Universidade Federal de Goiás
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Brendell Pinto Fernandes

Desenvolvimento de aplicativo didático para estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica

Goiânia – GO
2020

SIBI
SISTEMA DE BIBLIOTECAS UFG

EMC

UFG

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): BRENDELL PINTO FERNANDES

Título do trabalho: Desenvolvimento de aplicativo didático para estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica.

2. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO[1]

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.

Brendell Pinto Fernandes

Assinatura(a) do(a)(s) autor(a)(es)(as)[2]

Ciente e de acordo:

LINA PAOLA GARCES N.

Assinatura do(a) orientador(a)[2]

Data: 14 / 08 / 2020

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: (a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;

[2] As assinaturas devem ser originais sendo assinadas no próprio documento, imagens coladas não serão aceitas.

Brendell Pinto Fernandes

Desenvolvimento de aplicativo didático para estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica

Projeto Final de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Lina Paola Garcés Negrete

Goiânia – GO

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Fernandes, Brendell Pinto
Desenvolvimento de aplicativo didático para estudo da disciplina de Engenharia Elétrica [manuscrito] / Brendell Pinto Fernandes. - 2020.
CIV, 104 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Lina Paola Garcés Negrete; co-orientador Dr. Maria Leonor Silva de Almeida; co-orientador Dr. Gelson Andréia Brigatto.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2020.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui fotografias, tabelas, lista de figuras.

1. Análise de Sistemas de Energia Elétrica. 2. MATLAB. 3. App Designer. 4. Educação em Engenharia. 5. Fluxo de Carga. I. Negrete, Lina Paola Garcés, orient. II. Título.

CDU 621.3

Brendell Pinto Fernandes

Desenvolvimento de software para estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica

Projeto Final de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Trabalho Aprovado. Goiânia - GO, 14 de Agosto de 2020:

LINA PAOLA GARCES N.

Profa. Dra. Lina Paola Garcés Negrete
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/ Universidade Federal de Goiás

Maria Leonor Silva de Almeida

Profa. Dra. Maria Leonor Silva de Almeida
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/ Universidade Federal de Goiás

Gelson Brigatto

Prof. Dr. Gelson Andréia Brigatto
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/ Universidade Federal de Goiás

Igor Kopcak

Prof. Dr. Igor Kopcak
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação/ Universidade Federal de Goiás

Goiânia – GO

2020

Agradecimentos

Primeiramente a minha família pelo apoio incondicional a todos esses anos de estudos, acreditando sempre neste como sendo a principal forma de crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos que me acompanharam nessa jornada árdua em busca de novos conhecimentos ao longo desses anos de graduação.

E a todos os professores da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, pelos ensinamentos compartilhados.

Resumo

O trabalho consiste no desenvolvimento de um aplicativo didático para as análises, em regime permanente, dos problemas comumente trabalhados nas disciplinas de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica (ISEE), obrigatória no curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás. O programa foi implementado no *software* MATLAB® por meio da interface App Designer que permite o desenvolvimento de interfaces gráficas intuitivas aos usuários, sendo o programa capaz de executar os cálculos das matrizes admitância e impedância nodal de um sistema elétrico, variados cálculos de fluxos de potência baseados nos diversos métodos estudados no curso e por último, cálculos de curto-circuito monofásicos e trifásicos assim como os resultados referentes as tensões pós-falta e correntes de contribuição da falta. O objetivo geral deste projeto é fornecer, aos alunos da disciplina de Introdução a Sistemas Energia Elétrica, uma ferramenta intuitiva e focada em resolver rapidamente os exercícios propostos na disciplina. Dessa forma, o aluno poderá comparar seus resultados obtidos, através de cálculos teóricos, com o *software* e assim poder consolidar de maneira consciente seus estudos na disciplina. Além disso, a ferramenta de cálculo de fluxo de potência e de análise de curto-circuito fornecerá aos alunos e futuros profissionais da área uma maneira rápida e eficaz de validar seus cálculos e análises de projetos.

Palavras-chave: Análise de Sistemas de Energia Elétrica. MATLAB®. App Designer. Educação em Engenharia. Fluxo de Carga. Cálculo de curto-circuito.

Abstract

The work consists in the development of a didactic application for the analysis, on a permanent basis, of the problems commonly worked in the subjects of Introduction to Electric Energy Systems (ISEE), mandatory in the undergraduate course in Electrical Engineering at the Federal University of Goiás. The program was developed in the MATLAB® software through App Designer interface, which allows the development of intuitive graphical interfaces for users, being able to perform the calculations of the nodal admittance matrix of an electrical system, various power flow calculations based on different methods studied in the course and finally, single-phase and three-phase short-circuit calculations, as well as the results related to post-fault voltages and fault contribution currents. The general objective of this project is to provide to the students registered in the subject of Introduction to Electric Energy Systems an intuitive tool and focused on the solver quickly. In this way, the students will be able to compare the results obtained, using theoretical calculations, with those obtained through the software and thus they being able to consciously consolidate their studies in the course. In addition, a tool including power flow calculations and short-circuit analysis will provide, for the students and future professionals in the field, a quick and effective way to validate your calculations and projects.

Keywords: Analysis of Electric Power Systems. MATLAB®. App Designer. Engineering Education. Load Flow. Short circuit calculation.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Sistema genérico de 3 barras. 15
Figura 2.2 – Matriz admitância nodal genérica. 17
Figura 2.3 - Ramo genérico de uma rede elétrica. 19
Figura 2.4 - Ilustração do método de Newton-Raphson. 24
Figura 2.5 - Decomposição em componentes simétricas de um sistema trifásico desequilibrado. 29
Figura 2.6 - Circuitos de sequência para um gerador síncrono. 30
Figura 2.7 - Circuito de sequência positiva e negativa para transformadores. 30
Figura 2.8 - Circuito equivalente monofásico de sequência zero para transformadores trifásicos. 30
Figura 2.9 - Modelo de sequência positiva e negativa para LT. 31
Figura 2.10 - Modelo de sequência zero para LT. 31
Figura 2.11 - Circuito equivalente de curto-circuito trifásico equilibrado. 32
Figura 2.12 - Circuito equivalente de curto-circuito monofásico. 33
Figura 3.1 - Janela inicial do PEISEE. 36
Figura 3.2 - Informações presentes na janela “Sobre” do PEISEE. 36
Figura 3.3 - Informações presentes na janela “Instruções de preenchimento” do PEISEE. 37
Figura 3.4 - Janela do Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal, aba “Parâmetros básicos”. 39
Figura 3.5 - Janela do Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal, aba “Parâmetros adicionais”. 40
Figura 3.6 - Painel “Cargas” com modelo por potência constante. 41
Figura 3.7 - Painel “Cargas” com modelo por impedância constante. 41
Figura 3.8 - Painel “Eliminar nós (Redução de Kron)”. 41
Figura 3.9 - Matrizes admitância e impedância nodal. 42
Figura 3.10 - janela “Métodos PFC”. 43
Figura 3.11 - Janela “Método Linearizado” preenchido. 44
Figura 3.12 - Janela “Relatório de Fluxo de Carga Linear”. 45
Figura 3.13 - Janela “Método de Newton-Raphson” 46

Figura 3.14 - Janela “Relatório de Fluxo de Carga”. 46
Figura 3.15 - Janela “Método de Newton-Raphson Desacoplado”.....47
Figura 3.16 - Janela “Análise de Curto-circuito”. 48
Figura 3.17 - Exemplo de “Relatório de falta” com resultados.....49
Figura 3.18 - Lado direito da janela “Análise de curto-circuito” com resultados. 50
Figura 4.1 - Exemplo de sistema da lista de exercício de ISEE. 51
Figura 4.2 - Resultados das matrizes do sistema da figura 4.1.....52
Figura 4.3 - Exemplo e sistema da lista de exercícios de ISEE. 53
Figura 4.4 - Resultados das matrizes do sistema da figura 4.3.....54
Figura 4.5 - Exemplo de sistema da lista de exercícios de ISEE. 55
Figura 4.6 - Resultados das matrizes do sistema da figura 4.5.....56
Figura 4.7 - Exemplo de falta em sistema da lista de exercícios de ISEE.....56
Figura 4.8 - Exemplo de falta em sistema da lista de exercícios de ISEE.....57
Figura 4.9 - Exemplo de curto-circuito em sistema da lista de exercícios de ISEE. ..58

Figura C. 1 - Resultado da simulação no ANAFAS do sistema da figura 4.7. 68
Figura C. 2 - Resultado da simulação no ANAFAS do sistema da figura 4.8. 71
Figura C. 3 - Resultado da simulação no ANAFAS do sistema da figura 4.9. 73

Sumário

1 Introdução 11
1.1 Motivação e objetivos 11
1.2 Metodologia 11
1.3 Estrutura do trabalho 12
2 Referencial teórico 13
2.1 Introdução 13
2.2 Modelo de sistemas elétricos por matrizes 13
2.2.1 Análise de sistemas através da forma matricial 14
2.2.2 Redução de redes 18
2.3 Fluxo de potência e métodos de resolução 18
2.3.1 Fluxo de Carga Linearizado (CC) 22
2.3.2 Método de Newton-Raphson 24
2.3.3 Método de Newton-Raphson Desacoplado 27
2.4 Análise de curto-circuito monofásico e trifásico 28
2.4.1 Cálculo de correntes de curto-circuito 31
2.4.2 Tensões pós-falta e Correntes de contribuição 34
3 Descrição do Programa para estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica 35
3.1 Pré-requisitos e Instalação 35
3.2 Ambiente inicial do software PEISEE 35
3.3 Ferramenta Nº 1: Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal 37
3.4 Ferramenta Nº 2: Cálculos de fluxo de potência (PFC) 42
3.5 Ferramenta No. 3: Análise de curto-circuito 47
4 Testes e resultados 51
4.1 Exemplos de aplicação usando as ferramentas No. 1 e No.2 do PEISEE. 51

4.2 Exemplos de aplicação usando a ferramenta No.3 do PEISEE 56
5 Conclusão 60
6 Referências 61
APÊNDICE A – Arquivo “LEIA.txt” 62
APÊNDICE B – Relatórios de fluxo de carga com software PEISEE e OpenDSS para sistemas dos exemplos das Figuras 4.1, 4.3 e 4.5. 63
B.1 – Relatório de fluxo de carga do PEISEE para o sistema da Figura 4.1 63
B.2 – Relatório de fluxo de carga do OpenDSS para o sistema da Figura 4.1 64
B.3 – Relatório de fluxo de carga do PEISEE para o sistema da Figura 4.3 65
B.4 – Relatório de fluxo de carga do OpenDSS para o sistema da Figura 4.3 66
B.5 – Relatório de fluxo de carga do PEISEE para o sistema da Figura 4.5 66
APÊNDICE C – Relatórios de falta obtidos com software PEISEE e ANAFAS para sistemas dos exemplos das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. 67
C.1 – Relatório de falta do PEISEE para o sistema da Figura 4.7 67
C.2 – Relatório de falta do ANAFAS para o sistema da Figura 4.7 68
C.3 – Relatório de falta do PEISEE para o sistema da Figura 4.8 70
C.4 – Relatório de falta do ANAFAS para o sistema da Figura 4.8 70
C.5 – Relatório de falta do PEISEE para o sistema da Figura 4.9 72
C.6 – Relatório de falta do ANAFAS para o sistema da Figura 4.9 73
APÊNDICE D – Relatórios de fluxo de carga com software PEISEE para sistemas IEEE. 74
Sistema IEEE de 14 barras 74
Sistema IEEE de 30 barras 76
Sistema IEEE de 57 barras 81
Sistema IEEE de 118 barras 88

1 Introdução

1.1 Motivação e objetivos

O Programa para Estudo da disciplina de Introdução à Sistemas de Energia Elétrica (PEISEE) foi pensado para o âmbito da disciplina de Introdução à Sistema de Energia Elétrica (ISEE), com objetivo de ser uma ferramenta acessível aos estudantes e focada, especificamente, na resolução dos exercícios propostos de maneira a auxiliar no aprendizado dessa disciplina obrigatória no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás (UFG).

O ambiente gráfico do software foi desenvolvido no App Designer e inspirado em outros softwares desenvolvidos na UFG, de forma que tentou-se manter um padrão de interface gráfica semelhante ao já existente para outras disciplinas.

Observou-se durante a graduação do autor, que certas disciplinas mais complexas e obrigatórias no curso necessitam de ferramentas computacionais que auxiliem os alunos na hora das atividades, pois muitos dos exercícios propostos não dispõem de gabarito de correção. Um exemplo de software existe para a disciplina de Transmissão de Energia Elétrica, outra disciplina complexa no curso, existe um software de apoio o qual se mostrou bastante útil na resolução dos exercícios sendo decisiva, na visão do autor, no sucesso e aprendizado da mesma.

Assim, o PEISEE foi idealizado de maneira a promover essa maior compreensão da disciplina e aprendizado do conteúdo por meio de exercícios, de modo que os estudantes tenham facilidade com a inserção das informações necessárias para as análises presentes na disciplina, a fim de obter resultados satisfatórios na conclusão da matéria.

1.2 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado considerando as seguintes etapas:

a) Revisão da teoria de ISEE;
b) Elaboração da interface gráfica;
c) Elaboração do código fonte do programa;

d) Comunicação do código fonte e da interface gráfica;
e) Testes do programa desenvolvido.

A revisão da teoria de ISEE foi feita principalmente com o auxílio de [1], [2], [3] e [4]. Para maior compreensão de fluxo de potência utilizaram-se também as referências [5] e [6]. Na revisão da teoria de curto-circuito utilizaram-se [7] e [8] e para os cálculos de tensões pós-falta e correntes de contribuição utilizaram-se [9] e [10].

Todo o desenvolvimento do aplicativo foi organizado em forma de projeto com metodologia de gerenciamento ágil, *Scrum*, o qual foi dividido em pequenos ciclos iterativos (*Sprints*) e planejado de forma a ter os resultados esperados ao final de cada prazo estipulado. Este método é amplamente utilizado na indústria de *softwares* e pode ser melhor visto no *Agile Practice Guide*, publicado pelo *Project Management Institute* (PMI) em 2017, [11].

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura do presente trabalho será dividida nos capítulos a seguir. No Capítulo 2 será apresentado, de forma resumida, os principais conceitos e definições relacionados com a teoria de análise de sistema de energia elétrica em regime permanente, conforme a ementa da Disciplina Introdução a Sistemas de Energia Elétrica da EMC/UFG, necessária para o adequado desenvolvimento do *software*. O Capítulo 3 consistirá na descrição do aplicativo PEISEE, sua interface gráfica e funcionalidades, assim como a apresentação de um tutorial básico de utilização do mesmo. No Capítulo 4 serão apresentados os testes e resultados obtidos das simulações realizadas no PEISEE de exercícios propostos na disciplina de ISEE e comparados com os resultados de outros *softwares* de referência. Por fim, no Capítulo 5 será explicitada a conclusão obtida com o trabalho.

2 Referencial teórico

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os modelos, formulações matemáticas e uma breve teoria necessários para o desenvolvimento do Programa para Estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica (PEISEE), que o faz capaz da realização de cálculos e análises pertinentes à disciplina de ISEE, para qual o programa foi concebido. Neste capítulo, serão tratados os seguintes assuntos:

a) Modelo de sistemas elétricos por matrizes admitância e impedância nodal.

b) Fluxo de potência e métodos de resolução
   b.1) Fluxo Linearizado
   b.2) Método de Newton-Raphson
   b.3) Método de Newton-Raphson Desacoplado

c) Análise de curto-circuito monofásico e trifásico
   c.1) Cálculo da corrente de curto-circuito
   c.2) Tensões pós-falta e Correntes de contribuição

2.2 Modelo de sistemas elétricos por matrizes

Antes de definir o modelo por matrizes do sistema elétrico é necessário revisar o conceito de representação por unidade (p.u). Essa representação consiste em substituir os valores das variáveis e constantes expressas pelo Sistema Internacional de unidades (S.I.) por valores em p.u., definidos como uma razão de seus próprios valores com os valores de base:

$$Valor_{(p.u.)} = \frac{Valor\ da\ Grandeza_{(S.I.)}}{Valor\ de\ Base_{(S.I.)}}$$

Essa mudança de dimensão requer a definição de pelo menos duas grandezas como base, geralmente a potência e a tensão como descrito em [4]. A potência é única para um determinado sistema e a tensão é definida para uma barra e acompanha a relação de transformação dos transformadores para as demais barras.

Com essas variáveis de base definidas é possível calcular as bases das outras variáveis de interesse para a representação por unidade, que são a corrente de base e a impedância de base para sistemas trifásicos, pelas expressões a seguir:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} \qquad Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \tag{2.1}$$

Sendo:

I_b - Corrente de base (kA);

S_b - Potência de base do sistema (MVA);

V_b - Tensão de base (kV);

Z_b - Impedância de base (Ω).

2.2.1 Análise de sistemas através da forma matricial

Considerando o porte dos sistemas elétricos, verifica-se a necessidade de cálculos mais rápidos e eficientes para resolução de problemas envolvendo a operação dos sistemas cada vez mais complexos. Sendo assim, mostrou-se relevante a ênfase em técnicas de solução de redes através de métodos matriciais que possibilitam uma aplicação rápida de modelos computacionais.

Dentre as matrizes que modelam um sistema elétrico, a matriz admitância nodal é especialmente interessante para análise das redes, pois expressa a natureza linear entre tensões de barras e injeções de correntes nas barras, como mostra a equação a seguir:

$$[\hat{I}] = [Y][\hat{E}] \tag{2.2}$$

Sendo:

$[\hat{I}]$ - Vetor (NB x 1) de injeções líquidas de correntes;

$[Y]$ - Matriz (NB x NB) admitância nodal;

$[\hat{E}]$ - Vetor (NB x 1) de tensões nodais;

NB - Número de barras ou nós na rede.

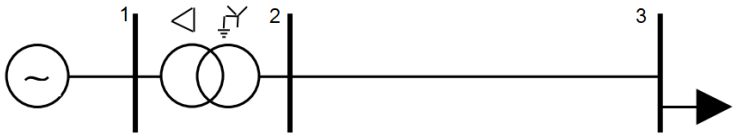
A importância dessa matriz se dá principalmente pois é usada para encontrar a solução do Problema de Fluxo de Carga (PFC).

A formulação das equações nodais da rede se baseia na aplicação da primeira Lei de Kirchhoff, conhecida como lei das correntes. Um dos métodos de obtenção da matriz admitância que deriva dessa primeira Lei, é o Método das Injeções de correntes.

Este método consiste em aplicar fontes de tensão nas barras e medir a injeção de corrente em cada barra, de acordo com o elemento da matriz desejado.

Exemplificando com o sistema elétrico de 3 barras da Figura 2.1:

Figura 2.1 - Sistema genérico de 3 barras.



Fonte: Adaptado de Arruda[1].

Temos da Figura 2.1 a matriz admitância abaixo:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \hat{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \hat{E}_1 \\ \hat{E}_2 \\ \hat{E}_3 \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Para encontrar os valores referentes a coluna um, é necessário considerar as tensões das demais barras iguais a zero, $\hat{E}_2 = \hat{E}_3 = 0$, com isso temos de (2.3):

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \hat{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{21} \\ Y_{31} \end{bmatrix} x \left[\hat{E}_1\right] \tag{2.4}$$

Encontramos as seguintes equações para os valores dos elementos da primeira coluna.

$$Y_{11} = \hat{I}_1/\hat{E}_1 \Big|_{\hat{E}_2 = \hat{E}_3 = 0}, \quad Y_{21} = \hat{I}_2/\hat{E}_1 \Big|_{\hat{E}_2 = \hat{E}_3 = 0}, \quad Y_{31} = \hat{I}_3/\hat{E}_1 \Big|_{\hat{E}_2 = \hat{E}_3 = 0}.$$

De modo semelhante é possível encontrar os valores referentes a coluna dois e três e obter as seguintes equações:

$$Y_{12} = \hat{I}_1/\hat{E}_2 \Big|_{\hat{E}_1 = \hat{E}_3 = 0}, \quad Y_{22} = \hat{I}_2/\hat{E}_2 \Big|_{\hat{E}_1 = \hat{E}_3 = 0}, \quad Y_{32} = \hat{I}_3/\hat{E}_2 \Big|_{\hat{E}_1 = \hat{E}_3 = 0},$$

$$Y_{13} = \hat{I}_1/\hat{E}_3 \Big|_{\hat{E}_1 = \hat{E}_2 = 0}, \quad Y_{23} = \hat{I}_2/\hat{E}_3 \Big|_{\hat{E}_1 = \hat{E}_2 = 0}, \quad Y_{33} = \hat{I}_3/\hat{E}_3 \Big|_{\hat{E}_1 = \hat{E}_2 = 0}.$$

Generalizando, para qualquer caso:

$$Y_{km} = \hat{I}_k / \hat{E}_m \,\big|_{\hat{E}_j=0, j\neq m}$$

Existe também um método de obtenção direta da matriz admitância nodal através de um algoritmo, que é a forma mais difundida e rápida para se encontrar os elementos da matriz, sendo mais prática em relação ao método anterior [5].

Seja uma matriz admitância nodal genérica de dimensão NBxNB:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & & Y_{3n} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}_{NBxNB}$$

É possível encontrar os elementos dessa matriz através dos seguintes passos:

- Para os elementos da diagonal principal Y_{kk}, soma-se todas as admitâncias conectadas à barra incluindo os elementos shunts.

$$Y_{kk} = y_k^{sh} + \sum_{m\in\Omega k} (y_{km} + y_{km}^{sh}) \qquad (2.5)$$

Sendo:

y_k^{sh} - Admitância do elemento conectado entre barra k e o nó terra;

y_{km} - Admitância do elemento conectado entre as duas barras k e m, sejam Linhas de Transmissão ou Transformadores;

y_{km}^{sh} - Admitâncias shunts dos elementos conectados em derivação nas duas barras k e m, geralmente susceptância capacitiva de Linhas de Transmissão;

$m \in \Omega k$ - Barras m pertencentes ao conjunto das barras conectadas diretamente a barra k.

- Para os elementos fora da diagonal principal Y_{km}, $(k \neq m)$, temos que o valor do elemento será o oposto da admitância conectada entre as duas barras, k e m

$$Y_{km} = -y_{km,\ (k\neq m)} \qquad (2.6)$$

Figura 2.2 – Matriz admitância nodal genérica.

$$\begin{bmatrix} y_1^{sh} + \sum_{m \in \Omega\, 1} (y_{1m} + y_{1m}^{sh}) & -y_{12} & \dots & -y_{1n} \\ -y_{21} & y_2^{sh} + \sum_{m \in \Omega\, 2} (y_{2m} + y_{2m}^{sh}) & \dots & -y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -y_{n1} & -y_{n2} & \dots & y_n^{sh} + \sum_{m \in \Omega\, n} (y_{nm} + y_{nm}^{sh}) \end{bmatrix}_{NBxNB}$$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Algumas características importantes da matriz admitância nodal:

- Matriz quadrada de dimensão NBxNB.
- Matriz simétrica em relação a diagonal principal $(Y_{km} = Y_{mk})$.
- Matriz de números complexos
- Matriz esparsa para redes de número elevados de barras.

Uma outra matriz de grande importância para análise sistemas elétricos é a matriz impedância nodal, que também evidencia a relação linear das tensões e correntes de um sistema elétrico e que pode ser obtida invertendo-se a matriz admitância nodal.

$$[Z] = [Y]^{-1}$$
$$\left[\hat{E}\right] = [Z]\left[\hat{I}\right] \qquad (2.7)$$

Sendo:

$\left[\hat{E}\right]$ - Vetor (NB x 1) de tensões nodais;

$[Z]$ - Matriz (NB x NB) de impedância Nodal;

$\left[\hat{I}\right]$ - Vetor (NB x 1) de injeções líquidas de correntes.

A importância dessa matriz se dá principalmente na utilização para resolução de análises de faltas em cálculos de curto-circuito na rede [9], [2] e [7].

A matriz de impedância nodal também pode ser obtida usando métodos de Injeções de correntes através de aplicação de fontes de correntes nas barras, assim como existem algoritmos para sua obtenção direta, porém não serão alvos de estudos desse trabalho visto que a simples inversão da matriz admitância já supre os objetivos das análises presentes no *software*.

Algumas características importantes da matriz de impedância nodal:

- Matriz quadrada de dimensão NBxNB.
- Matriz simétrica em relação a diagonal principal ($Z_{km} = Z_{mk}$).
- Matriz de números complexos
- Matriz Cheia.

2.2.2 Redução de redes

Outra análise importante nesse contexto é a Redução de nós do sistema, muito utilizada na análise de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) para "eliminar" as barras com injeção de corrente nula. Esse procedimento pode ser muito útil para reduzir o tamanho das matrizes na resolução das equações lineares mostradas em (2.2) e (2.7).

Para essa redução das matrizes do sistema elétrico, temos o Método de Eliminação de Gauss (MEG), que pode ser formulado matricialmente em blocos para eliminação de vários nós (Redução de Kron) [5]. A forma mais simples de realizar essa redução implica em recalcular cada elemento da matriz em questão, eliminado nó por nó. Seguindo essa ideia, o k-ésimo nó pode ser eliminado recalculando os demais elementos das outras (NB-1) linhas e colunas da matriz usando:

$$y'_{ij} = y_{ij} - \frac{y_{ik}y_{kj}}{y_{kk}} \tag{2.8}$$

Sendo:

y'_{ij} - Novo elemento da matriz alocado na i-ésima linha e j-ésima coluna;

y_{ij} - Elemento da matriz da i-ésima linha e j-ésima coluna;

y_{ik} - Elemento da matriz da i-ésima linha e k-ésima coluna;

y_{kj} - Elemento da matriz da k-ésima linha e j-ésima coluna;

y_{kk} - Elemento da matriz da k-ésima linha e k-ésima coluna.

2.3 Fluxo de potência e métodos de resolução

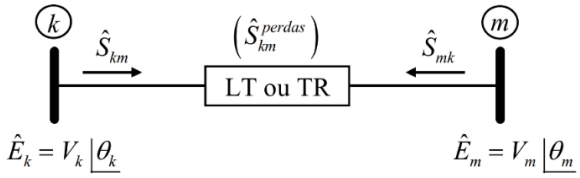
Os cálculos de fluxo de potência (ou fluxo de carga) em uma rede de energia elétrica tem grande importância no planejamento da expansão do sistema assim como na determinação da melhor condição de operação para este sistema como afirma

referência [4]. Sejam estes sistemas uma indústria de grande porte, uma rede de distribuição de energia elétrica ou mesmo todo o Sistema Interligado Nacional (SIN), os principais resultados advindos destes cálcucos consistem na determinação do estado da rede (módulo e o ângulo de fase da tensão em cada barra) e da distribuição de fluxos (potências ativa e reativa que circulam em cada linha) [3], [5] e [6].

