dos limites foram:

- instalação de novas linhas de transmissão 58-59, com resistência  $R = 0,03$  pu, reatância  $X = 0,15$  pu e capacidade de carregamento de 65 MVA;
- remanejamento de geração de 300 MW da Usina 10 para as Usinas 1, 4, 6, 8, 12 e 15, em que destina-se 60 MW para a Usina 12 e 48 MW para cada uma das demais.



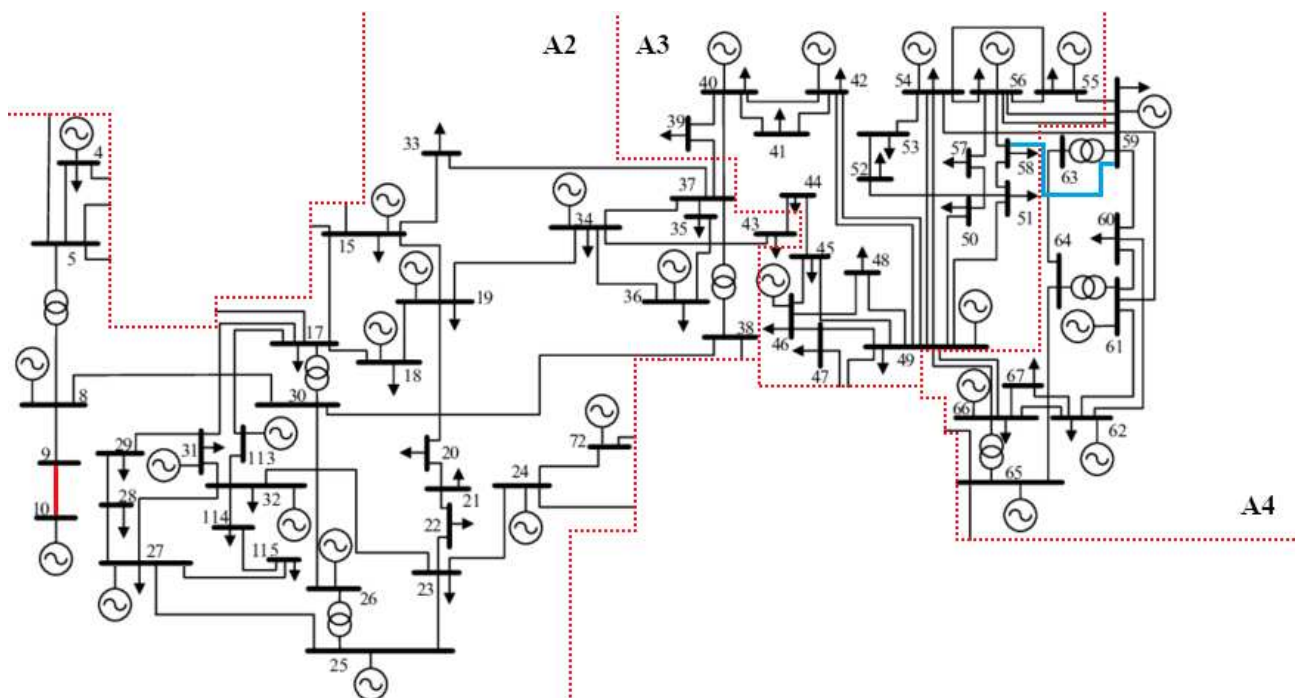
Desse modo, a tensão na Barra 4 foi corrigida somente com a nova LT e o remanejamento na Usina 10, sem a necessidade de instalar um capacitor *shunt*. Ao executar o fluxo de potência com as ações de controle verificadas, as componentes violadas operaram dentro dos limites sem afetar as demais componentes do sistema, como observa-se na Tabela 13. A Figura 14 mostra a posição da Linha 9-10 (em vermelho) e da nova LT (em azul) no diagrama unifilar.

Tabela 13 – Soluções das violações após perda da Usina 10

| Correções nas barras |                   |                  |                  |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
|----------------------|-------------------|------------------|------------------|------|--------|--------|-------|------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| Barra                | Módulo            | Ângulo           |                  |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| 44                   | 0,9584            | -20,22°          |                  |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| Correções nos ramos  |                   |                  |                  |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| Ramo                 | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| 22-23                | 65,0              | 83,58%           | 85,16%           |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| 23-32                | 130,0             | 81,99%           | 79,64%           |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| 38-65                | 300,0             | 88,00%           | 45-49            | 65,0 | 81,68% | 84,91% | 56-59 | 65,0 | 82,96% | 85,57% | 68-69 | 200,0 | 99,79% | 98,67% |
| 45-49                | 65,0              | 81,68%           | 84,91%           |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| 56-59                | 65,0              | 82,96%           | 85,57%           |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |
| 68-69                | 200,0             | 99,79%           | 98,67%           |      |        |        |       |      |        |        |       |       |        |        |

Fonte: Autoral.

Figura 14 – Posição da LT 9-10 e das novas componentes do sistema



Fonte: Autoral.

#### 4.4.3 Perda da LT 34-43

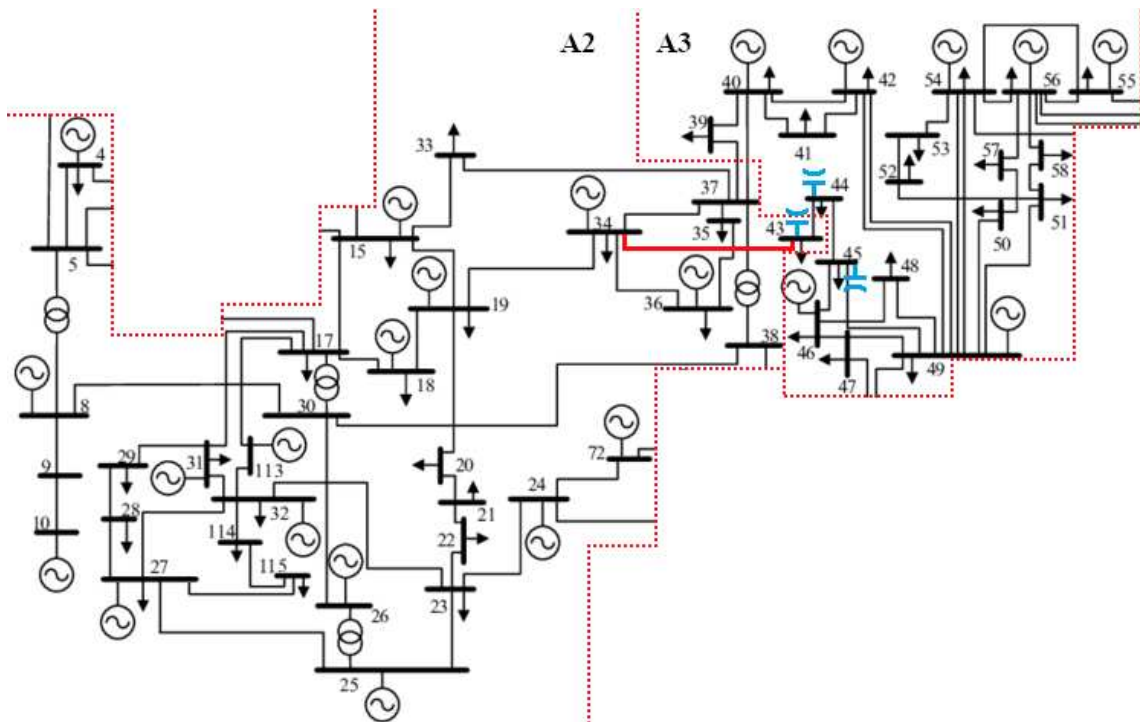
A Tabela 14 mostra as violações nos limiares em situação de emergência com a perda da Linha 34-43. Observa-se a ocorrência de violações nodais apenas, pois trata-se da contingência com maior índice de tensão. A única ação de controle necessária foi a instalação de bancos de capacitores *shunt* de 5 MVar nas Barras 43 e 44 e um de 15 MVar na Barra 45. Na Tabela 15, são apresentadas as tensões após as ações de controle. A Figura 15 mostra a posição da Linha 34-43 (em vermelho) e a posições dos bancos *shunt* instalados (em azul) no diagrama unifilar.

Tabela 14 – Violações após perda da LT 34-43

| Violações nas barras |        |         |
|----------------------|--------|---------|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |
| 43                   | 0,9056 | -19,71° |
| 44                   | 0,9311 | -16,89° |
| 45                   | 0,9494 | -15,03° |

Fonte: Autoral.

Figura 15 – Posição da LT 34-43 e das novas componentes do sistema



Fonte: Autoral.

Tabela 15 – Soluções das violações após perda da LT 34-43

| Correções nas barras |        |         |
|----------------------|--------|---------|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |
| 43                   | 0,9527 | -20,01° |
| 44                   | 0,9634 | -17,22° |
| 45                   | 0,9712 | -15,32° |

Fonte: Autoral.

#### 4.4.4 Perda da LT 45-46

A Tabela 16 mostra as violações nos limiaries em situação de emergência com a perda da Linha 45-46. É a primeira contingência observada fora da Área 2 do sistema. Observa-se que ocorreu uma violação de tensão a menos que na contingência anterior, mas uma das linhas foi violada. Não foi necessária a instalação de capacitores *shunt* para corrigir as tensões nas barras, uma vez que todas as violações foram resolvidas apenas com a instalação de uma nova LT 45-48, com resistência  $R = 0,04$  pu, reatância  $X = 0,2$  pu e capacidade de carregamento de 65 MVA. Na Tabela 17, são apresentadas as tensões após as ações de controle. A Figura 16 mostra a posição da Linha 45-46 (em vermelho) e da nova LT (em azul) no diagrama unifilar.

Tabela 16 – Violações após perda da LT 45-46

| Violações nas barras |        |         |
|----------------------|--------|---------|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |
| 44                   | 0,9227 | -19,23° |
| 45                   | 0,9171 | -17,79° |

| Violações nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 45-49               | 65,0              | 114,96%          | 124,13%          |

Fonte: Autoral.

Tabela 17 – Soluções das violações após perda da LT 45-46

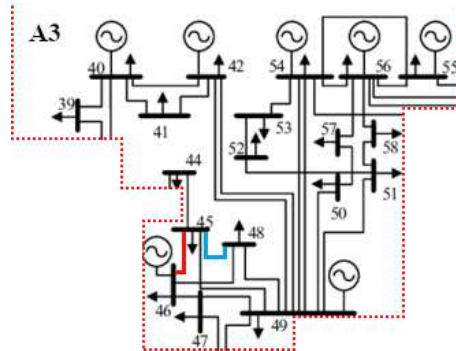
| Correções nas barras (continua) |        |         |
|---------------------------------|--------|---------|
| Barra                           | Módulo | Ângulo  |
| 44                              | 0,9507 | -16,72° |
| 45                              | 0,9513 | -14,91° |

Tabela 17 – Soluções das violações após perda da LT 45-46

| Correções nos ramos (conclusão) |                   |                  |                  |
|---------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                            | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 45-49                           | 65,0              | 76,20%           | 79,17%           |

Fonte: Autoral.

Figura 16 – Posição da LT 45-46 e das novas componentes do sistema



Fonte: Autoral.

#### 4.4.5 Iterações

Todas as operações realizadas para as contingências N-1 tiveram o mesmo perfil iterativo. Ao executar o fluxo de potência, tanto durante as contingências quanto após as ações de controle, o número de iterações foi igual a quatro para todos os cenários estudados.

### 4.5 Critério N-2

#### 4.5.1 Perda simultânea da Usina 10 e da LT 38-65

A Tabela 18 mostra as violações em situação de emergência após a perda das Linhas 9-10 e 38-65. Como esperado para a contingência com maior índice de fluxo de potência, ocorreram muitas violações nos ramos. Alguns geradores e barras também foram afetados, pois a contingência também apresenta o segundo maior índice de tensão e geração reativa.

Tabela 18 – Violações após perda da Usina 10 e da LT 38-65

| Violações nos geradores (continua) |             |           |             |          |
|------------------------------------|-------------|-----------|-------------|----------|
| Gerador                            | $P_{g,max}$ | $P_g$     | $Q_{g,max}$ | $Q_g$    |
| 24                                 | 50          | -13,0     | 100         | 117,5549 |
| 42                                 | 50          | -59,0     | 250         | 267,0640 |
| 69                                 | 1100        | 1341,0828 | 100         | 72,2067  |

Tabela 18 – Violações após perda da Usina 10 e da LT 38-65

| Violações nas barras (conclusão) |        |          |
|----------------------------------|--------|----------|
| Barra                            | Módulo | Ângulo   |
| 38                               | 1,0535 | -101,74° |
| 43                               | 0,8410 | -86,64°  |
| 44                               | 0,8032 | -54,66°  |
| 45                               | 0,8657 | -42,66°  |

| Violações nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 19-20               | 65,0              | 103,65%          | 102,79%          |
| 20-21               | 65,0              | 124,47%          | 123,75%          |
| 21-22               | 65,0              | 140,25%          | 140,92%          |
| 22-23               | 65,0              | 155,03%          | 160,04%          |
| 23-24               | 300,0             | 105,74%          | 108,08%          |
| 23-32               | 100,0             | 162,27%          | 162,48%          |
| 24-70               | 130,0             | 147,59%          | 147,63%          |
| 24-72               | 130,0             | 133,20%          | 134,09%          |
| 26-30               | 300,0             | 126,06%          | 123,96%          |
| 31-32               | 65,0              | 109,55%          | 110,66%          |
| 34-43               | 130,0             | 125,66%          | 107,54%          |
| 40-42               | 130,0             | 113,41%          | 114,44%          |
| 41-42               | 130,0             | 118,15%          | 120,55%          |
| 42-49               | 300,0             | 164,77%          | 165,34%          |
| 43-44               | 130,0             | 115,35%          | 111,13%          |
| 44-45               | 130,0             | 123,25%          | 132,72%          |
| 45-46               | 65,0              | 178,11%          | 203,43%          |
| 45-49               | 65,0              | 181,18%          | 208,21%          |
| 46-47               | 65,0              | 146,88%          | 146,12%          |
| 46-48               | 32,0              | 122,55%          | 127,35%          |
| 47-49               | 32,0              | 122,35%          | 120,22%          |
| 47-69               | 130,0             | 120,12%          | 123,74%          |
| 49-66               | 450,0             | 117,86%          | 117,97%          |
| 49-69               | 130,0             | 109,22%          | 111,02%          |
| 56-59               | 65,0              | 170,96%          | 173,56%          |
| 64-65               | 300,0             | 110,75%          | 112,07%          |
| 68-69               | 200,0             | 159,27%          | 157,51%          |
| 69-70               | 200,0             | 173,42%          | 172,05%          |
| 69-75               | 200,0             | 118,45%          | 114,92%          |
| 69-77               | 130,0             | 111,46%          | 109,13%          |
| 70-71               | 130,0             | 166,22%          | 164,72%          |
| 70-74               | 32,0              | 192,86%          | 195,91%          |
| 71-72               | 130,0             | 158,13%          | 158,60%          |
| 74-75               | 130,0             | 117,94%          | 116,39%          |
| 75-77               | 65,0              | 110,99%          | 114,24%          |

Fonte: Autoral.

Devido à grande quantidade de violações, foram necessárias muitas ações de controle para fazer o sistema voltar a operar dentro dos limiares. Desse modo, as medidas definidas para solucionar os problemas encontrados foram:

a) instalação de novas linhas de transmissão:

- 23-26, com resistência  $R = 0,002$  pu, reatância  $X = 0,005$  pu e capacidade de carregamento de 130 MVA;
- 34-72, com resistência  $R = 0,05$  pu, reatância  $X = 0,2$  pu e capacidade de carregamento de 130 MVA;
- 38-70, com resistência  $R = 0,08$  pu, reatância  $X = 0,3$  pu e capacidade de carregamento de 65 MVA;
- 45-48, com resistência  $R = 0,08$  pu, reatância  $X = 0,3$  pu e capacidade de carregamento de 65 MVA;
- 46-73, com resistência  $R = 0,002$  pu, reatância  $X = 0,005$  pu e capacidade de carregamento de 130 MVA;

b) remanejamento de geração:

- 200 MW da Usina 10 para as Usinas 1, 4, 6, 8 e 12, em que destina-se 40 MW para cada uma;
- 200 MW da Usina 26 para as Usinas 27, 31, 32, 34 e 36, em que destina-se 40 MW para cada uma;
- 180 MW da Usina 49 para as Usinas 40 e 42, em que destina-se 90 MW para cada uma;
- 120 MW da Usina 59 para as Usinas 54, 55 e 56, em que destina-se 40 MW para cada uma;
- 240 MW da Usina 80 para as Usinas 70, 72, 73, 74, 76 e 77, em que destina-se 40 MW para cada uma.

Logo, as tensões nas barras foram corrigidas somente com as novas LT's e o remanejamento de geração, sem a necessidade de capacitores *shunt*. Ao executar o fluxo de potência com as ações de controle, as componentes violadas operaram dentro dos limites sem afetar as demais componentes do sistema, como observa-se na Tabela 19. A Figura 17 mostra a posição das Linhas 9-10 e 38-65 (em vermelho) e das novas LT's (em azul) no diagrama unifilar.

Tabela 19 – Soluções das violações após perda da Usina 10 e da LT 38-65

| Correções nos geradores (continua) |             |       |             |          |
|------------------------------------|-------------|-------|-------------|----------|
| Gerador                            | $P_{g,max}$ | $P_g$ | $Q_{g,max}$ | $Q_g$    |
| 24                                 | 50          | -13,0 | 100         | -12,1906 |

Tabela 19 – Soluções das violações após perda da Usina 10 e da LT 38-65

| Correções nos geradores (conclusão) |             |          |             |         |
|-------------------------------------|-------------|----------|-------------|---------|
| Gerador                             | $P_{g,max}$ | $P_g$    | $Q_{g,max}$ | $Q_g$   |
| 42                                  | 50          | -31,0    | 250         | 23,6487 |
| 69                                  | 1100        | 776,5868 | 100         | 29,4699 |

| Correções nas barras |        |         |
|----------------------|--------|---------|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |
| 38                   | 1,0441 | -32.31° |
| 43                   | 0,9722 | -29.35° |
| 44                   | 0,9575 | -22.28° |
| 45                   | 0,9643 | -18.83° |

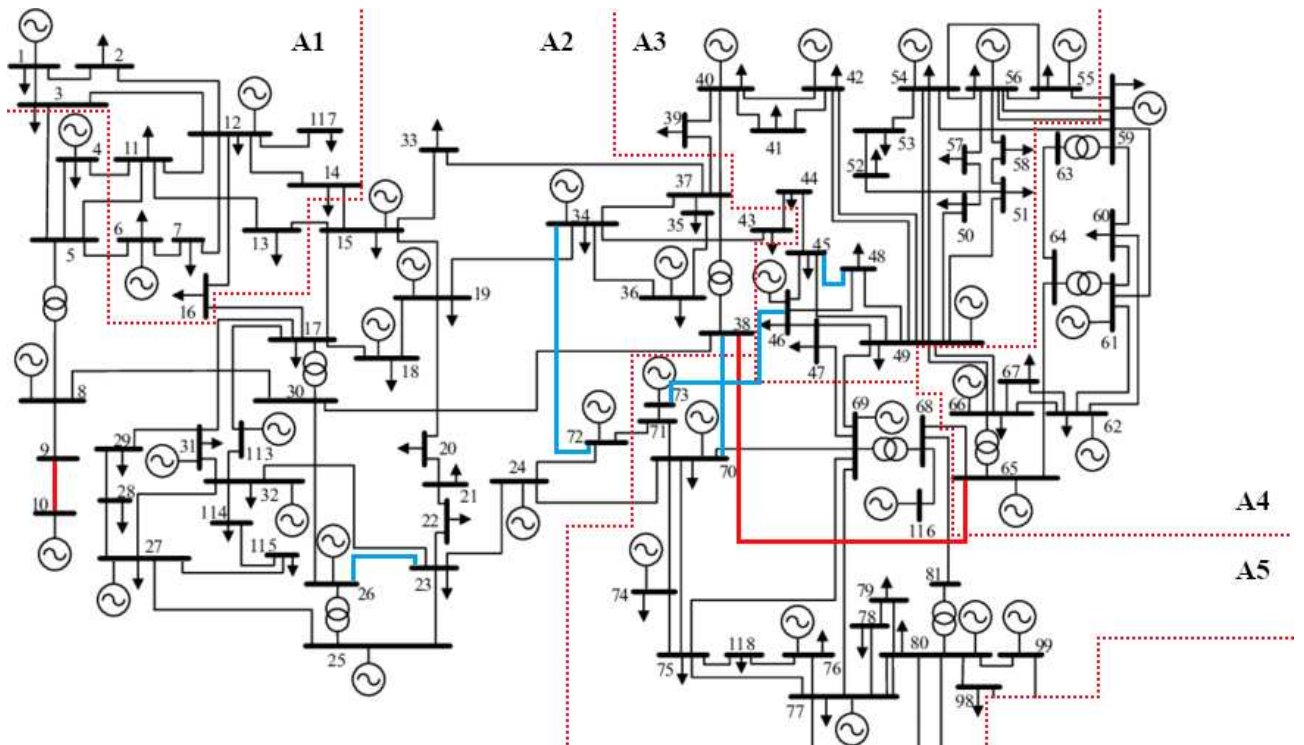
| Correções nos ramos (continua) |                   |                  |                  |
|--------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                           | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 19-20                          | 65,0              | 34,67%           | 37,31%           |
| 20-21                          | 65,0              | 57,75%           | 58,64%           |
| 21-22                          | 65,0              | 75,95%           | 76,74%           |
| 22-23                          | 65,0              | 91,34%           | 93,20%           |
| 23-24                          | 300,0             | 20,13%           | 20,55%           |
| 23-32                          | 100,0             | 70,57%           | 68,17%           |
| 24-70                          | 130,0             | 38,30%           | 38,34%           |
| 24-72                          | 130,0             | 17,67%           | 18,57%           |
| 26-30                          | 300,0             | 58,59%           | 50,28%           |
| 31-32                          | 65,0              | 47,12%           | 48,24%           |
| 34-43                          | 130,0             | 24,21%           | 25,66%           |
| 40-42                          | 130,0             | 34,55%           | 19,96%           |
| 41-42                          | 130,0             | 41,26%           | 42,09%           |
| 42-49                          | 300,0             | 35,96%           | 36,58%           |
| 43-44                          | 130,0             | 34,60%           | 35,62%           |
| 44-45                          | 130,0             | 46,08%           | 46,61%           |
| 45-46                          | 65,0              | 69,78%           | 70,95%           |
| 45-49                          | 65,0              | 73,00%           | 75,55%           |
| 46-47                          | 65,0              | 49,52%           | 51,20%           |
| 46-48                          | 32,0              | 20,27%           | 32,25%           |
| 47-49                          | 32,0              | 44,90%           | 41,12%           |
| 47-69                          | 130,0             | 59,09%           | 60,87%           |
| 49-66                          | 450,0             | 72,92%           | 73,03%           |
| 49-69                          | 130,0             | 52,33%           | 54,18%           |
| 56-59                          | 65,0              | 54,08%           | 56,67%           |
| 64-65                          | 300,0             | 87,99%           | 90,10%           |
| 68-69                          | 200,0             | 91,96%           | 90,95%           |
| 69-70                          | 200,0             | 94,43%           | 93,03%           |
| 69-75                          | 200,0             | 72,66%           | 70,37%           |
| 69-77                          | 130,0             | 96,79%           | 94,46%           |
| 70-71                          | 130,0             | 46,03%           | 45,86%           |
| 70-74                          | 32,0              | 75,64%           | 78,69%           |
| 71-72                          | 130,0             | 57,14%           | 56,33%           |
| 74-75                          | 130,0             | 49,13%           | 49,16%           |

Tabela 19 – Soluções das violações após perda da Usina 10 e da LT 38-65

| Correções nos ramos (conclusão) |                   |                  |                  |
|---------------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                            | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 75-77                           | 65,0              | 39,68%           | 41,04%           |

Fonte: Autoral.

Figura 17 – Posições das LT's 9-10 e 38-65 e das novas componentes no diagrama unifilar



Fonte: Autoral.

#### 4.5.2 Perda simultânea dos Transformadores 8-5 e 30-17

A Tabela 20 mostra as violações em situação de emergência após a perda dos Transformadores 8-5 e 30-17. Novamente, como se trata de uma grave contingência pelo índice de fluxo de potência, ocorreram muitas violações nos ramos. Alguns geradores e barras também foram afetados, embora os desvios tenham sido baixos, uma vez que a contingência não foi listada entre as cinco maiores pelo índice de tensão e geração reativa.

Tabela 20 – Violações após perda dos Transformadores 8-5 e 30-17

| Violações nos geradores (continua) |             |          |
|------------------------------------|-------------|----------|
| Gerador                            | $Q_{g,max}$ | $Q_g$    |
| 19                                 | 100         | 126,9424 |
| 32                                 | 100         | 107,6968 |



Tabela 20 – Violações após perda dos Transformadores 8-5 e 30-17

| Violações nas barras (conclusão) |        |         |  |
|----------------------------------|--------|---------|--|
| Barra                            | Módulo | Ângulo  |  |
| 21                               | 0,9367 | -48,64° |  |
| 22                               | 0,9364 | -41,35° |  |
| 33                               | 0,9476 | -48,73° |  |

| Violações nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 1-2                 | 32,0              | 111,12%          | 113,88%          |
| 7-12                | 65,0              | 111,40%          | 111,80%          |
| 8-30                | 300,0             | 137,72%          | 136,61%          |
| 11-13               | 65,0              | 133,63%          | 132,22%          |
| 12-14               | 65,0              | 176,40%          | 175,29%          |
| 13-15               | 65,0              | 168,60%          | 175,94%          |
| 14-15               | 65,0              | 194,66%          | 199,09%          |
| 15-19               | 65,0              | 206,11%          | 206,56%          |
| 15-33               | 130,0             | 148,33%          | 141,65%          |
| 16-17               | 130,0             | 107,41%          | 110,08%          |
| 19-20               | 65,0              | 140,02%          | 136,38%          |
| 19-34               | 130,0             | 145,36%          | 146,73%          |
| 20-21               | 65,0              | 158,13%          | 156,11%          |
| 21-22               | 65,0              | 172,61%          | 173,26%          |
| 22-23               | 65,0              | 187,49%          | 196,01%          |
| 23-32               | 100,0             | 180,02%          | 180,96%          |
| 25-27               | 200,0             | 141,99%          | 140,34%          |
| 26-25               | 300,0             | 117,24%          | 117,24%          |
| 27-28               | 300,0             | 130,65%          | 129,29%          |
| 27-32               | 32,0              | 187,64%          | 185,89%          |
| 27-115              | 32,0              | 141,29%          | 140,17%          |
| 28-29               | 65,0              | 105,95%          | 105,25%          |
| 30-38               | 200,0             | 184,24%          | 182,69%          |
| 31-32               | 65,0              | 165,00%          | 166,11%          |
| 33-37               | 130,0             | 156,00%          | 163,70%          |
| 34-37               | 200,0             | 144,05%          | 143,17%          |
| 38-37               | 450,0             | 129,80%          | 127,45%          |
| 56-59               | 65,0              | 104,37%          | 106,98%          |

Fonte: Autoral.

Mais uma vez, foram necessárias ações de controle significativas para fazer o sistema voltar a operar em regime permanente, embora com menos intensidade que no caso anterior. Assim, as medidas definidas para solucionar os problemas encontrados foram:

a) instalação de novas linhas de transmissão:

- 25-74, com resistência  $R = 0,02$  pu, reatância  $X = 0,4$  pu e capacidade de carregamento de 130 MVA;
- 15-34, com resistência  $R = 0,001$  pu, reatância  $X = 0,002$  pu e capacidade de carregamento de 300 MVA;

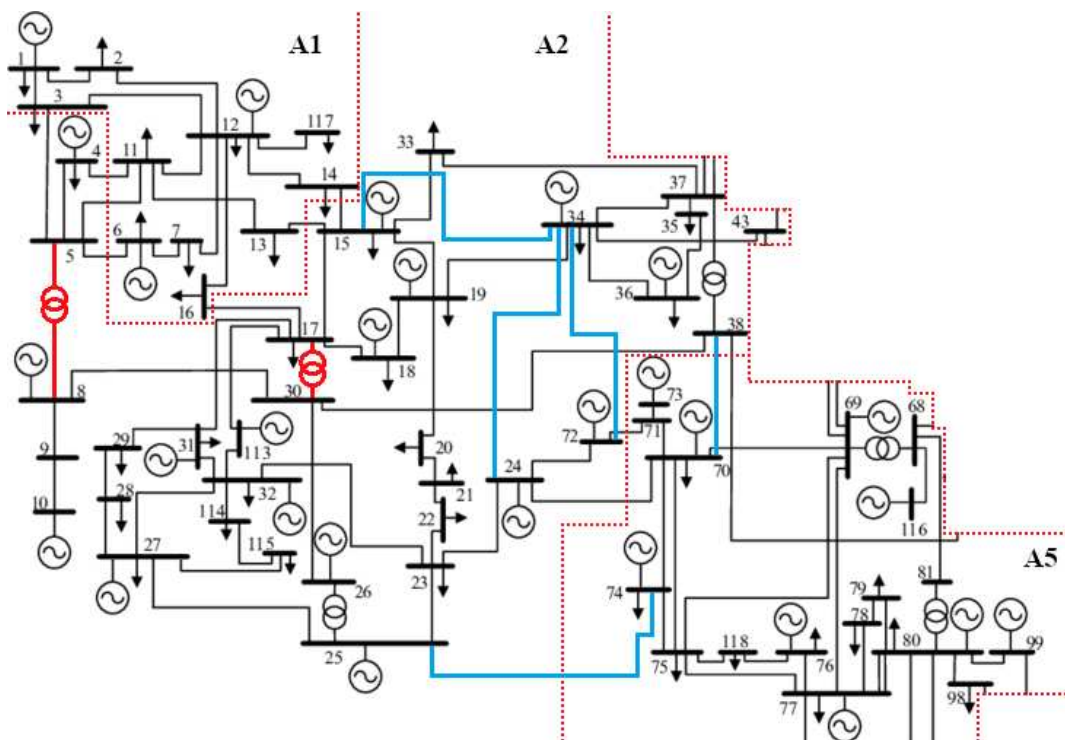
- 24-34, com resistência  $R = 0,001$  pu, reatância  $X = 0,002$  pu e capacidade de carregamento de 200 MVA;
- 34-72, com resistência  $R = 0,001$  pu, reatância  $X = 0,002$  pu e capacidade de carregamento de 200 MVA;
- 38-70, com resistência  $R = 0,02$  pu, reatância  $X = 0,4$  pu e capacidade de carregamento de 200 MVA;

b) remanejamento de geração:

- 270 MW da Usina 10 para as Usinas 1, 4, 6, 8 e 12, 15 em que destina-se 45 MW para cada uma;
- 240 MW da Usina 26 para as Usinas 18, 19, 24, 27, 31 e 32 em que destina-se 40 MW para cada uma.

Novamente, as tensões nas barras foram corrigidas somente com as novas LT's e o remanejamento de geração, sem a necessidade de capacitores *shunt*. Ao executar o fluxo de potência, as componentes violadas operaram dentro dos limites sem afetar as demais componentes do sistema, como observa-se na Tabela 21. A Figura 18 mostra a posição dos Transformadores 8-5 e 30-17 (em vermelho) e das novas LT's (em azul) no diagrama unifilar.

Figura 18 – Posições dos Transformadores 8-5 e 30-17 e das novas componentes no diagrama unifilar



Fonte: Autoral.

Tabela 21 – Soluções das violações após perda dos Transformadores 8-5 e 30-17

| Correções nos geradores |             |         |  |
|-------------------------|-------------|---------|--|
| Gerador                 | $Q_{g,max}$ | $Q_g$   |  |
| 19                      | 100         | 34,3087 |  |
| 32                      | 100         | 26,7960 |  |

| Correções nas barras |        |         |
|----------------------|--------|---------|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |
| 21                   | 0,9828 | -19,80° |
| 22                   | 0,9859 | -18,57° |
| 33                   | 0,9912 | -19,09° |

| Correções nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 1-2                 | 32,0              | 38,43%           | 43,18%           |
| 7-12                | 65,0              | 45,88%           | 46,14%           |
| 8-30                | 300,0             | 72,29%           | 67,80%           |
| 11-13               | 65,0              | 49,16%           | 50,62%           |
| 12-14               | 65,0              | 71,46%           | 72,29%           |
| 13-15               | 65,0              | 85,69%           | 88,99%           |
| 14-15               | 65,0              | 92,07%           | 94,44%           |
| 15-19               | 65,0              | 48,64%           | 48,18%           |
| 15-33               | 130,0             | 4,83%            | 6,61%            |
| 16-17               | 130,0             | 42,78%           | 43,74%           |
| 19-20               | 65,0              | 19,72%           | 22,12%           |
| 19-34               | 130,0             | 5,50%            | 6,81%            |
| 20-21               | 65,0              | 14,64%           | 16,88%           |
| 21-22               | 65,0              | 32,47%           | 32,80%           |
| 22-23               | 65,0              | 48,18%           | 48,52%           |
| 23-32               | 100,0             | 32,61%           | 30,12%           |
| 25-27               | 200,0             | 52,56%           | 50,87%           |
| 26-25               | 300,0             | 21,60%           | 21,60%           |
| 27-28               | 300,0             | 43,39%           | 43,18%           |
| 27-32               | 32,0              | 56,86%           | 55,12%           |
| 27-115              | 32,0              | 73,30%           | 73,40%           |
| 28-29               | 65,0              | 19,26%           | 17,86%           |
| 30-38               | 200,0             | 89,84%           | 86,19%           |
| 31-32               | 65,0              | 26,55%           | 27,67%           |
| 33-37               | 130,0             | 14,09%           | 14,16%           |
| 34-37               | 200,0             | 82,16%           | 82,25%           |
| 38-37               | 450,0             | 76,95%           | 73,79%           |
| 56-59               | 65,0              | 97,37%           | 99,97%           |

Fonte: Autoral.

#### 4.5.3 Perda simultânea das LT's 34-43 e 45-46

A Tabela 22 mostra as violações em situação de emergência após a perda das Linhas 34-43 e 45-46. Observa-se que esta situação-problema combina as contingências N-1 de 34-43 e

45-46, uma vez que ocorreram violações nas Barras 43 a 45 e na Linha 45-49. A diferença é que as violações nestas barras foram ainda mais severas, pois a contingência é a maior pelo índice de tensão, e ocorreu uma outra violação em um dos sentidos do fluxo na Linha 56-59.

Tabela 22 – Violações após perda das LT's 34-43 e 45-46

| Violações nas barras |        |         |  |
|----------------------|--------|---------|--|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |  |
| 43                   | 0,7867 | -25,55° |  |
| 44                   | 0,8183 | -21,89° |  |
| 45                   | 0,8413 | -19,53° |  |

| Violações nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 45-49               | 65,0              | 145,23%          | 169,89%          |
| 56-59               | 65,0              | 98,14%           | 100,74%          |

Fonte: Autoral.

Dessa forma, combinou-se as ações definidas nas contingências N-1 de 34-43 e 45-46. Os resultados desta tentativa são vistos na Tabela 23. Observa-se que a tensão na Barra 43 ainda ficou abaixo de 0,95 pu. Todavia, após a instalação de mais bancos *shunt* de 2 MVAr nas Barras 43 e 44, o sistema voltou a operar nos limites, como observa-se na Tabela 24. A Figura 19 mostra a posição das Linhas 34-43 e 45-46 (em vermelho) e dos capacitores (em azul).

Tabela 23 – Tentativa de correções das violações após perda das LT's 34-43 e 45-46

| Correções nas barras |        |         |  |
|----------------------|--------|---------|--|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |  |
| 43                   | 0,9390 | -20,19° |  |
| 44                   | 0,9501 | -17,32° |  |
| 45                   | 0,9582 | -15,37° |  |

| Correções nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 45-49               | 65,0              | 78,91%           | 82,00%           |
| 56-59               | 65,0              | 97,38%           | 99,98%           |

Fonte: Autoral.

Tabela 24 – Correções finais das violações após perda das LT's 34-43 e 45-46

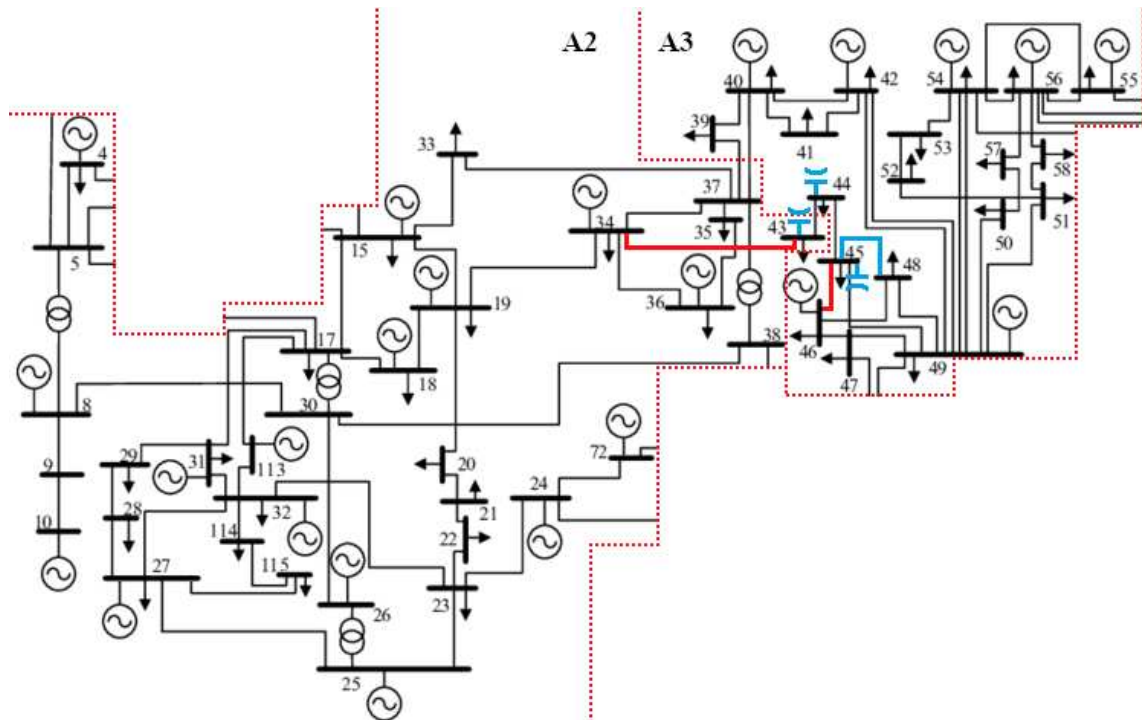
| Correções nas barras |        |         |  |
|----------------------|--------|---------|--|
| Barra                | Módulo | Ângulo  |  |
| 43                   | 0,9531 | -20,28° |  |
| 44                   | 0,9587 | -17,41° |  |
| 45                   | 0,9629 | -15,43° |  |

| Correções nos ramos |                   |                  |                  |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Ramo                | Pot. limite (MVA) | Capacidade (K-M) | Capacidade (M-K) |
| 45-49               | 65,0              | 78,65%           | 81,63%           |
| 56-59               | 65,0              | 97,37%           | 99,97%           |

Fonte: Autoral.

Figura 19 – Posições das LT's 34-43 e 45-46 e das novas componentes no diagrama unifilar



Fonte: Autoral.

#### 4.5.4 Iterações

As contingências N-2 referentes às perdas simultâneas 9-10/38-65 e 8-5/30-17 apresentaram o mesmo perfil iterativo. Durante as contingências, foram necessárias cinco iterações até o resultado final. Após as ações de controle, porém, foram quatro iterações. Na perda simultânea 34-43/45-46, o número de iterações foi igual em todas as análises. O algoritmo convergiu após quatro iterações tanto durante a contingência quanto nas tentativas de solução das violações.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do trabalho, foi possível realizar uma análise do fluxo de potência sem controles e limites e das piores contingências com critério N-1 e N-2 no sistema-teste IEEE de 118 barras. A simulação desta topologia foi desafiadora, mas permitiu observar problemas úteis em um contexto prático e funcional. Em primeiro lugar, percebeu-se que o método de Newton-Raphson é uma técnica poderosa para se estudar como a potência flui neste sistema elétrico. Ademais, verificou-se que os índices de desempenho propuseram cenários relevantes.