Sendo assim, para obter resolução é comum a separação do problema em dois subsistemas, o subsistema 1 que consiste em encontrar os módulos e ângulos das tensões nas barras do sistema que são desconhecidas, através de métodos iterativos e aproximações lineares. E o subsistema 2 que consiste no cálculo direto dos fluxos de potência e as perdas através da substituição das variáveis obtidas no subsistema 1, nas equações que definem tais grandezas.

Considere para análise um ramo qualquer de um sistema elétrico, que representa uma linha de transmissão ou um transformador conforme imagem abaixo:

Figura 2.3 - Ramo genérico de uma rede elétrica.



Fonte: Brigatto[3].

A admitância entre as barras k e m pode ser expressa, como mostrado abaixo:

$$\hat{y}_{km} = g_{km} + jb_{km} \tag{2.9}$$

Sendo:

$\hat{y}_{km}$ - Admitância entre as barras k e m;

g_{km} - Parte real da admitância (condutância) do ramo km;

b_{km} - Parte imaginária da admitância (susceptância) do ramo km.

A potência complexa representada na Figura 2.3 acima pode ser escrita da seguinte forma:

$$\hat{S}_{km} = P_{km} + jQ_{km} \quad \text{e} \quad \hat{S}_{mk} = P_{mk} + jQ_{mk} \tag{2.10}$$

Sendo:

$\hat{S}_{km}$ - Potência complexa que flui da barra k para m;

$\hat{S}_{mk}$ - Potência complexa que flui da barra m para k;

P_{km} - Potência ativa que flui da barra k para m;

P_{mk} - Potência ativa que flui da barra m para k;

Q_{km} - Potência reativa que flui da barra k para m;

Q_{mk} - Potência reativa que flui da barra m para k.

Após a manipulação das equações acima, é possível encontrar equações matemáticas para a obtenção desses valores de potência que fluem de uma barra para outra. Esse conjunto de equações de potências compõem o problema do subsistema 2 mostrado a seguir. Esses equacionamentos são descritos com detalhes em [3] e [5].

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} cos\theta_{km} + b_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.11)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m (b_{km} cos\theta_{km} + g_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.12)$$

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} cos\theta_{km} - b_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.13)$$

$$Q_{mk} = -V_m^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m (b_{km} cos\theta_{km} + g_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.14)$$

Sendo:

V_k - Módulo da tensão da barra k;

V_m - Módulo da tensão da barra m;

g_{km} - Parte real da admitância (condutância) do ramo km;

b_{km} - Parte imaginária da admitância (condutância) do ramo km;

θ_{km} - Ângulo de defasagem entre a barra k e m;

b_{km}^{sh} - Susceptância shunt de derivação nas barras k e m.

Pode-se também equacionar as perdas dos ramos pelas seguintes equações:

$$P_{km}^{Perdas} = P_{km} + P_{mk} \quad (2.15)$$

$$Q_{km}^{Perdas} = Q_{km} + Q_{mk} \quad (2.16)$$

Sendo:

P_{km}^{Perdas} - Perdas de potência ativa no ramo km;

Q_{km}^{Perdas} - Perdas de potência reativa no ramo km.

Pode-se observar das equações (2.11) a (2.14), que para obter os valores das potências que fluem de uma barra para outra é necessário conhecer os valores de

tensão das barras, $\hat{E}_k = V_k \angle\theta_k$ e $\hat{E}_m = V_m \angle\theta_m$, e das demais barras do sistema elétrico, sendo então necessário conhecer todas as tensões das NB barras.

As barras de um sistema elétrico são caracterizadas quando se estuda o PFC da seguinte maneira conforme [5]:

- Barra tipo PQ: São conhecidos P (Potência ativa) e Q (Potência reativa), que correspondem às potências injetadas na barra e, V (Módulo da tensão) e θ (ângulo da tensão) da barra são desconhecidos (incógnitas). São chamadas de barras de carga, e representam barras sem controle, ou com controle limitado de tensão
- Barra tipo PV: São conhecidos P (Potência ativa) e V (Módulo da tensão), correspondendo à potência injetada na barra e magnitude da tensão da barra e, Q (Potência reativa) e θ (ângulo da tensão) são desconhecidos (incógnitas). São chamadas de barras de tensão controlada.
- Barra tipo $V\theta$: São conhecidos V (Módulo da Tensão) e θ (ângulo da tensão) da barra, correspondendo ao fasor de tensão na barra e, P (Potência ativa) e Q (Potência reativa) são desconhecidos (incógnitas). Chamada de Barra de referência angular ou barra *slack*.

As barras tipo PQ e PV, são utilizadas para representar barras de carga e geração com tensão controlada respectivamente. A barra de referência (*Slack*) da rede, acumula duas funções, fornece a referência angular, além de fechar o balanço de potência do sistema [5].

Para o cálculo do subsistema 1, que envolve conhecer o estado da rede (todas os módulos e ângulos de tensão das barras), diversos métodos são ultilizados, como, Método de Gauss-Seidel, Método Newton-Raphson, Método Newton-Raphson Desacoplado e outras variações. Esses métodos são chamados de iterativos, que usam várias repetições dos cálculos para se chegar em um resultado aproximado de acordo com a tolerância especificada. Há também o Método Linear que não é iterativo e utiliza de equações diretas através de uma linearização das equações da formulação básica do PFC para se obter um resultado aproximado.

2.3.1 Fluxo de Carga Linearizado (CC)

O método de cálculo linear do fluxo de potência em uma rede se baseia no acoplamento P-θ, no qual o fluxo de potência ativa de uma barra a outra é proporcional à abertura angular das tensões entre essas duas barras. Estes resultados advindos do fluxo de carga linear são bastante ultilizados nas fases de planejamento da rede, na qual pretende-se estudar o balanço energético em que se pode negligenciar a precisão do estado da rede elétrica para facilitar a implementação de ferramentas de otimização e a simulação de cenários variados. Estes resultados aproximados não são aplicáveis a sistemas de baixa tensão e de distribuição, sendo mais confiáveis em redes de alta tensão conforme é mostrado em [3], [5] e [6].

Considerando as equações (2.11) e (2.13) abaixo e sabendo que a relação das perdas ativas é dada pela equação (2.15):

$$P_{km}^{Perdas} = P_{km} + P_{mk} \tag{2.17}$$

Tem-se que:

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km}(V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m cos\theta_{km}) \tag{2.18}$$

Desconsiderando os termos referentes as perdas de P_{km} e P_{mk}, encontra-se:

$$P_{km} = -P_{mk} = -V_kV_m b_{km} sen\theta_{km} \tag{2.19}$$

Considerando que os módulos das tensões nodais são próximos a 1 p.u., que os ângulos das barras são pequenos mas não-nulos e sabendo que redes de alta tensão tem elavada relação X/R (reatância/resistência).

$$V_k \cong V_m \cong 1\ p.u.$$

$$sen\theta_{km} \cong \theta_{km}$$

$$b_{km} \cong -\frac{1}{x_{km}},\ \ g_{km} \approx 0$$

Temos então, considerando todas essas aproximações de (2.19) que:

$$P_{km} = x_{km}^{-1}\theta_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \tag{2.20}$$

Sendo:

- P_{km} - Potência ativa que flui da barra k para m;
- x_{km}^{-1} - Inverso da reatância indutiva entre as barras k e m;
- θ_{km} - Abertura angular entre as barras k e m.

Equação (2.22) é análoga à Lei de Ohm aplicada ao resistor pecorrido por uma corrente, sendo a corrente análoga ao fluxo P_{km}, o ângulo θ_{km} análogo a diferença de potencial entre dois pontos e a reatância x_{km} analoga a resistência do resistor.

Para um modelo matricial simples que visa expressar a equação (2.20) acima para todas as barras do sistema de modo a se obter uma relação linear conforme as equações (2.2) e (2.7), é conveniente expressar as injeções de potência ativa na barra k, que são resultado da soma das potências ativas que saem dessa barra k, conforme abaixo:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega k} x_{km}^{-1} \theta_{km}, \qquad (k = 1, \dots, NB) \tag{2.21}$$

$$P_k = (\sum_{m \in \Omega k} x_{km}^{-1}) \theta_k + \sum_{m \in \Omega k} (-x_{km}^{-1} \theta_m) \tag{2.22}$$

Resultando na seguinte expressão na sua forma matricial:

$$[P] = [B'][\theta] \tag{2.23}$$

Em que:

$$B'_{km} = -x_{km}^{-1}$$

$$B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega k} x_{km}^{-1}$$

Sendo:

$[P]$ - Vetor (NB x 1) de injeções líquidas de potência ativa;

$[B']$ - Matriz (NB x NB) de susceptância nodal;

$[\theta]$ - Vetor (NB x 1) de ângulo das tensões nodais;

Os angulos nodais em radianos são obtidos da seguinte forma:

$$[\theta] = [B']^{-1}[P] \tag{2.24}$$

As perdas de potência ativa em um ramo genérico km podem ser obtidas através de equacionamentos levando como base identidades trigonométricas conforme demonstrado pelas refêrencias [3] e [5], resultando nas expressões para as perdas abaixo:

$$P_{km}^{Perdas} = g_{km} \theta_{km}^2 \tag{2.25}$$

Sendo:

P_{km}^{Perdas} - Perdas de potência ativa no ramo km;

g_{km} - Condutância entre as barras k e m;

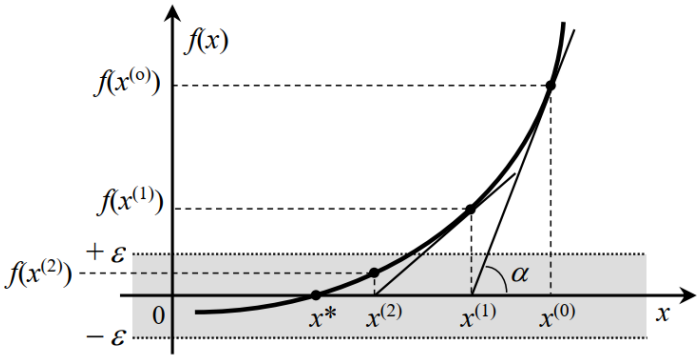
θ_{km} - Abertura angular entre as barras k e m.

A solução obtida pelo método do fluxo de carga linearizado é aproximada, mas permite estimar a distribuição de fluxos de potência ativa com baixo custo computacional e precisão aceitável para algumas aplicações [3].

2.3.2 Método de Newton-Raphson

A teoria geral do Método de Newton-Raphson se aplica a diferentes áreas nas quais os processos envolvidos são modelados por equações não-lineares e deseja-se obter as raízes dessas equações para solução desse sistema não-linear, através de sucessivas aproximações, conforme mostra a Figura 2.4:

Figura 2.4 - Ilustração do método de Newton-Raphson.



Fonte: Brigatto[3].

O método consiste em tentar encontrar a raiz da equação definindo um ponto inicial no eixo x, ($x^{(0)}$), onde a função definida nesse ponto ($f(x^{(0)})$) tem uma derivada $tg\alpha = \frac{df(x)}{dx}\Big|_{x=x^{(0)}} = \frac{f(x^{(0)})}{x^{(0)}-x^{(1)}}$, que define o coeficiente angular para uma reta que passa pelo ponto $(x^{(0)}, f(x^{(0)}))$, esta reta tem uma raiz ($x^{(1)}$), esses valores são atualizados através da repetição até que $f(x^{(i)}) \leq |\varepsilon|$, sendo ε a tolerância escolhida para este processo iterativo. Temos, então, que a equação geral para atualização da variável pelo método de Newton-Raphson é descrito como:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - \left(\frac{df(x)}{dx}\Big|_{x=x^{(i)}}\right)^{-1} f(x^{(i)}) \qquad (2.26)$$

Para utilizar esse método na resolução do substema 1 e encontrar as variáveis de módulo e ângulo de tensão nas barras de uma rede elétrica é necessário adequar as equações, pois as íncognitas desse sistema são vetores de funções de mais de uma variável e a derivada na equação (2.26) agora forma uma matriz Jacobiana de derivadas parciais, formada por quatro submatrizes, conforme (2.27). A formulação completa do método e suas adequações podem ser obtidas nas referências [3], [5] e [6].

$$\begin{bmatrix}[\theta^{(i+1)}]\\ [V^{(i+1)}]\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}[\theta^{(i)}]\\ [V^{(i)}]\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}[H] & [N]\\ [M] & [L]\end{bmatrix}^{-1} x \begin{bmatrix}[\Delta P^{(i)}]\\ [\Delta Q^{(i)}]\end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Sendo i o número de iterações:

$[\theta^{(i+1)}]$ - Vetor (NBx1) dos ângulos de tensão das barras;

$[V^{(i+1)}]$ - Vetor (NBx1) das tensões das barras;

$[\theta^{(i)}]$ - Vetor (NBx1) dos ângulos de tensão das barras;

$[V^{(i)}]$ - Vetor (NBx1) das antigas tensões das barras;

$[H]$ - Submatriz (NBxNB) de derivadas parciais $\partial P/\partial\theta$;

$[N]$ - Submatriz (NBxNB) de derivadas parciais $\partial P/\partial V$;

$[M]$ - Submatriz (NBxNB) de derivadas parciais $\partial Q/\partial\theta$;

$[L]$ - Submatriz (NBxNB) de derivadas parciais $\partial Q/\partial V$;

$[\Delta P^{(i)}]$ - Vetor (NBx1) de resíduos de potência ativas;

$[\Delta Q^{(i)}]$ - Vetor (NBx1) de resíduos de potência reativas;

Da equação (2.7) pode-se separar a matriz admitância nodal em duas matrizes:

$$[Y] = [G] + j[B]$$

Sendo:

$[Y]$ - Matriz (NB x NB) admitância nodal;

$[G]$ - Matriz (NB x NB) condutância nodal;

$[B]$ - Matriz (NB x NB) susceptância nodal

Tem-se de [5] que:

$$P_k^{cal} = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in \Omega k} V_m (G_{km} cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.28)$$

$$Q_k^{cal} = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in \Omega k} V_m (G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} cos\theta_{km}) \quad (2.29)$$

$[P^{esp}]$ é o vetor de potência ativa conhecida das barras do tipo PV e PQ, e $[Q^{esp}]$ é o vetor da potência reativa das barras do tipo PQ. Esses valores subtraídos das equações (2.28) e (2.29) formam as chamadas equações de resíduos (2.30) e (2.31). Essas funções de $[\Delta P^{(i)}]$ que são atualizadas a cada iteração conforme valores atuais de $V^{(i)}$ e $\theta^{(i)}$, assumem o papel da função $f(x^{(i)})$ na equação geral (2.26) e ditam o critério de parada para as iterações na resolução do método.

$$[\Delta \mathrm{P}] = [P^{esp}] - [P^{cal}] = 0 \quad (2.30)$$

$$[\Delta \mathrm{Q}] = [Q^{esp}] - [Q^{cal}] = 0 \quad (2.31)$$

Assim, quando as restrições $[\Delta P^{(i)}] \leq \varepsilon$ e $[\Delta Q^{(i)}] \leq \varepsilon$ são satisfeitas, as iterações são interrompidas e diz-se que o método convergiu para este sistema obtendo assim o resultado dos valores dos módulos de tensão das barras $[V^{(i)}]$ e os ângulos de tensão das barras $[\theta^{(i)}]$.

Para se encontrar os valores das submatrizes da matriz jacobiana é necessário resolver as equações (2.32) a (2.39):

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k^{cal}}{\partial \theta_k} = V_k \sum_{m \in \Omega k} V_m (B_{km} cos\theta_{km} - G_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.32)$$

$$H_{km} = \frac{\partial P_k^{cal}}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} cos\theta_{km}) \quad (2.33)$$

$$N_{kk} = \frac{\partial P_k^{cal}}{\partial V_k} = 2V_k G_{kk} + \sum_{m \in \Omega k} V_m (G_{km} cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.34)$$

$$N_{km} = \frac{\partial P_k^{cal}}{\partial V_m} = V_k (G_{km} cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.35)$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k^{cal}}{\partial \theta_k} = V_k \sum_{m \in \Omega k} V_m (G_{km} cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.36)$$

$$M_{km} = \frac{\partial Q_k^{cal}}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}) \quad (2.37)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k^{cal}}{\partial V_k} = -2V_k B_{kk} + \sum_{m \in \Omega k} V_m (G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} cos\theta_{km}) \quad (2.38)$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k^{cal}}{\partial V_m} = V_k (G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} cos\theta_{km}) \quad (2.39)$$

Sendo:

$\boldsymbol{X}_{kk}$ - Elemento da diagonal principal da submatriz $[\boldsymbol{X}]$;

$\boldsymbol{X}_{km}$ - Elemento fora da diagonal principal da submatriz $[\boldsymbol{X}]$;

P_k^{cal} - Potência ativa líquida calculada da barra k.

Q_k^{cal} - Potência reativa líquida calculada da barra k.

V_k - Módulo da tensão da barra k.

V_m - Módulo da tensão da barra m.

G_{kk} - Elemento da matriz $[G]$ da linha k e coluna k.

G_{km} - Elemento da matriz $[G]$ da linha k e coluna m.

B_{kk} - Elemento da matriz $[B]$ da linha k e coluna k.

B_{km} - Elemento da matriz $[B]$ da linha k e coluna m.

θ_{km} - Abertura angular entre a barra k e m.

São essas equações que formam o desenvolvimento do método de Newton-Raphson para Sistemas Elétricos. Todo o desenvolvimento dessas equações podem ser observadas com maiores detalhes nas referências [3] e [5].

2.3.3 Método de Newton-Raphson Desacoplado

O método de Newton-Raphson Desacoplado é uma variação do Método de Newton-Raphson baseado em algumas aproximações. Assim como no método linear, este também considera que os ângulos das barras de uma rede elétrica são pequenos e que existe uma elevada relação X/R para redes de alta-tensão. Além dessas aproximações, o método desacoplado se baseia principalmente no fato que o fluxo de potência ativa é mais sensível a variações de ângulo do que a variações de módulo das tensões, assim como o fluxo de potência reativa é mais sensível a variações de módulo do que de ângulo das tensões. Por conta dessas razões é possível reduzir a matriz jacobiana, eliminando a submatriz $[N]$ (sensibilidade PV) e submatriz $[M]$ (sensibilidade $Q\theta$) sem grandes prejuízos aos resultados para redes elétricas de

alta tensão e assim economizando processamento e obtendo mais velocidade nas análises de fluxo de potência.

Considerando o exposto, temos que a equação (2.27) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix}[\theta^{(i+1)}]\\ [V^{(i+1)}]\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}[\theta^{(i)}]\\ [V^{(i)}]\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}[H] & 0\\ 0 & [L]\end{bmatrix}^{-1} x \begin{bmatrix}[\Delta P^{(i)}]\\ [\Delta Q^{(i)}]\end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Realizando a multiplicação da matriz jacobiana pelos vetores de resíduos, percebe-se que é possível separar (desacoplar) a equação em dois subproblemas conforme mostrado abaixo:

Subproblema $P\theta$:

$$[\theta^{(i+1)}] = [\theta^{(i)}] + [H]^{-1}[\Delta P^{(i)}] \quad (2.41)$$

Subproblema QV:

$$[V^{(i+1)}] = [V^{(i)}] + [L]^{-1}[\Delta Q^{(i)}] \quad (2.42)$$

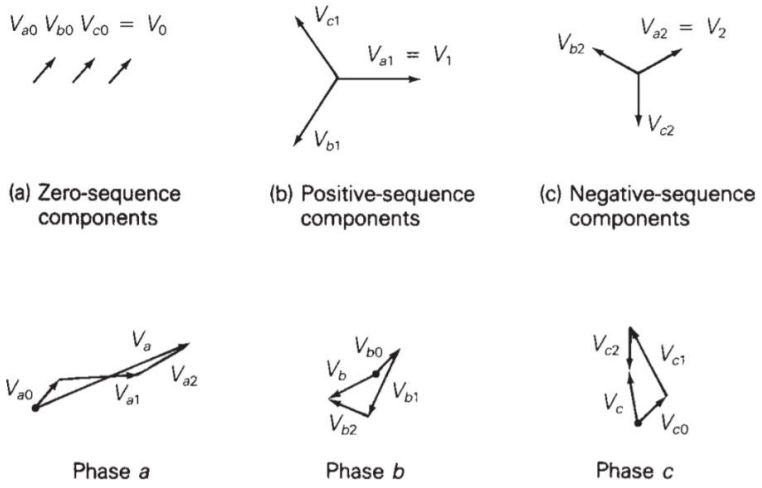
Sendo necessário a convergência dos dois subproblemas $[\Delta P^{(i)}] \leq \varepsilon$ e $[\Delta Q^{(i)}] \leq \varepsilon$ para se obter os resultados do método, visto que na prática os dois subproblemas têm velocidades de convergência distintas [3].

O método desacoplado apresenta uma implementação mais complexa e sua convergência é pouco confiável para redes de média e baixa tensão devido à usual relação X/R mais baixa [3].

2.4 Análise de curto-circuito monofásico e trifásico

Primeiramente é necessário descrever brevemente sobre o método de componentes simétricas aplicada a uma rede trifásica enunciado por *Fortescue* em 1918, que diz que, “um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados e essa decomposição é única.” [8].

Figura 2.5 - Decomposição em componentes simétricas de um sistema trifásico desequilibrado.



Fonte: GLOVER[10].

A matriz de transformação $[T]$ de componentes simétricas para tensões fasoriais está em (2.43):

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_a \\ \hat{V}_b \\ \hat{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \hat{V}_0 \\ \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix} \tag{2.43}$$

Sendo:

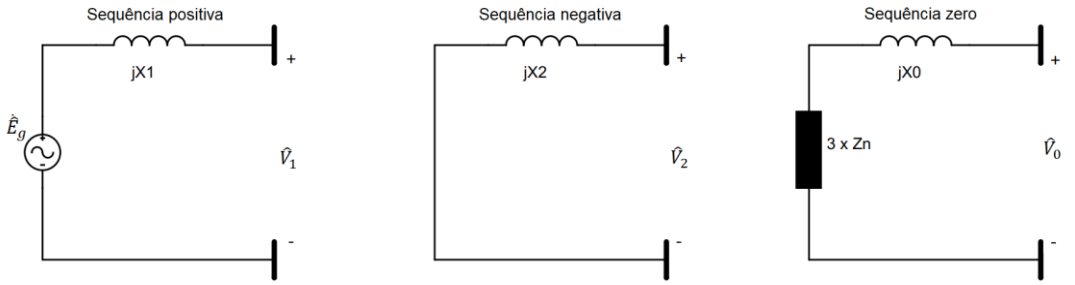
a - Operador complexo com valor de $e^{\frac{j2\pi}{3}} = 1\angle 120^o$;

a^2 - Operador complexo com valor de $e^{\frac{j4\pi}{3}} = 1\angle -120^o$;

Esse desenvolvimento da matriz de transformação aplicada a uma rede elétrica polifásica pode ser visto com detalhes na referência [9]. Tendo em vista esse método, é evidente a necessidade de modelar os equipamentos do sistema elétrico de potência para componentes simétricas, que envolvem os geradores, linhas de transmissão e transformadores. Esses modelos serão apresentados brevemente neste trabalho, visto que não é o objetivo do mesmo. Os detalhes dos modelos podem ser encontrados nas referências [9], [2], [10] e [7].

Para os Geradores Síncronos, a Figura 2.6 mostra seus modelos de sequência positiva, negativa e zero. Os valores das reatâncias de sequência são iguais a reatância síncrona do gerador $jx_d = jx_1 = jx_2 = jx_0$. A impedância Zn corresponde a impedância de aterramento do gerador.

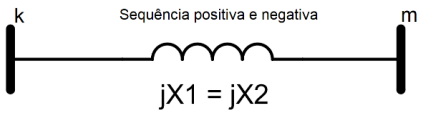
Figura 2.6 - Circuitos de sequência para um gerador síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os transformadores trifásicos de núcleo envolvente a representação simplificada para o modelo de sequência positiva e negativa tem o mesmo valor, $jx_1 = jx_2$, conforme mostrado na Figura 2.7.

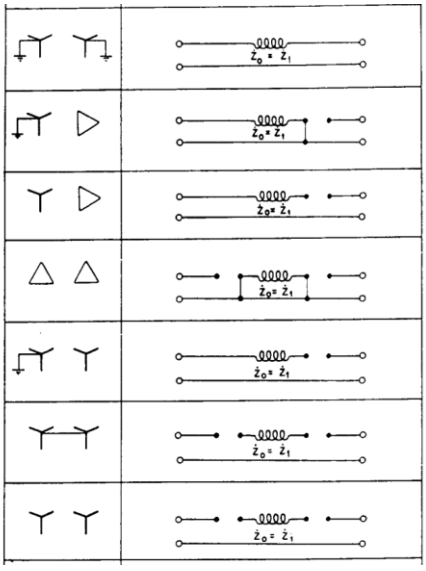
Figura 2.7 - Circuito de sequência positiva e negativa para transformadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Suas representações em componentes de sequência zero variam de acordo com as respectivas conexões dos enrolamentos do primário e secundário do transformador, conforme Figura 2.8.

Figura 2.8 - Circuito equivalente monofásico de sequência zero para transformadores trifásicos.

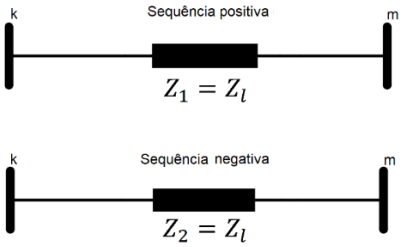


Fonte: Kindermann[7].

A representação de linhas de transmissão em circuitos de sequência será apresentada a seguir e se assemelha um pouco aos de geradores síncronos. É Importante ressaltar que essa representação não leva em consideração acoplamentos magnéticos entre fases ou entre linhas de transmissão, assim como os componentes de derivação shunt não são incluídos nessa análise.

Os modelos de sequência positiva e negativa são iguais, sendo Z_l a impedância série equivalente da LT, conforme mostrado abaixo:

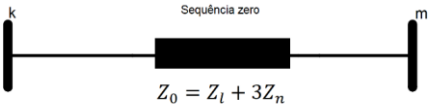
Figura 2.9 - Modelo de sequência positiva e negativa para LT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo de sequência zero para linhas de transmissão é mostrado na Figura 2.10, em que Z_n é a impedância de retorno da LT, conforme a referência [2]. Porém essas impedâncias de retorno são bastante complexas de se obter, visto que dependem da resistividade do solo por onde passa a LT, do cabo de cobertura e de todo o terreno onde se encontra a mesma [7]. Uma determinação analítica mais precisa da impedância de sequência zero pode ser obtida utilizando o método de Carson mostrado na referência [9].