Notou-se que, para o sistema-teste simulado, a abordagem NR é um mecanismo com baixo esforço computacional e boa capacidade de convergência. Em todas as análises executadas, seja em regime permanente, em estado de emergência ou após as ações de controle, o algoritmo convergiu após no máximo cinco iterações. Tal comportamento foi observado tanto em um sistema-teste pequeno como o de 3 barras quanto em um sistema complexo como o de 118 barras, o que demonstra a boa eficácia do método NR em diversas situações nas topologias analisadas.

No entanto, como as rotinas utilizadas funcionam apenas com sistemas totalmente interligados, é possível que contingências importantes sejam desprezadas no relatório de desempenhos. Assim, no caso de topologias menos robustas, onde uma contingência pode dividir o sistema em múltiplas partes de tamanho considerável, é interessante executar o fluxo de potência para cada uma das regiões. Todavia, no caso do SEP estudado, por se tratar de uma topologia robusta, essa limitação do algoritmo não influenciou tanto nos resultados, uma vez que as partes isoladas do resto do sistema nos poucos cenários divergentes não tinham tamanho considerável.

Ressalta-se que o sistema de 118 barras ainda deve permanecer em estado de alerta após as ações de controle, pois ainda podem haver contingências que podem levá-lo ao estado de emergência, caso ocorram, seja de critério N-1 ou N-2. Contudo, uma vez que os limiares de geração, tensão e fluxo de potência já são respeitados no estado de alerta, o objetivo do trabalho de estudar o uso de limiares em um sistema de potência robusto foi cumprido.

A instalação de novas LT's e de capacitores *shunt* e o remanejamento de geração são melhorias que podem ser feitas em regime permanente para que o sistema opere no estado de segurança, sem a possibilidade de alguma contingência levar o sistema ao estado de emergência. Dentre tais melhorias, pode-se aplicar ações que foram encontradas para diversas contingências, tais como remanejamento de carga das Usinas 10 e 26 para usinas de menor porte, instalação de LT's entre as Barras 34 e 72 e entre as Barras 38 e 70 com parâmetros definidos pelo fabricante e instalação de bancos de capacitores *shunt* nas Barras 43, 44 e 45.

## REFERÊNCIAS

- AMERONGEN, R. A. M. A general-purpose version of the fast decoupled load flow. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 4, n. 2, p. 760–770, 1989.
- BORGES, C. L. T. **Análise de Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 45-46 p.
- CASTRO, C. A. **Formulação Básica do Problema de Fluxo de Carga**. Campinas: Universidade de Campinas, 2006. 17-22 p.
- CHRISTIE, R. **Power Systems Test Case Archive**. University of Washington, 1993. Disponível em: <<https://labs.ece.uw.edu/pstca/>>.
- EJEBE, G.; WOLLENBERG, B. Automatic contingency selection. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 98, n. 1, p. 97–101, 1979.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1994. 329-376 p.
- KAUR, S.; SINGH, A.; KHELA, R. S. Load flow analysis of ieee-3 bus system by using mipower software. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 4, n. 3, p. 9–16, 2015.
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: E. Blucher, 1983. 153-157 p. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Brasil).
- MOURA, A. P.; MOURA, A. F. Newton-raphson power flow with constant matrices: A comparison with decoupled power flow methods. **Electrical Power and Energy Systems**, p. 108–114, 2012.
- ONS. **Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos**. Rio de Janeiro, 2018. Submódulo 23.3, Revisão 2.
- OVERBYE, T. **PowerWorld**. Chicago: PowerWorld Corporation, 2023.
- PAI, M. **Computer Techniques in Power System Analysis**. 3. ed. Nova Delhi: McGraw-Hill, 1979.
- SEIFI, H.; SEPASIAN, M. S. **Electric Power System Planning**. 1. ed. Teerã: Springer, 2011. Apêndice A.
- STOTT, B. Review of load-flow calculation methods. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 7, p. 916–929, 1974.
- WOOD, A. J.; WOLLENBERG, B. F. **Power Generation, Operation and Control**. 2. ed. Nova York: John Wiley and Sons, 1996. 410-450 p.
- YANG, F.; QIU, R.; LING, Z.; HE, X.; YANG, H. Detection and analysis of multiple events based on high-dimensional factor models in power grid. **Energies**, v. 12, p. 1360, 2019.





|     |     |   |        |     |       |      |        |       |     |        |      |     |
|-----|-----|---|--------|-----|-------|------|--------|-------|-----|--------|------|-----|
| 71  | 64  | 3 | 0.0    | 0.0 | 0.0   | 0.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 72  | 65  | 2 | 391.0  | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -600.0 | 600.0 | 0.0 | 900.0  | 1.00 | 0   |
| 73  | 66  | 2 | 392.0  | 0.0 | 39.0  | 18.0 | -300.0 | 300.0 | 0.0 | 900.0  | 1.00 | 0   |
| 74  | 67  | 3 | 0.0    | 0.0 | 28.0  | 7.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 75  | 68  | 3 | 0.0    | 0.0 | 0.0   | 0.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 76  | 69  | 1 | 516.0  | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -100.0 | 100.0 | 0.0 | 1100.0 | 1.00 | 0   |
| 77  | 70  | 2 | 0.0    | 0.0 | 66.0  | 20.0 | -300.0 | 300.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 78  | 71  | 3 | 0.0    | 0.0 | 0.0   | 0.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 79  | 72  | 2 | -12.0  | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -100.0 | 100.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 80  | 73  | 2 | -6.0   | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -50.0  | 50.0  | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 81  | 74  | 2 | 0.0    | 0.0 | 68.0  | 27.0 | -150.0 | 150.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 82  | 75  | 3 | 0.0    | 0.0 | 47.0  | 11.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 83  | 76  | 2 | 0.0    | 0.0 | 68.0  | 36.0 | -150.0 | 150.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 84  | 77  | 2 | 0.0    | 0.0 | 61.0  | 28.0 | -300.0 | 300.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 85  | 78  | 3 | 0.0    | 0.0 | 71.0  | 26.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 86  | 79  | 3 | 0.0    | 0.0 | 39.0  | 32.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 87  | 80  | 2 | 477.0  | 0.0 | 130.0 | 26.0 | -250.0 | 250.0 | 0.0 | 900.0  | 1.00 | 0   |
| 88  | 81  | 3 | 0.0    | 0.0 | 0.0   | 0.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 89  | 82  | 3 | 0.0    | 0.0 | 54.0  | 27.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 90  | 83  | 3 | 0.0    | 0.0 | 20.0  | 10.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 91  | 84  | 3 | 0.0    | 0.0 | 11.0  | 7.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 92  | 85  | 2 | 0.0    | 0.0 | 24.0  | 15.0 | -150.0 | 150.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 93  | 86  | 3 | 0.0    | 0.0 | 21.0  | 10.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 94  | 87  | 2 | 0.0    | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -50.0  | 50.0  | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 95  | 88  | 3 | 0.0    | 0.0 | 48.0  | 10.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 96  | 89  | 2 | 607.0  | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -250.0 | 250.0 | 0.0 | 1100.0 | 1.00 | 0   |
| 97  | 90  | 2 | -85.0  | 0.0 | 78.0  | 42.0 | -250.0 | 250.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 98  | 91  | 2 | -10.0  | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -50.0  | 50.0  | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 99  | 92  | 2 | 0.0    | 0.0 | 65.0  | 10.0 | -150.0 | 150.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 100 | 93  | 3 | 0.0    | 0.0 | 12.0  | 7.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 101 | 94  | 3 | 0.0    | 0.0 | 30.0  | 16.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 102 | 95  | 3 | 0.0    | 0.0 | 42.0  | 31.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 103 | 96  | 3 | 0.0    | 0.0 | 38.0  | 15.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 104 | 97  | 3 | 0.0    | 0.0 | 15.0  | 9.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 105 | 98  | 3 | 0.0    | 0.0 | 34.0  | 8.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 106 | 99  | 2 | -42.0  | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -50.0  | 50.0  | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 107 | 100 | 2 | 252.0  | 0.0 | 37.0  | 18.0 | -50.0  | 50.0  | 0.0 | 450.0  | 1.00 | 0   |
| 108 | 101 | 3 | 0.0    | 0.0 | 22.0  | 15.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 109 | 102 | 3 | 0.0    | 0.0 | 5.0   | 3.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 110 | 103 | 2 | 40.0   | 0.0 | 23.0  | 16.0 | -100.0 | 100.0 | 0.0 | 100.0  | 1.00 | 0   |
| 111 | 104 | 2 | 0.0    | 0.0 | 38.0  | 25.0 | -100.0 | 100.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 112 | 105 | 2 | 0.0    | 0.0 | 31.0  | 26.0 | -150.0 | 150.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 113 | 106 | 3 | 0.0    | 0.0 | 43.0  | 16.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 114 | 107 | 2 | -22.0  | 0.0 | 28.0  | 12.0 | -100.0 | 100.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 115 | 108 | 3 | 0.0    | 0.0 | 2.0   | 1.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 116 | 109 | 3 | 0.0    | 0.0 | 8.0   | 3.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 117 | 110 | 2 | 0.0    | 0.0 | 39.0  | 30.0 | -100.0 | 100.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 118 | 111 | 2 | 36.0   | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -50.0  | 50.0  | 0.0 | 100.0  | 1.00 | 0   |
| 119 | 112 | 2 | -43.0  | 0.0 | 25.0  | 13.0 | -100.0 | 100.0 | 0.0 | 100.0  | 1.00 | 0   |
| 120 | 113 | 2 | -6.0   | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -50.0  | 50.0  | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 121 | 114 | 3 | 0.0    | 0.0 | 8.0   | 3.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 122 | 115 | 3 | 0.0    | 0.0 | 22.0  | 7.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 123 | 116 | 2 | -184.0 | 0.0 | 0.0   | 0.0  | -300.0 | 300.0 | 0.0 | 50.0   | 1.00 | 0   |
| 124 | 117 | 3 | 0.0    | 0.0 | 20.0  | 8.0  | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0   |
| 125 | 118 | 3 | 0.0    | 0.0 | 33.0  | 15.0 | 0.0    | 0.0   | 0.0 | 0.0    | 1.00 | 0]; |
| 126 |     |   |        |     |       |      |        |       |     |        |      |     |

% Tabela de dados de ramos:

| % Origem | Destino | R  | X       | B       | Tap     | Sn    | Sit   |   |
|----------|---------|----|---------|---------|---------|-------|-------|---|
| 129      | d1 = [1 | 2  | 0.03030 | 0.09990 | 0.02540 | 1     | 32.0  | 0 |
| 130      |         | 1  | 0.01290 | 0.04240 | 0.01082 | 1     | 65.0  | 0 |
| 131      |         | 4  | 0.00176 | 0.00798 | 0.00210 | 1     | 130.0 | 0 |
| 132      |         | 3  | 0.02410 | 0.10800 | 0.02840 | 1     | 90.0  | 0 |
| 133      |         | 5  | 0.01190 | 0.05400 | 0.01426 | 1     | 130.0 | 0 |
| 134      |         | 6  | 0.00459 | 0.02080 | 0.00550 | 1     | 65.0  | 0 |
| 135      |         | 8  | 0.00244 | 0.03050 | 1.16200 | 1     | 640.0 | 0 |
| 136      |         | 8  | 0.00000 | 0.02670 | 0.00000 | 0.985 | 450.0 | 0 |
| 137      |         | 9  | 0.00258 | 0.03220 | 1.23000 | 1     | 640.0 | 0 |
| 138      |         | 4  | 0.02090 | 0.06880 | 0.01748 | 1     | 130.0 | 0 |
| 139      |         | 5  | 0.02030 | 0.06820 | 0.01738 | 1     | 130.0 | 0 |
| 140      |         | 11 | 0.00595 | 0.01960 | 0.00502 | 1     | 90.0  | 0 |
| 141      |         | 2  | 0.01870 | 0.06160 | 0.01572 | 1     | 65.0  | 0 |
| 142      |         | 3  | 0.04840 | 0.16000 | 0.04060 | 1     | 65.0  | 0 |
| 143      |         | 7  | 0.00862 | 0.03400 | 0.00874 | 1     | 65.0  | 0 |

|     |    |    |         |         |         |       |       |   |
|-----|----|----|---------|---------|---------|-------|-------|---|
| 144 | 11 | 13 | 0.02225 | 0.07310 | 0.01876 | 1     | 65.0  | 0 |
| 145 | 12 | 14 | 0.02150 | 0.07070 | 0.01816 | 1     | 65.0  | 0 |
| 146 | 13 | 15 | 0.07440 | 0.24440 | 0.06268 | 1     | 65.0  | 0 |
| 147 | 14 | 15 | 0.05950 | 0.19500 | 0.05020 | 1     | 65.0  | 0 |
| 148 | 12 | 16 | 0.02120 | 0.08340 | 0.02140 | 1     | 130.0 | 0 |
| 149 | 15 | 17 | 0.01320 | 0.04370 | 0.04440 | 1     | 130.0 | 0 |
| 150 | 16 | 17 | 0.04540 | 0.18010 | 0.04660 | 1     | 130.0 | 0 |
| 151 | 17 | 18 | 0.01230 | 0.05050 | 0.01298 | 1     | 130.0 | 0 |
| 152 | 18 | 19 | 0.01119 | 0.04930 | 0.01142 | 1     | 65.0  | 0 |
| 153 | 19 | 20 | 0.02520 | 0.11700 | 0.02980 | 1     | 65.0  | 0 |
| 154 | 15 | 19 | 0.01200 | 0.03940 | 0.01010 | 1     | 65.0  | 0 |
| 155 | 20 | 21 | 0.01830 | 0.08490 | 0.02160 | 1     | 65.0  | 0 |
| 156 | 21 | 22 | 0.02090 | 0.09700 | 0.02460 | 1     | 65.0  | 0 |
| 157 | 22 | 23 | 0.03420 | 0.15900 | 0.04040 | 1     | 65.0  | 0 |
| 158 | 23 | 24 | 0.01350 | 0.04920 | 0.04980 | 1     | 300.0 | 0 |
| 159 | 23 | 25 | 0.01560 | 0.08000 | 0.08640 | 1     | 300.0 | 0 |
| 160 | 26 | 25 | 0.00000 | 0.03820 | 0.00000 | 0.960 | 300.0 | 0 |
| 161 | 25 | 27 | 0.03180 | 0.16300 | 0.17640 | 1     | 200.0 | 0 |
| 162 | 27 | 28 | 0.01913 | 0.08550 | 0.02160 | 1     | 65.0  | 0 |
| 163 | 28 | 29 | 0.02370 | 0.09430 | 0.02380 | 1     | 65.0  | 0 |
| 164 | 30 | 17 | 0.00000 | 0.03880 | 0.00000 | 0.960 | 300.0 | 0 |
| 165 | 8  | 30 | 0.00431 | 0.05040 | 0.51400 | 1     | 300.0 | 0 |
| 166 | 26 | 30 | 0.00799 | 0.08600 | 0.90800 | 1     | 300.0 | 0 |
| 167 | 17 | 31 | 0.04740 | 0.15630 | 0.03990 | 1     | 130.0 | 0 |
| 168 | 29 | 31 | 0.01080 | 0.03310 | 0.00830 | 1     | 130.0 | 0 |
| 169 | 23 | 32 | 0.03170 | 0.11530 | 0.11730 | 1     | 130.0 | 0 |
| 170 | 31 | 32 | 0.02980 | 0.09850 | 0.02510 | 1     | 65.0  | 0 |
| 171 | 27 | 32 | 0.02290 | 0.07550 | 0.01926 | 1     | 32.0  | 0 |
| 172 | 15 | 33 | 0.03800 | 0.12440 | 0.03194 | 1     | 130.0 | 0 |
| 173 | 19 | 34 | 0.07520 | 0.24700 | 0.06320 | 1     | 130.0 | 0 |
| 174 | 35 | 36 | 0.00224 | 0.01020 | 0.00268 | 1     | 65.0  | 0 |
| 175 | 35 | 37 | 0.01100 | 0.04970 | 0.01318 | 1     | 65.0  | 0 |
| 176 | 33 | 37 | 0.04150 | 0.14200 | 0.03660 | 1     | 130.0 | 0 |
| 177 | 34 | 36 | 0.00871 | 0.02680 | 0.00568 | 1     | 130.0 | 0 |
| 178 | 34 | 37 | 0.00256 | 0.00940 | 0.00984 | 1     | 200.0 | 0 |
| 179 | 38 | 37 | 0.00000 | 0.03750 | 0.00000 | 0.935 | 450.0 | 0 |
| 180 | 37 | 39 | 0.03210 | 0.10600 | 0.02700 | 1     | 130.0 | 0 |
| 181 | 37 | 40 | 0.05930 | 0.16800 | 0.04200 | 1     | 130.0 | 0 |
| 182 | 30 | 38 | 0.00464 | 0.05400 | 0.42200 | 1     | 200.0 | 0 |
| 183 | 39 | 40 | 0.01840 | 0.06050 | 0.01552 | 1     | 130.0 | 0 |
| 184 | 40 | 41 | 0.01450 | 0.04870 | 0.01222 | 1     | 130.0 | 0 |
| 185 | 40 | 42 | 0.05550 | 0.18300 | 0.04660 | 1     | 130.0 | 0 |
| 186 | 41 | 42 | 0.04100 | 0.13500 | 0.03440 | 1     | 130.0 | 0 |
| 187 | 43 | 44 | 0.06080 | 0.24540 | 0.06068 | 1     | 130.0 | 0 |
| 188 | 34 | 43 | 0.04130 | 0.16810 | 0.04226 | 1     | 130.0 | 0 |
| 189 | 44 | 45 | 0.02240 | 0.09010 | 0.02240 | 1     | 130.0 | 0 |
| 190 | 45 | 46 | 0.04000 | 0.13560 | 0.03320 | 1     | 65.0  | 0 |
| 191 | 46 | 47 | 0.03800 | 0.12700 | 0.03160 | 1     | 65.0  | 0 |
| 192 | 46 | 48 | 0.06010 | 0.18900 | 0.04720 | 1     | 32.0  | 0 |
| 193 | 47 | 49 | 0.01910 | 0.06250 | 0.01604 | 1     | 32.0  | 0 |
| 194 | 42 | 49 | 0.07150 | 0.32300 | 0.08600 | 1     | 300.0 | 0 |
| 195 | 42 | 49 | 0.07150 | 0.32300 | 0.08600 | 1     | 300.0 | 0 |
| 196 | 45 | 49 | 0.06840 | 0.18600 | 0.04440 | 1     | 65.0  | 0 |
| 197 | 48 | 49 | 0.01790 | 0.05050 | 0.01258 | 1     | 65.0  | 0 |
| 198 | 49 | 50 | 0.02670 | 0.07520 | 0.01874 | 1     | 130.0 | 0 |
| 199 | 49 | 51 | 0.04860 | 0.13700 | 0.03420 | 1     | 130.0 | 0 |
| 200 | 51 | 52 | 0.02030 | 0.05880 | 0.01396 | 1     | 130.0 | 0 |
| 201 | 52 | 53 | 0.04050 | 0.16350 | 0.04058 | 1     | 32.0  | 0 |
| 202 | 53 | 54 | 0.02630 | 0.12200 | 0.03100 | 1     | 32.0  | 0 |
| 203 | 49 | 54 | 0.07300 | 0.28900 | 0.07380 | 1     | 130.0 | 0 |
| 204 | 49 | 54 | 0.08690 | 0.29100 | 0.07300 | 1     | 130.0 | 0 |
| 205 | 54 | 55 | 0.01690 | 0.07070 | 0.02020 | 1     | 16.0  | 0 |
| 206 | 54 | 56 | 0.00275 | 0.00955 | 0.00732 | 1     | 32.0  | 0 |
| 207 | 55 | 56 | 0.00488 | 0.01510 | 0.00374 | 1     | 65.0  | 0 |
| 208 | 56 | 57 | 0.03430 | 0.09660 | 0.02420 | 1     | 65.0  | 0 |
| 209 | 50 | 57 | 0.04740 | 0.13400 | 0.03320 | 1     | 65.0  | 0 |
| 210 | 56 | 58 | 0.03430 | 0.09660 | 0.02420 | 1     | 32.0  | 0 |
| 211 | 51 | 58 | 0.02550 | 0.07190 | 0.01788 | 1     | 32.0  | 0 |
| 212 | 54 | 59 | 0.05030 | 0.22930 | 0.05980 | 1     | 65.0  | 0 |
| 213 | 56 | 59 | 0.08250 | 0.25100 | 0.05690 | 1     | 65.0  | 0 |
| 214 | 56 | 59 | 0.08030 | 0.23900 | 0.05360 | 1     | 65.0  | 0 |
| 215 | 55 | 59 | 0.04739 | 0.21580 | 0.05646 | 1     | 130.0 | 0 |
| 216 | 59 | 60 | 0.03170 | 0.14500 | 0.03760 | 1     | 130.0 | 0 |

|     |     |     |         |         |         |       |       |   |
|-----|-----|-----|---------|---------|---------|-------|-------|---|
| 217 | 59  | 61  | 0.03280 | 0.15000 | 0.03880 | 1     | 130.0 | 0 |
| 218 | 60  | 61  | 0.00264 | 0.01350 | 0.01456 | 1     | 200.0 | 0 |
| 219 | 60  | 62  | 0.01230 | 0.05610 | 0.01468 | 1     | 32.0  | 0 |
| 220 | 61  | 62  | 0.00824 | 0.03760 | 0.00980 | 1     | 65.0  | 0 |
| 221 | 63  | 59  | 0.00000 | 0.03860 | 0.00000 | 0.960 | 300.0 | 0 |
| 222 | 63  | 64  | 0.00172 | 0.02000 | 0.21600 | 1     | 300.0 | 0 |
| 223 | 64  | 61  | 0.00000 | 0.02680 | 0.00000 | 0.985 | 130.0 | 0 |
| 224 | 38  | 65  | 0.00901 | 0.09860 | 1.04600 | 1     | 300.0 | 0 |
| 225 | 64  | 65  | 0.00269 | 0.03020 | 0.38000 | 1     | 300.0 | 0 |
| 226 | 49  | 66  | 0.01800 | 0.09190 | 0.02480 | 1     | 450.0 | 0 |
| 227 | 49  | 66  | 0.01800 | 0.09190 | 0.02480 | 1     | 450.0 | 0 |
| 228 | 62  | 66  | 0.04820 | 0.21800 | 0.05780 | 1     | 65.0  | 0 |
| 229 | 62  | 67  | 0.02580 | 0.11700 | 0.03100 | 1     | 65.0  | 0 |
| 230 | 65  | 66  | 0.00000 | 0.03700 | 0.00000 | 0.935 | 300.0 | 0 |
| 231 | 66  | 67  | 0.02240 | 0.10150 | 0.02682 | 1     | 300.0 | 0 |
| 232 | 65  | 68  | 0.00138 | 0.01600 | 0.63800 | 1     | 300.0 | 0 |
| 233 | 47  | 69  | 0.08440 | 0.27780 | 0.07092 | 1     | 130.0 | 0 |
| 234 | 49  | 69  | 0.09850 | 0.32400 | 0.08280 | 1     | 130.0 | 0 |
| 235 | 68  | 69  | 0.00000 | 0.03700 | 0.00000 | 0.935 | 200.0 | 0 |
| 236 | 69  | 70  | 0.03000 | 0.12700 | 0.12200 | 1     | 200.0 | 0 |
| 237 | 24  | 70  | 0.00221 | 0.41150 | 0.10198 | 1     | 130.0 | 0 |
| 238 | 70  | 71  | 0.00882 | 0.03550 | 0.00878 | 1     | 130.0 | 0 |
| 239 | 24  | 72  | 0.04880 | 0.19600 | 0.04880 | 1     | 130.0 | 0 |
| 240 | 71  | 72  | 0.04460 | 0.18000 | 0.04444 | 1     | 130.0 | 0 |
| 241 | 71  | 73  | 0.00866 | 0.04540 | 0.01178 | 1     | 32.0  | 0 |
| 242 | 70  | 74  | 0.04010 | 0.13230 | 0.03368 | 1     | 32.0  | 0 |
| 243 | 70  | 75  | 0.04280 | 0.14100 | 0.03600 | 1     | 130.0 | 0 |
| 244 | 69  | 75  | 0.04050 | 0.12200 | 0.12400 | 1     | 200.0 | 0 |
| 245 | 74  | 75  | 0.01230 | 0.04060 | 0.01034 | 1     | 130.0 | 0 |
| 246 | 76  | 77  | 0.04440 | 0.14800 | 0.03680 | 1     | 130.0 | 0 |
| 247 | 69  | 77  | 0.03090 | 0.10100 | 0.10380 | 1     | 130.0 | 0 |
| 248 | 75  | 77  | 0.06010 | 0.19990 | 0.04978 | 1     | 65.0  | 0 |
| 249 | 77  | 78  | 0.00376 | 0.01240 | 0.01264 | 1     | 130.0 | 0 |
| 250 | 78  | 79  | 0.00546 | 0.02440 | 0.00648 | 1     | 130.0 | 0 |
| 251 | 77  | 80  | 0.01700 | 0.04850 | 0.04720 | 1     | 130.0 | 0 |
| 252 | 77  | 80  | 0.02940 | 0.10500 | 0.02280 | 1     | 200.0 | 0 |
| 253 | 79  | 80  | 0.01560 | 0.07040 | 0.01870 | 1     | 130.0 | 0 |
| 254 | 68  | 81  | 0.00175 | 0.02020 | 0.80800 | 1     | 300.0 | 0 |
| 255 | 81  | 80  | 0.00000 | 0.03700 | 0.00000 | 0.935 | 200.0 | 0 |
| 256 | 77  | 82  | 0.02980 | 0.08530 | 0.08174 | 1     | 65.0  | 0 |
| 257 | 82  | 83  | 0.01120 | 0.03665 | 0.03796 | 1     | 65.0  | 0 |
| 258 | 83  | 84  | 0.06250 | 0.13200 | 0.02580 | 1     | 65.0  | 0 |
| 259 | 83  | 85  | 0.04300 | 0.14800 | 0.03480 | 1     | 65.0  | 0 |
| 260 | 84  | 85  | 0.03020 | 0.06410 | 0.01234 | 1     | 65.0  | 0 |
| 261 | 85  | 86  | 0.03500 | 0.12300 | 0.02760 | 1     | 32.0  | 0 |
| 262 | 86  | 87  | 0.02828 | 0.20740 | 0.04450 | 1     | 32.0  | 0 |
| 263 | 85  | 88  | 0.02000 | 0.10200 | 0.02760 | 1     | 65.0  | 0 |
| 264 | 85  | 89  | 0.02390 | 0.17300 | 0.04700 | 1     | 130.0 | 0 |
| 265 | 88  | 89  | 0.01390 | 0.07120 | 0.01934 | 1     | 130.0 | 0 |
| 266 | 89  | 90  | 0.05180 | 0.18800 | 0.05280 | 1     | 300.0 | 0 |
| 267 | 89  | 90  | 0.02380 | 0.09970 | 0.10600 | 1     | 300.0 | 0 |
| 268 | 90  | 91  | 0.02540 | 0.08360 | 0.02140 | 1     | 16.0  | 0 |
| 269 | 89  | 92  | 0.00990 | 0.05050 | 0.05480 | 1     | 450.0 | 0 |
| 270 | 89  | 92  | 0.03930 | 0.15810 | 0.04140 | 1     | 450.0 | 0 |
| 271 | 91  | 92  | 0.03870 | 0.12720 | 0.03268 | 1     | 16.0  | 0 |
| 272 | 92  | 93  | 0.02580 | 0.08480 | 0.02180 | 1     | 90.0  | 0 |
| 273 | 92  | 94  | 0.04810 | 0.15800 | 0.04060 | 1     | 90.0  | 0 |
| 274 | 93  | 94  | 0.02230 | 0.07320 | 0.01876 | 1     | 90.0  | 0 |
| 275 | 94  | 95  | 0.01320 | 0.04340 | 0.01110 | 1     | 65.0  | 0 |
| 276 | 80  | 96  | 0.03560 | 0.18200 | 0.04940 | 1     | 65.0  | 0 |
| 277 | 82  | 96  | 0.01620 | 0.05300 | 0.05440 | 1     | 65.0  | 0 |
| 278 | 94  | 96  | 0.02690 | 0.08690 | 0.02300 | 1     | 32.0  | 0 |
| 279 | 80  | 97  | 0.01830 | 0.09340 | 0.02540 | 1     | 32.0  | 0 |
| 280 | 80  | 98  | 0.02380 | 0.10800 | 0.02860 | 1     | 32.0  | 0 |
| 281 | 80  | 99  | 0.04540 | 0.20600 | 0.05460 | 1     | 32.0  | 0 |
| 282 | 92  | 100 | 0.06480 | 0.29500 | 0.04720 | 1     | 65.0  | 0 |
| 283 | 94  | 100 | 0.01780 | 0.05800 | 0.06040 | 1     | 65.0  | 0 |
| 284 | 95  | 96  | 0.01710 | 0.05470 | 0.01474 | 1     | 32.0  | 0 |
| 285 | 96  | 97  | 0.01730 | 0.08850 | 0.02400 | 1     | 16.0  | 0 |
| 286 | 98  | 100 | 0.03970 | 0.17900 | 0.04760 | 1     | 16.0  | 0 |
| 287 | 99  | 100 | 0.01800 | 0.08130 | 0.02160 | 1     | 32.0  | 0 |
| 288 | 100 | 101 | 0.02770 | 0.12620 | 0.03280 | 1     | 32.0  | 0 |
| 289 | 92  | 102 | 0.01230 | 0.05590 | 0.01464 | 1     | 65.0  | 0 |

```

290     101 102    0.02460    0.11200    0.02940    1      65.0    0
291     100 103    0.01600    0.05250    0.05360    1     200.0    0
292     100 104    0.04510    0.20400    0.05410    1     130.0    0
293     103 104    0.04660    0.15840    0.04070    1      65.0    0
294     103 105    0.05350    0.16250    0.04080    1      65.0    0
295     100 106    0.06050    0.22900    0.06200    1     130.0    0
296     104 105    0.00994    0.03780    0.00986    1     130.0    0
297     105 106    0.01400    0.05470    0.01434    1      65.0    0
298     105 107    0.05300    0.18300    0.04720    1      65.0    0
299     105 108    0.02610    0.07030    0.01844    1      65.0    0
300     106 107    0.05300    0.18300    0.04720    1      32.0    0
301     108 109    0.01050    0.02880    0.00760    1      32.0    0
302     103 110    0.03906    0.18130    0.04610    1     130.0    0
303     109 110    0.02780    0.07620    0.02020    1      32.0    0
304     110 111    0.02200    0.07550    0.02000    1      65.0    0
305     110 112    0.02470    0.06400    0.06200    1     130.0    0
306      17 113    0.00913    0.03010    0.00768    1     130.0    0
307      32 113    0.06150    0.20300    0.05180    1     130.0    0
308      32 114    0.01350    0.06120    0.01628    1      32.0    0
309      27 115    0.01640    0.07410    0.01972    1      32.0    0
310     114 115    0.00230    0.01040    0.00276    1      32.0    0
311      68 116    0.00034    0.00405    0.16400    1     450.0    0
312      12 117    0.03290    0.14000    0.03580    1      32.0    0
313      75 118    0.01450    0.04810    0.01198    1      65.0    0
314      76 118    0.01640    0.05440    0.01356    1      65.0    0];
315
316 % Dados gerais do SEP:
317 Sb = 100; % Potencia de base
318 Vr = [0.95 1.05]; % Limites de tensao
319 [n_linhas , n_colunas] = size(d1); % Dimensoes da tabela de dados das linhas

```

## APÊNDICE B – ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA

```

1 % fluxo_de_potencia.m
2
3 % Obtencao de dados do sistema:
4 barra = bd(:,1); % Numeros que identificam as barras
5 n_barras = max(barra); % Numero de barras do sistema
6 tipo = bd(:,2); % Tipo de barra
7 Pg = bd(:,3)/Sb; % Potencia ativa gerada em pu
8 Qg = bd(:,4)/Sb; % Potencia reativa gerada em pu
9 Pl = bd(:,5)/Sb; % Potencia ativa de carga em pu
10 Ql = bd(:,6)/Sb; % Potencia reativa de carga em pu
11 Qgmin = bd(:,7)/Sb; % Limite minimo de potencia reativa
12 Qgmax = bd(:,8)/Sb; % Limite maximo de potencia reativa
13 Pgmin = bd(:,9)/Sb; % Limite minimo de potencia ativa
14 Pgmax = bd(:,10)/Sb; % Limite maximo de potencia ativa
15 Vi = bd(:,11); % Tensao inicial especificada
16 theta = bd(:,12).'; % Angulo da tensao
17 f1 = find(tipo == 1); % Identificacao da barra de referencia
18 f2 = find(tipo == 2); % Identificacao das barras do tipo PV
19 f3 = find(tipo == 3); % Identificacao das barras do tipo PQ
20 barra_origem = dl(:,1).'; % Barra de origem da linha
21 bus1 = barra_origem; % Barra de origem da linha (pode ser modificada)
22 barra_destino = dl(:,2).'; % Barra de destino da linha
23 bus2 = barra_destino; % Barra de destino da linha (pode ser modificada)
24 Sn = dl(:,7).'; % Limite para sobrecarga
25 barra_ref = f1'; % Barra de referencia
26 barras_PV = f2'; % Vetor das barras PV recebe vazio
27 barras_PQ = f3'; % Vetor das barras PQ recebe vazio
28 NPV = length(barras_PV); % Numero de barras PV.
29 NPQ = length(barras_PQ); % Numero de barras PQ
30 barras_PVPQ = sort([barras_PQ barras_PV]); % Indices dos angulos theta a serem encontrados
31 barras_refPV = sort([barra_ref barras_PV]); % Indices das barras de referencia e PV
32
33 % Pre-alocacao de memoria:
34 J = zeros(2*NPQ+NPV,2*NPQ+NPV); % Matriz Jacobiana
35 Ybus = zeros(n_barras, n_barras); % Matriz das admitancia nas barras
36 bsh = zeros(n_barras, n_barras); % Matriz da susceptancia nas barras
37 H = zeros(n_barras, n_barras); % Acoplamento da potencia ativa com o angulo theta
38 M = zeros(n_barras, n_barras); % Acoplamento da potencia reativa com o angulo theta
39 N = zeros(n_barras, n_barras); % Acoplamento da potencia ativa com a tensao V
40 L = zeros(n_barras, n_barras); % Acoplamento da potencia reativa com a tensao V
41 Pcal = zeros(n_barras, n_barras); % Potencia ativa a ser calculada
42 Qcal = zeros(n_barras, n_barras); % Potencia reativa a ser calculada
43 Pf = zeros(n_barras, n_barras); % Fluxo de potencia ativa
44 Qf = zeros(n_barras, n_barras); % Fluxo de potencia reativa
45 Ppl = zeros(n_barras, n_barras); % Perda de potencia ativa na linha
46 Qpl = zeros(n_barras, n_barras); % Perda de potencia reativa na linha
47 Pc = zeros(1, n_barras); % Vetor da potencia ativa presente na barra
48 Qc = zeros(1, n_barras); % Vetor da potencia reativa presente na barra
49 deltaP = zeros(1, n_barras); % Vetor da variacao da potencia ativa durante as iteracoes
50 deltaQ = zeros(1, n_barras); % Vetor da variacao da potencia reativa durante as iteracoes
51 aux = zeros(2, n_barras+1); % Variavel auxiliar para testar se existe barra em paralelo
52 bb1 = zeros(n_barras, n_barras); % Cria uma matriz de zeros de n_barras por n_barras
53 bb2 = zeros(n_barras, n_barras); % Cria uma matriz de zeros de n_barras por n_barras
54
55 % Verifica se alguma linha foi perdida:
56 for k=1:n_linhas
57     if dl(k,8)==1 % Caso a linha tenha sido removida, a impedancia recebe um valor
58         % que tende ao infinito, pois e um circuito aberto
59         dl(k,3)=100000;
60         dl(k,4)=100000;
61         dl(k,5)=0;
62         bus1(k)=0; % Origem da linha guarda 0
63         bus2(k)=0; % Destino da linha guarda 0
64     end
65 end
66
67 % Zera as potencias iniciais caso alguma barra tenha sido perdida com a remocao de linhas:
68 uni_bus = union(bus1(bus1~=0), bus2(bus2~=0));
69 bp = setdiff(bd(:,1), uni_bus);
70 for k=1:length(bp)

```

```

71     u = bp(k);
72     Pg(u) = 0; Qg(u) = 0; Pl(u) = 0; Ql(u) = 0;
73 end
74
75 % Construcao da matriz de admitancias:
76 for i=1:n_linhas
77     k = dl(i,1); % Barra de origem
78     m = dl(i,2); % Barra de destino
79     z = dl(i,3)+(dl(i,4)*1j); % Impedancia da linha
80     bsh = (dl(i,5)*1j)/2; % Susceptancia shunt da barra
81     tap = dl(i,6); % Tap variavel
82     Y = 1/z; % Admitancia da linha
83     Ybus(k,k) = Ybus(k,k) + Y * tap^2 + bsh; % Diagonal principal
84     Ybus(m,m) = Ybus(m,m) + Y + bsh; % Diagonal principal
85     Ybus(k,m) = Ybus(k,m) - Y * tap; % Diagonal secundaria
86     Ybus(m,k) = Ybus(m,k) - Y * tap; % Diagonal secundaria
87 end
88 G = real(Ybus); % Condutancia
89 B = imag(Ybus); % Susceptancia
90
91 % Vetor das tensoes iniciais especificadas e arbitradas:
92 V = Vi'; % Tensao inicial especificada
93 V(barras_PQ) = cos(theta(barras_PQ)); % Valor inicial para tensao nao especificada
94 for k=1:n_barras
95     for m=1:n_barras
96         % Equacao para potencia ativa Pc a ser calculada:
97         Pcal(k,m) = V(m)*(G(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)) + B(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)));
98         % Equacao para potencia reativa Qc a ser calculada:
99         Qcal(k,m) = V(m)*(G(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)) - B(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)));
100     end
101     Pc(k) = V(k)*sum(Pcal(k,:)); % Potencia ativa calculada com theta e V inicializados
102     Qc(k) = V(k)*sum(Qcal(k,:)); % Potencia reativa calculada com theta e V inicializados
103     deltaP(k) = Pg(k) - Pl(k) - Pc(k); % Variacao da pot. ativa em funcao de V e theta
104     deltaQ(k) = Qg(k) - Ql(k) - Qc(k); % Variacao da pot. reativa em funcao de V e theta
105 end
106
107 toler = 1e-3; % Tolerancia para continuar as iteracoes
108 c = 0; % Contador do numero de iteracoes
109 % Vetor com as variacoes de potencia ativa e reativa:
110 delta_PQ(1:2*NPQ+NPV,1) = [deltaP(barras_PVPQ) deltaQ(barras_PQ)]';
111 % Vetor com os angulos theta e tensao V:
112 theta_V(1:2*NPQ+NPV,1) = [theta(barras_PVPQ) V(barras_PQ)]';
113
114 while (max(abs(delta_PQ))>toler) % Enquanto o maximo valor em modulo for maior que a toler
115     for k=1:n_barras
116         for m=1:n_barras
117             % Equacao para potencia ativa Pc a ser calculada:
118             Pcal(k,m) = V(m)*(G(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)) +
119                 B(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)));
119             % Equacao para potencia reativa Qc a ser calculada:
120             Qcal(k,m) = V(m)*(G(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)) -
121                 B(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)));
122             % Acoplamentos para a matriz Jacobiana:
123             H(k,m) = V(k)*V(m)*(G(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)) -
124                 B(k,m)*cos(theta(k)-theta(m))); % dP_k / dtheta_m
125             N(k,m) = V(k)*(G(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)) +
126                 B(k,m)*sin(theta(k)-theta(m))); % dP_k / dV_m
127             M(k,m) = -V(k)*V(m)*(G(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)) +
128                 B(k,m)*sin(theta(k)-theta(m))); % dQ_k / dtheta_m
129             L(k,m) = V(k)*(G(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)) -
130                 B(k,m)*cos(theta(k)-theta(m))); % dQ_k / dV_m
131         end
132         Pc(k) = V(k)*sum(Pcal(k,:)); % Potencia ativa calculada com theta e V atualizados
133         Qc(k) = V(k)*sum(Qcal(k,:)); % Potencia reativa calculada com theta e V atualizados
134         deltaP(k) = Pg(k)-Pl(k)-Pc(k); % Variacao da potencia ativa em funcao de V e theta
135         deltaQ(k) = Qg(k)-Ql(k)-Qc(k); % Variacao da potencia reativa em funcao de V e theta
136         H(k,k) = - Qc(k) - B(k,k)*V(k)^2; % dP_k/dtheta_k
137         N(k,k) = V(k) \ (Pc(k) + G(k,k)*V(k)^2); % dP_k/dV_k
138         M(k,k) = Pc(k) - G(k,k)*V(k)^2; % dQ_k/dtheta_k
139         L(k,k) = V(k) \ (Qc(k) - B(k,k)*V(k)^2); % dQ_k/dV_k
140     end
141 end
142 % Construcao da Jacobiana a partir dos vetores que identificam os tipos de barra:
143 J(1:NPQ+NPV,1:NPQ+NPV) = H(barras_PVPQ, barras_PVPQ); % Acoplamento P_theta