Figura 2.10 - Modelo de sequência zero para LT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.1 Cálculo de correntes de curto-circuito

Para o cálculo da corrente de curto-circuito trifásico equilibrado de uma barra k qualquer do sistema elétrico de potência tem-se a expressão em (2.44):

$$\hat{I}_{cc3f,k} = \frac{\hat{V}_k^{pf}}{Z_{k,1}^{th} + Z_f} \tag{2.44}$$

Sendo:

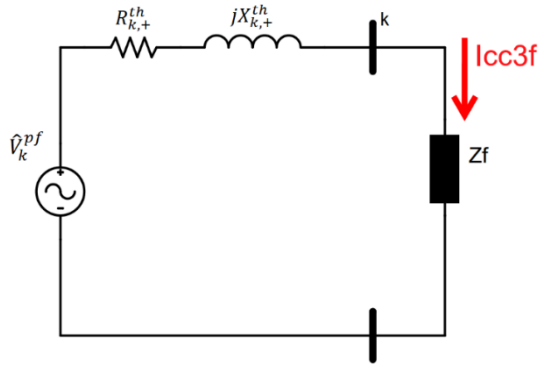
$\hat{I}_{cc3f,k}$ - Corrente de curto-circuito trifásico na barra k;

$\hat{V}_k^{pf}$ - Tensão pré-falta na barra k;

$Z_{k,1}^{th}$ - Impedância de sequência positiva equivalente de Thévenin da barra k;

Z_f - Impedância de falta.

Figura 2.11 - Circuito equivalente de curto-circuito trifásico equilibrado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo da corrente de curto-circuito monofásico em uma barra k qualquer do sistema elétrico de potência, tem-se a expressão em (2.45):

$$\hat{I}_{cc1f,k} = \frac{3\hat{V}_k^{pf}}{Z_{k,1}^{th} + Z_{k,2}^{th} + Z_{k,0}^{th} + Z_f} \qquad (2.45)$$

Sendo:

$\hat{I}_{cc3f,k}$ - Corrente de curto-circuito trifásico na barra k;

$\hat{V}_k^{pf}$ - Tensão pré-falta na barra k;

$Z_{k,1}^{th}$ - Impedância de sequência positiva equivalente de Thévenin da barra k;

$Z_{k,2}^{th}$ - Impedância de sequência negativa equivalente de Thévenin da barra k;

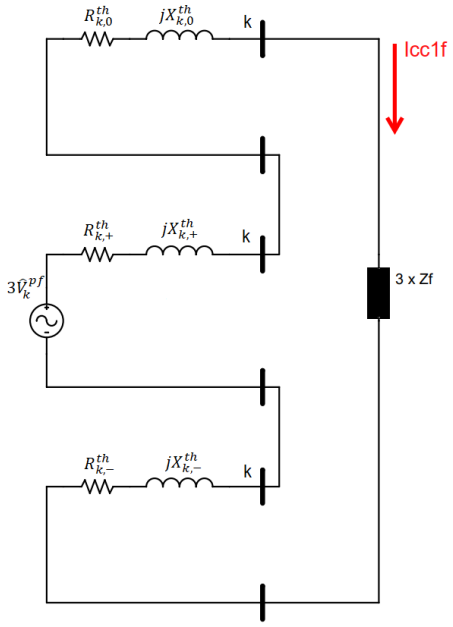
$Z_{k,0}^{th}$ - Impedância de sequência zero equivalente de Thévenin da barra k;

Z_f - Impedância de falta.

Os elementos das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero equivalente das barras ($Z_{k,1}^{th}$, $Z_{k,2}^{th}$ *e* $Z_{k,0}^{th}$), podem ser encontrados montando os circuitos de sequência para o sistema elétrico de acordo com os modelos de sequência dos componentes do SEP apresentados anteriormente. Após obter o

circuito equivalente em termos dos componentes de sequência é possível reduzir o circuito através dos métodos de circuitos elétricos para encontrar a impedância equivalente de Thévenin do nó (barra) desejado.

Figura 2.12 - Circuito equivalente de curto-circuito monofásico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Porém, como mencionado anteriormente a matriz impedância nodal desempenha um papel importante na análise de curtos-circuitos, visto que estas impedâncias aparecem naturalmente na obtenção dessa matriz. O elemento da diagonal principal da matriz impedância nodal (Z_{kk}) corresponde a impedância equivalente vista daquela barra em relação ao nó de referência (terra).

Como mencionado anteriormente, o processo de obtenção da matriz admitância é mais simples comparado ao da matriz de impedância. Logo o procedimento de obtenção das impedâncias equivalentes de Thévenin de sequência da barra, se caracteriza primeiramente pela obtenção de uma matriz admitância para cada sequência (positiva, negativa e zero), pelos mesmos procedimentos descritos na Seção 2.2, e em seguida inverter cada uma dessas matrizes para obter as matrizes impedância de cada sequência, na qual se utilizam para os cálculos de curto-circuito

$$Z^{th}_{k,1} = Z^{+}_{kk}, \qquad Z^{th}_{k,2} = Z^{-}_{kk}, \qquad Z^{th}_{k,0} = Z^{0}_{kk} \tag{2.46}$$

$$Z^{+}_{kk} = R^{+}_{kk} + jX^{+}_{kk}, \qquad Z^{-}_{kk} = R^{-}_{kk} + jX^{+}_{kk}, \qquad Z^{0}_{kk} = R^{0}_{kk} + jX^{+}_{kk} \tag{2.47}$$

2.4.2 Tensões pós-falta e Correntes de contribuição

As tensões que ocorrem no momento da falta trifásica, aqui chamadas de tensões pós-falta trifásica, podem ser obtidas através da seguinte equação matricial. As equações presentes nessa subseção podem ser encontradas em [9].

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_1^{f,+} \\ \vdots \\ \hat{V}_k^{f,+} \\ \vdots \\ \hat{V}_n^{f,+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ \hat{V}_k^{pf} \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z^+{}_{11} & Z^+{}_{12} & Z^+{}_{13} & \cdots & Z^+{}_{1n} \\ \vdots & & & & \vdots \\ Z^+{}_{k1} & Z^+{}_{k1} & Z^+{}_{k1} & & Z^+{}_{kn} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ Z^+{}_{n1} & Z^+{}_{n2} & Z^+{}_{n3} & \cdots & Z^+{}_{nn} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -\hat{I}_k^{f,+} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.48}$$

Sendo:

$V_i^{f,+}$ - Tensão pós-falta de sequência positiva na barra i;

$\hat{V}_k^{pf}$ - Tensão pré-falta na barra k;

$Z^+{}_{ij}$ - Elemento da matriz de impedância de sequência positiva;

$I_k^{f,+}$ - Corrente de sequência positiva de falta da barra.

Através da equação (2.48) é possível encontrar as tensões pós-falta de sequência positiva de cada barra e com isso, através da matriz de transformação $[T]$ de (2.43) encontram-se as tensões trifásicas pós-falta resolvendo a equação (2.49) para cada barra i.

$$\begin{bmatrix} \hat{V}_{i,a}^f \\ \hat{V}_{i,b}^f \\ \hat{V}_{i,c}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{V}_i^{f,+} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.49}$$

Conhecendo as tensões trifásicas pós-falta de cada barra, é possível encontrar as correntes de contribuição da falta trifásica em um ramo "*i-j*" qualquer do sistema apenas resolvendo a equação abaixo para cada ramo:

$$\hat{I}_{ij}^f = \frac{\hat{V}_i^f - \hat{V}_j^f}{z_{ij}} \tag{2.50}$$

Sendo:

$\hat{I}_{ij}^f$ - Corrente de contribuição da falta trifásica no ramo "*i-j*";

$\hat{V}^f{}_x$ - Tensão trifásica pós-falta da barra x;

z_{ij} - Impedância primitiva do ramo "*i-j*".

3 Descrição do Programa para estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica

3.1 Pré-requisitos e Instalação

Para os *softwares* produzidos e implementados no ambiente do MATLAB® como o PEISEE é necessário ter instalado no computador do usuário o compilador do MATLAB® (MATLAB Runtime). Para poder executar este *software* em questão, é necessário ter o MATLAB Runtime V9.6 disponível para os sistemas operacionais em 64-bit, Windows, Linux e MacOS (Mais informações em “LEIA.txt” no APÊNDICE A).

Para a instalação do PEISEE no computador do usuário, será disponibilizado um link do Google Drive aberto para os interessados, neste link haverá duas pastas com as opções de instalação para os usuários. A pasta “PEISEE_App”, para aqueles usuários que já tenham instalado o MATLAB Runtime V9.6 e a pasta “PEISEE + MATLAB RUNTIME V9.6_installerWeb” para os usuários que não tenham o MATLAB Runtime em seu computador e queiram instala-lo com o PEISEE (Mais informações em “LEIA.txt” no APÊNDICE A).

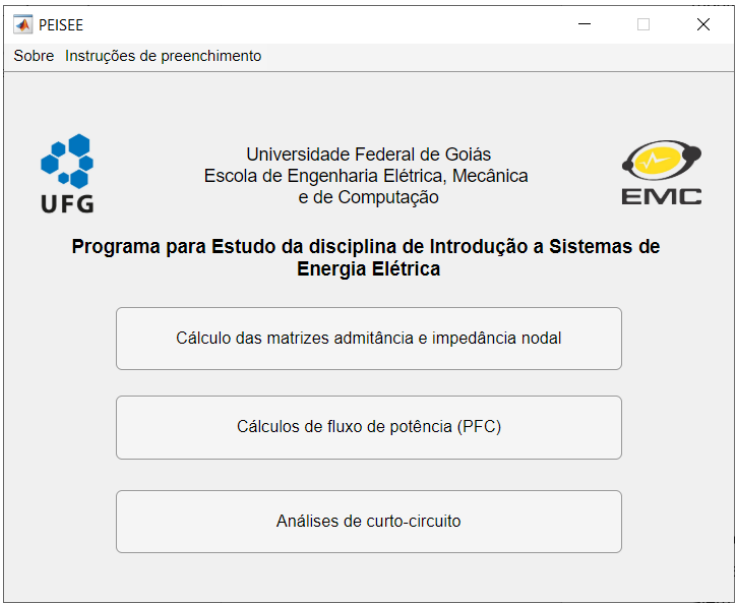
3.2 Ambiente inicial do software PEISEE

Com o levantamento teórico apresentado no Capítulo 2 foi desenvolvido o Programa para Estudo da disciplina de Introdução à Sistemas de Energia Elétrica (PEISEE) implementado no *software* MATLAB®. O PEISEE tem interface gráfica desenvolvida no App Designer, um ambiente de programação de aplicações *desktops* do próprio MATLAB®. Este programa foi desenvolvido para realizar as seguintes aplicações principais:

a) Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal
b) Cálculos de fluxo de potência (PFC)
c) Análise de curto-circuito

Essas três opções são apresentadas na janela inicial do programa que é mostrada na Figura 3.1 na forma de três botões centralizados.

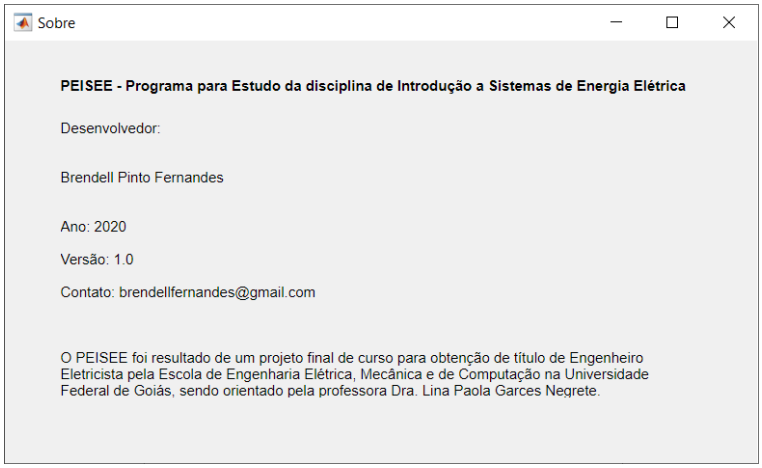
Figura 3.1 - Janela inicial do PEISEE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

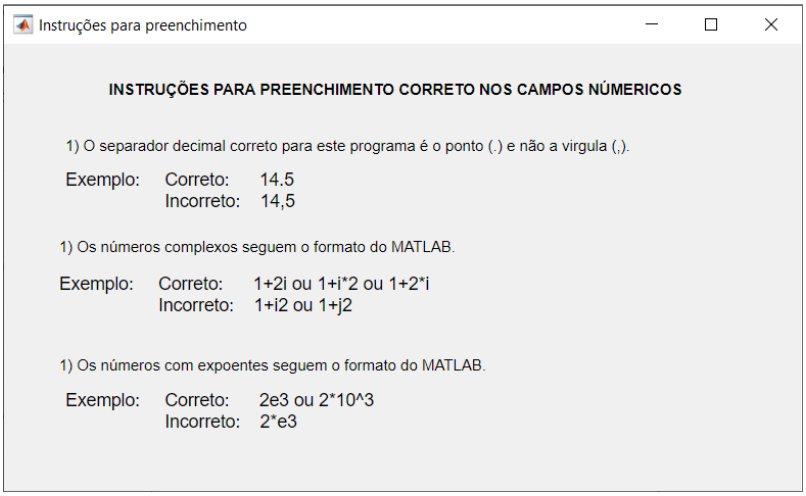
No canto superior direito há outros dois botões menores “Sobre” e “Instruções de preenchimento” que trazem informações sobre o *software*. Essas informações são referentes ao desenvolvedor, versão, contato e um breve contexto de sua concepção, além de informações necessárias para correta maneira de preenchimento dos campos numéricos do *software*, conforme mostrado nas Figuras 3.2 e 3.3.

Figura 3.2 - Informações presentes na janela “Sobre” do PEISEE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.3 - Informações presentes na janela “Instruções de preenchimento” do PEISEE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Ferramenta Nº 1: Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal

Pressionando o botão com opção “Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal” da janela inicial (mostrada na Figura 3.1) é aberta uma nova janela conforme ilustra a Figura 3.4. O objetivo dessa janela é obter as informações (dados de entrada) do sistema elétrico para o qual se deseja calcular as matrizes em questão. No canto superior direito há duas abas “Parâmetros básicos” e “Parâmetros adicionais”.

A primeira aba, “Parâmetros básicos”, que é aberta com a inicialização da janela, traz campos destinados ao preenchimento das informações gerais do sistema. Inicialmente, solicita-se o número de barras do sistema e a descrição da unidade padrão utilizada para representá-lo. Neste último caso, permite-se a representação de unidades usando o Sistema Internacional (S.I.) ou diretamente usando valores em por unidade (p.u.). Caso seja utilizado o (S.I.), será necessário o preenchimento da potência de base do sistema em MVA e das tensões de base das barras em kV, conforme o número de barras informado, caso contrário estes campos são desabilitados.

Ainda na primeira aba temos o painel “Geradores” que é destinado ao preenchimento das informações relacionadas com a geração. Neste painel, deve-se primeiro definir a quantidade de geradores no sistema, essa opção irá habilitar um número de linhas a serem preenchidas na tabela correspondente à quantidade de

geradores especificada, podendo-se então preencher as informações técnicas pertinentes aos geradores. Essas informações técnicas são a potência nominal do gerador em MVA, tensão nominal do gerador em kV, reatância em %, e o número da barra à qual ele está conectado.

No painel “Linhas de Transmissão”, deve-se primeiro informar a quantidade de LTs no sistema, para assim preencher as informações referentes a cada LT. Neste caso, as informações correspondem ao número da barra de início e da barra final da linha, comprimento em quilômetros, resistência série equivalente da linha em Ω/km, reatância indutiva série da linha em Ω/km e reatância capacitiva total da linha em kΩ*km.

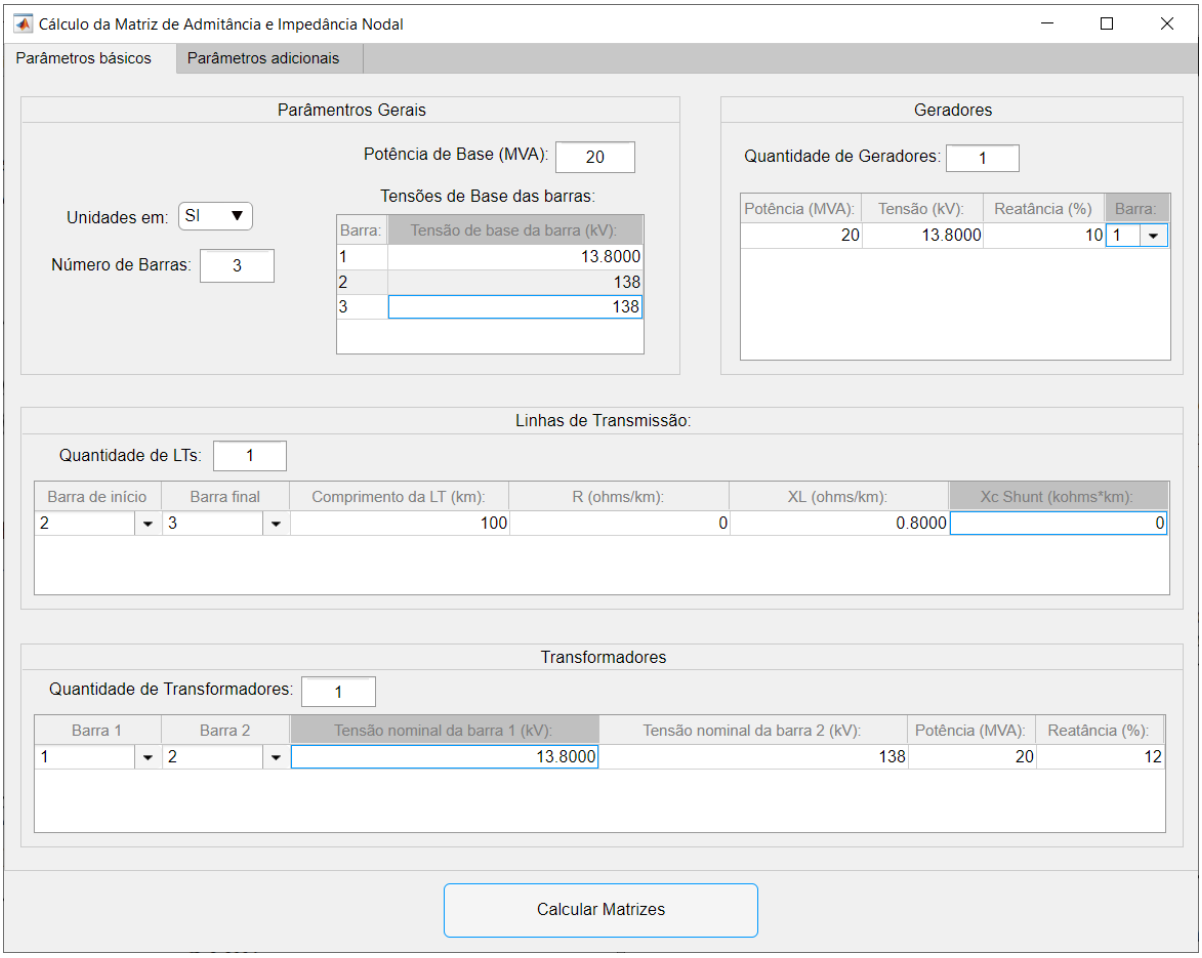
No painel “Transformadores”, da mesma maneira como nos outros painéis, preenche-se primeiro o campo referente à quantidade de transformadores presentes no sistema e, após isso, preenchem-se os campos relacionados com as informações técnicas de cada equipamento. Os dados necessários são: as barras (k e i) que são interligadas nos terminais do transformador, tensão nominal da barra k em kV, tensão nominal da barra i em kV, potência nominal do transformador em MVA e a reatância indutiva do transformador em %. Preenchidos esses campos já é possível calcular as matrizes do sistema pressionando o botão da parte inferior da janela com nome “Calcular Matrizes”.

Na segunda aba “Parâmetros adicionais” são apresentados campos que disponibilizam a entrada de informações complementares. Cabe ressaltar, que quando se muda de aba não há perda de informações. Nessa nova aba são visualizados campos para preenchimento de novas informações do sistema como, cargas, elementos conectados em *shunt* e a possibilidade de eliminar barras com injeção de corrente nula, pelo método de redução de Kron, conforme mostra a Figura 3.8.

No painel “Cargas”, como nos outros painéis já descritos, é necessário primeiro informar a quantidade de cargas presentes no sistema. Nesta aplicação foram considerados dois modelos matemáticos para as cargas: Potência constante e Impedância constante. Assim sendo, além de especificar a barra onde estão alocadas as cargas, para o primeiro modelo são solicitados os dados de potência da carga, tensão na carga e fator de potência (ver Figura 3.6) e para o modelo de impedância constante é solicitado apenas o valor em ohms (ver Figura 3.7). Para considerar cada um desses modelos, o painel se modifica para possibilitar a correta entrada de dados.

Uma observação pertinente aos dados das cargas inseridos para o cálculo de matrizes é que caso tenha interesse em utilizar os resultados dessas matrizes nos cálculos posteriores de fluxo de potência que serão descritos na Seção 3.2, não se deve adicionar cargas nesse campo, devendo-se adicioná-las somente nas janelas correspondentes à ferramenta do fluxo de potência, conforme ressaltado na observação que aparece nas Figuras 3.6 e 3.7.

Figura 3.4 - Janela do Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal, aba “Parâmetros básicos”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

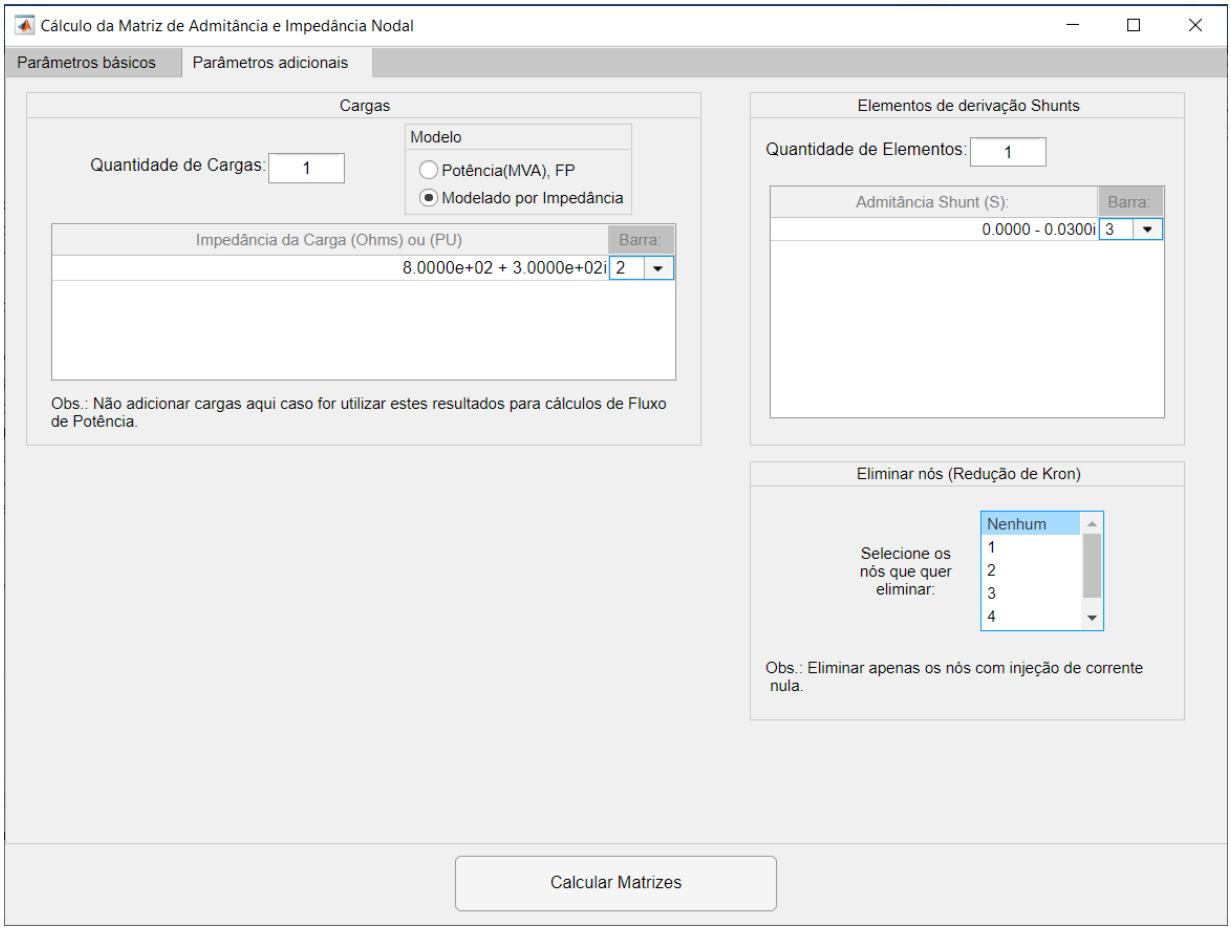
No painel “Elementos de derivação *Shunts*”, inicia-se com o mesmo padrão, necessitando informar primeiro a quantidade de elementos shunts no sistema, depois, informar o valor da admitância em Siemens (S) e o número da barra ao qual o elemento está conectado. É importante lembrar no preenchimento deste painel, a

forma correta de adicionar os números complexos conforme presente na janela “Instruções de preenchimento”.

No painel “Eliminar nós (Redução de Kron)”, é possível selecionar os nós (barras) que se deseja eliminar no sistema, reduzindo-se assim o tamanho das matrizes. A lista é iniciada com a opção “Nenhuma”, caso se deseje manter o número original de nós do sistema e, seguido dos números de todas as barras do sistema, sendo possível selecionar mais de uma barra, como mostrado na Figura 3.8. Importante lembrar da teoria que somente podem ser eliminados aqueles nós com injeção de corrente nula, conforme a observação presente no painel.

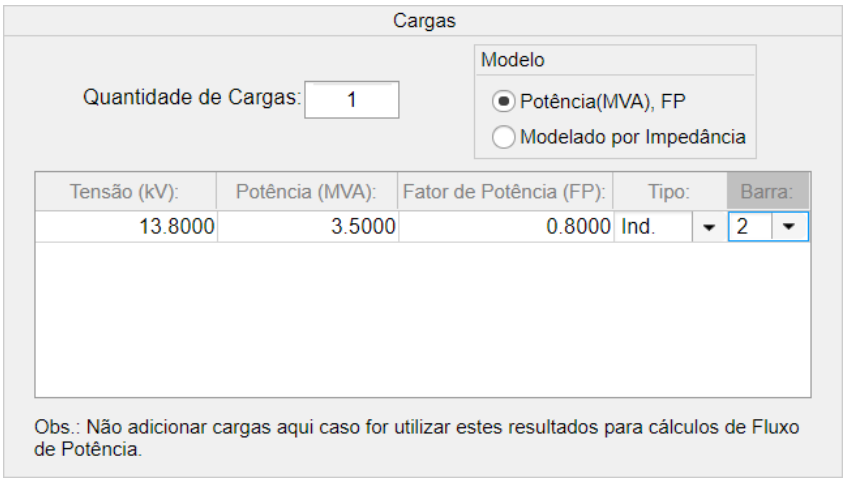
Todos os cálculos envolvidos nesta ferramenta “Cálculo da Matriz de admitância e impedância nodal” foram descritos no Capítulo 2, na Seção 2.2.

Figura 3.5 - Janela do Cálculo das matrizes admitância e impedância nodal, aba “Parâmetros adicionais”.



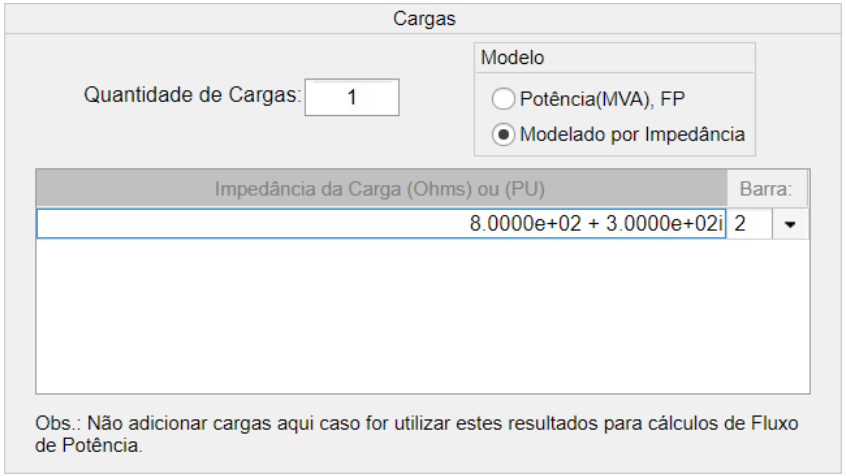
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.6 - Painel “Cargas” com modelo por potência constante.



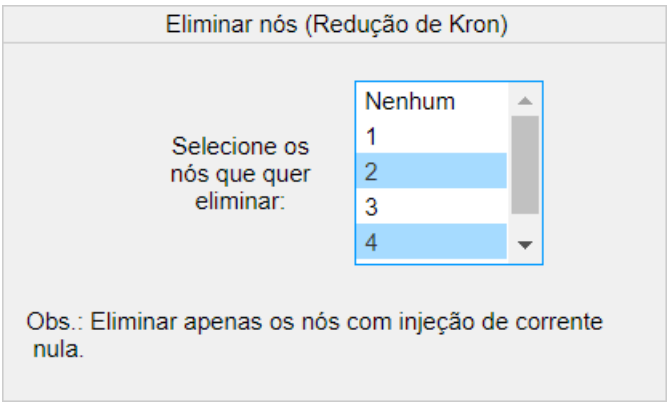
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.7 - Painel “Cargas” com modelo por impedância constante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

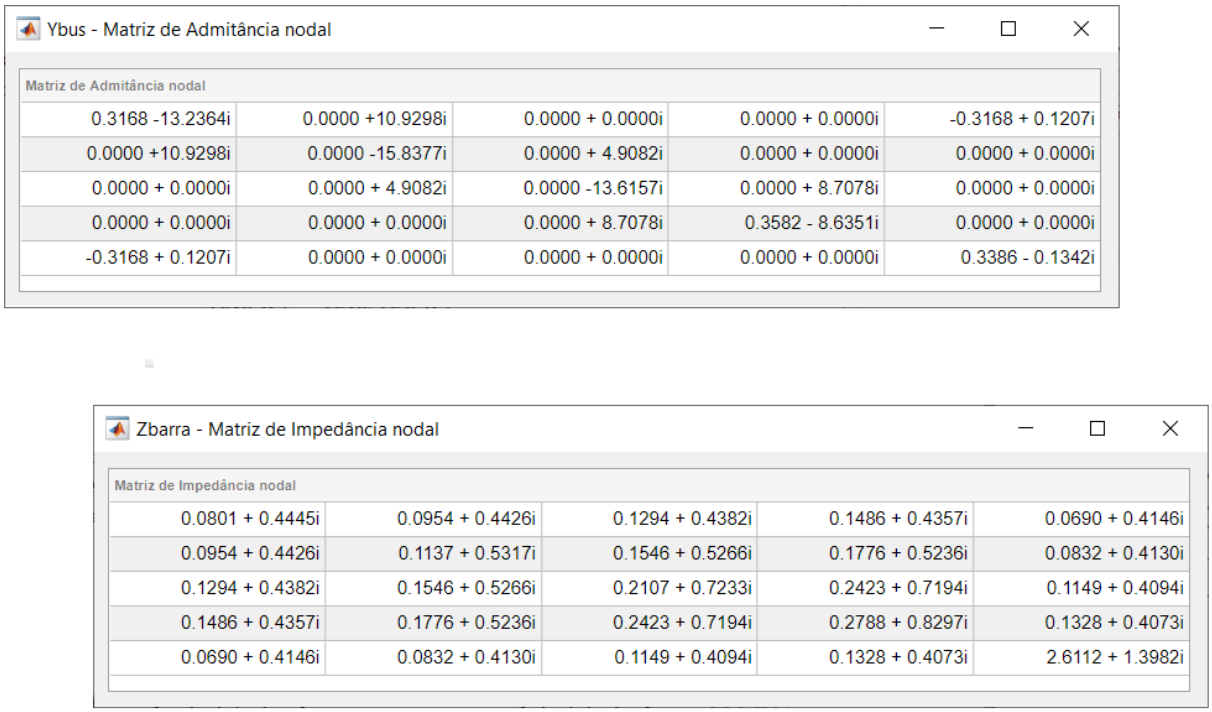
Figura 3.8 - Painel “Eliminar nós (Redução de Kron)”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pressionando o botão “Calcular Matrizes”, os cálculos matemáticos são executados e as matrizes do sistema são apresentadas ao usuário como tabelas, conforme Figura 3.9 mostrada abaixo. Resultados de testes e estudos de casos serão apresentados no Capítulo 4.

Figura 3.9 - Matrizes admitância e impedância nodal.

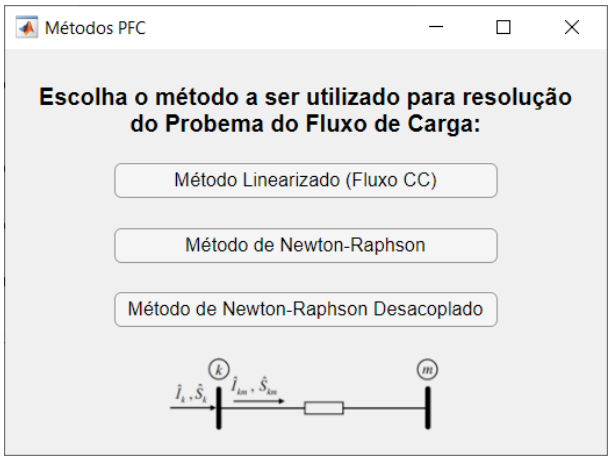


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Ferramenta Nº 2: Cálculos de fluxo de potência (PFC)

Pressionando, agora, o botão central com opção “Cálculos de fluxo de potência (PFC)” apresentado na janela inicial (Figura 3.1) é aberta uma nova janela, igual à mostrada na Figura 3.10, com o nome “Métodos PFC”. Nessa janela, apresentam-se ao usuário três opções de métodos de cálculo de fluxo de potência, os mesmos apresentados no Capítulo 2, Seção 2.3. As opções disponíveis são, “Método Linearizado (Fluxo CC)”, “Método de Newton-Raphson” e “Método de Newton-Raphson Desacoplado”.

Figura 3.10 - Janela “Métodos PFC”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pressionando a primeira opção da janela da Figura 3.10, “Método Linearizado (Fluxo CC), é aberta uma janela com o nome “Método Linearizado”, mostrada na Figura 3.11. Nesta janela são coletados os dados do sistema necessários para realizar o cálculo de fluxo de potência linear, conforme às equações descritas no Capítulo 2, Seção 2.3, Subseção 2.3.1.

Para iniciar com o cálculo de fluxo de potência é necessário, primeiramente, carregar as informações da matriz admitância nodal do sistema a ser analisado. Isso é feito através do botão “Load – Ybus” mostrado na janela que irá abrir um buscador de arquivo padrão do sistema operacional em questão, que permitirá ao usuário selecionar o arquivo no formato “Ybus – Dia-Mês-Ano.mat”. Este arquivo contém os dados do último sistema simulado e, para o qual foram calculadas as matrizes usando a ferramenta apresentada na seção anterior, e que foi salvo automaticamente na pasta de origem (pasta que contém os arquivos do programa).

Depois de carregar o arquivo, o nome deste é mostrado no campo designado e o campo “Número de Barras” é mudado automaticamente considerando o número de barras do sistema que foi carregado, conforme mostra a Figura 3.11.

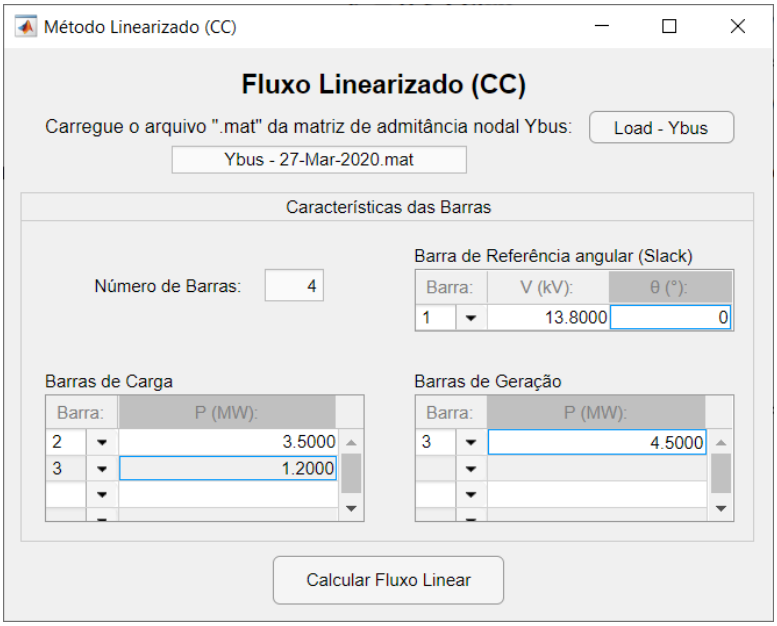
Após isso, é possível inserir o restante das informações. O campo “Barra de Referência angular (Slack)” é destinado para preenchimento dos dados referentes à barra slack, na qual deve-se inserir o número dela no sistema, o valor da tensão em kV e o ângulo em graus.

Para o campo “Barras de Carga”, é necessário preencher os dados apenas para aquelas barras com cargas conectadas, inserindo o número da barra e a potência em MW que caracteriza esta carga.

Nas “Barras de Geração”, assim como nas “Barras de carga”, é necessário preencher os dados apenas das barras com geração conectada a ela, inserindo o número da barra e a potência de geração em MW.

Nesses dois campos, “Barras de Geração” e “Barras de carga”, não é necessário preencher todos os campos disponíveis nas tabelas, visto que o número de campos disponibilizadas advém do número de barras do sistema, podendo assim existir barras com geração e carga, assim como também barras somente de conexão, isto é, sem geração ou carga.

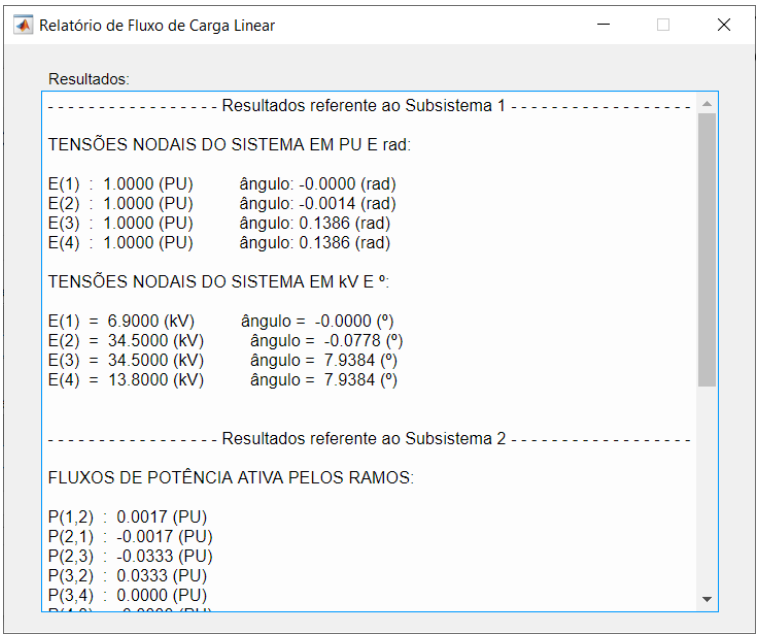
Figura 3.11 - Janela “Método Linearizado” preenchido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a inserção de todas as informações necessárias, é possível realizar os cálculos pressionando o botão “Calcular Fluxo Linear”. Para listar os dados de saída da ferramenta, é emitido um relatório de fluxo de carga linear, conforme Figura 3.12. Neste relatório são registrados os valores das principais grandezas do sistema: Módulos das tensões nodais (em p.u e kV), ângulos dessas tensões (em radianos e graus) e os fluxos de potência ativa pelos ramos (em pu e MW).

Figura 3.12 - Janela “Relatório de Fluxo de Carga Linear”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

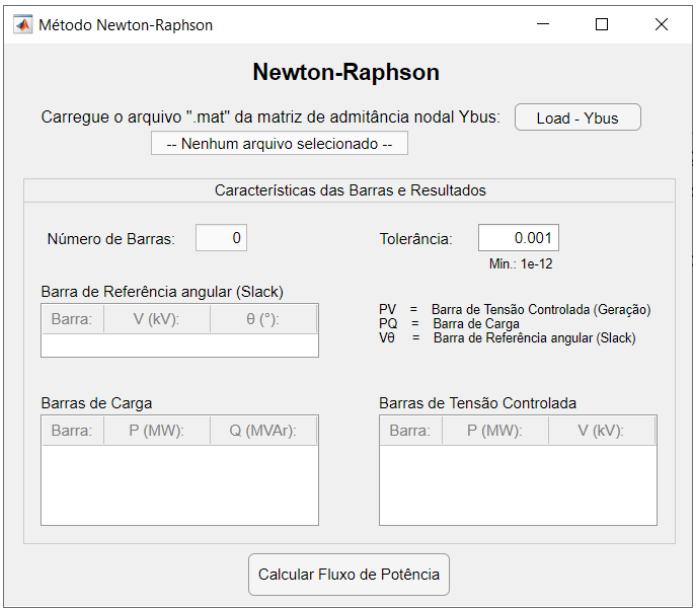
Pressionando o botão “Método de Newton-Raphson” da Figura 3.10, uma nova janela é aberta conforme mostrado na Figura 3.13, na qual serão coletados os dados do sistema a ser analisado.

Como já descrito, primeiramente carrega-se o arquivo “.mat” correspondente às matrizes do sistema. Após isso, diferente do método linear, é necessário informar a tolerância, pois como visto no Capítulo 2, Seção 2.3, Subseção 2.3.2, o método de Newton-Raphson é iterativo. Na implementação deste método foi estabelecido uma tolerância mínima de $1e-9 = 1x10^{-9}$, e número máximo de iterações de 20.

Os demais campos são referentes às informações das barras. Para a “Barra de Referência angular (Slack)”, tipo $V\theta$, informa-se o número da barra, o módulo e o ângulo de tensão desta barra. Para “Barras de Carga”, que são barras do tipo PQ, é necessário informar o número da barra em que a carga está conectada, a potência ativa e reativa consumida em MW e MVAr, respectivamente. Para “Barras de Tensão Controlada”, tipo PV, informa-se o número da barra, a potência ativa fornecida em MW e o módulo de tensão.

Lembrando que nesses dois últimos campos descritos não é necessário preencher todas os campos da tabela, visto que o número de campos destas advém do número de barras do sistema, podendo assim existir barras com geração e carga, assim como também barras somente de conexão, isto é, sem geração ou carga.

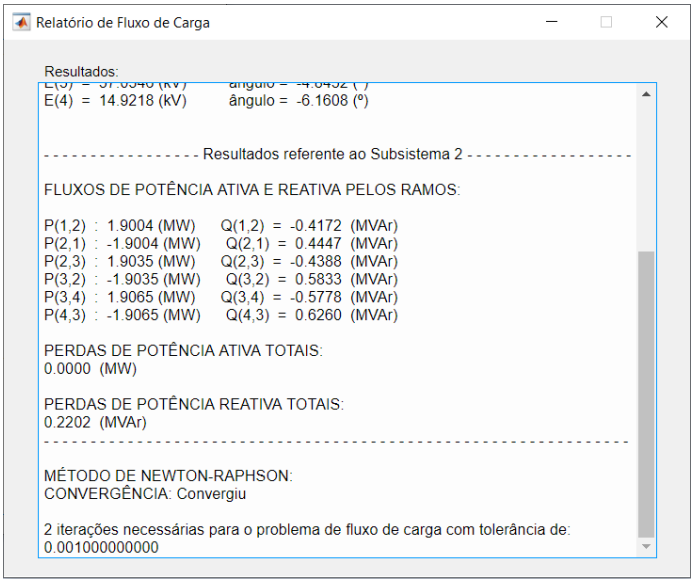
Figura 3.13 - Janela “Método de Newton-Raphson”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o preenchimento dos campos necessários, é possível obter os resultados referentes ao subsistema 1 (Módulo e ângulo das tensões de todas as barras) e subsistema 2 (Fluxo de potência ativa e reativa entre barras) pressionando o botão “Calcular Fluxo de Potência” que irá realizar os cálculos do método conforme o equacionamento apresentado no Capítulo 2, Subseção 2.3.2. Uma nova janela é aberta automaticamente para apresentar os resultados obtidos, conforme a Figura 3.14 a seguir.

Figura 3.14 - Janela “Relatório de Fluxo de Carga”.

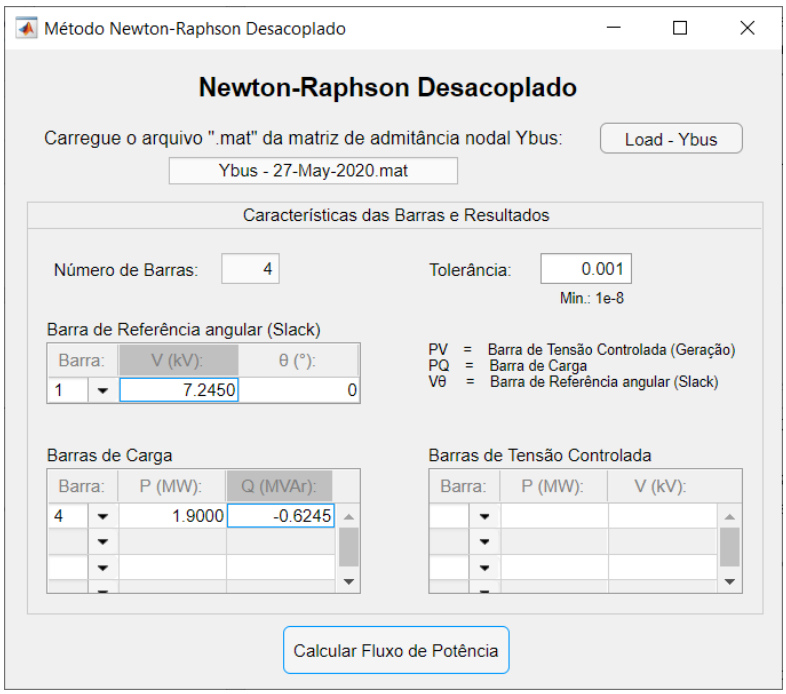


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pressionando agora a última opção da Figura 3.10, “Método de Newton-Raphson Desacoplado” abre-se a janela com mesmo nome mostrada na Figura 3.15. O preenchimento dos dados de entrada é bastante semelhante à apresentada no “Método de Newton-Raphson”, diferindo apenas no nome e nas aproximações matemáticas mostradas no Capítulo 2, visto que é uma variação do Método de Newton-Raphson. Neste caso, na implementação computacional é considerada uma tolerância mínima para convergência de $1e-8 = 1x10^{-9}$ e, as iterações são limitadas a 20 vezes.

Como mencionado, a forma de preenchimento e os dados necessários são os mesmos do método anterior, logo não serão descritos novamente, basta seguir os mesmos critérios para obter os resultados que são apresentados também da mesma maneira conforme apresentado na Figura 3.14, “Relatório de Fluxo de Carga”.

Figura 3.15 - Janela “Método de Newton-Raphson Desacoplado”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

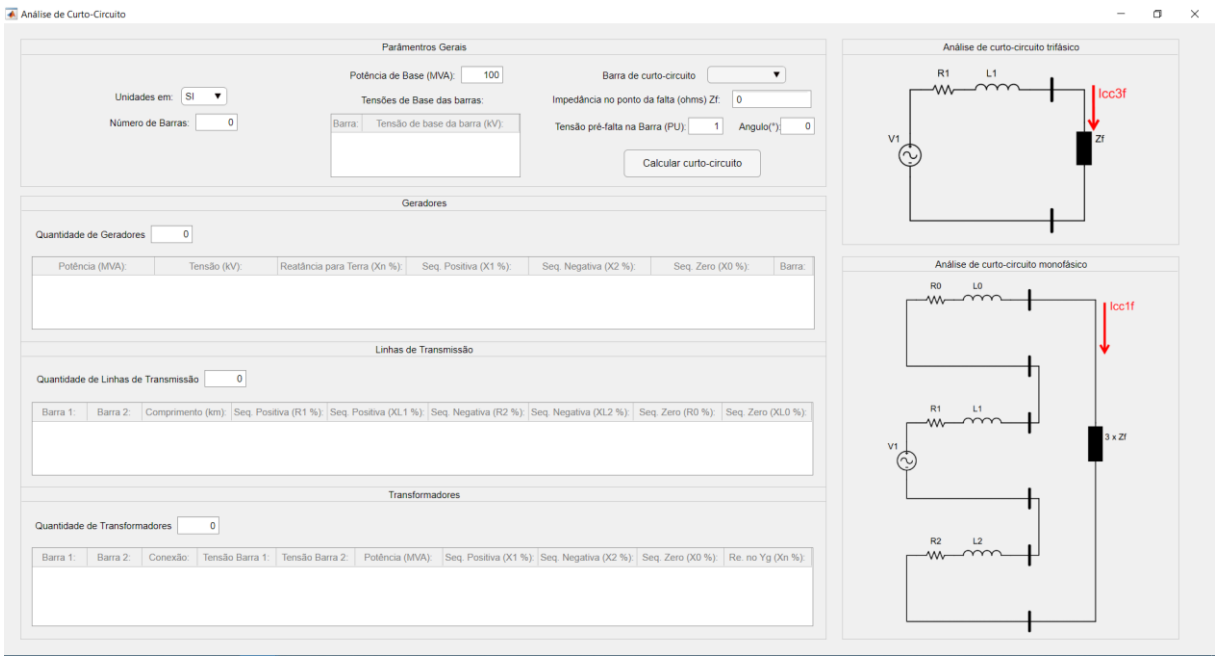
3.5 Ferramenta No. 3: Análise de curto-circuito

Pressionando agora a última opção da janela inicial da Figura 3.1, “Análise de curto-circuito” uma nova janela é aberta (ver Figura 3.16). Essa janela é destinada à obtenção das informações relacionadas aos parâmetros dos componentes do sistema

elétrico (Geradores, Linhas de transmissão e Transformadores) para os modelos de sequência positiva, negativa e zero. As primeiras informações solicitadas no painel “Parâmetros Gerais” são semelhantes às vistas no cálculo de matrizes, isto é, solicita-se o número de barras, tipo de unidade utilizada na representação, potência de base do sistema em MVA e tensões de base das barras em kV.

Além dessas informações, deve-se também informar o número da barra de curto-circuito, a impedância no ponto de falta em ohms (verificar instruções de preenchimento para números complexos Figura 3.3) e o módulo e ângulo da tensão de pré-falta, em p.u. e graus, respectivamente.

Figura 3.16 - Janela “Análise de Curto-circuito”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No painel “Geradores” é necessário informar, primeiramente, o número de geradores do sistema e, em seguida preencher os campos referentes à potência nominal do gerador em MVA, tensão nominal do gerador em kV, a reatância de aterramento em %, a reatância de sequência positiva, negativa e zero do gerador em %, e por último, o número da barra ao qual ele está conectado. Esses dados correspondem aos parâmetros especificados nos modelos de sequência do gerador descritos brevemente na seção 2.4.

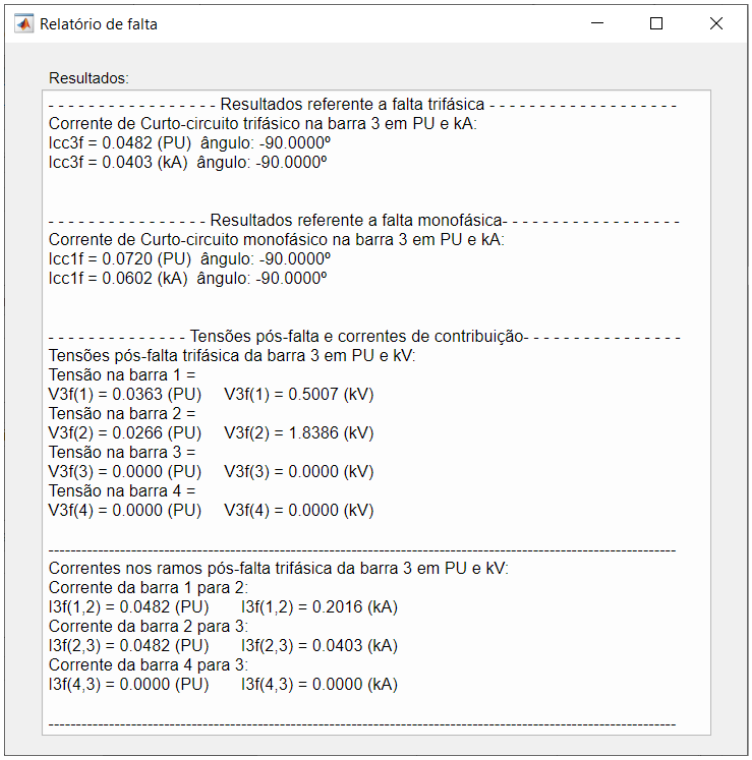
No painel “Linhas de Transmissão”, preenche-se primeiramente o número de LTs seguido de barra de início e barra de fim de cada uma delas, o comprimento em km, a resistência série de sequência positiva, negativa e zero em %. Esses dados são necessários para representar adequadamente os componentes usando os modelos de sequência para as LTs descritos brevemente na seção 2.4.