```

```

144 J(1:NPQ+NPV,1+NPQ+NPV:2*NPQ+NPV) = N(barras_PVPQ, barras_PQ); % Acoplamento P_V
145 J(1+NPQ+NPV:2*NPQ+NPV,1:NPQ+NPV) = M(barras_PQ, barras_PVPQ); % Acoplamento Q_theta
146 J(1+NPQ+NPV:2*NPQ+NPV,1+NPQ+NPV:2*NPQ+NPV) = L(barras_PQ, barras_PQ); % Acoplamento Q_V
147 % Vetor com as variacoes de potencia ativa e reativa:
148 delta_PQ(1:2*NPQ+NPV,1) = [deltaP(barras_PVPQ) deltaQ(barras_PQ)]';
149 delta_PQ = delta_PQ + 10^-7; % Para evitar problemas de escalonamento
150 delta_thetaV = J\delta_PQ; % Calculo do vetor de incremento do angulo theta e tensao V
151 theta_V = theta_V+delta_thetaV; % Matriz atualizada com tensao (pu) e angulo (radianos)
152 theta(barras_PVPQ) = theta_V(1:NPQ+NPV);
153 V(barras_PQ) = theta_V(1+NPQ+NPV:2*NPQ+NPV);
154 c = c + 1;
155 if c>50
156     break % Estabelece o maximo de 50 iteracoes
157 end
158 end
159 for i=1:n_linhas
160     k = dl(i,1); % Origem
161     m = dl(i,2); % Destino
162     bsh = dl(i,5); % Susceptancia shunt da barra
163     % Fluxo de potencia ativa da barra K para barra M:
164     Pf(k,m) = -G(k,m)*V(k)^2 + G(k,m)*V(k)*V(m)*cos(theta(k)-theta(m)) +
165     B(k,m)*V(k)*V(m)*sin(theta(k)-theta(m));
166     % Fluxo de potencia ativa da barra M para barra K:
167     Pf(m,k) = -G(k,m)*V(m)^2 + G(k,m)*V(k)*V(m)*cos(theta(k)-theta(m)) -
168     B(k,m)*V(k)*V(m)*sin(theta(k)-theta(m));
169     % Fluxo de potencia reativa da barra K para barra M:
170     Qf(k,m) = -V(k)^2*(-B(k,m) + bsh*0.5) - B(k,m)*V(k)*V(m)*cos(theta(k)-theta(m)) +
171     G(k,m)*V(k)*V(m)*sin(theta(k)-theta(m));
172     % Fluxo de potencia reativa da barra M para barra K:
173     Qf(m,k) = -V(m)^2*(-B(k,m) + bsh*0.5) - B(k,m)*V(k)*V(m)*cos(theta(k)-theta(m)) -
174     G(k,m)*V(k)*V(m)*sin(theta(k)-theta(m));
175
176     % Perda de potencia ativa e reativa na linha:
177     Ppl(k,m) = Pf(k,m) + Pf(m,k); Qpl(k,m) = Qf(k,m) + Qf(m,k);
178 end
179 for k=1:n_barras
180     for m=1:n_barras
181         % Equacao para potencia ativa Pc a ser calculada:
182         Pcal(k,m) = V(m)*(G(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)) + B(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)));
183         % Equacao para potencia reativa Qc a ser calculada:
184         Qcal(k,m) = V(m)*(G(k,m)*sin(theta(k)-theta(m)) - B(k,m)*cos(theta(k)-theta(m)));
185     end
186     Pc(k) = V(k)*sum(Pcal(k,:)); % Potencia ativa calculada com theta e V atualizados
187     Qc(k) = V(k)*sum(Qcal(k,:)); % Potencia reativa calculada com theta e V atualizados
188
189     Pg(k) = Pc(k) + Pl(k); % Potencia ativa gerada
190     Qg(k) = Qc(k) + Ql(k); % Potencia reativa gerada
191 end
192
193 g=find(dl(:,8)==1); % Encontra as linhas perdidas
194 if g~=0 % Caso haja alguma linha perdida
195     % Origem e destino das linhas perdidas:
196     r1=barra_origem(g);
197     r2=barra_destino(g);
198
199     Pf(r1,r2)=0; Qf(r1,r2)=0; % Garante que nao haja fluxo de carga nas linhas perdidas
200     Pf(r2,r1)=0; Qf(r2,r1)=0;
201     Ppl(r1,r2)=0; Qpl(r1,r2)=0;
202 end
203 for k=1:length(bp)
204     u = bp(k);
205     V(u) = 0; theta(u) = 0; % Zera a tensao das barras perdidas
206 end

```

## APÊNDICE C – IMPRESSÃO DE RESULTADOS DE FLUXO DE POTÊNCIA

```

1 % relatorio_potencia_fluxo.m
2 run('dados.m'); % Realiza a leitura dos dados do sistema
3 run('fluxo_de_potencia.m'); % Executa o fluxo de potencia
4
5 fprintf('FLUXO DE CARGA\n\nNo iteracoes: %d\n', c) % Imprime o numero de iteracoes
6
7 % Geracao de potencia nos geradores:
8 fprintf('\n1. Geracao de potencia nos geradores:\n');
9 fprintf('\n Gerador      MW      MVAR\n');
10
11 for k=1:n_barras
12     if bd(k,2)~=3 && V(k)~=0 % Para eliminar as barras PQ e as barras perdidas
13         fprintf(' %3d %10.4f %9.4f \n', k, Pg(k)*Sb, Qg(k)*Sb)
14     end
15 end
16
17 % Verifica se as potencias geradas estao dentro dos limites dados:
18 for k=1:n_barras
19     if bd(k,2)~=3 && V(k)~=0
20         if Pg(k)>Pgmax(k)
21             fprintf('\nA potencia ativa gerada em %d esta acima do limite maximo.\n', k)
22         elseif Pg(k)<Pgmin(k)
23             fprintf('\nA potencia ativa gerada em %d esta abaixo do limite minimo.\n', k)
24         elseif Qg(k)>Qgmax(k)
25             fprintf('\nA potencia reativa gerada em %d esta acima do limite maximo.\n', k)
26         elseif Qg(k)<Qgmin(k)
27             fprintf('\nA potencia reativa gerada em %d esta abaixo do limite minimo.\n', k)
28         end
29     end
30 end
31
32 % Tensoes nas barras:
33 fprintf('\n2. Tensoes nodais em pu:\n');
34 fprintf('\n Barra      Modulo      Angulo      Limites\n');
35 for k=1:n_barras
36     if V(k)~=0 % Se a barra nao tiver sido perdida
37         if V(k)<min(Vr) || V(k)>max(Vr) % Verifica se as tensoes estao dentro dos limites
38             fprintf(' %3d %9.4f %9.2f      fora \n', k, V(k), theta(k)*180/pi)
39         else
40             fprintf(' %3d %9.4f %9.2f      dentro \n', k, V(k), theta(k)*180/pi)
41         end
42     end
43 end
44
45 for k=1:n_barras % Calculo da potencia aparente em MVA que representa o fluxo
46     for m=1:n_barras
47         Sf(k,m)=sqrt((Pf(k,m))^2+(Qf(k,m))^2)*Sb;
48     end
49 end
50
51 idx1 = sub2ind(size(bb1), barra_origem, barra_destino);
52 Sf1 = Sf(idx1); % Fluxo de potencia aparente da barra K para a barra M
53 idx2 = sub2ind(size(bb2), barra_destino, barra_origem);
54 Sf2 = Sf(idx2); % Fluxo de potencia aparente da barra M para a barra K
55
56 % Capacidade de fluxo nas linhas:
57 for k=1:n_linhas
58     a(k)=100*(Sf1(k)/Sn(k));
59     b(k)=100*(Sf2(k)/Sn(k));
60 end
61
62 % Capacidade das linhas nos sentidos K-M e M-K:
63 bb1(idx1)=a;
64 bb2(idx2)=b;
65
66 fprintf('\n3. Fluxo de potencia nas linhas, de K para M:\n');
67 fprintf('\n De      Para      MW      MVAR      Cap. percentual      Situacao\n');
68 for k=1:n_barras
69     for m=1:n_barras
70         if bb1(k,m)~=0

```



```

71         if bb1(k,m)<100
72             fprintf(' %3d %6d %11.4f %9.4f %9.2f%%           equilibrio \n',
73                 k, m, Pf(k,m)*Sb, Qf(k,m)*Sb, bb1(k,m))
74         else
75             fprintf(' %3d %6d %11.4f %9.4f %9.2f%%           ~sobrecarga \n',
76                 k, m, Pf(k,m)*Sb, Qf(k,m)*Sb, bb1(k,m))
77         end
78     end
79 end
80
81 fprintf('\n4. Fluxo de potencia nas linhas , de M para K:\n');
82 fprintf('\n De Para MW MVar Cap. percentual Situacao\n');
83 for k=1:n_barras
84     for m=1:n_barras
85         if bb2(k,m)~=0
86             if bb2(k,m)<100
87                 fprintf(' %3d %6d %11.4f %9.4f %9.2f%%           equilibrio \n',
88                     k, m, Pf(k,m)*Sb, Qf(k,m)*Sb, bb2(k,m))
89             else
90                 fprintf(' %3d %6d %11.4f %9.4f %9.2f%%           ~sobrecarga \n',
91                     k, m, Pf(k,m)*Sb, Qf(k,m)*Sb, bb2(k,m))
92             end
93         end
94     end
95 end
96 fprintf('\n5. Perda de potencia nas linhas de transmissao:\n');
97 fprintf('\n Linha MW MVar\n');
98 for k=1:n_barras
99     for m=1:n_barras
100         if Ppl(k,m)~=0 || Qpl(k,m)~=0
101             fprintf(' %3d-%2d %9.4f %9.4f \n', k, m, Ppl(k,m)*Sb, Qpl(k,m)*Sb)
102         end
103     end
104 end

```

## APÊNDICE D – FUNÇÃO PARA CRITÉRIO N-1

```

1  % contingencias.m
2
3  function [PIp, PIv] = contingencias(ld1) % Funcao que recebe uma combinacao de status das
4                                     % linhas e retorna os indices de performance
5
6  run('dados.m'); % Realiza a leitura dos dados do sistema
7
8  dl(ld1,8) = 1; % Desativa a linha na coluna de situacao da matriz de dados das LT's
9
10 run('fluxo_de_potencia.m'); % Executa o fluxo de potencia
11
12 PIp = 0; PIv = 0; % Contadores para os somatorios dos indices de potencia e tensao
13
14 % Calculo do indice de performance de potencia:
15 for i=1:n_linhas
16     if dl(i,8)==0 % Se a linha nao estiver desativada
17         k = dl(i,1); % Origem da linha
18         m = dl(i,2); % Destino da linha
19         X = dl(i,4); % Reatancia da linha
20         % O fluxo de potencia ativa considerado deve ser o da linha de maior tensao para a
21         % de menor tensao:
22         if V(k)>V(m)
23             Pl_max = (V(k)*V(m))/X; % Potencia maxima da linha
24             PIp = PIp + ((Pf(k,m)/Pl_max)^2)/2; % Indice de performance
25         elseif V(m)>V(k)
26             Pl_max = (V(m)*V(k))/X;
27             PIp = PIp + ((Pf(m,k)/Pl_max)^2)/2;
28         end
29     end
30 end
31
32 % Desvio limite de tensao:
33 deltaVi = 0.075;
34
35 % Calculo do indice de performance de tensao:
36 for i=1:n_barras
37     if V(i)~=0
38         % Caso haja algum gerador fora dos limites de potencia reativa:
39         if bd(i,2)~=3 && Qg(i)>Qgmax(i)
40             PIv = PIv + (((abs(V(i))-abs(Vi(i)))/deltaVi)^2)/2 + ((Qg(i)/Qgmax(i))^2)/2;
41         elseif bd(i,2)~=3 && Qg(i)<Qgmin(i)
42             PIv = PIv + (((abs(V(i))-abs(Vi(i)))/deltaVi)^2)/2 + ((Qg(i)/Qgmin(i))^2)/2;
43         else
44             PIv = PIv + (((abs(V(i))-abs(Vi(i)))/deltaVi)^2)/2;
45         end
46     end
47 end
48
49 % Desconsidera cenarios com muitas iteracoes, para evitar possiveis casos de
50 % nao-convergencia do algoritmo:
51 if c>=50
52     PIp=0;
53     PIv=0;
54 end
55 end

```

## APÊNDICE E – FUNÇÃO PARA CRITÉRIO N-2

```

1  % contingencias2.m
2
3  % Funcao que recebe um par de numeracoes de linhas perdidas e retorna os indices de
4  % performance
5  function [PIp, PIVq] = contingencias2(ld21,ld22)
6
7  run('dados.m'); % Realiza a leitura dos dados do sistema
8  % Desativa as linhas na coluna de situacao da matriz de dados das LT's:
9  dl(ld21,8) = 1; dl(ld22,8) = 1;
10 run('fluxo_de_potencia.m'); % Executa o fluxo de potencia
11 % Contadores para auxiliar nos somatorios dos indices de potencia e tensao:
12 PIp = 0; PIVq = 0;
13
14 % Calculo do indice de performance de potencia:
15 for i=1:n_linhas
16     if dl(i,8)==0 % Se a linha nao estiver desativada
17         k = dl(i,1); % Origem da linha
18         m = dl(i,2); % Destino da linha
19         X = dl(i,4); % Reatancia da linha
20         % O fluxo de potencia ativa considerado deve ser o da linha de maior tensao para a
21         % de menor tensao:
22         if V(k)>V(m)
23             Pl_max = (V(k)*V(m))/X; % Potencia maxima da linha
24             PIp = PIp + ((Pf(k,m)/Pl_max)^2)/2; % Indice de performance
25         elseif V(m)>V(k)
26             Pl_max = (V(m)*V(k))/X;
27             PIp = PIp + ((Pf(m,k)/Pl_max)^2)/2;
28         end
29     end
30 end
31
32 deltaVi = 0.075; % Desvio limite de tensao
33
34 % Calculo do indice de performance de tensao:
35 for i=1:n_barras
36     if V(i)~=0
37         % Caso haja algum gerador fora dos limites de potencia reativa:
38         if bd(i,2)~=3 && Qg(i)>Qgmax(i)
39             PIVq = PIVq + (((abs(V(i))-abs(Vi(i)))/deltaVi)^2)/2 + ((Qg(i)/Qgmax(i))^2)/2;
40         elseif bd(i,2)~=3 && Qg(i)<Qgmin(i)
41             PIVq = PIVq + (((abs(V(i))-abs(Vi(i)))/deltaVi)^2)/2 + ((Qg(i)/Qgmin(i))^2)/2;
42         else
43             PIVq = PIVq + (((abs(V(i))-abs(Vi(i)))/deltaVi)^2)/2;
44         end
45     end
46 end
47
48 % Desconsidera cenarios com muitas iteracoes, para evitar possiveis casos de
49 % nao-convergencia do algoritmo:
50 if c>=50
51     PIp=0;
52     PIVq=0;
53 end
54 end

```

## APÊNDICE F – IMPRESSÃO DAS CONTINGÊNCIAS MAIS GRAVES

```

1  % RELATORIO CONTINGENCIAS
2
3 clc;
4  run('dados.m'); % Realiza a leitura dos dados do sistema
5
6  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
7
8  VPIp = zeros(1,n_linhas); VPIvq = zeros(1,n_linhas); % Prealocacao de memoria
9  for i=1:n_linhas
10     ld1=i;
11     % Chama a funcao que calcula os indices de performance:
12     [PIp, PIVq] = contingencias(ld1);
13     % Cria vetores com os indices de performance:
14     VPIp(i) = PIp; VPIvq(i) = PIVq;
15 end
16
17 % Selecao das cinco maiores contingencias:
18
19 % Coloca os indices de performance em ordem decrescente:
20 PIp_sort = sort(VPIp,'descend'); PIVq_sort = sort(VPIvq,'descend');
21
22 % Seleciona as numeracoes das combinacoes selecionadas:
23 [~,ind1] = intersect(VPIp,PIp_sort(1:5)); [~,ind2] = intersect(VPIvq,PIvq_sort(1:5));
24
25 % Desinverte a ordem os elementos e transpoe a matriz para um vetor:
26 ind1 = flip(ind1. '); ind2 = flip(ind2. ');
27
28 fprintf('RELATORIO DE CONTINGENCIAS\n\n1. Maiores indices de desempenho N-1:\n');
29 fprintf('\nRanking   Linha perdida   PIp   \n');
30 for i=1:5
31     fprintf('%3d %8d-%3d           %7.4f \n', i, dl(ind1(i),1), dl(ind1(i),2), PIp_sort(i));
32 end
33 fprintf('\nRanking   Linha perdida   PIVq   \n');
34 for i=1:5
35     fprintf('%3d %8d-%3d           %7.4f \n', i, dl(ind2(i),1), dl(ind2(i),2), PIVq_sort(i));
36 end
37
38 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
39
40 n = n_linhas;
41 ar = zeros(1,n);
42
43 % Cria uma matriz com todas as combinacoes possiveis de vetor com 'n_linhas' elementos,
44 % onde dois deles sao iguais a 1 e o restante igual a 0:
45 for i=1:n
46     d2 = eye(i-1);
47     c2 = ones(i-1,1);
48     b2 = zeros(i-1,n-i);
49     ar = [ar;[b2 c2 d2]];
50 end
51
52 % Elimina a primeira linha, que e composta apenas de zeros:
53 ar(1,:) = [];
54
55 % Cada coluna de 'ar' representa uma combinacao de duas linhas perdidas
56
57 [ar_linhas , ar_colunas] = size(ar);
58
59 % Prealocacao de memoria:
60 VPIp = zeros(1,ar_linhas); VPIvq = zeros(1,ar_linhas);
61 en1 = zeros(1,ar_linhas); en2 = zeros(1,ar_linhas);
62 for i=1:ar_linhas
63     ld2 = ar(i,:);
64     ld2 = find(ld2); % Encontra a posicao dos elementos nao-nulos, ou seja, os 1's
65     ld21 = ld2(1); ld22 = ld2(2);
66     % Chama a funcao que calcula os indices de performance:
67     [PIp, PIVq] = contingencias2(ld21,ld22);
68     VPIp(i) = PIp; VPIvq(i) = PIVq; % Cria vetores com os indices de performance
69     en1(i) = ld21; en2(i) = ld22; % Cria vetores com as numeracoes das linhas perdidas
70 end