No painel “Transformadores”, preenche-se, primeiro, o número de transformadores do sistema seguido das barras que conectam os terminais do transformador, o tipo de conexão dos enrolamentos ('DYg', 'DD', 'YY', 'DY', 'YD', 'YgY', 'YgD', 'YgYg', 'YYg'), a tensão nominal do primário em kV, a tensão nominal do secundário em kV, a potência nominal do transformador em kV, a reatância de sequência positiva, negativa e zero em %, e por último a reatância de aterramento do transformador caso a conexão de um dos enrolamentos seja ‘Yg’.

Pressionando o botão “Calcular curto-circuito”, são realizados todos os cálculos pertinentes as análises discutidas no Capítulo 2, na seção 2.4.

Os resultados, como, correntes de curto-circuito trifásico e monofásico, tensões trifásicas pós-falta nas barras do sistema e as correntes de contribuição para falta trifásica, são apresentados na forma de relatório, conforme mostrado na Figura 3.17.

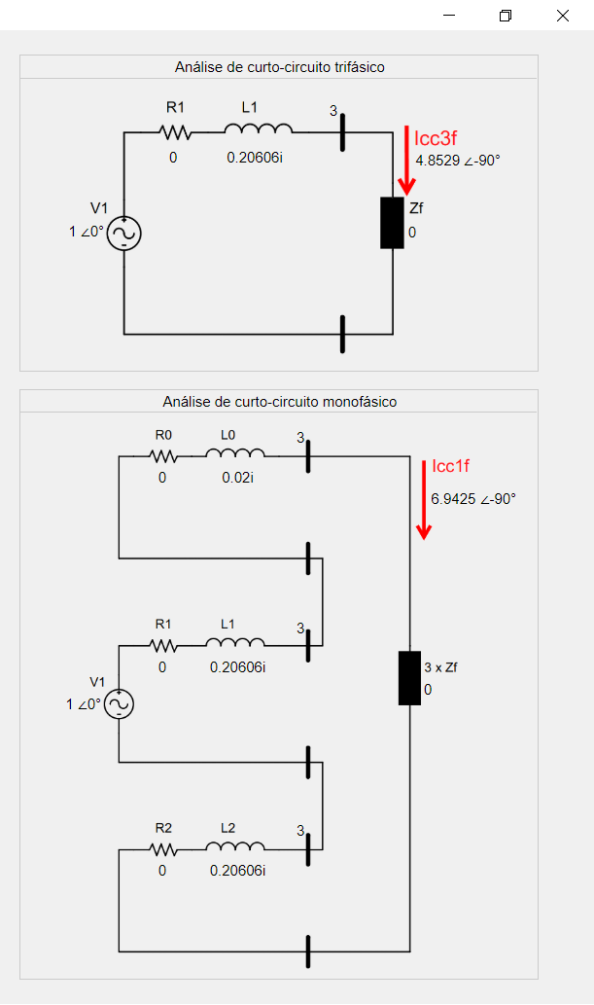
Figura 3.17 - Exemplo de “Relatório de falta” com resultados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na parte direita da tela mostrada na Figura 3.18 onde se localizam os circuitos equivalentes para “Análise de curto circuito trifásico” e “Análise de curto circuito monofásico”, mostram-se os valores das correntes de curto-circuito trifásico e monofásico nos locais indicados com seta vermelha, assim como os valores correspondentes às impedâncias de Thévenin no circuito de sequência equivalente.

Figura 3.18 - Lado direito da janela “Análise de curto-circuito” com resultados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 Testes e resultados

Para a validação do software como ferramenta de análise básica de sistemas elétricos de potência para a disciplina de ISEE, foram realizados vários testes sugeridos como exercícios na disciplina de ISEE para cálculos de matrizes do sistema, fluxo de carga e curto-circuito. Além dos exercícios contidos nas listas propostas, foram realizados testes de cálculo de matrizes e fluxo de carga com Sistemas IEEE de 14, 30, 57 e 118 barras para verificação dos resultados e para a análise de convergência dos métodos iterativos do PFC.

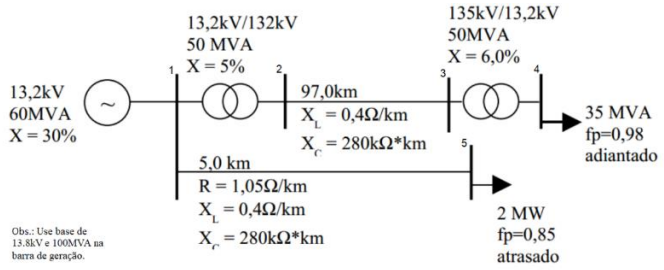
Para fins de comparação, foram usados o software Open Distribution System Simulator (OpenDSS), produzido pelo Electric Power Research Institute (EPRI) e utilizado no Brasil conforme recomenda a Nota Técnica n° 0057/2014-SRD/ANEEL da ANEEL para cálculos de fluxos de carga e, o software de Análise de Faltas Simultâneas (ANAFAS), produzido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) para cálculos de curto-circuito. Os mesmos sistemas testados com o PEISEE, são simulados nesses softwares e usados como valores de referência.

A seguir são apresentados alguns dos resultados dos testes realizados com o software.

4.1 Exemplos de aplicação usando as ferramentas No. 1 e No.2 do PEISEE.

Inicialmente, o sistema exemplo mostrado na Figura 4.1 foi implementado no PEISEE e foram utilizadas as ferramentas para o cálculo das matrizes admitância e impedância nodal do sistema e solução ao PFC através do método de Newton-Raphson. Os resultados obtidos foram comparados com os obtidos no software do OpenDSS para validação do software proposto.

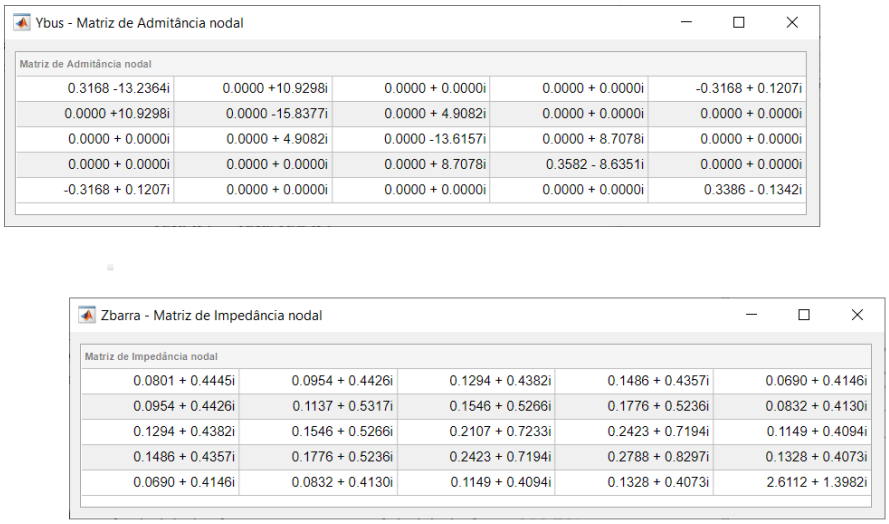
Figura 4.1 - Exemplo de sistema da lista de exercício de ISEE.



Fonte: Adaptado de Arruda, C. (2006) [1].

As matrizes admitância e impedância da rede, obtidas usando o PEISEE, são mostradas na Figura a seguir.

Figura 4.2 - Resultados das matrizes do sistema da figura 4.1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a obtenção dessas matrizes, foram obtidos resultados para o fluxo de carga usando o método de Newton-Raphson e o relatório dos resultados gerado pelo software PEISEE é mostrado no APÊNDICE B.1. Esse sistema foi também simulado usando o software OpenDSS. Os resultados extraídos do programa OpenDSS para comparação constam no APÊNDICE B.2.

A seguir são apresentadas duas tabelas que trazem os resultados comparados dos valores obtidos com o software PEISEE com o OpenDSS, sendo o erro percentual calculado da seguinte forma $\Delta X\% = \frac{X_{PEISEE} - X_{OpenDSS}}{X_{OpenDSS}} x100\%$.

Tabela 4.1 – Resultados comparados das tensões de barras para o sistema da figura 4.1

	Tensões nas barras (PEISEE)		Tensões nas barras (OpenDSS)		Erros	
Barra:	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	ΔV%	Δθ%
1	0,9565	0,0000	0,95650	0,0000	0,0000%	0,0000%
2	0,9587	-1,9611	0,95867	-2,0000	0,0031%	-1,9450%

3	0,9676	-6,2810	0,96749	-6,3000	0,0114%	-0,3016%
4	0,9750	-8,6739	0,95319	-8,7000	2,2881%	-0,3000%
5	0,8789	-0,8969	0,88972	-0,8000	-1,2161%	12,1125%

Fonte: Elaborado pelo autor.

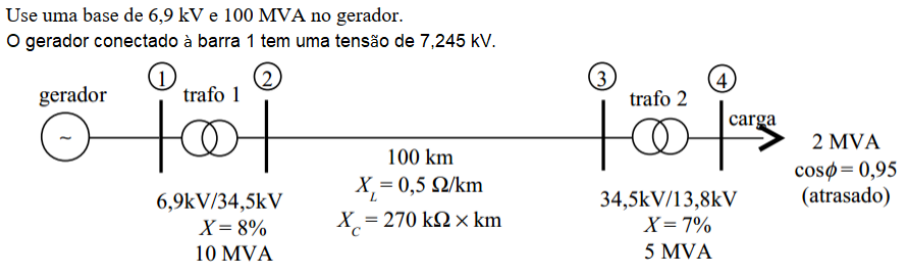
Tabela 4.2 – Resultados comparados do fluxo de carga nos ramos para o sistema da figura 4.1

	Fluxo de carga (PEISEE)		Fluxo de carga (OpenDSS)		Erros	
Ramo:	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVAr)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVAr)	Δ*P*%	Δ*Q*%
1-2	34,3000	-1,7424	34,3	-1,7	0,0000%	2,4941%
2-1	-34,3000	2,9220	-34,3	2,9	0,0000%	0,7586%
1-5	2.1976	1,3145	1,9	1,1	15,6632%	19,5000%
5-1	-2,0000	-1,2392	-1,7	-1,1	17,6471%	12,6545%
2-3	34,3000	-2,8907	34,3	-2,9	0,0000%	-0,3207%
3-2	-34,3000	5,5169	-34,3	5,5	0,0000%	0,3073%
3-4	34,3000	-5,4851	34,3	-5,5	0,0000%	-0,2709%
4-3	-34,3000	6,9649	-34,3	7,0	0,0000%	-0,5014%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, mais um exemplo de sistema da lista de exercício de ISEE, para cálculo das matrizes do sistema e cálculo de fluxo de potência com o método de Newton-Raphson Desacoplado.

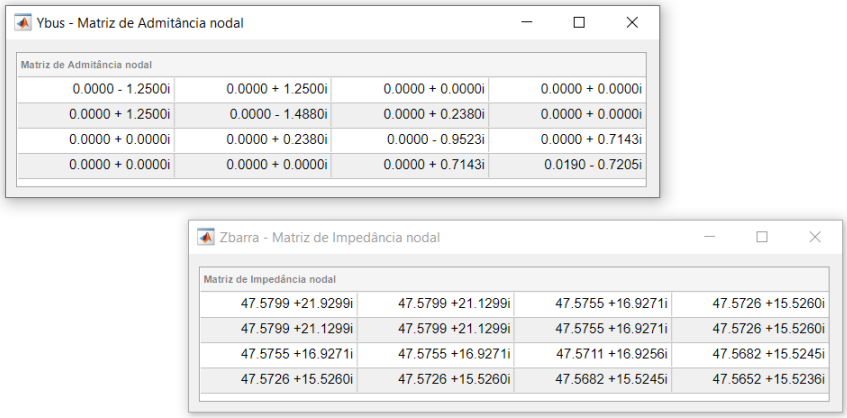
Figura 4.3 - Exemplo e sistema da lista de exercícios de ISEE.



Fonte: Lista de Exercícios, Profa. Lina.

A seguir os resultados das matrizes do sistema da figura 4.3, mostrando os valores das matrizes admitância e impedância nodal do sistema exemplo obtidos usando o PEISEE.

Figura 4.4 - Resultados das matrizes do sistema da Figura 4.3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, realizou-se cálculo do PFC usando o método de Newton-Raphson Desacoplado. Os relatórios com os resultados obtidos do fluxo de carga gerado pelo software PEISEE para o sistema da Figura 4.3 podem ser observados no APÊNDICE B.3.

Para comparação, os resultados extraídos do software OpenDSS simulando o mesmo sistema exemplo mostrado na Figura 4.3 estão presentes no APÊNDICE B.4.

Tabela 4.3 – Resultados comparados das tensões de barras para o sistema da Figura 4.3

	Tensões nas barras (PEISEE)		Tensões nas barras (OpenDSS)		Erros	
Barra:	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	ΔV%	Δθ%
1	1,0500	0,0000	1,05	0,0000	0,0000%	0,0000%
2	1,0434	-0,7949	1,0434	-0,8	0,0000%	-0,6375%
3	1,0123	-5,1284	1,0122	-5,1	0,0099%	0,5569%
4	1,0033	-6,6291	1,0031	-6,6	0,0199%	0,4409%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4.4 – Resultados comparados do fluxo de carga nos ramos para o sistema da Figura 4.3

	Fluxo de carga (PEISEE)		Fluxo de carga (OpenDSS)		Erros	
Ramo:	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVAr)	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVAr)	Δ*P*%	Δ*Q*%
1-2	1,9000	0,8740	1,9	0,9	0,0000%	-2,8889%
2-1	-1,9000	-0,8423	-1,9	-0,8	0,0000%	5,2875%
2-3	1,9000	0,8447	1,9	0,8	0,0000%	5,5875%
3-2	-1,9000	-0,6779	-1,9	-0,7	0,0000%	-3,1571%
3-4	1,9000	0,6801	1,9	0,7	0,0000%	-2,8429%
4-3	-1,9000	-0,6245	-1,9	-0,6	0,0000%	4,0833%

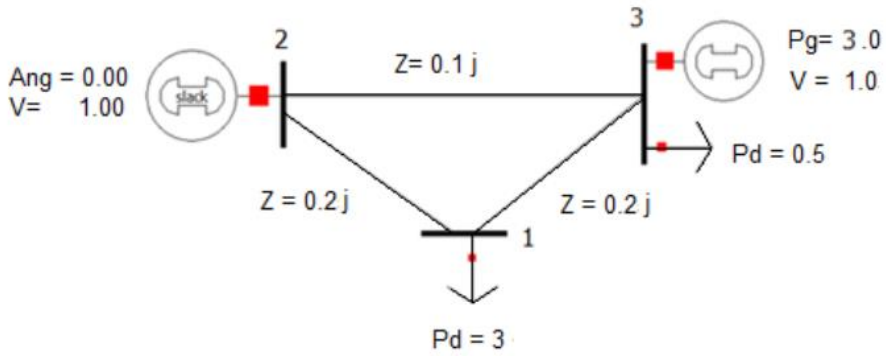
Fonte: Elaborado pelo autor.

Agora, apresenta-se um exemplo de cálculo das matrizes admitância e impedância nodal de um sistema no qual as informações são fornecidas em p.u. e para o qual pede-se, também, o cálculo do fluxo de carga linearizado (CC).

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados obtidos para o sistema exemplo da Figura 4.5, usando o PEISEE, para as matrizes admitância e impedância nodal, os resultados da solução do PFC podem ser vistos no APÊNDICE B.5.

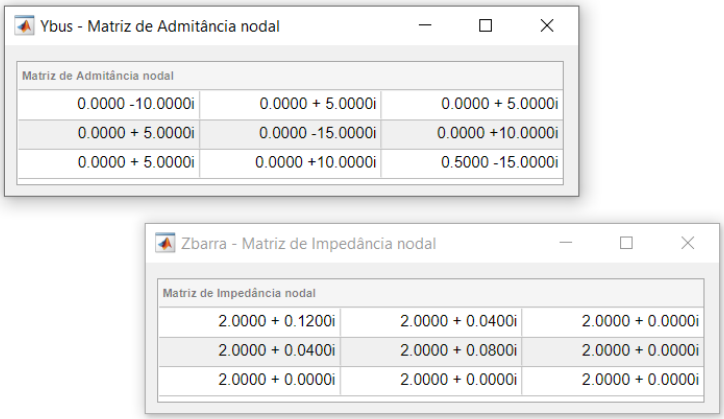
Neste exemplo, não são apresentados resultados comparativos com o OpenDSS, porém com uma breve resolução manual ou com a verificação usando outros softwares disponíveis para fluxo de potência, como o PowerWorld em modo fluxo DC, é possível constatar a exatidão dos cálculos apresentados pelo PEISEE.

Figura 4.5 - Exemplo de sistema da lista de exercícios de ISEE.



Fonte: Lista de Exercícios, Profa. Lina.

Figura 4.6 - Resultados das matrizes do sistema da Figura 4.5.

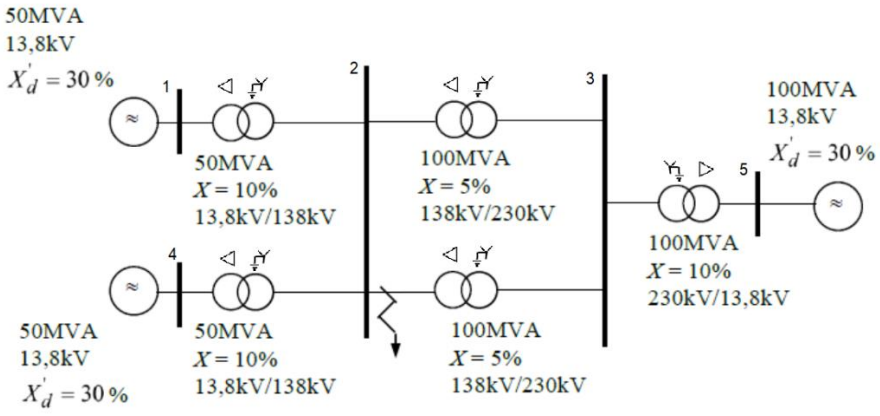


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Exemplos de aplicação usando a ferramenta No.3 do PEISEE

Agora serão apresentados os resultados dos testes de exemplos de análise de curto-circuito em sistemas elétricos de potência calculados com o software PEISEE e logo, esses resultados serão comparados com os valores obtidos com o software ANAFAS.

Figura 4.7 - Exemplo de falta em sistema da lista de exercícios de ISEE.



Fonte: Lista de Exercícios, Profa. Lina.

O relatório de falta com os resultados do PEISEE considerando uma falta na barra 2 do sistema da Figura 4.7 é apresentado no APÊNDICE C.1. Os resultados

obtidos da simulação do mesmo sistema no ANAFAS considerando uma falta na barra 2 são mostrados no APÊNDICE C.2.

Os principais valores referentes aos curtos-circuitos trifásicos e monofásicos do exemplo da Figura 4.7, são apresentados abaixo em forma de tabela que trazem os resultados comparados, sendo o erro percentual apresentado em função do software de referência (ANAFAS) com a seguinte formula, $\Delta X\% = \frac{X_{PEISEE} - X_{ANAFAS}}{X_{ANAFAS}} x100\%$.

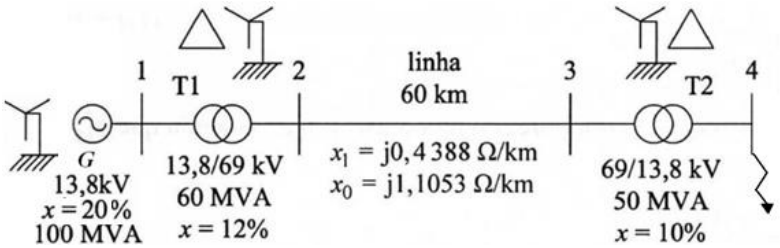
Tabela 4.3 – Resultados comparados das correntes de curto-circuito do exemplo da Figura 4.7

	Correntes de curto-circuito (PEISEE)		Correntes de curto-circuito (ANAFAS)		Erros	
Falta:	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	ΔI%	$\Delta\theta\%$
Trifásica	4,8529	-90,00	4,8530	-90,0	-0,0021%	0,0000%
Monofásica	5,8580	-90,00	5,858	-90,0	0,0000%	0,0000%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir, na Figura 4.8 apresenta-se mais um exemplo para a análise de um curto-circuito usando os softwares PEISEE e ANAFAS.

Figura 4.8 - Exemplo de falta em sistema da lista de exercícios de ISEE.



Fonte: Lista de Exercícios, Profa. Lina.

Os resultados gerados pelo software PEISEE considerando um curto-circuito na barra 4 do sistema elétrico representado na Figura 4.8 são apresentados no APÊNDICE C.3. Assim como os resultados gerados pelo software ANAFAS para o

curto-circuito na barra 4 do sistema elétrico representado na Figura 4.8 podem ser vistos no APÊNDICE C.4.

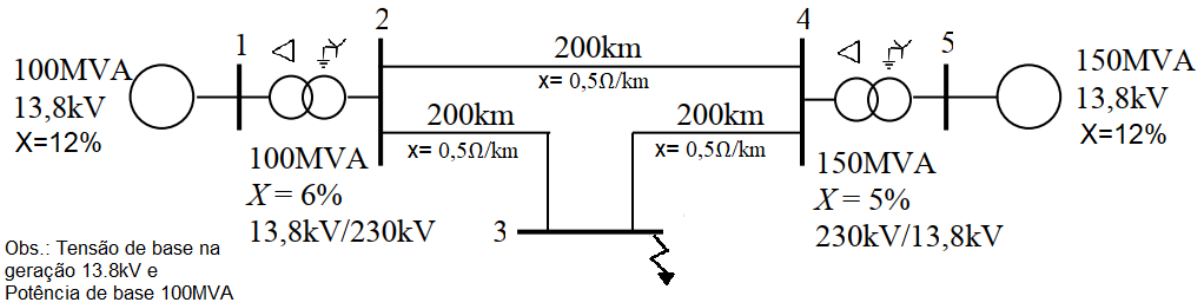
Tabela 4.4 – Resultados comparados das correntes de curto-circuito do exemplo da Figura 4.8

	Correntes de curto-circuito (PEISEE)		Correntes de curto-circuito (ANAFAS)		Erros	
Falta:	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	ΔI%	Δθ%
Trifásica	0,8673	-90,00	0,867	-90,0	0,0346%	0,0000%
Monofásica	0,0000	0,00	0,0000	0,00	0,0000%	0,0000%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente, a Figura 4.9 apresenta um outro exemplo para o cálculo de curto-circuito usando os softwares PEISEE e ANAFAS.

Figura 4.9 - Exemplo de curto-circuito em sistema da lista de exercícios de ISEE.



Fonte: Lista de Exercícios, Prof. Colemar.

O relatório de falta que apresenta os resultados encontrados pelo PEISEE para um curto-circuito na barra 3 do sistema da Figura 4.9 é mostrado no APÊNDICE C.5. Da mesma forma, os resultados encontrados pelo ANAFAS para o curto-circuito na barra 3 do sistema da Figura 4.9 são apresentados no APÊNDICE C.6.

Tabela 4.5 – Resultados comparados das correntes de curto-circuito do exemplo da Figura 4.9

	Correntes de curto-circuito (PEISEE)		Correntes de curto-circuito (ANAFAS)		Erros	
Falta:	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	Módulo (p.u.)	Ângulo (graus)	ΔI%	Δθ%
Trifásica	6,0539	-90,00	6,054	-90,0	-0,0017%	0,0000%
Monofásica	5,8098	-90,00	5,810	-90,0	-0,0034%	0,0000%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outros testes foram realizados usando as ferramentas disponibilizadas no PEISEE que correspondem ao cálculo das matrizes impedâncias e admitância de rede, análise de fluxo de potência e cálculos de curtos-circuitos. Por exemplo, análise de fluxos de cargas foram realizados para os Sistemas IEEE de 14, 30, 57 e 118 barras com o objetivo de verificar a convergência dos métodos iterativos implementados no software, e obteve-se convergência com tolerância de $1e-3 = 1x10^{-3}$. As informações principais obtidas destes testes são apresentadas no APÊNDICE D a este documento.

5 Conclusão

O Programa para Estudo da disciplina de Introdução a Sistemas de Energia Elétrica (PEISEE) foi criado com o objetivo principal de ser uma ferramenta intuitiva aos estudantes da disciplina ISEE, de modo que possibilite a fácil resolução de exercícios, sendo uma ferramenta de auxílio à aprendizagem.

A partir dos resultados apresentados no Capítulo 4, foi possível observar a eficiência do software para pequenos sistemas, que são típicos da disciplina, apresentando um erro médio para as tensões nodais de $\Delta V\%_{médio} = 0{,}3556\%$ e $\Delta\theta\%_{médio} = 1{,}6703\%$, assim como para os fluxos nos ramos dos sistemas, obteve-se $\Delta P\%_{médio} = 2{,}0819\%$ e $\Delta Q\%_{médio} = 4{,}2877\%$ em relação ao software de referência adotado.

Com a ferramenta de cálculo de curto-circuito obteve-se maior exatidão em relação ao software de referência, com erros médios para os valores de correntes de curto-circuito trifásico e monofásico de $\Delta\hat{I}_{cc3f}\%_{médio} = 0{,}0128\%$ e $\Delta\hat{I}_{cc1f}\%_{médio} = 0{,}0011\%$, respectivamente.

Nesse sentido, espera-se que este software possa vir a auxiliar a aprendizagem dos alunos por meio da realização dos cálculos e análises presentes no mesmo. Para melhoramento continuo da ferramenta, o PEISEE será atualizado conforme o recebimento das sugestões advindas dos usuários e disponibilizado no mesmo link no Google Drive. Como trabalhos futuros, visam-se a possível adição de novas funcionalidades, como, análise de estabilidade de sistemas elétricos e ferramentas voltadas a proteção de sistema elétricos.

6 Referências

[1] Arruda, C. (2006). REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA. Apostila de sala de aula. Goiânia: UFG.

[2] Baleeiro Alves, A. (2019). Introdução às Componentes Simétricas e Cálculo de Curtos-circuitos. Apostila de sala de aula. Goiânia: UFG.

[3] Brigatto, G. A. (2019). TEORIA DO PROBLEMA DO FLUXO DE CARGA. Apostila de sala de aula. Goiânia: UFG.

[4] Stevenson, W. D. (1986). Elementos de Análise de Sistema de Potência. São Paulo: McGraw-Hill.

[5] Monticelli, A. (1983). Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo: Edgard Blucher.

[6] Zanetta Jr., L. C. (2006). Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência. São Paulo: Livraria da Fisica.

[7] Kindermann, G. (1997). Curto circuito. Porto Alegre: SAGRA LUZZATTO.

[8] Sato, F. (2015). Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda.

[9] Anderson, P. M. (1973). Analysis of Faulted Power Systems. New York: Wiley-Interscience-IEEE.

[10] GLOVER, J., SARMA, M., & OVERBYE, T. (2012). POWER SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN. Stamford: Cengage Learning.

[11] Agile Alliance®. (2017). Agile Practice Guide. Chicago: Project Management Institute (PMI).

APÊNDICE A – Arquivo “LEIA.txt”

PEISEE Executable

1. Prerequisites for Deployment

- Caso seja usuário do MATLAB R2019a ou versão mais recente,
  faça download apenas da pasta "PEISEE_App" e execute em seu computador o aplicativo "PEISEE.exe"

- Caso não seja usuário do MATLAB R2019a ou tenha versão anterior,
  é necessário instalar em seu computador o compilador do MATLAB (MATLAB Runtime V9.6).

  - Para realizar a instalação do MATLAB Runtime há duas opções:

    1 - Faça download da pasta "PEISEE + MATLAB RUNTIME V9.6_installerWeb" e execute "MyAppInstaller_web" que instalará o PEISEE juntamente com o MATLAB Runtime com o auxílio da internet.

    2 - Como alternativa, é possível fazer o download e instalar a versão para Windows, Linux ou MacOS do MATLAB Runtime for R2019a no seguinte link no site do MathWorks:
    http://www.mathworks.com/products/compiler/mcr/index.html

NOTA: Você precisará de acesso de administrador para executar o instalador do MATLAB Runtime.

APÊNDICE B – Relatórios de fluxo de carga com software PEISEE e OpenDSS para sistemas dos exemplos das Figuras 4.1, 4.3 e 4.5.

B.1 – Relatório de fluxo de carga do PEISEE para o sistema da Figura 4.1

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 1 - - - - - - - - - - - - - - - - -

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM PU E rad:

E(1) : 0.9565 (PU) ângulo: -0.0000 (rad)
E(2) : 0.9587 (PU) ângulo: -0.0342 (rad)
E(3) : 0.9676 (PU) ângulo: -0.1096 (rad)
E(4) : 0.9750 (PU) ângulo: -0.1514 (rad)
E(5) : 0.8789 (PU) ângulo: 0.0157 (rad)

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM kV E º:

E(1) = 13.2000 (kV) ângulo = -0.0000 (º)
E(2) = 132.3075 (kV) ângulo = -1.9611 (º)
E(3) = 133.5346 (kV) ângulo = -6.2810 (º)
E(4) = 13.1560 (kV) ângulo = -8.6739 (º)
E(5) = 12.1283 (kV) ângulo = 0.8969 (º)

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 2 - - - - - - - - - - - - - - - - -
FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA PELOS RAMOS:
P(1,2) : 34.3000 (MW) Q(1,2) = -1.7424 (MVAr)
P(2,1) : -34.3000 (MW) Q(2,1) = 2.9220 (MVAr)
P(1,5) : 2.1976 (MW) Q(1,5) = 1.3145 (MVAr)
P(5,1) : -2.0000 (MW) Q(5,1) = -1.2392 (MVAr)
P(2,3) : 34.3000 (MW) Q(2,3) = -2.8907 (MVAr)
P(3,2) : -34.3000 (MW) Q(3,2) = 5.5169 (MVAr)
P(3,4) : 34.3000 (MW) Q(3,4) = -5.4851 (MVAr)
P(4,3) : -34.3000 (MW) Q(4,3) = 6.9649 (MVAr)

PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAIS:
0.1976 (MW)

PERDAS DE POTÊNCIA REATIVA TOTAIS:

5.3608 (MVAr)

- -

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON:

CONVERGÊNCIA: Convergiu

4 iterações necessárias para o problema de fluxo de carga com tolerância de: 0.000000000001

B.2 – Relatório de fluxo de carga do OpenDSS para o sistema da Figura 4.1

Figura B. 1 - Resultado da simulação no OpenDSS do sistema da Figura 4.1.

LINE-LINE VOLTAGES BY BUS & NODE

Bus	Node	VLN (kV)	Angle	pu	Base kV
BARRA1	1-2	13.2 /_	0.0	0.9565	13.800
-	2-3	13.2 /_	-120.0	0.9565	13.800
-	3-1	13.2 /_	120.0	0.9565	13.800
BARRA2	1-2	132.3 /_	-2.0	0.95867	138.000
-	2-3	132.3 /_	-122.0	0.95867	138.000
-	3-1	132.3 /_	118.0	0.95867	138.000
BARRA3	1-2	133.51 /_	-6.3	0.96749	138.000
-	2-3	133.51 /_	-126.3	0.96749	138.000
-	3-1	133.51 /_	113.7	0.96749	138.000
BARRA5	1-2	12.278 /_	0.8	0.88972	13.800
-	2-3	12.278 /_	-119.2	0.88972	13.800
-	3-1	12.278 /_	120.8	0.88972	13.800
BARRA4	1-2	13.154 /_	-8.7	0.95319	13.800
-	2-3	13.154 /_	-128.7	0.95319	13.800
-	3-1	13.154 /_	111.3	0.95319	13.800

SYMMETRICAL COMPONENT POWERS BY CIRCUIT ELEMENT (first 3 phases)

Element	Term	P1(MW)	Q1(Mvar)	P2	Q2	P0	Q0
"Vsource.SOURCE"	1	-36.2	0.5	-0.0	0.0	-0.0	0.0
"Vsource.SOURCE"	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
"Line.LINHA1"	1	34.3	-2.9	0.0	-0.0	0.0	-0.0
"Line.LINHA1"	2	-34.3	5.5	-0.0	0.0	-0.0	0.0
"Line.LINHA2"	1	1.9	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
"Line.LINHA2"	2	-1.7	-1.1	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
"Transformer.T1"	1	34.3	-1.7	0.0	-0.0	0.0	-0.0
"Transformer.T1"	2	-34.3	2.9	-0.0	0.0	0.0	0.0
"Transformer.T2"	1	34.3	-5.5	0.0	-0.0	0.0	0.0
"Transformer.T2"	2	-34.3	7.0	-0.0	0.0	0.0	0.0
"Load.C1"	1	34.3	-7.0	0.0	-0.0	-0.0	0.0
"Load.C2"	1	1.7	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0

Total Circuit Losses = 0.1 +j 5.3

Fonte: OpenDSS.

B.3 – Relatório de fluxo de carga do PEISEE para o sistema da Figura 4.3

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 1 - - - - - - - - - - - - - - - - -

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM PU E rad:

E(1) : 1.0500 (PU) ângulo: -0.0000 (rad)
E(2) : 1.0434 (PU) ângulo: -0.0139 (rad)
E(3) : 1.0123 (PU) ângulo: -0.0895 (rad)
E(4) : 1.0033 (PU) ângulo: -0.1157 (rad)

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM kV E º:

E(1) = 7.2450 (kV) ângulo = -0.0000 (º)
E(2) = 35.9987 (kV) ângulo = -0.7949 (º)
E(3) = 34.9253 (kV) ângulo = -5.1284 (º)
E(4) = 13.8451 (kV) ângulo = -6.6291 (º)

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 2 - - - - - - - - - - - - - - - - -

FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA PELOS RAMOS:

P(1,2) : 1.9000 (MW) Q(1,2) = 0.8740 (MVAr)
P(2,1) : -1.9000 (MW) Q(2,1) = -0.8423 (MVAr)
P(2,3) : 1.9000 (MW) Q(2,3) = 0.8447 (MVAr)
P(3,2) : -1.9000 (MW) Q(3,2) = -0.6779 (MVAr)
P(3,4) : 1.9000 (MW) Q(3,4) = 0.6801 (MVAr)
P(4,3) : -1.9000 (MW) Q(4,3) = -0.6245 (MVAr)

PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAIS:
0.0000 (MW)

PERDAS DE POTÊNCIA REATIVA TOTAIS:
0.2542 (MVAr)
- - - - - - - - - - - - - - - - -

5 iterações necessárias para o subproblema P0 com tolerância de: 0.00000001

4 iterações necessárias para o subproblema QV com tolerância de: 0.00000001

B.4 – Relatório de fluxo de carga do OpenDSS para o sistema da Figura 4.3

Figura B. 2 - Resultado da simulação no OpenDSS do sistema da Figura 4.3.

LINE-LINE VOLTAGES BY BUS & NODE

Bus	Node	VLN (kV)	Angle	pu	Base kV
BARRA1	1-2	7.245	/_ 0.0	1.05	6.900
-	2-3	7.245	/_ -120.0	1.05	6.900
-	3-1	7.245	/_ 120.0	1.05	6.900
BARRA2	1-2	35.997	/_ -0.8	1.0434	34.500
-	2-3	35.997	/_ -120.8	1.0434	34.500
-	3-1	35.997	/_ 119.2	1.0434	34.500
BARRA3	1-2	34.921	/_ -5.1	1.0122	34.500
-	2-3	34.921	/_ -125.1	1.0122	34.500
-	3-1	34.921	/_ 114.9	1.0122	34.500
BARRA4	1-2	13.843	/_ -6.6	1.0031	13.800
-	2-3	13.843	/_ -126.6	1.0031	13.800
-	3-1	13.843	/_ 113.4	1.0031	13.800

SYMMETRICAL COMPONENT POWERS BY CIRCUIT ELEMENT (first 3 phases)

Element	Term	P1(MW)	Q1(Mvar)	P2	Q2	P0	Q0
"Vsource.SOURCE"	1	-1.9	-0.9	-0.0	-0.0	0.0	0.0
"Vsource.SOURCE"	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
"Line.LINHA1"	1	1.9	0.8	0.0	0.0	-0.0	0.0
"Line.LINHA1"	2	-1.9	-0.7	-0.0	-0.0	0.0	-0.0
"Transformer.T1"	1	1.9	0.9	0.0	0.0	-0.0	0.0
"Transformer.T1"	2	-1.9	-0.8	-0.0	-0.0	0.0	0.0
"Transformer.T2"	1	1.9	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
"Transformer.T2"	2	-1.9	-0.6	-0.0	-0.0	-0.0	-0.0
"Load.C1"	1	1.9	0.6	0.0	0.0	-0.0	-0.0

Total Circuit Losses = 0.0 +j 0.3

Fonte: OpenDSS.

B.5 – Relatório de fluxo de carga do PEISEE para o sistema da Figura 4.5

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 1 - - - - - - - - - - - - - - - - -

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM PU:

E(1) : 1.0000 (PU) ângulo: -0.2600 (rad) ângulo = -14.8969 (º)

E(2) : 1.0000 (PU) ângulo: -0.0000 (rad) ângulo = -0.0000 (º)

E(3) : 1.0000 (PU) ângulo: 0.0800 (rad) ângulo = 4.5837 (º)

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 2 - - - - - - - - - - - - - - - - - -
FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA PELOS RAMOS:
P(1,2) : -1.3000 (PU)
P(2,1) : 1.3000 (PU)
P(1,3) : -1.7000 (PU)
P(3,1) : 1.7000 (PU)
P(2,3) : -0.8000 (PU)
P(3,2) : 0.8000 (PU)

POTÊNCIA INJETADA NA BARRA 2 (SLACK) :
Pslack = 0.5000 (PU)

PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAIS NOS RAMOS DA REDE:
0.0000 (PU)
- -

APÊNDICE C – Relatórios de falta obtidos com software PEISEE e ANAFAS para sistemas dos exemplos das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

C.1 – Relatório de falta do PEISEE para o sistema da Figura 4.7

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente a falta trifásica - - - - - - - - - - - - - - - - - -
Corrente de Curto-circuito trifásico na barra 2 em PU e kA:
Icc3f = 4.8529 (PU) ângulo: -90.0000º
Icc3f = 2.0303 (kA) ângulo: -90.0000º

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente a falta monofásica- - - - - - - - - - - - - - - - - -
Corrente de Curto-circuito monofásico na barra 2 em PU e kA:
Icc1f = 5.8580 (PU) ângulo: -90.0000º
Icc1f = 2.4508 (kA) ângulo: -90.0000º

- - - - - - - - - - - - - - - Tensões pós-falta e correntes de contribuição- - - - - - - - - - - - - - - -
Tensões pós-falta trifásica da barra 2 em PU e kV:
Tensão na barra 1 =
V3f(1) = 0.2500 (PU) V3f(1) = 3.4500 (kV)

Tensão na barra 2 =

V3f(2) = 0.0000 (PU) V3f(2) = 0.0000 (kV)

Tensão na barra 3 =

V3f(3) = 0.0588 (PU) V3f(3) = 13.5294 (kV)

Tensão na barra 4 =

V3f(4) = 0.2500 (PU) V3f(4) = 3.4500 (kV)

Tensão na barra 5 =

V3f(5) = 0.2941 (PU) V3f(5) = 4.0588 (kV)

Correntes nos ramos pós-falta trifásica da barra 2 em PU e kV:

Corrente da barra 1 para 2:

I3f(1,2) = 1.2500 (PU) I3f(1,2) = 5.2296 (kA)

Corrente da barra 3 para 2:

I3f(3,2) = 2.3529 (PU) I3f(3,2) = 0.5906 (kA)

Corrente da barra 4 para 2:

I3f(4,2) = 1.2500 (PU) I3f(4,2) = 5.2296 (kA)

Corrente da barra 5 para 3:

I3f(5,3) = 2.3529 (PU) I3f(5,3) = 9.8440 (kA)

C.2 – Relatório de falta do ANAFAS para o sistema da Figura 4.7

Figura C. 1 - Resultado da simulação no ANAFAS do sistema da Figura 4.7.

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA
2	FFF	2 2	Caso-Base

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

Barra 2 (2)

	TENSAO(pu)					CORRENTE(pu)			
	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0	4.853	-90.0	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0	-4.853	-30.0	4.853	-90.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0	-4.853	-150.0	0.000	0.0

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA
1	FT	2 2	Caso-Base

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

Barra 2 (2)

	TENSAO(pu)					CORRENTE(pu)			
	mod.	ang.		mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.195	-180.0	5.858	-90.0	1.953	-90.0
B	0.914	-108.7	P	0.598	0.0	0.000	0.0	1.953	-90.0
C	0.914	108.7	N	0.402	180.0	0.000	0.0	1.953	-90.0

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

Bar. 2 (2) TEN.(pu)

	mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0

Bar. 1 (1) TEN.(pu) Cir. 1T(T1) CORR.(pu) p/ 2

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.250	30.0	Z	0.000	0.0	A	1.250	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.250	-90.0	P	0.250	30.0	B	-1.250	-30.0	P	1.250	-90.0
C	0.250	150.0	N	0.000	0.0	C	-1.250	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 4 (4) TEN.(pu) Cir. 1T(T2) CORR.(pu) p/ 2

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.250	30.0	Z	0.000	0.0	A	1.250	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.250	-90.0	P	0.250	30.0	B	-1.250	-30.0	P	1.250	-90.0
C	0.250	150.0	N	0.000	0.0	C	-1.250	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 3 (3) TEN.(pu) Cir. 1T(T3) CORR.(pu) p/ 2

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.059	-30.0	Z	0.000	0.0	A	1.176	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.059	-150.0	P	0.059	-30.0	B	-1.176	-30.0	P	1.176	-90.0
C	0.059	90.0	N	0.000	0.0	C	-1.176	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 3 (3) TEN.(pu) Cir. 2T(T4) CORR.(pu) p/ 2

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.059	-30.0	Z	0.000	0.0	A	1.176	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.059	-150.0	P	0.059	-30.0	B	-1.176	-30.0	P	1.176	-90.0
C	0.059	90.0	N	0.000	0.0	C	-1.176	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 1 (1) TEN.(pu)

	mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.250	30.0	Z	0.000	0.0
B	0.250	-90.0	P	0.250	30.0
C	0.250	150.0	N	0.000	0.0

Bar. 2 (2) TEN.(pu) Cir. 1T(T1) CORR.(pu) p/ 1

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0	A	-1.250	-60.0	Z	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0	B	1.250	-0.0	P	-1.250	-60.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0	C	1.250	-120.0	N	0.000	0.0

Bar. 0 (-REFERENCIA-) TEN.(pu) Cir. 1G(G1) CORR.(pu) p/ 1

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	1.000	30.0	Z	0.000	0.0	A	1.250	-60.0	Z	0.000	0.0
B	1.000	-90.0	P	1.000	30.0	B	-1.250	0.0	P	1.250	-60.0
C	1.000	150.0	N	0.000	0.0	C	-1.250	-120.0	N	0.000	0.0

Bar. 4 (4) TEN.(pu)

	mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.250	30.0	Z	0.000	0.0
B	0.250	-90.0	P	0.250	30.0
C	0.250	150.0	N	0.000	0.0

Bar. 5 (5) TEN.(pu) Cir. 1T(T5) CORR.(pu) p/ 3

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.294	-0.0	Z	0.000	0.0	A	2.353	-120.0	Z	0.000	0.0
B	0.294	-120.0	P	0.294	-0.0	B	-2.353	-60.0	P	2.353	-120.0
C	0.294	120.0	N	0.000	0.0	C	-2.353	-180.0	N	0.000	0.0

Fonte: ANAFAS.

C.3 – Relatório de falta do PEISEE para o sistema da Figura 4.8

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente a falta trifásica - - - - - - - - - - - - - - - - - -

Corrente de Curto-circuito trifásico na barra 4 em PU e kA:
Icc3f = 0.8673 (PU) ângulo: -90.0000º
Icc3f = 3.6285 (kA) ângulo: -90.0000º

- - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente a falta monofásica- - - - - - - - - - - - - - - - -

Corrente de Curto-circuito monofásico na barra 4 em PU e kA:
Icc1f = 0.0000 (PU) ângulo: 0.0000º
Icc1f = 0.0000 (kA) ângulo: 0.0000º

- - - - - - - - - - - - - - - Tensões pós-falta e correntes de contribuição- - - - - - - - - - - - - - - -
Tensões pós-falta trifásica da barra 4 em PU e kV:
Tensão na barra 1 =
V3f(1) = 0.8265 (PU) V3f(1) = 11.4062 (kV)
Tensão na barra 2 =
V3f(2) = 0.6531 (PU) V3f(2) = 45.0624 (kV)
Tensão na barra 3 =
V3f(3) = 0.1735 (PU) V3f(3) = 11.9688 (kV)
Tensão na barra 4 =
V3f(4) = 0.0000 (PU) V3f(4) = 0.0000 (kV)

Correntes nos ramos pós-falta trifásica da barra 4 em PU e kV:
Corrente da barra 1 para 2:
I3f(1,2) = 0.8673 (PU) I3f(1,2) = 3.6285 (kA)
Corrente da barra 2 para 3:
I3f(2,3) = 0.8673 (PU) I3f(2,3) = 0.7257 (kA)
Corrente da barra 3 para 4:
I3f(3,4) = 0.8673 (PU) I3f(3,4) = 0.7257 (kA)

C.4 – Relatório de falta do ANAFAS para o sistema da Figura 4.8

Figura C. 2 - Resultado da simulação no ANAFAS do sistema da Figura 4.8.

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA
2	FFF	4 4	Caso-Base

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

Barra 4 (4)

	TENSAO(pu) mod.	ang.		mod.	ang.		CORRENTE(pu) mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0	A	0.867	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0	B	-0.867	-30.0	P	0.867	-90.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0	C	-0.867	-150.0	N	0.000	0.0

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA
1	FT	4 4	Caso-Base

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

Barra 4 (4)

	TENSAO(pu) mod.	ang.		mod.	ang.		CORRENTE(pu) mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	1.000	180.0	A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0
B	1.732	-150.0	P	1.000	-0.0	B	0.000	0.0	P	0.000	0.0
C	1.732	150.0	N	0.000	0.0	C	0.000	0.0	N	0.000	0.0

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

Bar. 4 (4) TEN.(pu)

	mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0

Bar. 3 (3) TEN.(pu) Cir. 1T(T2) CORR.(pu) p/ 4

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.173	-30.0	Z	0.000	0.0	A	0.867	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.173	-150.0	P	0.173	-30.0	B	-0.867	-30.0	P	0.867	-90.0
C	0.173	90.0	N	0.000	0.0	C	-0.867	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 3 (3) TEN.(pu)

	mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.173	-30.0	Z	0.000	0.0
B	0.173	-150.0	P	0.173	-30.0
C	0.173	90.0	N	0.000	0.0

Bar. 2 (2) TEN.(pu) Cir. 1L(LT23) CORR.(pu) p/ 3

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.653	-30.0	Z	0.000	0.0	A	0.867	-120.0	Z	0.000	0.0
B	0.653	-150.0	P	0.653	-30.0	B	-0.867	-60.0	P	0.867	-120.0
C	0.653	90.0	N	0.000	0.0	C	-0.867	-180.0	N	0.000	0.0

Bar. 4 (4) TEN.(pu) Cir. 1T(T2) CORR.(pu) p/ 3

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0	A	-0.867	-120.0	Z	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0	B	0.867	-60.0	P	-0.867	-120.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0	C	0.867	-180.0	N	0.000	0.0

Fonte: ANAFAS.

C.5 – Relatório de falta do PEISEE para o sistema da Figura 4.9

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente a falta trifásica - - - - - - - - - - - - - - - - - -
Corrente de Curto-circuito trifásico na barra 3 em PU e kA:
Icc3f = 6.0539 (PU) ângulo: -90.0000º
Icc3f = 1.5197 (kA) ângulo: -90.0000º

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente a falta monofásica- - - - - - - - - - - - - - - - - -
Corrente de Curto-circuito monofásico na barra 3 em PU e kA:
Icc1f = 5.8098 (PU) ângulo: -90.0000º
Icc1f = 1.4584 (kA) ângulo: -90.0000º

- - - - - - - - - - - - - - - Tensões pós-falta e correntes de contribuição- - - - - - - - - - - - - - - -
Tensões pós-falta trifásica da barra 3 em PU e kV:
Tensão na barra 1 =
V3f(1) = 0.6945 (PU) V3f(1) = 9.5843 (kV)
Tensão na barra 2 =
V3f(2) = 0.5418 (PU) V3f(2) = 124.6078 (kV)
Tensão na barra 3 =
V3f(3) = 0.0000 (PU) V3f(3) = 0.0000 (kV)
Tensão na barra 4 =
V3f(4) = 0.6024 (PU) V3f(4) = 138.5539 (kV)

Tensão na barra 5 =
V3f(5) = 0.7193 (PU) V3f(5) = 9.9270 (kV)

Correntes nos ramos pós-falta trifásica da barra 3 em PU e kV:
Corrente da barra 1 para 2:
I3f(1,2) = 2.5457 (PU) I3f(1,2) = 10.6505 (kA)
Corrente da barra 2 para 3:
I3f(2,3) = 2.8665 (PU) I3f(2,3) = 0.7196 (kA)
Corrente da barra 4 para 2:
I3f(4,2) = 0.3208 (PU) I3f(4,2) = 0.0805 (kA)
Corrente da barra 4 para 3:
I3f(4,3) = 3.1873 (PU) I3f(4,3) = 0.8001 (kA)
Corrente da barra 5 para 4:
I3f(5,4) = 3.5082 (PU) I3f(5,4) = 14.6771 (kA)

C.6 – Relatório de falta do ANAFAS para o sistema da Figura 4.9

Figura C. 3 - Resultado da simulação no ANAFAS do sistema da Figura 4.9.

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA
2	FFF	3 3	Caso-Base

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

Barra 3 (3)

	TENSAO(pu) mod.	ang.		mod.	ang.		CORRENTE(pu) mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0	A	6.054	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0	B	-6.054	-30.0	P	6.054	-90.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0	C	-6.054	-150.0	N	0.000	0.0

CASO	FALTA	LOCALIZACAO	CONTINGENCIA
1	FT	3 3	Caso-Base

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C U R T O

Barra 3 (3)

	TENSAO(pu) mod.	ang.		mod.	ang.		CORRENTE(pu) mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.360	180.0	A	5.810	-90.0	Z	1.937	-90.0
B	1.021	-122.0	P	0.680	0.0	B	0.000	0.0	P	1.937	-90.0
C	1.021	122.0	N	0.320	180.0	C	0.000	0.0	N	1.937	-90.0

T E N S O E S E C O R R E N T E S D E C O N T R I B U I C A O

Bar. 3 (3) TEN.(pu)

	mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.000	0.0	Z	0.000	0.0
B	0.000	0.0	P	0.000	0.0
C	0.000	0.0	N	0.000	0.0

Bar. 2 (2) TEN.(pu) Cir. 1L(L23) CORR.(pu) p/ 3

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.542	0.0	Z	0.000	0.0	A	2.867	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.542	-120.0	P	0.542	0.0	B	-2.867	-30.0	P	2.867	-90.0
C	0.542	120.0	N	0.000	0.0	C	-2.867	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 4 (4) TEN.(pu) Cir. 1L(L34) CORR.(pu) p/ 3

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.602	0.0	Z	0.000	0.0	A	3.187	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.602	-120.0	P	0.602	0.0	B	-3.187	-30.0	P	3.187	-90.0
C	0.602	120.0	N	0.000	0.0	C	-3.187	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 2 (2) TEN.(pu)

	mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.542	0.0	Z	0.000	0.0
B	0.542	-120.0	P	0.542	0.0
C	0.542	120.0	N	0.000	0.0

Bar. 1 (Geração 1) TEN.(pu) Cir. 1T(T1) CORR.(pu) p/ 2

	mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.		mod.	ang.
A	0.695	0.0	Z	0.000	0.0	A	2.546	-90.0	Z	0.000	0.0
B	0.695	-120.0	P	0.695	0.0	B	-2.546	-30.0	P	2.546	-90.0
C	0.695	120.0	N	0.000	0.0	C	-2.546	-150.0	N	0.000	0.0

Bar. 4 (4) TEN.(pu)				Cir. 1L(L24) CORR.(pu) p/ 2			
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A 0.602	0.0	Z 0.000	0.0	A 0.321	-90.0	Z 0.000	0.0
B 0.602	-120.0	P 0.602	0.0	B -0.321	-30.0	P 0.321	-90.0
C 0.602	120.0	N 0.000	0.0	C -0.321	-150.0	N 0.000	0.0

Bar. 5 (Geração 2) TEN.(pu)				Cir. 1T(T2) CORR.(pu) p/ 4			
mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.	mod.	ang.
A 0.719	0.0	Z 0.000	0.0	A 3.508	-90.0	Z 0.000	0.0
B 0.719	-120.0	P 0.719	0.0	B -3.508	-30.0	P 3.508	-90.0
C 0.719	120.0	N 0.000	0.0	C -3.508	-150.0	N 0.000	0.0

Fonte: ANAFAS.