```

```

71
72 % Selecao das cinco maiores contingencias:
73
74 % Coloca os indices de performance em ordem decrescente:
75 PIp_sort = sort(VPIp, 'descend'); PIVq_sort = sort(VPIvq, 'descend');
76
77 % Seleciona as numeracoes das combinacoes selecionadas:
78 [~, ind1] = intersect(VPIp, PIP_sort(1:5)); [~, ind2] = intersect(VPIvq, PIVq_sort(1:5));
79
80 % Desinverte a ordem os elementos e transpoe a matriz para um vetor:
81 ind1 = flip(ind1. '); ind2 = flip(ind2. ');
82
83 fprintf('\n2. Maiores indices de desempenho N-2:\n');
84 fprintf('\nRanking   Linhas perdidas       PIP           \n');
85 for i=1:5
86     fprintf('%3d %6d-%3d   %3d-%3d   %7.4f \n', i, d1(en1(ind1(i)),1), d1(en1(ind1(i)),2),
87           d1(en2(ind1(i)),1), d1(en2(ind1(i)),2), PIP_sort(i));
88 end
89 fprintf('\nRanking   Linhas perdidas       PIVq           \n');
90 for i=1:5
91     fprintf('%3d %6d-%3d   %3d-%3d   %7.4f \n', i, d1(en1(ind2(i)),1), d1(en1(ind2(i)),2),
92           d1(en2(ind2(i)),1), d1(en2(ind2(i)),2), PIVq_sort(i));
93 end

```

## APÊNDICE G – POTÊNCIAS GERADAS EM REGIME PERMANENTE

|    | Gerador | MW       | MVAr      |  |
|----|---------|----------|-----------|--|
| 1  |         |          |           |  |
| 2  | 1 1     | 0.0000   | 56.1942   |  |
| 3  | 1 4     | -9.0000  | 34.1207   |  |
| 4  | 1 6     | 0.0000   | 39.0934   |  |
| 5  | 1 10    | 450.0000 | -93.2213  |  |
| 6  | 1 12    | 85.0000  | 66.7607   |  |
| 7  | 1 15    | 0.0000   | 61.2734   |  |
| 8  | 1 18    | 0.0000   | 46.1181   |  |
| 9  | 1 19    | 0.0000   | 43.3502   |  |
| 10 | 1 25    | 220.0000 | 64.8475   |  |
| 11 | 1 26    | 314.0000 | -179.2958 |  |
| 12 | 1 27    | -9.0000  | 43.8224   |  |
| 13 | 1 31    | 7.0000   | 44.9636   |  |
| 14 | 1 32    | 0.0000   | 43.7279   |  |
| 15 | 1 34    | 0.0000   | 55.5914   |  |
| 16 | 1 36    | 0.0000   | 40.8685   |  |
| 17 | 1 40    | -46.0000 | 69.5401   |  |
| 18 | 1 42    | -59.0000 | 49.8079   |  |
| 19 | 1 46    | 19.0000  | 42.2967   |  |
| 20 | 1 49    | 204.0000 | 48.9736   |  |
| 21 | 1 54    | 48.0000  | 57.4064   |  |
| 22 | 1 55    | 0.0000   | 35.6361   |  |
| 23 | 1 56    | 0.0000   | 60.4352   |  |
| 24 | 1 59    | 155.0000 | 145.7500  |  |
| 25 | 1 61    | 160.0000 | -28.9449  |  |
| 26 | 1 62    | 0.0000   | 36.0754   |  |
| 27 | 1 65    | 391.0000 | -449.5939 |  |
| 28 | 1 66    | 392.0000 | 142.6049  |  |
| 29 | 1 69    | 519.1293 | 46.1459   |  |
| 30 | 1 70    | 0.0000   | 33.4649   |  |
| 31 | 1 74    | 0.0000   | 64.9349   |  |
| 32 | 1 76    | 0.0000   | 76.1189   |  |
| 33 | 1 77    | 0.0000   | 145.4634  |  |
| 34 | 1 80    | 477.0000 | 86.3605   |  |
| 35 | 1 85    | 0.0000   | 53.4010   |  |
| 36 | 1 87    | 0.0000   | 2.5523    |  |
| 37 | 1 89    | 607.0000 | -97.0307  |  |
| 38 | 1 90    | -85.0000 | 84.1369   |  |
| 39 | 1 91    | -10.0000 | 0.4006    |  |
| 40 | 1 92    | 0.0000   | 60.9588   |  |
| 41 | 1 99    | -42.0000 | 6.1442    |  |
| 42 | 1100    | 252.0000 | 10.2082   |  |
| 43 | 1103    | 40.0000  | 17.0413   |  |
| 44 | 1104    | 0.0000   | 33.5366   |  |
| 45 | 1105    | 0.0000   | 49.9219   |  |
| 46 | 1107    | -22.0000 | 28.2841   |  |
| 47 | 1110    | 0.0000   | 33.1923   |  |
| 48 | 1111    | 36.0000  | -10.9190  |  |
| 49 | 1112    | -43.0000 | 38.1370   |  |

## APÊNDICE H – TENSÕES NODAIS EM REGIME PERMANENTE

|    | Barra | Modulo | Angulo | Limites | Barra | Modulo | Angulo | Limites |
|----|-------|--------|--------|---------|-------|--------|--------|---------|
| 1  |       |        |        |         |       |        |        |         |
| 2  | 1     | 1.0000 | -19.97 | dentro  | 60    | 0.9983 | -7.49  | dentro  |
| 3  | 2     | 0.9948 | -19.14 | dentro  | 61    | 1.0000 | -6.59  | dentro  |
| 4  | 3     | 0.9959 | -18.84 | dentro  | 62    | 1.0000 | -7.22  | dentro  |
| 5  | 4     | 1.0000 | -14.82 | dentro  | 63    | 1.0228 | -7.84  | dentro  |
| 6  | 5     | 0.9995 | -14.32 | dentro  | 64    | 1.0157 | -6.05  | dentro  |
| 7  | 6     | 1.0000 | -17.19 | dentro  | 65    | 1.0000 | -2.62  | dentro  |
| 8  | 7     | 0.9993 | -17.63 | dentro  | 66    | 1.0000 | -2.48  | dentro  |
| 9  | 8     | 1.0000 | -9.05  | dentro  | 67    | 0.9934 | -5.53  | dentro  |
| 10 | 9     | 1.0092 | -1.36  | dentro  | 68    | 1.0113 | -2.79  | dentro  |
| 11 | 10    | 1.0000 | 6.95   | dentro  | 69    | 1.0000 | 0.00   | dentro  |
| 12 | 11    | 0.9923 | -17.45 | dentro  | 70    | 1.0000 | -8.42  | dentro  |
| 13 | 12    | 1.0000 | -17.99 | dentro  | 71    | 1.0005 | -8.80  | dentro  |
| 14 | 13    | 0.9809 | -18.89 | dentro  | 72    | 1.0000 | -10.05 | dentro  |
| 15 | 14    | 0.9990 | -18.79 | dentro  | 73    | 1.0000 | -8.96  | dentro  |
| 16 | 15    | 1.0000 | -19.34 | dentro  | 74    | 1.0000 | -9.79  | dentro  |
| 17 | 16    | 0.9930 | -18.29 | dentro  | 75    | 0.9925 | -8.33  | dentro  |
| 18 | 17    | 1.0018 | -16.52 | dentro  | 76    | 1.0000 | -9.94  | dentro  |
| 19 | 18    | 1.0000 | -18.99 | dentro  | 77    | 1.0000 | -4.21  | dentro  |
| 20 | 19    | 1.0000 | -19.62 | dentro  | 78    | 0.9917 | -4.42  | dentro  |
| 21 | 20    | 0.9853 | -18.74 | dentro  | 79    | 0.9863 | -3.96  | dentro  |
| 22 | 21    | 0.9788 | -17.19 | dentro  | 80    | 1.0000 | -1.34  | dentro  |
| 23 | 22    | 0.9815 | -14.68 | dentro  | 81    | 1.0363 | -2.38  | dentro  |
| 24 | 23    | 0.9976 | -9.73  | dentro  | 82    | 0.9738 | -3.55  | dentro  |
| 25 | 24    | 1.0000 | -9.98  | dentro  | 83    | 0.9763 | -2.47  | dentro  |
| 26 | 25    | 1.0000 | -2.05  | dentro  | 84    | 0.9873 | -0.30  | dentro  |
| 27 | 26    | 1.0000 | -0.10  | dentro  | 85    | 1.0000 | 1.04   | dentro  |
| 28 | 27    | 1.0000 | -15.65 | dentro  | 86    | 0.9901 | -0.42  | dentro  |
| 29 | 28    | 0.9943 | -17.25 | dentro  | 87    | 1.0000 | -0.49  | dentro  |
| 30 | 29    | 0.9962 | -18.15 | dentro  | 88    | 0.9905 | 4.32   | dentro  |
| 31 | 30    | 1.0311 | -11.25 | dentro  | 89    | 1.0000 | 8.52   | dentro  |
| 32 | 31    | 1.0000 | -18.03 | dentro  | 90    | 1.0000 | 1.90   | dentro  |
| 33 | 32    | 1.0000 | -16.21 | dentro  | 91    | 1.0000 | 1.85   | dentro  |
| 34 | 33    | 0.9912 | -19.80 | dentro  | 92    | 1.0000 | 2.57   | dentro  |
| 35 | 34    | 1.0000 | -19.13 | dentro  | 93    | 0.9843 | -0.21  | dentro  |
| 36 | 35    | 0.9985 | -19.60 | dentro  | 94    | 0.9787 | -2.21  | dentro  |
| 37 | 36    | 1.0000 | -19.63 | dentro  | 95    | 0.9657 | -3.13  | dentro  |
| 38 | 37    | 0.9993 | -18.57 | dentro  | 96    | 0.9735 | -3.20  | dentro  |
| 39 | 38    | 1.0470 | -13.12 | dentro  | 97    | 0.9818 | -2.65  | dentro  |
| 40 | 39    | 0.9923 | -22.21 | dentro  | 98    | 0.9917 | -3.16  | dentro  |
| 41 | 40    | 1.0000 | -23.43 | dentro  | 99    | 1.0000 | -3.83  | dentro  |
| 42 | 41    | 0.9931 | -23.83 | dentro  | 100   | 1.0000 | -2.75  | dentro  |
| 43 | 42    | 1.0000 | -22.23 | dentro  | 101   | 0.9861 | -1.35  | dentro  |
| 44 | 43    | 0.9773 | -19.20 | dentro  | 102   | 0.9941 | 1.17   | dentro  |
| 45 | 44    | 0.9614 | -16.67 | dentro  | 103   | 1.0000 | -6.65  | dentro  |
| 46 | 45    | 0.9640 | -14.89 | dentro  | 104   | 1.0000 | -9.78  | dentro  |
| 47 | 46    | 1.0000 | -12.37 | dentro  | 105   | 1.0000 | -10.93 | dentro  |
| 48 | 47    | 0.9961 | -9.83  | dentro  | 106   | 0.9907 | -11.08 | dentro  |
| 49 | 48    | 0.9935 | -10.51 | dentro  | 107   | 1.0000 | -13.96 | dentro  |
| 50 | 49    | 1.0000 | -9.50  | dentro  | 108   | 0.9982 | -12.00 | dentro  |
| 51 | 50    | 0.9932 | -11.83 | dentro  | 109   | 0.9977 | -12.40 | dentro  |
| 52 | 51    | 0.9808 | -14.69 | dentro  | 110   | 1.0000 | -13.13 | dentro  |
| 53 | 52    | 0.9764 | -15.70 | dentro  | 111   | 1.0000 | -11.45 | dentro  |
| 54 | 53    | 0.9806 | -16.76 | dentro  | 112   | 1.0000 | -16.03 | dentro  |
| 55 | 54    | 1.0000 | -16.00 | dentro  | 113   | 1.0000 | -16.55 | dentro  |
| 56 | 55    | 1.0000 | -16.29 | dentro  | 114   | 0.9952 | -16.50 | dentro  |
| 57 | 56    | 1.0000 | -16.11 | dentro  | 115   | 0.9948 | -16.51 | dentro  |
| 58 | 57    | 0.9940 | -14.71 | dentro  | 116   | 1.0000 | -3.16  | dentro  |
| 59 | 58    | 0.9867 | -15.59 | dentro  | 117   | 0.9841 | -19.50 | dentro  |
| 60 | 59    | 1.0000 | -11.40 | dentro  | 118   | 0.9898 | -9.52  | dentro  |

**APÊNDICE I – FLUXO DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE (K-M)**

|    | De | Para | MW        | MVAr     | Cap. percentual | Situacao     |
|----|----|------|-----------|----------|-----------------|--------------|
| 1  |    |      |           |          |                 |              |
| 2  | 1  | 2    | -11.7376  | 7.5577   | 43.63           | equilibrio l |
| 3  | 1  | 3    | -39.2624  | 21.6365  | 68.97           | equilibrio l |
| 4  | 1  | 12   | -31.8030  | 0.8692   | 48.95           | equilibrio l |
| 5  | 1  | 5    | -69.3389  | 13.5987  | 78.51           | equilibrio l |
| 6  | 1  | 12   | -9.1857   | -1.7469  | 14.39           | equilibrio l |
| 7  | 1  | 5    | -103.0218 | 29.7187  | 82.48           | equilibrio l |
| 8  | 1  | 11   | 64.0218   | -7.5980  | 49.59           | equilibrio l |
| 9  | 1  | 6    | 88.7992   | -18.9305 | 69.84           | equilibrio l |
| 10 | 1  | 11   | 76.3349   | -10.8958 | 59.31           | equilibrio l |
| 11 | 1  | 7    | 35.8203   | -4.8539  | 55.61           | equilibrio l |
| 12 | 1  | 12   | 16.7605   | -6.5755  | 27.70           | equilibrio l |
| 13 | 1  | 5    | 338.9204  | 17.5592  | 75.42           | equilibrio l |
| 14 | 1  | 9    | -439.9961 | -23.2380 | 68.85           | equilibrio l |
| 15 | 1  | 30   | 73.0758   | -92.2210 | 39.22           | equilibrio l |
| 16 | 1  | 10   | -444.7495 | 34.6160  | 69.70           | equilibrio l |
| 17 | 1  | 12   | 33.2118   | -49.1493 | 65.91           | equilibrio l |
| 18 | 1  | 13   | 35.0742   | 4.2158   | 54.35           | equilibrio l |
| 19 | 1  | 14   | 18.4719   | -4.9164  | 29.41           | equilibrio l |
| 20 | 1  | 16   | 7.8910    | 5.3701   | 7.34            | equilibrio l |
| 21 | 1  | 117  | 20.1492   | 5.1117   | 64.96           | equilibrio l |
| 22 | 1  | 15   | 0.7903    | -10.8909 | 16.80           | equilibrio l |
| 23 | 1  | 15   | 4.3951    | -4.3549  | 9.52            | equilibrio l |
| 24 | 1  | 17   | -103.8036 | 27.7650  | 82.66           | equilibrio l |
| 25 | 1  | 19   | 11.1542   | -3.8730  | 18.17           | equilibrio l |
| 26 | 1  | 33   | 7.7728    | 3.0965   | 6.44            | equilibrio l |
| 27 | 1  | 17   | -17.1310  | -2.5914  | 13.33           | equilibrio l |
| 28 | 1  | 18   | 81.9677   | -15.1748 | 64.12           | equilibrio l |
| 29 | 1  | 31   | 15.8204   | -5.4160  | 12.86           | equilibrio l |
| 30 | 1  | 113  | 3.3425    | 4.6367   | 4.40            | equilibrio l |
| 31 | 1  | 19   | 21.1185   | -5.2432  | 33.48           | equilibrio l |
| 32 | 1  | 20   | -9.6624   | 13.2934  | 25.28           | equilibrio l |
| 33 | 1  | 34   | -3.1336   | -2.1915  | 2.94            | equilibrio l |
| 34 | 1  | 21   | -27.7410  | 12.8648  | 47.04           | equilibrio l |
| 35 | 1  | 22   | -41.9225  | 6.1055   | 65.18           | equilibrio l |
| 36 | 1  | 23   | -52.3175  | 1.6354   | 80.53           | equilibrio l |
| 37 | 1  | 24   | 6.9694    | -9.2406  | 3.86            | equilibrio l |
| 38 | 1  | 25   | -158.9852 | 34.8909  | 54.26           | equilibrio l |
| 39 | 1  | 32   | 91.7220   | -27.5979 | 73.68           | equilibrio l |
| 40 | 1  | 70   | -6.6225   | -4.9732  | 6.37            | equilibrio l |
| 41 | 1  | 72   | 0.5791    | -2.5838  | 2.04            | equilibrio l |
| 42 | 1  | 27   | 142.2285  | -19.3596 | 71.77           | equilibrio l |
| 43 | 1  | 25   | 85.4166   | 1.4520   | 28.48           | equilibrio l |
| 44 | 1  | 30   | 228.5834  | -80.2242 | 80.75           | equilibrio l |
| 45 | 1  | 28   | 32.2837   | -1.1619  | 49.70           | equilibrio l |
| 46 | 1  | 32   | 11.8821   | -4.5036  | 39.71           | equilibrio l |
| 47 | 1  | 115  | 20.5946   | 1.6140   | 64.56           | equilibrio l |
| 48 | 1  | 29   | 15.0844   | -6.9053  | 25.52           | equilibrio l |
| 49 | 1  | 31   | -8.9781   | -8.7961  | 9.67            | equilibrio l |
| 50 | 1  | 17   | 234.7414  | 85.6264  | 83.29           | equilibrio l |
| 51 | 1  | 38   | 62.2252   | -57.0451 | 42.21           | equilibrio l |
| 52 | 1  | 32   | -29.2978  | 8.1173   | 46.77           | equilibrio l |
| 53 | 1  | 113  | 2.6655    | -3.3890  | 3.32            | equilibrio l |
| 54 | 1  | 114  | 9.4931    | 4.9269   | 33.42           | equilibrio l |
| 55 | 1  | 37   | -15.2585  | -2.8399  | 11.94           | equilibrio l |
| 56 | 1  | 36   | 29.3666   | -9.6873  | 23.79           | equilibrio l |
| 57 | 1  | 37   | -95.2351  | 32.8788  | 50.38           | equilibrio l |
| 58 | 1  | 43   | 3.7269    | 10.5018  | 8.57            | equilibrio l |
| 59 | 1  | 36   | 1.7211    | -14.7399 | 22.83           | equilibrio l |
| 60 | 1  | 37   | -34.7211  | 5.7399   | 54.14           | equilibrio l |
| 61 | 1  | 39   | 56.7151   | -9.9667  | 44.30           | equilibrio l |
| 62 | 1  | 40   | 45.3668   | -16.3587 | 37.10           | equilibrio l |
| 63 | 1  | 37   | 247.7935  | 136.2517 | 62.84           | equilibrio l |
| 64 | 1  | 65   | -185.7896 | 27.3610  | 62.60           | equilibrio l |
| 65 | 1  | 40   | 28.6573   | -21.7821 | 27.69           | equilibrio l |
| 66 | 1  | 41   | 16.9109   | 8.5919   | 14.59           | equilibrio l |
| 67 | 1  | 42   | -10.4656  | 0.9643   | 8.08            | equilibrio l |
| 68 | 1  | 42   | -20.1429  | -0.3750  | 15.50           | equilibrio l |
| 69 | 1  | 49   | -126.8447 | 38.9954  | 44.23           | equilibrio l |
| 70 | 1  | 44   | -14.3446  | 7.3420   | 12.40           | equilibrio l |