APÊNDICE D – Relatórios de fluxo de carga com software PEISEE para sistemas IEEE.

Sistema IEEE de 14 barras

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 1 - - - - - - - - - - - - - - - - -

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM PU E rad:

E(1) : 1.0600 (p.u.) ângulo: -0.0000 (rad)
E(2) : 1.0450 (p.u.) ângulo: -0.0271 (rad)
E(3) : 1.0100 (p.u.) ângulo: -0.0549 (rad)
E(4) : 1.0320 (p.u.) ângulo: -0.0970 (rad)
E(5) : 1.0384 (p.u.) ângulo: -0.0848 (rad)
E(6) : 1.0700 (p.u.) ângulo: -0.1625 (rad)
E(7) : 1.0567 (p.u.) ângulo: -0.1495 (rad)
E(8) : 1.0900 (p.u.) ângulo: -0.1495 (rad)
E(9) : 1.0501 (p.u.) ângulo: -0.1766 (rad)
E(10) : 1.0461 (p.u.) ângulo: -0.1791 (rad)
E(11) : 1.0544 (p.u.) ângulo: -0.1730 (rad)
E(12) : 1.0548 (p.u.) ângulo: -0.1776 (rad)
E(13) : 1.0495 (p.u.) ângulo: -0.1790 (rad)
E(14) : 1.0318 (p.u.) ângulo: -0.1952 (rad

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM kV E º:

E(1) = 1.0600 (p.u.) ângulo = -0.0000 (º)

E(2) = 1.0450 (p.u.) ângulo = -1.5535 (º)
E(3) = 1.0100 (p.u.) ângulo = -3.1466 (º)
E(4) = 1.0320 (p.u.) ângulo = -5.5575 (º)
E(5) = 1.0384 (p.u.) ângulo = -4.8569 (º)
E(6) = 1.0700 (p.u.) ângulo = -9.3096 (º)
E(7) = 1.0567 (p.u.) ângulo = -8.5648 (º)
E(8) = 1.0900 (p.u.) ângulo = -8.5648 (º)
E(9) = 1.0501 (p.u.) ângulo = -10.1194 (º)
E(10) = 1.0461 (p.u.) ângulo = -10.2610 (º)
E(11) = 1.0544 (p.u.) ângulo = -9.9139 (º)
E(12) = 1.0548 (p.u.) ângulo = -10.1751 (º)
E(13) = 1.0495 (p.u.) ângulo = -10.2574 (º)
E(14) = 1.0318 (p.u.) ângulo = -11.1867 (º)

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 2 - - - - - - - - - - - - - - - - -

FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA PELOS RAMOS:

P(1,2) : 53.9577 (MW) Q(1,2) = 9.8637 (MVAr)
P(2,1) : -53.4382 (MW) Q(2,1) = -8.2785 (MVAr)
P(1,5) : 42.2301 (MW) Q(1,5) = 1.8147 (MVAr)
P(5,1) : -41.3710 (MW) Q(5,1) = 1.7313 (MVAr)
P(2,3) : 18.2259 (MW) Q(2,3) = 14.3528 (MVAr)
P(3,2) : -17.9943 (MW) Q(3,2) = -13.3770 (MVAr)
P(2,4) : 41.2666 (MW) Q(2,4) = -4.3882 (MVAr)
P(4,2) : -40.3502 (MW) Q(4,2) = 7.1685 (MVAr)
P(2,5) : 33.9562 (MW) Q(2,5) = -6.1085 (MVAr)
P(5,2) : -33.3355 (MW) Q(5,2) = 8.0041 (MVAr)
P(3,4) : 18.0019 (MW) Q(3,4) = -19.4941 (MVAr)
P(4,3) : -17.5394 (MW) Q(4,3) = 20.6744 (MVAr)
P(4,5) : -32.7536 (MW) Q(4,5) = -5.1373 (MVAr)
P(5,4) : 32.8914 (MW) Q(5,4) = 5.5719 (MVAr)
P(4,7) : 27.3613 (MW) Q(4,7) = -11.5078 (MVAr)
P(7,4) : -27.3613 (MW) Q(7,4) = 13.2378 (MVAr)
P(4,9) : 15.4964 (MW) Q(4,9) = -2.7476 (MVAr)
P(9,4) : -15.4964 (MW) Q(9,4) = 4.0412 (MVAr)
P(5,6) : 34.2302 (MW) Q(5,6) = -11.6963 (MVAr)
P(6,5) : -34.2302 (MW) Q(6,5) = 14.7544 (MVAr)
P(6,11) : 8.1470 (MW) Q(6,11) = 4.5346 (MVAr)

P(11,6) : -8.0749 (MW) Q(11,6) = -4.3836 (MVAr)
P(6,12) : 7.9182 (MW) Q(6,12) = 2.6102 (MVAr)
P(12,6) : -7.8436 (MW) Q(12,6) = -2.4549 (MVAr)
P(6,13) : 18.1762 (MW) Q(6,13) = 7.7228 (MVAr)
P(13,6) : -17.9508 (MW) Q(13,6) = -7.2789 (MVAr)
P(7,8) : 0.0000 (MW) Q(7,8) = -19.9543 (MVAr)
P(8,7) : -0.0000 (MW) Q(8,7) = 20.5823 (MVAr)
P(7,9) : 27.3683 (MW) Q(7,9) = 6.7474 (MVAr)
P(9,7) : -27.3683 (MW) Q(9,7) = -5.9647 (MVAr)
P(9,10) : 4.4481 (MW) Q(9,10) = 3.2784 (MVAr)
P(10,9) : -4.4393 (MW) Q(10,9) = -3.2550 (MVAr)
P(9,14) : 8.8793 (MW) Q(9,14) = 3.0106 (MVAr)
P(14,9) : -8.7779 (MW) Q(14,9) = -2.7951 (MVAr)
P(10,11) : -4.5652 (MW) Q(10,11) = -2.5429 (MVAr)
P(11,10) : 4.5857 (MW) Q(11,10) = 2.5909 (MVAr)
P(12,13) : 1.7453 (MW) Q(12,13) = 0.8591 (MVAr)
P(13,12) : -1.7378 (MW) Q(13,12) = -0.8523 (MVAr)
P(13,14) : 6.1959 (MW) Q(13,14) = 2.3396 (MVAr)
P(14,13) : -6.1278 (MW) Q(14,13) = -2.2010 (MVAr)

PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAIS:
4.3260 (MW)

PERDAS DE POTÊNCIA REATIVA TOTAIS:
21.0725 (MVAr)
- -

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON:
CONVERGÊNCIA: Convergiu

2 iterações necessárias para o problema de fluxo de carga com tolerância de: 0.001000000000

Sistema IEEE de 30 barras

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 1 - - - - - - - - - - - - - - - - -

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM PU E rad:

E(1) : 1.0400 (p.u.) ângulo: -0.0000 (rad)
E(2) : 1.0500 (p.u.) ângulo: -0.0339 (rad)

E(3) : 1.0259 (p.u.) ângulo: -0.0481 (rad)
E(4) : 1.0220 (p.u.) ângulo: -0.0571 (rad)
E(5) : 1.0100 (p.u.) ângulo: -0.0507 (rad)
E(6) : 1.0153 (p.u.) ângulo: -0.0606 (rad)
E(7) : 1.0047 (p.u.) ângulo: -0.0659 (rad)
E(8) : 1.0100 (p.u.) ângulo: -0.0507 (rad)
E(9) : 1.0235 (p.u.) ângulo: -0.0891 (rad)
E(10) : 1.0151 (p.u.) ângulo: -0.1254 (rad)
E(11) : 1.0500 (p.u.) ângulo: -0.0504 (rad)
E(12) : 1.0229 (p.u.) ângulo: -0.1134 (rad)
E(13) : 1.0500 (p.u.) ângulo: -0.0873 (rad)
E(14) : 1.0080 (p.u.) ângulo: -0.1299 (rad)
E(15) : 1.0037 (p.u.) ângulo: -0.1316 (rad)
E(16) : 1.0122 (p.u.) ângulo: -0.1236 (rad)
E(17) : 1.0088 (p.u.) ângulo: -0.1287 (rad)
E(18) : 0.9952 (p.u.) ângulo: -0.1424 (rad)
E(19) : 0.9934 (p.u.) ângulo: -0.1452 (rad)
E(20) : 0.9980 (p.u.) ângulo: -0.1413 (rad)
E(21) : 1.0020 (p.u.) ângulo: -0.1341 (rad)
E(22) : 1.0024 (p.u.) ângulo: -0.1341 (rad)
E(23) : 0.9934 (p.u.) ângulo: -0.1393 (rad)
E(24) : 0.9884 (p.u.) ângulo: -0.1431 (rad)
E(25) : 0.9835 (p.u.) ângulo: -0.1411 (rad)
E(26) : 0.9652 (p.u.) ângulo: -0.1490 (rad)
E(27) : 0.9895 (p.u.) ângulo: -0.1351 (rad)
E(28) : 1.0094 (p.u.) ângulo: -0.0689 (rad)
E(29) : 0.9689 (p.u.) ângulo: -0.1581 (rad)
E(30) : 0.9570 (p.u.) ângulo: -0.1746 (rad)

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM kV E º:

E(1) = 1.0400 (p.u.) ângulo = -0.0000 (º)
E(2) = 1.0500 (p.u.) ângulo = -1.9419 (º)
E(3) = 1.0259 (p.u.) ângulo = -2.7574 (º)
E(4) = 1.0220 (p.u.) ângulo = -3.2709 (º)
E(5) = 1.0100 (p.u.) ângulo = -2.9063 (º)
E(6) = 1.0153 (p.u.) ângulo = -3.4717 (º)
E(7) = 1.0047 (p.u.) ângulo = -3.7768 (º)
E(8) = 1.0100 (p.u.) ângulo = -2.9039 (º)
E(9) = 1.0235 (p.u.) ângulo = -5.1056 (º)

E(10) = 1.0151 (p.u.) ângulo = -7.1837 (º)
E(11) = 1.0500 (p.u.) ângulo = -2.8870 (º)
E(12) = 1.0229 (p.u.) ângulo = -6.4969 (º)
E(13) = 1.0500 (p.u.) ângulo = -5.0030 (º)
E(14) = 1.0080 (p.u.) ângulo = -7.4422 (º)
E(15) = 1.0037 (p.u.) ângulo = -7.5423 (º)
E(16) = 1.0122 (p.u.) ângulo = -7.0821 (º)
E(17) = 1.0088 (p.u.) ângulo = -7.3752 (º)
E(18) = 0.9952 (p.u.) ângulo = -8.1570 (º)
E(19) = 0.9934 (p.u.) ângulo = -8.3175 (º)
E(20) = 0.9980 (p.u.) ângulo = -8.0951 (º)
E(21) = 1.0020 (p.u.) ângulo = -7.6858 (º)
E(22) = 1.0024 (p.u.) ângulo = -7.6809 (º)
E(23) = 0.9934 (p.u.) ângulo = -7.9812 (º)
E(24) = 0.9884 (p.u.) ângulo = -8.1984 (º)
E(25) = 0.9835 (p.u.) ângulo = -8.0859 (º)
E(26) = 0.9652 (p.u.) ângulo = -8.5352 (º)
E(27) = 0.9895 (p.u.) ângulo = -7.7395 (º)
E(28) = 1.0094 (p.u.) ângulo = -3.9488 (º)
E(29) = 0.9689 (p.u.) ângulo = -9.0559 (º)
E(30) = 0.9570 (p.u.) ângulo = -10.0024 (º)

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 2 - - - - - - - - - - - - - - - - -

FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA PELOS RAMOS:

P(1,2) : 52.7915 (MW) Q(1,2) = -34.6241 (MVAr)
P(2,1) : -52.0840 (MW) Q(2,1) = 36.7430 (MVAr)
P(1,3) : 28.1378 (MW) Q(1,3) = 1.7388 (MVAr)
P(3,1) : -27.8057 (MW) Q(3,1) = -0.3780 (MVAr)
P(2,4) : 18.0027 (MW) Q(2,4) = 11.1963 (MVAr)
P(4,2) : -17.7703 (MW) Q(4,2) = -10.4881 (MVAr)
P(2,5) : 13.3072 (MW) Q(2,5) = 18.0884 (MVAr)
P(5,2) : -13.0913 (MW) Q(5,2) = -17.1814 (MVAr)
P(2,6) : 20.7749 (MW) Q(2,6) = 14.0547 (MVAr)
P(6,2) : -20.4433 (MW) Q(6,2) = -13.0487 (MVAr)
P(3,4) : 25.4076 (MW) Q(3,4) = 1.7694 (MVAr)
P(4,3) : -25.3263 (MW) Q(4,3) = -1.5358 (MVAr)
P(4,6) : 12.5166 (MW) Q(4,6) = 12.9873 (MVAr)

P(6,4) : -12.4795 (MW) Q(6,4) = -12.8583 (MVAr)
P(4,12) : 22.9806 (MW) Q(4,12) = 0.2714 (MVAr)
P(12,4) : -22.9806 (MW) Q(12,4) = 1.0232 (MVAr)
P(5,7) : 13.0916 (MW) Q(5,7) = -0.5014 (MVAr)
P(7,5) : -13.0142 (MW) Q(7,5) = 0.6966 (MVAr)
P(6,7) : 9.8361 (MW) Q(6,7) = 9.8631 (MVAr)
P(7,6) : -9.7858 (MW) Q(7,6) = -9.7087 (MVAr)
P(6,8) : -18.9719 (MW) Q(6,8) = 18.2746 (MVAr)
P(8,6) : 19.0527 (MW) Q(8,6) = -17.9919 (MVAr)
P(6,9) : 14.2444 (MW) Q(6,9) = -3.8187 (MVAr)
P(9,6) : -14.2444 (MW) Q(9,6) = 4.2576 (MVAr)
P(6,10) : 12.0010 (MW) Q(6,10) = 0.4108 (MVAr)
P(10,6) : -12.0010 (MW) Q(10,6) = 0.3670 (MVAr)
P(6,28) : 15.8204 (MW) Q(6,28) = 5.5824 (MVAr)
P(28,6) : -15.7743 (MW) Q(28,6) = -5.4188 (MVAr)
P(8,28) : 0.9509 (MW) Q(8,28) = -2.6240 (MVAr)
P(28,8) : -0.9023 (MW) Q(28,8) = 2.6392 (MVAr)
P(9,10) : 34.2520 (MW) Q(9,10) = 8.3993 (MVAr)
P(10,9) : -34.2520 (MW) Q(10,9) = -7.0933 (MVAr)
P(9,11) : -20.0017 (MW) Q(9,11) = -12.6489 (MVAr)
P(11,9) : 20.0017 (MW) Q(11,9) = 13.7609 (MVAr)
P(10,17) : 6.0879 (MW) Q(10,17) = 5.3141 (MVAr)
P(17,10) : -6.0674 (MW) Q(17,10) = -5.2606 (MVAr)
P(10,20) : 9.5458 (MW) Q(10,20) = 4.0969 (MVAr)
P(20,10) : -9.4478 (MW) Q(20,10) = -3.8780 (MVAr)
P(10,21) : 16.6372 (MW) Q(10,21) = 10.1940 (MVAr)
P(21,10) : -16.5086 (MW) Q(21,10) = -9.9173 (MVAr)
P(10,22) : 8.1746 (MW) Q(10,22) = 4.7086 (MVAr)
P(22,10) : -8.1118 (MW) Q(22,10) = -4.5791 (MVAr)
P(12,13) : -20.0015 (MW) Q(12,13) = -19.5245 (MVAr)
P(13,12) : 20.0015 (MW) Q(13,12) = 20.5698 (MVAr)
P(12,14) : 7.7485 (MW) Q(12,14) = 2.2885 (MVAr)
P(14,12) : -7.6717 (MW) Q(14,12) = -2.1288 (MVAr)
P(12,15) : 17.5487 (MW) Q(12,15) = 6.2710 (MVAr)
P(15,12) : -17.3290 (MW) Q(15,12) = -5.8382 (MVAr)
P(12,16) : 6.4854 (MW) Q(12,16) = 2.4469 (MVAr)
P(16,12) : -6.4420 (MW) Q(16,12) = -2.3557 (MVAr)
P(14,15) : 1.4707 (MW) Q(14,15) = 0.5294 (MVAr)
P(15,14) : -1.4654 (MW) Q(15,14) = -0.5246 (MVAr)
P(15,18) : 5.5115 (MW) Q(15,18) = 1.2396 (MVAr)

P(18,15) : -5.4776 (MW) Q(18,15) = -1.1704 (MVAr)
P(15,23) : 5.0806 (MW) Q(15,23) = 2.6251 (MVAr)
P(23,15) : -5.0482 (MW) Q(23,15) = -2.5595 (MVAr)
P(16,17) : 2.9412 (MW) Q(16,17) = 0.5561 (MVAr)
P(17,16) : -2.9340 (MW) Q(17,16) = -0.5392 (MVAr)
P(18,19) : 2.2775 (MW) Q(18,19) = 0.2707 (MVAr)
P(19,18) : -2.2741 (MW) Q(19,18) = -0.2638 (MVAr)
P(19,20) : -7.2254 (MW) Q(19,20) = -3.1362 (MVAr)
P(20,19) : 7.2467 (MW) Q(20,19) = 3.1789 (MVAr)
P(21,22) : -0.9932 (MW) Q(21,22) = -1.2817 (MVAr)
P(22,21) : 0.9935 (MW) Q(22,21) = 1.2824 (MVAr)
P(22,24) : 7.1174 (MW) Q(22,24) = 3.2976 (MVAr)
P(24,22) : -7.0469 (MW) Q(24,22) = -3.1880 (MVAr)
P(23,24) : 1.8480 (MW) Q(23,24) = 0.9598 (MVAr)
P(24,23) : -1.8422 (MW) Q(24,23) = -0.9479 (MVAr)
P(24,25) : 0.1898 (MW) Q(24,25) = 1.3438 (MVAr)
P(25,24) : -0.1862 (MW) Q(25,24) = -1.3376 (MVAr)
P(25,26) : 3.5464 (MW) Q(25,26) = 2.3712 (MVAr)
P(26,25) : -3.4985 (MW) Q(26,25) = -2.2997 (MVAr)
P(25,27) : -3.3607 (MW) Q(25,27) = -1.0330 (MVAr)
P(27,25) : 3.3747 (MW) Q(27,25) = 1.0597 (MVAr)
P(27,28) : -16.6740 (MW) Q(27,28) = -4.4211 (MVAr)
P(28,27) : 16.6740 (MW) Q(28,27) = 5.6247 (MVAr)
P(27,29) : 6.1955 (MW) Q(27,29) = 1.6853 (MVAr)
P(29,27) : -6.1030 (MW) Q(29,27) = -1.5104 (MVAr)
P(27,30) : 7.0983 (MW) Q(27,30) = 1.6838 (MVAr)
P(30,27) : -6.9243 (MW) Q(30,27) = -1.3562 (MVAr)
P(29,30) : 3.7027 (MW) Q(29,30) = 0.6119 (MVAr)
P(30,29) : -3.6668 (MW) Q(30,29) = -0.5439 (MVAr)

PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAIS:
3.4390 (MW)

PERDAS DE POTÊNCIA REATIVA TOTAIS:
16.8180 (MVAr)

- -

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON:
CONVERGÊNCIA: Convergiu

2 iterações necessárias para o problema de fluxo de carga com tolerância de: 0.001000000000

Sistema IEEE de 57 barras

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 1 - - - - - - - - - - - - - - - - -

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM PU E rad:

E(1) : 1.0400 (p.u.) ângulo: 0.0000 (rad)
E(2) : 1.0100 (p.u.) ângulo: 0.0341 (rad)
E(3) : 0.9850 (p.u.) ângulo: 0.1297 (rad)
E(4) : 0.9756 (p.u.) ângulo: 0.1675 (rad)
E(5) : 0.9734 (p.u.) ângulo: 0.2426 (rad)
E(6) : 0.9800 (p.u.) ângulo: 0.2869 (rad)
E(7) : 0.9797 (p.u.) ângulo: 0.3427 (rad)
E(8) : 1.0050 (p.u.) ângulo: 0.4325 (rad)
E(9) : 0.9800 (p.u.) ângulo: 0.3111 (rad)
E(10) : 0.9831 (p.u.) ângulo: 0.2340 (rad)
E(11) : 0.9661 (p.u.) ângulo: 0.2349 (rad)
E(12) : 1.0150 (p.u.) ângulo: 0.2419 (rad)
E(13) : 0.9737 (p.u.) ângulo: 0.1889 (rad)
E(14) : 0.9646 (p.u.) ângulo: 0.1460 (rad)
E(15) : 0.9779 (p.u.) ângulo: 0.1134 (rad)
E(16) : 1.0106 (p.u.) ângulo: 0.1479 (rad)
E(17) : 1.0143 (p.u.) ângulo: 0.0628 (rad)
E(18) : 0.9498 (p.u.) ângulo: 0.0327 (rad)
E(19) : 0.9199 (p.u.) ângulo: 0.0346 (rad)
E(20) : 0.9142 (p.u.) ângulo: 0.0505 (rad)
E(21) : 0.9044 (p.u.) ângulo: 0.0874 (rad)
E(22) : 0.9062 (p.u.) ângulo: 0.0940 (rad)
E(23) : 0.9046 (p.u.) ângulo: 0.0959 (rad)
E(24) : 0.8951 (p.u.) ângulo: 0.1458 (rad)
E(25) : 0.8238 (p.u.) ângulo: -0.0675 (rad)
E(26) : 0.8936 (p.u.) ângulo: 0.1591 (rad)
E(27) : 0.9298 (p.u.) ângulo: 0.2333 (rad)
E(28) : 0.9516 (p.u.) ângulo: 0.2691 (rad)
E(29) : 0.9704 (p.u.) ângulo: 0.2921 (rad)
E(30) : 0.8030 (p.u.) ângulo: -0.0784 (rad)
E(31) : 0.7782 (p.u.) ângulo: -0.0879 (rad)
E(32) : 0.8066 (p.u.) ângulo: -0.0556 (rad)
E(33) : 0.8039 (p.u.) ângulo: -0.0566 (rad)
E(34) : 0.8552 (p.u.) ângulo: 0.0646 (rad)

E(35) : 0.8648 (p.u.) ângulo: 0.0704 (rad)
E(36) : 0.8769 (p.u.) ângulo: 0.0765 (rad)
E(37) : 0.8855 (p.u.) ângulo: 0.0803 (rad)
E(38) : 0.9098 (p.u.) ângulo: 0.0918 (rad)
E(39) : 0.8843 (p.u.) ângulo: 0.0803 (rad)
E(40) : 0.8765 (p.u.) ângulo: 0.0769 (rad)
E(41) : 0.9261 (p.u.) ângulo: 0.1333 (rad)
E(42) : 0.8785 (p.u.) ângulo: 0.0958 (rad)
E(43) : 0.9531 (p.u.) ângulo: 0.2058 (rad)
E(44) : 0.9216 (p.u.) ângulo: 0.0881 (rad)
E(45) : 0.9568 (p.u.) ângulo: 0.0962 (rad)
E(46) : 0.9473 (p.u.) ângulo: 0.1181 (rad)
E(47) : 0.9234 (p.u.) ângulo: 0.0968 (rad)
E(48) : 0.9202 (p.u.) ângulo: 0.0975 (rad)
E(49) : 0.9308 (p.u.) ângulo: 0.1147 (rad)
E(50) : 0.9256 (p.u.) ângulo: 0.1332 (rad)
E(51) : 0.9755 (p.u.) ângulo: 0.1986 (rad)
E(52) : 0.9327 (p.u.) ângulo: 0.2633 (rad)
E(53) : 0.9194 (p.u.) ângulo: 0.2510 (rad)
E(54) : 0.9399 (p.u.) ângulo: 0.2659 (rad)
E(55) : 0.9704 (p.u.) ângulo: 0.2875 (rad)
E(56) : 0.8643 (p.u.) ângulo: 0.0775 (rad)
E(57) : 0.8528 (p.u.) ângulo: 0.0583 (rad)

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM kV E º:

E(1) = 1.0400 (p.u.) ângulo = 0.0000 (º)
E(2) = 1.0100 (p.u.) ângulo = 1.9526 (º)
E(3) = 0.9850 (p.u.) ângulo = 7.4331 (º)
E(4) = 0.9756 (p.u.) ângulo = 9.5980 (º)
E(5) = 0.9734 (p.u.) ângulo = 13.8987 (º)
E(6) = 0.9800 (p.u.) ângulo = 16.4354 (º)
E(7) = 0.9797 (p.u.) ângulo = 19.6335 (º)
E(8) = 1.0050 (p.u.) ângulo = 24.7778 (º)
E(9) = 0.9800 (p.u.) ângulo = 17.8274 (º)
E(10) = 0.9831 (p.u.) ângulo = 13.4064 (º)
E(11) = 0.9661 (p.u.) ângulo = 13.4611 (º)
E(12) = 1.0150 (p.u.) ângulo = 13.8583 (º)
E(13) = 0.9737 (p.u.) ângulo = 10.8244 (º)
E(14) = 0.9646 (p.u.) ângulo = 8.3658 (º)