|     |   |    |     |           |           |       |            |   |
|-----|---|----|-----|-----------|-----------|-------|------------|---|
| 71  | l | 44 | 45  | -30.5423  | 4.2457    | 23.72 | equilibrio | l |
| 72  | l | 45 | 46  | -35.5722  | -15.9298  | 59.96 | equilibrio | l |
| 73  | l | 45 | 49  | -48.2030  | -0.6850   | 74.17 | equilibrio | l |
| 74  | l | 46 | 47  | -30.7716  | 11.4647   | 50.52 | equilibrio | l |
| 75  | l | 46 | 48  | -14.4342  | 5.9567    | 48.80 | equilibrio | l |
| 76  | l | 47 | 49  | -10.2062  | -3.8649   | 34.10 | equilibrio | l |
| 77  | l | 47 | 69  | -54.9899  | 17.0587   | 44.29 | equilibrio | l |
| 78  | l | 48 | 49  | -34.6010  | -0.8785   | 53.25 | equilibrio | l |
| 79  | l | 49 | 50  | 50.7598   | -8.8449   | 39.63 | equilibrio | l |
| 80  | l | 49 | 51  | 62.8870   | -7.0573   | 48.68 | equilibrio | l |
| 81  | l | 49 | 54  | 73.6141   | -19.4887  | 58.58 | equilibrio | l |
| 82  | l | 49 | 66  | -253.0315 | 64.6292   | 58.03 | equilibrio | l |
| 83  | l | 49 | 69  | -45.4568  | 13.9130   | 36.57 | equilibrio | l |
| 84  | l | 50 | 57  | 33.0552   | -12.9682  | 54.63 | equilibrio | l |
| 85  | l | 51 | 52  | 27.8158   | -2.6410   | 21.49 | equilibrio | l |
| 86  | l | 51 | 58  | 16.1353   | -14.5186  | 67.83 | equilibrio | l |
| 87  | l | 52 | 53  | 9.6517    | -6.7795   | 36.86 | equilibrio | l |
| 88  | l | 53 | 54  | -13.3978  | -14.0942  | 60.77 | equilibrio | l |
| 89  | l | 54 | 55  | 6.8456    | -2.6279   | 45.83 | equilibrio | l |
| 90  | l | 54 | 56  | 19.0758   | -5.8387   | 62.34 | equilibrio | l |
| 91  | l | 54 | 59  | -33.0618  | 5.6661    | 51.61 | equilibrio | l |
| 92  | l | 55 | 56  | -18.8248  | 5.9295    | 30.36 | equilibrio | l |
| 93  | l | 55 | 59  | -37.3379  | 7.0638    | 29.23 | equilibrio | l |
| 94  | l | 56 | 57  | -20.2630  | 12.5225   | 36.65 | equilibrio | l |
| 95  | l | 56 | 58  | -3.9325   | 13.9717   | 45.36 | equilibrio | l |
| 96  | l | 56 | 59  | -59.5835  | 19.8860   | 96.64 | equilibrio | l |
| 97  | l | 59 | 60  | -44.1702  | 10.5375   | 34.93 | equilibrio | l |
| 98  | l | 59 | 61  | -52.7988  | 11.9477   | 41.64 | equilibrio | l |
| 99  | l | 60 | 61  | -114.0023 | 10.0124   | 57.22 | equilibrio | l |
| 100 | l | 60 | 62  | -8.8352   | -1.7737   | 28.16 | equilibrio | l |
| 101 | l | 61 | 62  | 27.6027   | -6.3822   | 43.59 | equilibrio | l |
| 102 | l | 62 | 66  | -35.7631  | 6.5821    | 55.94 | equilibrio | l |
| 103 | l | 62 | 67  | -22.5448  | 9.4388    | 37.60 | equilibrio | l |
| 104 | l | 63 | 59  | 157.9608  | 62.8935   | 56.67 | equilibrio | l |
| 105 | l | 63 | 64  | -157.9608 | 41.1755   | 54.41 | equilibrio | l |
| 106 | l | 64 | 61  | 35.7288   | 58.7328   | 52.88 | equilibrio | l |
| 107 | l | 64 | 65  | -194.1451 | 56.4593   | 67.40 | equilibrio | l |
| 108 | l | 65 | 66  | -6.0937   | 0.0073    | 2.03  | equilibrio | l |
| 109 | l | 65 | 68  | 12.5989   | -103.5148 | 34.76 | equilibrio | l |
| 110 | l | 66 | 67  | 51.2991   | -4.7638   | 17.17 | equilibrio | l |
| 111 | l | 68 | 69  | -124.4086 | 31.8796   | 64.21 | equilibrio | l |
| 112 | l | 68 | 81  | -47.4153  | -162.2788 | 56.35 | equilibrio | l |
| 113 | l | 68 | 116 | 184.3499  | 258.5490  | 70.56 | equilibrio | l |
| 114 | l | 69 | 70  | 111.0845  | -23.8561  | 56.81 | equilibrio | l |
| 115 | l | 69 | 75  | 110.6198  | -28.1657  | 57.07 | equilibrio | l |
| 116 | l | 69 | 77  | 67.2809   | -23.0969  | 54.72 | equilibrio | l |
| 117 | l | 70 | 71  | 17.5154   | -6.0887   | 14.26 | equilibrio | l |
| 118 | l | 70 | 74  | 16.6182   | -6.5047   | 55.77 | equilibrio | l |
| 119 | l | 70 | 75  | 0.5309    | 3.3746    | 2.63  | equilibrio | l |
| 120 | l | 71 | 72  | 11.4825   | -4.6691   | 9.53  | equilibrio | l |
| 121 | l | 71 | 73  | 6.0031    | -0.6613   | 18.87 | equilibrio | l |
| 122 | l | 74 | 75  | -51.5019  | 34.4021   | 47.64 | equilibrio | l |
| 123 | l | 75 | 77  | -33.3869  | 5.1342    | 51.97 | equilibrio | l |
| 124 | l | 75 | 118 | 40.3966   | -6.7444   | 63.01 | equilibrio | l |
| 125 | l | 76 | 77  | -60.9296  | 19.8114   | 49.28 | equilibrio | l |
| 126 | l | 76 | 118 | -7.0704   | 20.3075   | 33.08 | equilibrio | l |
| 127 | l | 77 | 78  | 45.3362   | 52.8230   | 53.55 | equilibrio | l |
| 128 | l | 77 | 80  | -135.3050 | 46.9798   | 71.61 | equilibrio | l |
| 129 | l | 77 | 82  | -2.1363   | 27.4070   | 42.29 | equilibrio | l |
| 130 | l | 78 | 79  | -25.8485  | 27.4674   | 29.01 | equilibrio | l |
| 131 | l | 79 | 80  | -64.9285  | -4.2561   | 50.05 | equilibrio | l |
| 132 | l | 80 | 96  | 19.5213   | 8.5652    | 32.80 | equilibrio | l |
| 133 | l | 80 | 97  | 26.8894   | 13.2165   | 93.63 | equilibrio | l |
| 134 | l | 80 | 98  | 29.5126   | 0.2200    | 92.23 | equilibrio | l |
| 135 | l | 80 | 99  | 20.2175   | -6.7270   | 66.59 | equilibrio | l |
| 136 | l | 81 | 80  | -47.7042  | 95.4878   | 53.37 | equilibrio | l |
| 137 | l | 82 | 83  | -46.4622  | 6.3606    | 72.15 | equilibrio | l |
| 138 | l | 82 | 96  | -9.9711   | 1.1594    | 15.44 | equilibrio | l |
| 139 | l | 83 | 84  | -25.5481  | 3.2070    | 39.61 | equilibrio | l |
| 140 | l | 83 | 85  | -41.1769  | -4.0974   | 63.66 | equilibrio | l |
| 141 | l | 84 | 85  | -36.9890  | -2.2371   | 57.01 | equilibrio | l |
| 142 | l | 85 | 86  | 21.1651   | 0.9135    | 66.20 | equilibrio | l |
| 143 | l | 85 | 88  | -51.3720  | 19.5547   | 84.57 | equilibrio | l |

|     |   |     |     |          |          |       |            |   |
|-----|---|-----|-----|----------|----------|-------|------------|---|
| 144 | I | 85  | 89  | -73.1512 | 12.6718  | 57.11 | equilibrio | I |
| 145 | I | 86  | 87  | 0.0064   | -6.9111  | 21.60 | equilibrio | I |
| 146 | I | 88  | 89  | -99.9875 | 9.1498   | 77.23 | equilibrio | I |
| 147 | I | 89  | 90  | 168.8128 | -37.4958 | 57.64 | equilibrio | I |
| 148 | I | 89  | 92  | 262.2849 | -42.6942 | 59.05 | equilibrio | I |
| 149 | I | 90  | 91  | 0.9755   | -1.3659  | 10.49 | equilibrio | I |
| 150 | I | 91  | 92  | -9.0248  | 1.1738   | 56.88 | equilibrio | I |
| 151 | I | 92  | 93  | 57.0801  | 1.4792   | 63.44 | equilibrio | I |
| 152 | I | 92  | 94  | 51.5535  | -2.1034  | 57.33 | equilibrio | I |
| 153 | I | 92  | 100 | 30.3113  | -7.5559  | 48.06 | equilibrio | I |
| 154 | I | 92  | 102 | 43.6552  | 0.6779   | 67.17 | equilibrio | I |
| 155 | I | 93  | 94  | 44.2378  | -6.1433  | 49.62 | equilibrio | I |
| 156 | I | 94  | 95  | 40.3096  | 16.9417  | 67.27 | equilibrio | I |
| 157 | I | 94  | 96  | 19.0538  | -0.9359  | 59.62 | equilibrio | I |
| 158 | I | 94  | 100 | 4.6927   | -40.1695 | 62.22 | equilibrio | I |
| 159 | I | 95  | 96  | -1.9564  | -13.8837 | 43.82 | equilibrio | I |
| 160 | I | 96  | 97  | -11.6853 | -7.9623  | 88.38 | equilibrio | I |
| 161 | I | 98  | 100 | -4.6953  | -5.8873  | 47.06 | equilibrio | I |
| 162 | I | 99  | 100 | -21.9753 | 4.0023   | 69.80 | equilibrio | I |
| 163 | I | 100 | 101 | -15.9229 | 13.0825  | 64.40 | equilibrio | I |
| 164 | I | 100 | 103 | 119.6427 | -34.7411 | 62.29 | equilibrio | I |
| 165 | I | 100 | 104 | 57.9377  | -11.8334 | 45.49 | equilibrio | I |
| 166 | I | 100 | 106 | 60.6951  | -10.5181 | 47.38 | equilibrio | I |
| 167 | I | 101 | 102 | -38.0531 | 0.7239   | 58.55 | equilibrio | I |
| 168 | I | 103 | 104 | 31.9760  | -10.5005 | 51.78 | equilibrio | I |
| 169 | I | 103 | 105 | 41.9550  | -14.1359 | 68.11 | equilibrio | I |
| 170 | I | 103 | 110 | 60.2569  | -11.7580 | 47.23 | equilibrio | I |
| 171 | I | 104 | 105 | 49.8524  | -13.0682 | 39.64 | equilibrio | I |
| 172 | I | 105 | 106 | 8.5402   | 14.0840  | 25.34 | equilibrio | I |
| 173 | I | 105 | 107 | 26.8538  | -9.3734  | 43.76 | equilibrio | I |
| 174 | I | 105 | 108 | 24.1306  | -7.0242  | 38.66 | equilibrio | I |
| 175 | I | 106 | 107 | 23.9324  | -13.5924 | 86.01 | equilibrio | I |
| 176 | I | 108 | 109 | 21.9689  | -6.6191  | 71.70 | equilibrio | I |
| 177 | I | 109 | 110 | 13.9140  | -9.0130  | 51.81 | equilibrio | I |
| 178 | I | 110 | 111 | -35.6932 | 9.9718   | 57.02 | equilibrio | I |
| 179 | I | 110 | 112 | 69.3391  | -27.8673 | 57.48 | equilibrio | I |
| 180 | I | 114 | 115 | 1.4765   | 3.4719   | 11.79 | equilibrio | I |

## APÊNDICE J – FLUXO DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE (M-K)

|    | De | Para | MW        | MVar      | Cap. percentual | Situacao     |
|----|----|------|-----------|-----------|-----------------|--------------|
| 1  |    |      |           |           |                 |              |
| 2  | 1  | 2    | 11.8030   | -9.8692   | 48.08           | equilibrio l |
| 3  | 1  | 3    | 39.5247   | -21.8518  | 69.48           | equilibrio l |
| 4  | 1  | 5    | 70.5620   | -10.9443  | 79.34           | equilibrio l |
| 5  | 1  | 5    | 103.2243  | -29.0107  | 82.48           | equilibrio l |
| 6  | 1  | 5    | -338.9204 | 13.6609   | 75.38           | equilibrio l |
| 7  | 1  | 6    | -87.8203  | 21.9473   | 69.63           | equilibrio l |
| 8  | 1  | 7    | -35.7605  | 4.5755    | 55.46           | equilibrio l |
| 9  | 1  | 9    | 444.7496  | -34.6160  | 69.70           | equilibrio l |
| 10 | 1  | 10   | 450.0000  | -93.2213  | 71.81           | equilibrio l |
| 11 | 1  | 11   | -63.1557  | 8.7145    | 49.04           | equilibrio l |
| 12 | 1  | 11   | -75.1303  | 13.2190   | 58.68           | equilibrio l |
| 13 | 1  | 12   | 31.9946   | -1.8019   | 49.30           | equilibrio l |
| 14 | 1  | 12   | 9.2269    | -2.1601   | 14.58           | equilibrio l |
| 15 | 1  | 12   | -16.7330  | 5.8106    | 27.25           | equilibrio l |
| 16 | 1  | 12   | -33.0006  | 49.3467   | 65.96           | equilibrio l |
| 17 | 1  | 13   | -34.7903  | -5.1091   | 54.10           | equilibrio l |
| 18 | 1  | 14   | -18.3951  | 3.3549    | 28.77           | equilibrio l |
| 19 | 1  | 15   | -0.7419   | 4.9003    | 7.62            | equilibrio l |
| 20 | 1  | 15   | -4.3815   | -0.6155   | 6.81            | equilibrio l |
| 21 | 1  | 16   | -7.8690   | -7.4086   | 8.31            | equilibrio l |
| 22 | 1  | 17   | 105.3446  | -27.1114  | 83.67           | equilibrio l |
| 23 | 1  | 17   | 17.2661   | -1.5082   | 13.33           | equilibrio l |
| 24 | 1  | 17   | -234.7414 | -61.8933  | 80.92           | equilibrio l |
| 25 | 1  | 18   | -81.1185  | 17.3613   | 63.81           | equilibrio l |
| 26 | 1  | 19   | -11.1379  | 2.9165    | 17.71           | equilibrio l |
| 27 | 1  | 19   | -21.0661  | 4.3318    | 33.09           | equilibrio l |
| 28 | 1  | 20   | 9.7410    | -15.8648  | 28.64           | equilibrio l |
| 29 | 1  | 21   | 27.9225   | -14.1055  | 48.13           | equilibrio l |
| 30 | 1  | 22   | 42.3175   | -6.6354   | 65.90           | equilibrio l |
| 31 | 1  | 23   | 53.2939   | -1.0523   | 82.01           | equilibrio l |
| 32 | 1  | 24   | -6.9566   | 4.3192    | 2.73            | equilibrio l |
| 33 | 1  | 25   | 163.1881  | -21.9570  | 54.89           | equilibrio l |
| 34 | 1  | 25   | -85.4166  | 1.4520    | 28.48           | equilibrio l |
| 35 | 1  | 27   | -135.7604 | 34.8738   | 70.08           | equilibrio l |
| 36 | 1  | 28   | -32.0843  | -0.0947   | 49.36           | equilibrio l |
| 37 | 1  | 29   | -15.0219  | 4.7962    | 24.26           | equilibrio l |
| 38 | 1  | 30   | -72.6549  | 44.1170   | 28.33           | equilibrio l |
| 39 | 1  | 30   | -224.3117 | 32.5308   | 75.55           | equilibrio l |
| 40 | 1  | 31   | -15.6967  | 1.8267    | 12.16           | equilibrio l |
| 41 | 1  | 31   | 8.9945    | 8.0196    | 9.27            | equilibrio l |
| 42 | 1  | 32   | -88.8914  | 26.1916   | 71.28           | equilibrio l |
| 43 | 1  | 32   | -11.8469  | 2.6937    | 37.97           | equilibrio l |
| 44 | 1  | 32   | 29.5797   | -9.6953   | 47.89           | equilibrio l |
| 45 | 1  | 33   | -7.7415   | -6.1601   | 7.61            | equilibrio l |
| 46 | 1  | 34   | 3.1417    | -4.1020   | 3.97            | equilibrio l |
| 47 | 1  | 36   | -29.2838  | 9.3741    | 23.65           | equilibrio l |
| 48 | 1  | 36   | -1.7162   | 14.4944   | 22.45           | equilibrio l |
| 49 | 1  | 37   | 15.3573   | -0.4478   | 11.82           | equilibrio l |
| 50 | 1  | 37   | 95.4958   | -32.9050  | 50.50           | equilibrio l |
| 51 | 1  | 37   | 34.8586   | -6.4338   | 54.53           | equilibrio l |
| 52 | 1  | 37   | -247.7935 | -106.9958 | 59.98           | equilibrio l |
| 53 | 1  | 38   | -62.0040  | 14.0543   | 31.79           | equilibrio l |
| 54 | 1  | 39   | -55.6573  | 10.7821   | 43.61           | equilibrio l |
| 55 | 1  | 40   | -44.0239  | 15.9658   | 36.02           | equilibrio l |
| 56 | 1  | 40   | -28.4213  | 21.0182   | 27.19           | equilibrio l |
| 57 | 1  | 41   | -16.8571  | -9.6250   | 14.93           | equilibrio l |
| 58 | 1  | 42   | 10.5324   | -5.4040   | 9.11            | equilibrio l |
| 59 | 1  | 42   | 20.3123   | -2.4835   | 15.74           | equilibrio l |
| 60 | 1  | 43   | -3.6554   | -14.3419  | 11.38           | equilibrio l |
| 61 | 1  | 44   | 14.5423   | -12.2457  | 14.62           | equilibrio l |
| 62 | 1  | 45   | 30.7751   | -5.3853   | 24.03           | equilibrio l |
| 63 | 1  | 46   | 36.2059   | 14.8753   | 60.22           | equilibrio l |
| 64 | 1  | 47   | 31.1961   | -13.1938  | 52.11           | equilibrio l |
| 65 | 1  | 48   | 14.6010   | -10.1215  | 55.52           | equilibrio l |
| 66 | 1  | 49   | 133.2669  | -18.5834  | 44.85           | equilibrio l |
| 67 | 1  | 49   | 49.9145   | 1.0558    | 76.81           | equilibrio l |
| 68 | 1  | 49   | 10.2280   | 2.3387    | 32.79           | equilibrio l |
| 69 | 1  | 49   | 34.8181   | 0.2412    | 53.57           | equilibrio l |
| 70 | 1  | 50   | -50.0552  | 8.9682    | 39.12           | equilibrio l |

|     |  |    |    |           |          |       |            |  |
|-----|--|----|----|-----------|----------|-------|------------|--|
| 71  |  | 51 | 49 | -60.9511  | 9.1596   | 47.41 | equilibrio |  |
| 72  |  | 52 | 51 | -27.6517  | 1.7795   | 21.31 | equilibrio |  |
| 73  |  | 53 | 52 | -9.6022   | 3.0942   | 31.53 | equilibrio |  |
| 74  |  | 54 | 49 | -71.3500  | 20.4140  | 57.09 | equilibrio |  |
| 75  |  | 54 | 53 | 13.4904   | 11.4828  | 55.36 | equilibrio |  |
| 76  |  | 55 | 54 | -6.8372   | 0.6429   | 42.92 | equilibrio |  |
| 77  |  | 56 | 54 | -19.0650  | 5.1443   | 61.71 | equilibrio |  |
| 78  |  | 56 | 55 | 18.8440   | -6.2443  | 30.54 | equilibrio |  |
| 79  |  | 57 | 50 | -32.4685  | 11.3492  | 52.92 | equilibrio |  |
| 80  |  | 57 | 56 | 20.4685   | -14.3492 | 38.46 | equilibrio |  |
| 81  |  | 58 | 51 | -16.0168  | 13.1222  | 64.71 | equilibrio |  |
| 82  |  | 58 | 56 | 4.0168    | -16.1222 | 51.92 | equilibrio |  |
| 83  |  | 59 | 54 | 33.6493   | -8.9679  | 53.58 | equilibrio |  |
| 84  |  | 59 | 55 | 38.0449   | -9.4904  | 30.16 | equilibrio |  |
| 85  |  | 59 | 56 | 61.2356   | -20.2761 | 99.24 | equilibrio |  |
| 86  |  | 59 | 63 | -157.9608 | -51.7827 | 55.41 | equilibrio |  |
| 87  |  | 60 | 59 | 44.8376   | -11.2386 | 35.56 | equilibrio |  |
| 88  |  | 61 | 59 | 53.7764   | -11.3568 | 42.28 | equilibrio |  |
| 89  |  | 61 | 60 | 114.3496  | -9.6898  | 57.38 | equilibrio |  |
| 90  |  | 61 | 64 | -35.7288  | -57.4863 | 52.07 | equilibrio |  |
| 91  |  | 62 | 60 | 8.8450    | 0.3528   | 27.66 | equilibrio |  |
| 92  |  | 62 | 61 | -27.5371  | 5.7017   | 43.26 | equilibrio |  |
| 93  |  | 64 | 63 | 158.4163  | -58.3182 | 56.27 | equilibrio |  |
| 94  |  | 65 | 38 | 189.2161  | -99.4974 | 71.26 | equilibrio |  |
| 95  |  | 65 | 64 | 195.2788  | -82.3324 | 70.64 | equilibrio |  |
| 96  |  | 66 | 49 | 259.1843  | -35.6960 | 58.14 | equilibrio |  |
| 97  |  | 66 | 62 | 36.4229   | -9.3783  | 57.86 | equilibrio |  |
| 98  |  | 66 | 65 | 6.0937    | 0.0073   | 2.03  | equilibrio |  |
| 99  |  | 67 | 62 | 22.7070   | -11.7825 | 39.36 | equilibrio |  |
| 100 |  | 67 | 66 | -50.7070  | 4.7825   | 16.98 | equilibrio |  |
| 101 |  | 68 | 65 | -12.5259  | 39.8364  | 13.92 | equilibrio |  |
| 102 |  | 69 | 47 | 57.9223   | -14.4713 | 45.93 | equilibrio |  |
| 103 |  | 69 | 49 | 47.8132   | -14.4422 | 38.42 | equilibrio |  |
| 104 |  | 69 | 68 | 124.4086  | -25.4975 | 63.50 | equilibrio |  |
| 105 |  | 70 | 24 | 6.6235    | -5.0443  | 6.40  | equilibrio |  |
| 106 |  | 70 | 69 | -107.2880 | 27.7280  | 55.41 | equilibrio |  |
| 107 |  | 71 | 70 | -17.4856  | 5.3305   | 14.06 | equilibrio |  |
| 108 |  | 72 | 24 | -0.5789   | -2.2955  | 1.82  | equilibrio |  |
| 109 |  | 72 | 71 | -11.4210  | 0.4708   | 8.79  | equilibrio |  |
| 110 |  | 73 | 71 | -6.0000   | -0.5009  | 18.82 | equilibrio |  |
| 111 |  | 74 | 70 | -16.4981  | 3.5328   | 52.73 | equilibrio |  |
| 112 |  | 75 | 69 | -105.4685 | 31.3761  | 55.02 | equilibrio |  |
| 113 |  | 75 | 70 | -0.5193   | -6.9095  | 5.33  | equilibrio |  |
| 114 |  | 75 | 74 | 51.9781   | -33.8564 | 47.72 | equilibrio |  |
| 115 |  | 77 | 69 | -65.7830  | 17.6127  | 52.38 | equilibrio |  |
| 116 |  | 77 | 75 | 34.1021   | -7.6959  | 53.78 | equilibrio |  |
| 117 |  | 77 | 76 | 62.7860   | -17.3033 | 50.10 | equilibrio |  |
| 118 |  | 78 | 77 | -45.1515  | -53.4674 | 53.83 | equilibrio |  |
| 119 |  | 79 | 78 | 25.9285   | -27.7438 | 29.21 | equilibrio |  |
| 120 |  | 80 | 77 | 137.5487  | -42.4112 | 71.97 | equilibrio |  |
| 121 |  | 80 | 79 | 65.6063   | 5.4706   | 50.64 | equilibrio |  |
| 122 |  | 80 | 81 | 47.7042   | -91.2894 | 51.50 | equilibrio |  |
| 123 |  | 81 | 68 | 47.7042   | 80.9095  | 31.31 | equilibrio |  |
| 124 |  | 82 | 77 | 2.4333    | -34.5200 | 53.24 | equilibrio |  |
| 125 |  | 83 | 82 | 46.7250   | -9.1096  | 73.24 | equilibrio |  |
| 126 |  | 84 | 83 | 25.9890   | -4.7629  | 40.65 | equilibrio |  |
| 127 |  | 85 | 83 | 41.9445   | 3.3410   | 64.73 | equilibrio |  |
| 128 |  | 85 | 84 | 37.4136   | 1.9200   | 57.64 | equilibrio |  |
| 129 |  | 86 | 85 | -21.0064  | -3.0889  | 66.35 | equilibrio |  |
| 130 |  | 87 | 86 | 0.0000    | 2.5523   | 7.98  | equilibrio |  |
| 131 |  | 88 | 85 | 51.9875   | -19.1498 | 85.23 | equilibrio |  |
| 132 |  | 89 | 85 | 74.4840   | -7.7240  | 57.60 | equilibrio |  |
| 133 |  | 89 | 88 | 101.4183  | -3.7367  | 78.07 | equilibrio |  |
| 134 |  | 90 | 89 | -163.9755 | 46.1428  | 56.78 | equilibrio |  |
| 135 |  | 91 | 90 | -0.9752   | -0.7732  | 7.78  | equilibrio |  |
| 136 |  | 92 | 89 | -256.6595 | 65.5291  | 58.87 | equilibrio |  |
| 137 |  | 92 | 91 | 9.0593    | -4.3282  | 62.75 | equilibrio |  |
| 138 |  | 93 | 92 | -56.2378  | -0.8566  | 62.49 | equilibrio |  |
| 139 |  | 94 | 92 | -50.2751  | 2.3281   | 55.92 | equilibrio |  |
| 140 |  | 94 | 93 | -43.7810  | 5.8356   | 49.08 | equilibrio |  |
| 141 |  | 95 | 94 | -40.0436  | -17.1163 | 67.00 | equilibrio |  |
| 142 |  | 96 | 80 | -19.3423  | -12.4608 | 35.40 | equilibrio |  |
| 143 |  | 96 | 82 | 9.9904    | -6.2532  | 18.13 | equilibrio |  |

|     |      |     |           |           |       |              |
|-----|------|-----|-----------|-----------|-------|--------------|
| 144 | l 96 | 94  | -18.9519  | -0.9261   | 59.30 | equilibrio l |
| 145 | l 96 | 95  | 1.9890    | 12.6024   | 39.87 | equilibrio l |
| 146 | l 97 | 80  | -26.7187  | -14.8394  | 95.51 | equilibrio l |
| 147 | l 97 | 96  | 11.7187   | 5.8394    | 81.83 | equilibrio l |
| 148 | l 98 | 80  | -29.3047  | -2.1127   | 91.81 | equilibrio l |
| 149 | l 99 | 80  | -20.0247  | 2.1419    | 62.93 | equilibrio l |
| 150 | l100 | 92  | -29.6985  | 5.6259    | 46.50 | equilibrio l |
| 151 | l100 | 94  | -4.4304   | 35.1114   | 54.45 | equilibrio l |
| 152 | l100 | 98  | 4.7093    | 1.2297    | 30.42 | equilibrio l |
| 153 | l100 | 99  | 22.0669   | -5.7487   | 71.26 | equilibrio l |
| 154 | l101 | 100 | 16.0531   | -15.7239  | 70.22 | equilibrio l |
| 155 | l102 | 92  | -43.4206  | -1.0669   | 66.82 | equilibrio l |
| 156 | l102 | 101 | 38.4206   | -1.9331   | 59.18 | equilibrio l |
| 157 | l103 | 100 | -117.1880 | 37.4358   | 61.51 | equilibrio l |
| 158 | l104 | 100 | -56.3862  | 13.4412   | 44.59 | equilibrio l |
| 159 | l104 | 103 | -31.4662  | 8.1636    | 50.01 | equilibrio l |
| 160 | l105 | 103 | -40.9350  | 13.1540   | 66.15 | equilibrio l |
| 161 | l105 | 104 | -49.5896  | 13.0814   | 39.45 | equilibrio l |
| 162 | l106 | 100 | -58.4331  | 12.9375   | 46.04 | equilibrio l |
| 163 | l106 | 105 | -8.4993   | -15.3451  | 26.99 | equilibrio l |
| 164 | l107 | 105 | -26.4455  | 6.0630    | 41.74 | equilibrio l |
| 165 | l107 | 106 | -23.5545  | 10.2211   | 80.24 | equilibrio l |
| 166 | l108 | 105 | -23.9689  | 5.6191    | 37.88 | equilibrio l |
| 167 | l109 | 108 | -21.9140  | 6.0130    | 71.01 | equilibrio l |
| 168 | l110 | 103 | -58.8038  | 13.8929   | 46.48 | equilibrio l |
| 169 | l110 | 109 | -13.8420  | 7.1950    | 48.75 | equilibrio l |
| 170 | l111 | 110 | 36.0000   | -10.9190  | 57.88 | equilibrio l |
| 171 | l112 | 110 | -68.0000  | 25.1370   | 55.77 | equilibrio l |
| 172 | l113 | 17  | -3.3392   | -5.3952   | 4.88  | equilibrio l |
| 173 | l113 | 32  | -2.6608   | -1.7753   | 2.46  | equilibrio l |
| 174 | l114 | 32  | -9.4764   | -6.4718   | 35.86 | equilibrio l |
| 175 | l115 | 27  | -20.5239  | -3.2565   | 64.94 | equilibrio l |
| 176 | l115 | 114 | -1.4761   | -3.7435   | 12.58 | equilibrio l |
| 177 | l116 | 68  | -184.0000 | -270.9677 | 72.79 | equilibrio l |
| 178 | l117 | 12  | -20.0000  | -8.0000   | 67.31 | equilibrio l |
| 179 | l118 | 75  | -40.1508  | 6.3829    | 62.55 | equilibrio l |
| 180 | l118 | 76  | 7.1508    | -21.3829  | 34.69 | equilibrio l |

## APÊNDICE K – PERDAS DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE

|    | Linha  | MW     | MVAr     | Linha  | MW     | MVAr     | Linha   | MW     | MVAr    |
|----|--------|--------|----------|--------|--------|----------|---------|--------|---------|
| 1  |        |        |          |        |        |          |         |        |         |
| 2  | 1- 2   | 0.0654 | -2.3114  | 37- 40 | 1.3428 | -0.3929  | 74- 75  | 0.4762 | 0.5457  |
| 3  | 1- 3   | 0.2623 | -0.2154  | 38- 37 | 0.0000 | 29.2559  | 75- 77  | 0.7152 | -2.5618 |
| 4  | 2- 12  | 0.1916 | -0.9327  | 38- 65 | 3.4265 | -72.1364 | 75-118  | 0.2458 | -0.3615 |
| 5  | 3- 5   | 1.2231 | 2.6544   | 39- 40 | 0.2360 | -0.7640  | 76- 77  | 1.8565 | 2.5082  |
| 6  | 3- 12  | 0.0412 | -3.9070  | 40- 41 | 0.0537 | -1.0331  | 76-118  | 0.0804 | -1.0754 |
| 7  | 4- 5   | 0.2025 | 0.7080   | 40- 42 | 0.0668 | -4.4397  | 77- 78  | 0.1847 | -0.6443 |
| 8  | 4- 11  | 0.8661 | 1.1165   | 41- 42 | 0.1694 | -2.8585  | 77- 80  | 2.2437 | 4.5686  |
| 9  | 5- 6   | 0.9789 | 3.0167   | 42- 49 | 6.4222 | 20.4120  | 77- 82  | 0.2969 | -7.1130 |
| 10 | 5- 11  | 1.2046 | 2.3232   | 43- 44 | 0.1977 | -4.9037  | 78- 79  | 0.0800 | -0.2765 |
| 11 | 6- 7   | 0.0599 | -0.2784  | 44- 45 | 0.2328 | -1.1396  | 79- 80  | 0.6779 | 1.2145  |
| 12 | 7- 12  | 0.0275 | -0.7650  | 45- 46 | 0.6337 | -1.0544  | 80- 96  | 0.1790 | -3.8955 |
| 13 | 8- 5   | 0.0000 | 31.2201  | 45- 49 | 1.7115 | 0.3709   | 80- 97  | 0.1707 | -1.6229 |
| 14 | 8- 9   | 4.7534 | -57.8540 | 46- 47 | 0.4245 | -1.7290  | 80- 98  | 0.2079 | -1.8927 |
| 15 | 8- 30  | 0.4209 | -48.1040 | 46- 48 | 0.1668 | -4.1648  | 80- 99  | 0.1928 | -4.5851 |
| 16 | 9- 10  | 5.2505 | -58.6053 | 47- 49 | 0.0219 | -1.5262  | 81- 80  | 0.0000 | 4.1984  |
| 17 | 11- 12 | 0.2112 | 0.1975   | 47- 69 | 2.9324 | 2.5874   | 82- 83  | 0.2628 | -2.7490 |
| 18 | 11- 13 | 0.2840 | -0.8933  | 48- 49 | 0.2171 | -0.6372  | 82- 96  | 0.0194 | -5.0938 |
| 19 | 12- 14 | 0.0768 | -1.5615  | 49- 50 | 0.7046 | 0.1233   | 83- 84  | 0.4409 | -1.5559 |
| 20 | 12- 16 | 0.0220 | -2.0385  | 49- 51 | 1.9359 | 2.1023   | 83- 85  | 0.7676 | -0.7564 |
| 21 | 12-117 | 0.1492 | -2.8883  | 49- 54 | 2.2641 | 0.9253   | 84- 85  | 0.4247 | -0.3171 |
| 22 | 13- 15 | 0.0484 | -5.9906  | 49- 66 | 6.1527 | 28.9331  | 85- 86  | 0.1586 | -2.1753 |
| 23 | 14- 15 | 0.0136 | -4.9703  | 49- 69 | 2.3564 | -0.5292  | 85- 88  | 0.6155 | 0.4049  |
| 24 | 15- 17 | 1.5410 | 0.6536   | 50- 57 | 0.5867 | -1.6190  | 85- 89  | 1.3328 | 4.9478  |
| 25 | 15- 19 | 0.0163 | -0.9565  | 51- 52 | 0.1641 | -0.8615  | 86- 87  | 0.0065 | -4.3588 |
| 26 | 15- 33 | 0.0313 | -3.0636  | 51- 58 | 0.1185 | -1.3964  | 88- 89  | 1.4308 | 5.4131  |
| 27 | 16- 17 | 0.1352 | -4.0996  | 52- 53 | 0.0496 | -3.6854  | 89- 90  | 4.8373 | 8.6471  |
| 28 | 17- 18 | 0.8493 | 2.1865   | 53- 54 | 0.0925 | -2.6113  | 89- 92  | 5.6255 | 22.8349 |
| 29 | 17- 31 | 0.1237 | -3.5893  | 54- 55 | 0.0084 | -1.9850  | 90- 91  | 0.0003 | -2.1391 |
| 30 | 17-113 | 0.0033 | -0.7585  | 54- 56 | 0.0108 | -0.6944  | 91- 92  | 0.0346 | -3.1544 |
| 31 | 18- 19 | 0.0523 | -0.9114  | 54- 59 | 0.5875 | -3.3017  | 92- 93  | 0.8423 | 0.6226  |
| 32 | 19- 20 | 0.0786 | -2.5714  | 55- 56 | 0.0191 | -0.3148  | 92- 94  | 1.2784 | 0.2248  |
| 33 | 19- 34 | 0.0081 | -6.2934  | 55- 59 | 0.7070 | -2.4265  | 92-100  | 0.6129 | -1.9300 |
| 34 | 20- 21 | 0.1816 | -1.2407  | 56- 57 | 0.2055 | -1.8267  | 92-102  | 0.2347 | -0.3890 |
| 35 | 21- 22 | 0.3950 | -0.5299  | 56- 58 | 0.0844 | -2.1505  | 93- 94  | 0.4568 | -0.3078 |
| 36 | 22- 23 | 0.9764 | 0.5831   | 56- 59 | 1.6521 | -0.3901  | 94- 95  | 0.2660 | -0.1746 |
| 37 | 23- 24 | 0.0128 | -4.9214  | 59- 60 | 0.6673 | -0.7011  | 94- 96  | 0.1020 | -1.8620 |
| 38 | 23- 25 | 4.2029 | 12.9339  | 59- 61 | 0.9776 | 0.5909   | 94-100  | 0.2623 | -5.0581 |
| 39 | 23- 32 | 2.8306 | -1.4064  | 60- 61 | 0.3473 | 0.3225   | 95- 96  | 0.0326 | -1.2813 |
| 40 | 24- 70 | 0.0010 | -10.0175 | 60- 62 | 0.0098 | -1.4210  | 96- 97  | 0.0334 | -2.1229 |
| 41 | 24- 72 | 0.0002 | -4.8793  | 61- 62 | 0.0656 | -0.6805  | 98-100  | 0.0140 | -4.6576 |
| 42 | 25- 27 | 6.4681 | 15.5143  | 62- 66 | 0.6597 | -2.7962  | 99-100  | 0.0916 | -1.7464 |
| 43 | 26- 25 | 0.0000 | 2.9040   | 62- 67 | 0.1623 | -2.3436  | 100-101 | 0.1303 | -2.6413 |
| 44 | 26- 30 | 4.2717 | -47.6934 | 63- 59 | 0.0000 | 11.1108  | 100-103 | 2.4548 | 2.6947  |
| 45 | 27- 28 | 0.1994 | -1.2566  | 63- 64 | 0.4555 | -17.1427 | 100-104 | 1.5515 | 1.6078  |
| 46 | 27- 32 | 0.0352 | -1.8099  | 64- 61 | 0.0000 | 1.2465   | 100-106 | 2.2620 | 2.4195  |
| 47 | 27-115 | 0.0707 | -1.6425  | 64- 65 | 1.1337 | -25.8731 | 101-102 | 0.3675 | -1.2092 |
| 48 | 28- 29 | 0.0624 | -2.1091  | 65- 66 | 0.0000 | 0.0147   | 103-104 | 0.5099 | -2.3369 |
| 49 | 29- 31 | 0.0164 | -0.7766  | 65- 68 | 0.0730 | -63.6783 | 103-105 | 1.0200 | -0.9819 |
| 50 | 30- 17 | 0.0000 | 23.7331  | 66- 67 | 0.5921 | 0.0186   | 103-110 | 1.4531 | 2.1348  |
| 51 | 30- 38 | 0.2212 | -42.9908 | 68- 69 | 0.0000 | 6.3821   | 104-105 | 0.2628 | 0.0132  |
| 52 | 31- 32 | 0.2820 | -1.5780  | 68- 81 | 0.2888 | -81.3693 | 105-106 | 0.0409 | -1.2610 |
| 53 | 32-113 | 0.0048 | -5.1643  | 68-116 | 0.3499 | -12.4186 | 105-107 | 0.4083 | -3.3103 |
| 54 | 32-114 | 0.0166 | -1.5449  | 69- 70 | 3.7965 | 3.8719   | 105-108 | 0.1617 | -1.4051 |
| 55 | 33- 37 | 0.0988 | -3.2876  | 69- 75 | 5.1513 | 3.2104   | 106-107 | 0.3779 | -3.3714 |
| 56 | 34- 36 | 0.0828 | -0.3132  | 69- 77 | 1.4978 | -5.4842  | 108-109 | 0.0550 | -0.6061 |
| 57 | 34- 37 | 0.2607 | -0.0261  | 70- 71 | 0.0299 | -0.7582  | 109-110 | 0.0720 | -1.8180 |
| 58 | 34- 43 | 0.0715 | -3.8401  | 70- 74 | 0.1201 | -2.9719  | 110-111 | 0.3068 | -0.9472 |
| 59 | 35- 36 | 0.0049 | -0.2455  | 70- 75 | 0.0116 | -3.5349  | 110-112 | 1.3391 | -2.7304 |
| 60 | 35- 37 | 0.1375 | -0.6939  | 71- 72 | 0.0614 | -4.1983  | 114-115 | 0.0004 | -0.2717 |
| 61 | 37- 39 | 1.0577 | 0.8154   | 71- 73 | 0.0031 | -1.1622  |         |        |         |