E(15) = 0.9779 (p.u.) ângulo = 6.4986 (º)
E(16) = 1.0106 (p.u.) ângulo = 8.4736 (º)
E(17) = 1.0143 (p.u.) ângulo = 3.5982 (º)
E(18) = 0.9498 (p.u.) ângulo = 1.8748 (º)
E(19) = 0.9199 (p.u.) ângulo = 1.9804 (º)
E(20) = 0.9142 (p.u.) ângulo = 2.8923 (º)
E(21) = 0.9044 (p.u.) ângulo = 5.0074 (º)
E(22) = 0.9062 (p.u.) ângulo = 5.3840 (º)
E(23) = 0.9046 (p.u.) ângulo = 5.4971 (º)
E(24) = 0.8951 (p.u.) ângulo = 8.3552 (º)
E(25) = 0.8238 (p.u.) ângulo = -3.8651 (º)
E(26) = 0.8936 (p.u.) ângulo = 9.1162 (º)
E(27) = 0.9298 (p.u.) ângulo = 13.3669 (º)
E(28) = 0.9516 (p.u.) ângulo = 15.4195 (º)
E(29) = 0.9704 (p.u.) ângulo = 16.7361 (º)
E(30) = 0.8030 (p.u.) ângulo = -4.4893 (º)
E(31) = 0.7782 (p.u.) ângulo = -5.0360 (º)
E(32) = 0.8066 (p.u.) ângulo = -3.1869 (º)
E(33) = 0.8039 (p.u.) ângulo = -3.2419 (º)
E(34) = 0.8552 (p.u.) ângulo = 3.7023 (º)
E(35) = 0.8648 (p.u.) ângulo = 4.0354 (º)
E(36) = 0.8769 (p.u.) ângulo = 4.3843 (º)
E(37) = 0.8855 (p.u.) ângulo = 4.5995 (º)
E(38) = 0.9098 (p.u.) ângulo = 5.2608 (º)
E(39) = 0.8843 (p.u.) ângulo = 4.6016 (º)
E(40) = 0.8765 (p.u.) ângulo = 4.4057 (º)
E(41) = 0.9261 (p.u.) ângulo = 7.6380 (º)
E(42) = 0.8785 (p.u.) ângulo = 5.4873 (º)
E(43) = 0.9531 (p.u.) ângulo = 11.7927 (º)
E(44) = 0.9216 (p.u.) ângulo = 5.0473 (º)
E(45) = 0.9568 (p.u.) ângulo = 5.5106 (º)
E(46) = 0.9473 (p.u.) ângulo = 6.7650 (º)
E(47) = 0.9234 (p.u.) ângulo = 5.5479 (º)
E(48) = 0.9202 (p.u.) ângulo = 5.5881 (º)
E(49) = 0.9308 (p.u.) ângulo = 6.5711 (º)
E(50) = 0.9256 (p.u.) ângulo = 7.6296 (º)
E(51) = 0.9755 (p.u.) ângulo = 11.3814 (º)
E(52) = 0.9327 (p.u.) ângulo = 15.0848 (º)
E(53) = 0.9194 (p.u.) ângulo = 14.3791 (º)
E(54) = 0.9399 (p.u.) ângulo = 15.2359 (º)

E(55) = 0.9704 (p.u.) ângulo = 16.4742 (º)
E(56) = 0.8643 (p.u.) ângulo = 4.4415 (º)
E(57) = 0.8528 (p.u.) ângulo = 3.3398 (º)

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 2 - - - - - - - - - - - - - - - - -

FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA PELOS RAMOS:

P(1,2) : -86.5397 (MW) Q(1,2) = 139.2596 (MVAr)
P(2,1) : 88.6026 (MW) Q(2,1) = -132.3004 (MVAr)
P(1,15) : -107.0937 (MW) Q(1,15) = 99.1326 (MVAr)
P(15,1) : 110.5984 (MW) Q(15,1) = -81.2150 (MVAr)
P(1,16) : -67.4135 (MW) Q(1,16) = 35.2532 (MVAr)
P(16,1) : 69.8427 (MW) Q(16,1) = -24.2307 (MVAr)
P(1,17) : -52.8432 (MW) Q(1,17) = 38.3579 (MVAr)
P(17,1) : 53.7814 (MW) Q(17,1) = -34.1005 (MVAr)
P(2,3) : -88.6026 (MW) Q(2,3) = 66.1192 (MVAr)
P(3,2) : 92.1730 (MW) Q(3,2) = -55.9351 (MVAr)
P(3,4) : -83.0530 (MW) Q(3,4) = 52.7000 (MVAr)
P(4,3) : 84.1699 (MW) Q(4,3) = -49.0503 (MVAr)
P(3,15) : 30.8800 (MW) Q(3,15) = 4.0511 (MVAr)
P(15,3) : -30.7180 (MW) Q(15,3) = -3.5212 (MVAr)
P(4,5) : -42.6558 (MW) Q(4,5) = 23.8441 (MVAr)
P(5,4) : 44.2240 (MW) Q(5,4) = -20.5319 (MVAr)
P(4,6) : -70.4719 (MW) Q(4,6) = 22.1411 (MVAr)
P(6,4) : 72.9373 (MW) Q(6,4) = -13.6557 (MVAr)
P(4,18) : 28.9578 (MW) Q(4,18) = 7.8047 (MVAr)
P(18,4) : -28.9578 (MW) Q(18,4) = -3.7407 (MVAr)
P(5,6) : -57.2240 (MW) Q(5,6) = 18.3415 (MVAr)
P(6,5) : 58.3750 (MW) Q(6,5) = -15.8984 (MVAr)
P(6,7) : -50.2316 (MW) Q(6,7) = 11.6272 (MVAr)
P(7,6) : 50.7852 (MW) Q(7,6) = -8.8039 (MVAr)
P(6,8) : -81.0808 (MW) Q(6,8) = 7.7502 (MVAr)
P(8,6) : 83.4225 (MW) Q(8,6) = 4.2001 (MVAr)
P(7,8) : -124.9428 (MW) Q(7,8) = -4.8837 (MVAr)
P(8,7) : 127.2071 (MW) Q(8,7) = 16.4822 (MVAr)
P(7,29) : 74.1576 (MW) Q(7,29) = 15.9431 (MVAr)
P(29,7) : -74.1576 (MW) Q(29,7) = -12.0585 (MVAr)
P(8,9) : 239.3704 (MW) Q(8,9) = 17.1587 (MVAr)

P(9,8) : -233.7253 (MW) Q(9,8) = 11.6369 (MVAr)
P(9,10) : 42.1697 (MW) Q(9,10) = -9.3890 (MVAr)
P(10,9) : -41.4526 (MW) Q(10,9) = 12.6520 (MVAr)
P(9,11) : 83.1846 (MW) Q(9,11) = -5.9529 (MVAr)
P(11,9) : -81.3162 (MW) Q(11,9) = 12.0940 (MVAr)
P(9,12) : 19.9981 (MW) Q(9,12) = -15.2112 (MVAr)
P(12,9) : -19.5721 (MW) Q(12,9) = 17.1503 (MVAr)
P(9,13) : 69.7363 (MW) Q(9,13) = -12.7893 (MVAr)
P(13,9) : -67.2188 (MW) Q(13,9) = 21.0590 (MVAr)
P(9,55) : 18.6367 (MW) Q(9,55) = 8.0138 (MVAr)
P(55,9) : -18.6367 (MW) Q(55,9) = -7.4974 (MVAr)
P(10,12) : -11.1426 (MW) Q(10,12) = -22.3550 (MVAr)
P(12,10) : 11.3214 (MW) Q(12,10) = 23.1697 (MVAr)
P(10,51) : 47.5952 (MW) Q(10,51) = 11.4146 (MVAr)
P(51,10) : -47.5952 (MW) Q(51,10) = -9.6499 (MVAr)
P(11,13) : 51.6766 (MW) Q(11,13) = -24.4130 (MVAr)
P(13,11) : -50.8961 (MW) Q(13,11) = 26.9750 (MVAr)
P(11,41) : 12.1184 (MW) Q(11,41) = 5.7754 (MVAr)
P(41,11) : -12.1184 (MW) Q(41,11) = -4.3291 (MVAr)
P(11,43) : 17.5211 (MW) Q(11,43) = 8.4381 (MVAr)
P(43,11) : -17.5211 (MW) Q(43,11) = -7.8181 (MVAr)
P(12,13) : 103.3831 (MW) Q(12,13) = 43.0133 (MVAr)
P(13,12) : -101.2168 (MW) Q(13,12) = -35.9544 (MVAr)
P(12,16) : 115.1980 (MW) Q(12,16) = -14.4841 (MVAr)
P(16,12) : -112.8427 (MW) Q(16,12) = 25.1221 (MVAr)
P(12,17) : 99.6696 (MW) Q(12,17) = -12.4887 (MVAr)
P(17,12) : -95.7814 (MW) Q(17,12) = 30.0200 (MVAr)
P(13,14) : 91.1777 (MW) Q(13,14) = -5.4286 (MVAr)
P(14,13) : -90.0160 (MW) Q(14,13) = 9.2480 (MVAr)
P(13,15) : 74.9623 (MW) Q(13,15) = -24.8074 (MVAr)
P(15,13) : -73.1932 (MW) Q(15,13) = 30.5225 (MVAr)
P(13,49) : 35.1916 (MW) Q(13,49) = 23.1466 (MVAr)
P(49,13) : -35.1916 (MW) Q(49,13) = -19.5720 (MVAr)
P(14,15) : 44.7833 (MW) Q(14,15) = -36.4843 (MVAr)
P(15,14) : -44.1701 (MW) Q(15,14) = 38.4459 (MVAr)
P(14,46) : 34.7326 (MW) Q(14,46) = 23.1367 (MVAr)
P(46,14) : -34.7326 (MW) Q(46,14) = -21.7609 (MVAr)
P(15,45) : 15.4827 (MW) Q(15,45) = 19.9000 (MVAr)
P(45,15) : -15.4827 (MW) Q(45,15) = -19.2073 (MVAr)
P(18,19) : 1.7578 (MW) Q(18,19) = 2.9614 (MVAr)

P(19,18) : -1.6972 (MW) Q(19,18) = -2.8714 (MVAr)
P(19,20) : -1.6027 (MW) Q(19,20) = 2.2714 (MVAr)
P(20,19) : 1.6286 (MW) Q(20,19) = -2.2317 (MVAr)
P(20,21) : -3.9286 (MW) Q(20,21) = 1.2318 (MVAr)
P(21,20) : 3.9286 (MW) Q(21,20) = -1.0742 (MVAr)
P(21,22) : -3.9286 (MW) Q(21,22) = 1.0742 (MVAr)
P(22,21) : 3.9435 (MW) Q(22,21) = -1.0505 (MVAr)
P(22,23) : -3.0741 (MW) Q(22,23) = 11.6215 (MVAr)
P(23,22) : 3.0915 (MW) Q(23,22) = -11.5947 (MVAr)
P(22,38) : -0.8694 (MW) Q(22,38) = -10.5710 (MVAr)
P(38,22) : 0.8957 (MW) Q(38,22) = 10.6114 (MVAr)
P(23,24) : -9.3912 (MW) Q(23,24) = 9.8383 (MVAr)
P(24,23) : 9.7665 (MW) Q(24,23) = -9.2595 (MVAr)
P(24,25) : 12.6890 (MW) Q(24,25) = 6.5479 (MVAr)
P(25,24) : -12.6890 (MW) Q(25,24) = -3.4178 (MVAr)
P(24,26) : -22.4591 (MW) Q(24,26) = 3.0492 (MVAr)
P(26,24) : 22.4591 (MW) Q(26,24) = -2.7459 (MVAr)
P(25,30) : 6.3908 (MW) Q(25,30) = 4.2248 (MVAr)
P(30,25) : -6.2740 (MW) Q(30,25) = -4.0501 (MVAr)
P(26,27) : -22.4597 (MW) Q(26,27) = 2.7460 (MVAr)
P(27,26) : 23.5178 (MW) Q(27,26) = -1.1173 (MVAr)
P(27,28) : -32.8176 (MW) Q(27,28) = 0.6173 (MVAr)
P(28,27) : 33.5878 (MW) Q(28,27) = 0.5717 (MVAr)
P(28,29) : -38.1878 (MW) Q(28,29) = -2.8716 (MVAr)
P(29,28) : 38.8648 (MW) Q(29,28) = 3.8224 (MVAr)
P(29,52) : 18.2929 (MW) Q(29,52) = 5.6361 (MVAr)
P(52,29) : -17.7318 (MW) Q(52,29) = -4.9084 (MVAr)
P(30,31) : 2.6756 (MW) Q(30,31) = 2.2499 (MVAr)
P(31,30) : -2.6138 (MW) Q(31,30) = -2.1557 (MVAr)
P(31,32) : -3.1830 (MW) Q(31,32) = -0.7448 (MVAr)
P(32,31) : 3.2725 (MW) Q(32,31) = 0.8780 (MVAr)
P(32,33) : 3.8101 (MW) Q(32,33) = 1.9103 (MVAr)
P(33,32) : -3.7991 (MW) Q(33,32) = -1.9002 (MVAr)
P(32,34) : -8.6819 (MW) Q(32,34) = -3.5854 (MVAr)
P(34,32) : 8.6819 (MW) Q(34,32) = 4.8778 (MVAr)
P(34,35) : -8.6851 (MW) Q(34,35) = -4.7599 (MVAr)
P(35,34) : 8.7549 (MW) Q(35,34) = 4.8646 (MVAr)
P(35,36) : -14.7547 (MW) Q(35,36) = -7.6850 (MVAr)
P(36,35) : 14.9139 (MW) Q(36,35) = 7.8838 (MVAr)
P(36,37) : -14.8746 (MW) Q(36,37) = -8.7171 (MVAr)

P(37,36) : 14.9867 (MW) Q(37,36) = 8.8586 (MVAr)
P(36,40) : -0.0393 (MW) Q(36,40) = 0.8949 (MVAr)
P(40,36) : 0.0397 (MW) Q(40,36) = -0.8944 (MVAr)
P(37,38) : -16.2141 (MW) Q(37,38) = -10.8481 (MVAr)
P(38,37) : 16.5300 (MW) Q(38,37) = 11.3378 (MVAr)
P(37,39) : 1.2274 (MW) Q(37,39) = 2.0679 (MVAr)
P(39,37) : -1.2256 (MW) Q(39,37) = -2.0651 (MVAr)
P(38,44) : -2.9614 (MW) Q(38,44) = -16.8042 (MVAr)
P(44,38) : 3.0630 (MW) Q(44,38) = 17.0100 (MVAr)
P(38,48) : -15.8981 (MW) Q(38,48) = -9.2298 (MVAr)
P(48,38) : 16.0255 (MW) Q(48,38) = 9.4265 (MVAr)
P(38,49) : -12.5661 (MW) Q(38,49) = -2.5014 (MVAr)
P(49,38) : 12.7942 (MW) Q(49,38) = 2.8524 (MVAr)
P(39,57) : 1.2256 (MW) Q(39,57) = 2.0651 (MVAr)
P(57,39) : -1.2256 (MW) Q(57,39) = -1.9652 (MVAr)
P(40,56) : -0.0397 (MW) Q(40,56) = 0.8944 (MVAr)
P(56,40) : 0.0397 (MW) Q(56,40) = -0.8819 (MVAr)
P(41,42) : 11.9792 (MW) Q(41,42) = 5.6214 (MVAr)
P(42,41) : -11.5565 (MW) Q(42,41) = -4.9027 (MVAr)
P(41,43) : -15.5210 (MW) Q(41,43) = -5.5147 (MVAr)
P(43,41) : 15.5210 (MW) Q(43,41) = 6.8181 (MVAr)
P(41,56) : 9.3602 (MW) Q(41,56) = 1.2226 (MVAr)
P(56,41) : -8.7856 (MW) Q(56,41) = -0.6521 (MVAr)
P(42,56) : 4.4566 (MW) Q(42,56) = 0.9027 (MVAr)
P(56,42) : -4.3997 (MW) Q(56,42) = -0.8079 (MVAr)
P(44,45) : -15.0630 (MW) Q(44,45) = -18.5551 (MVAr)
P(45,44) : 15.4827 (MW) Q(45,44) = 19.3904 (MVAr)
P(46,47) : 34.7325 (MW) Q(46,47) = 21.9046 (MVAr)
P(47,46) : -34.3003 (MW) Q(47,46) = -20.6270 (MVAr)
P(47,48) : 4.6006 (MW) Q(47,48) = 9.1634 (MVAr)
P(48,47) : -4.5782 (MW) Q(48,47) = -9.1346 (MVAr)
P(48,49) : -11.4474 (MW) Q(48,49) = -0.0886 (MVAr)
P(49,48) : 11.5765 (MW) Q(49,48) = 0.2883 (MVAr)
P(49,50) : -7.1790 (MW) Q(49,50) = 8.3992 (MVAr)
P(50,49) : 7.2919 (MW) Q(50,49) = -8.2188 (MVAr)
P(50,51) : -28.2918 (MW) Q(50,51) = -2.2812 (MVAr)
P(51,50) : 29.5952 (MW) Q(51,50) = 4.3499 (MVAr)
P(52,53) : 12.8318 (MW) Q(52,53) = 2.7084 (MVAr)
P(53,52) : -12.6812 (MW) Q(53,52) = -2.5139 (MVAr)
P(53,54) : -7.3188 (MW) Q(53,54) = -2.1603 (MVAr)

P(54,53) : 7.4482 (MW) Q(54,53) = 2.3201 (MVAr)
P(54,55) : -11.5482 (MW) Q(54,55) = -3.7201 (MVAr)
P(55,54) : 11.8367 (MW) Q(55,54) = 4.0974 (MVAr)
P(56,57) : 5.5458 (MW) Q(56,57) = 0.1420 (MVAr)
P(57,56) : -5.4741 (MW) Q(57,56) = -0.0349 (MVAr)

PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAIS:
57.3116 (MW)

PERDAS DE POTÊNCIA REATIVA TOTAIS:
232.0930 (MVAr)
- -

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON:
CONVERGÊNCIA: Convergiu

3 iterações necessárias para o problema de fluxo de carga com tolerância de: 0.001000000000

Sistema IEEE de 118 barras

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 1 - - - - - - - - - - - - - - - - -

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM PU E rad:
E(1) : 0.9557 (p.u.) ângulo: 0.3210 (rad)
E(2) : 0.9717 (p.u.) ângulo: 0.3315 (rad)
E(3) : 0.9672 (p.u.) ângulo: 0.3364 (rad)
E(4) : 0.9980 (p.u.) ângulo: 0.4023 (rad)
E(5) : 0.9982 (p.u.) ângulo: 0.4079 (rad)
E(6) : 0.9837 (p.u.) ângulo: 0.3625 (rad)
E(7) : 0.9854 (p.u.) ângulo: 0.3550 (rad)
E(8) : 1.0150 (p.u.) ângulo: 0.4853 (rad)
E(9) : 1.0429 (p.u.) ângulo: 0.6120 (rad)
E(10) : 1.0500 (p.u.) ângulo: 0.7443 (rad)
E(11) : 0.9838 (p.u.) ângulo: 0.3560 (rad)
E(12) : 0.9900 (p.u.) ângulo: 0.3491 (rad)
E(13) : 0.9639 (p.u.) ângulo: 0.3231 (rad)
E(14) : 0.9798 (p.u.) ângulo: 0.3259 (rad)
E(15) : 0.9568 (p.u.) ângulo: 0.2903 (rad)

E(16) : 0.9802 (p.u.) ângulo: 0.3312 (rad)
E(17) : 0.9833 (p.u.) ângulo: 0.3357 (rad)
E(18) : 0.9530 (p.u.) ângulo: 0.2939 (rad)
E(19) : 0.9491 (p.u.) ângulo: 0.2800 (rad)
E(20) : 0.9488 (p.u.) ângulo: 0.2783 (rad)
E(21) : 0.9527 (p.u.) ângulo: 0.2939 (rad)
E(22) : 0.9669 (p.u.) ângulo: 0.3248 (rad)
E(23) : 0.9996 (p.u.) ângulo: 0.3888 (rad)
E(24) : 0.9920 (p.u.) ângulo: 0.3214 (rad)
E(25) : 1.0500 (p.u.) ângulo: 0.5504 (rad)
E(26) : 1.0150 (p.u.) ângulo: 0.5885 (rad)
E(27) : 0.9680 (p.u.) ângulo: 0.3902 (rad)
E(28) : 0.9616 (p.u.) ângulo: 0.3617 (rad)
E(29) : 0.9632 (p.u.) ângulo: 0.3462 (rad)
E(30) : 1.0050 (p.u.) ângulo: 0.4132 (rad)
E(31) : 0.9670 (p.u.) ângulo: 0.3488 (rad)
E(32) : 0.9678 (p.u.) ângulo: 0.3572 (rad)
E(33) : 0.9542 (p.u.) ângulo: 0.2630 (rad)
E(34) : 0.9656 (p.u.) ângulo: 0.2556 (rad)
E(35) : 0.9600 (p.u.) ângulo: 0.2482 (rad)
E(36) : 0.9595 (p.u.) ângulo: 0.2482 (rad)
E(37) : 0.9707 (p.u.) ângulo: 0.2650 (rad)
E(38) : 0.9978 (p.u.) ângulo: 0.3308 (rad)
E(39) : 0.9633 (p.u.) ângulo: 0.2422 (rad)
E(40) : 0.9700 (p.u.) ângulo: 0.2448 (rad)
E(41) : 0.9668 (p.u.) ângulo: 0.2372 (rad)
E(42) : 0.9850 (p.u.) ângulo: 0.2653 (rad)
E(43) : 0.9648 (p.u.) ângulo: 0.2216 (rad)
E(44) : 0.9814 (p.u.) ângulo: 0.2181 (rad)
E(45) : 0.9861 (p.u.) ângulo: 0.2330 (rad)
E(46) : 1.0050 (p.u.) ângulo: 0.2641 (rad)
E(47) : 1.0131 (p.u.) ângulo: 0.2459 (rad)
E(48) : 1.0206 (p.u.) ângulo: 0.2949 (rad)
E(49) : 1.0250 (p.u.) ângulo: 0.3138 (rad)
E(50) : 1.0022 (p.u.) ângulo: 0.2983 (rad)
E(51) : 0.9692 (p.u.) ângulo: 0.2792 (rad)
E(52) : 0.9595 (p.u.) ângulo: 0.2701 (rad)
E(53) : 0.9473 (p.u.) ângulo: 0.2739 (rad)
E(54) : 0.9550 (p.u.) ângulo: 0.3051 (rad)
E(55) : 0.9517 (p.u.) ângulo: 0.2972 (rad)

E(56) : 0.9543 (p.u.) ângulo: 0.2994 (rad)
E(57) : 0.9717 (p.u.) ângulo: 0.2919 (rad)
E(58) : 0.9605 (p.u.) ângulo: 0.2825 (rad)
E(59) : 0.9850 (p.u.) ângulo: 0.3771 (rad)
E(60) : 0.9933 (p.u.) ângulo: 0.3654 (rad)
E(61) : 0.9950 (p.u.) ângulo: 0.3763 (rad)
E(62) : 0.9981 (p.u.) ângulo: 0.3599 (rad)
E(63) : 0.9975 (p.u.) ângulo: 0.3697 (rad)
E(64) : 1.0015 (p.u.) ângulo: 0.3656 (rad)
E(65) : 1.0050 (p.u.) ângulo: 0.3475 (rad)
E(66) : 1.0500 (p.u.) ângulo: 0.3955 (rad)
E(67) : 1.0202 (p.u.) ângulo: 0.3653 (rad)
E(68) : 1.0071 (p.u.) ângulo: 0.2570 (rad)
E(69) : 1.0350 (p.u.) ângulo: 0.0000 (rad)
E(70) : 0.9765 (p.u.) ângulo: 0.0415 (rad)
E(71) : 0.9823 (p.u.) ângulo: 0.0639 (rad)
E(72) : 0.9800 (p.u.) ângulo: 0.1874 (rad)
E(73) : 0.9910 (p.u.) ângulo: 0.0622 (rad)
E(74) : 0.9500 (p.u.) ângulo: 0.0129 (rad)
E(75) : 0.9571 (p.u.) ângulo: 0.0324 (rad)
E(76) : 0.9205 (p.u.) ângulo: 0.0678 (rad)
E(77) : 0.9875 (p.u.) ângulo: 0.2334 (rad)
E(78) : 0.9870 (p.u.) ângulo: 0.2357 (rad)
E(79) : 0.9961 (p.u.) ângulo: 0.2565 (rad)
E(80) : 1.0400 (p.u.) ângulo: 0.3382 (rad)
E(81) : 1.0250 (p.u.) ângulo: 0.2854 (rad)
E(82) : 0.9658 (p.u.) ângulo: 0.3648 (rad)
E(83) : 0.9604 (p.u.) ângulo: 0.4180 (rad)
E(84) : 0.9622 (p.u.) ângulo: 0.5140 (rad)
E(85) : 0.9734 (p.u.) ângulo: 0.5658 (rad)
E(86) : 0.9787 (p.u.) ângulo: 0.5347 (rad)
E(87) : 1.0150 (p.u.) ângulo: 0.5296 (rad)
E(88) : 0.9796 (p.u.) ângulo: 0.6672 (rad)
E(89) : 1.0050 (p.u.) ângulo: 0.7694 (rad)
E(90) : 0.9850 (p.u.) ângulo: 0.7463 (rad)
E(91) : 0.9800 (p.u.) ângulo: 0.7103 (rad)
E(92) : 0.9874 (p.u.) ângulo: 0.6519 (rad)
E(93) : 0.9756 (p.u.) ângulo: 0.5648 (rad)
E(94) : 0.9775 (p.u.) ângulo: 0.4969 (rad)
E(95) : 0.9643 (p.u.) ângulo: 0.4459 (rad)

E(96) : 0.9741 (p.u.) ângulo: 0.4004 (rad)
E(97) : 1.0014 (p.u.) ângulo: 0.3629 (rad)
E(98) : 1.0189 (p.u.) ângulo: 0.3888 (rad)
E(99) : 1.0100 (p.u.) ângulo: 0.4787 (rad)
E(100) : 1.0170 (p.u.) ângulo: 0.5324 (rad)
E(101) : 0.9897 (p.u.) ângulo: 0.5676 (rad)
E(102) : 0.9866 (p.u.) ângulo: 0.6219 (rad)
E(103) : 1.0100 (p.u.) ângulo: 0.5174 (rad)
E(104) : 0.9758 (p.u.) ângulo: 0.4832 (rad)
E(105) : 0.9719 (p.u.) ângulo: 0.4783 (rad)
E(106) : 0.9668 (p.u.) ângulo: 0.4721 (rad)
E(107) : 0.9520 (p.u.) ângulo: 0.4804 (rad)
E(108) : 0.9707 (p.u.) ângulo: 0.4812 (rad)
E(109) : 0.9704 (p.u.) ângulo: 0.4830 (rad)
E(110) : 0.9733 (p.u.) ângulo: 0.4938 (rad)
E(111) : 0.9800 (p.u.) ângulo: 0.5225 (rad)
E(112) : 0.9750 (p.u.) ângulo: 0.4931 (rad)
E(113) : 0.9930 (p.u.) ângulo: 0.3348 (rad)
E(114) : 0.9628 (p.u.) ângulo: 0.3613 (rad)
E(115) : 0.9624 (p.u.) ângulo: 0.3629 (rad)
E(116) : 1.0050 (p.u.) ângulo: 0.2572 (rad)
E(117) : 0.9738 (p.u.) ângulo: 0.3222 (rad)
E(118) : 0.9332 (p.u.) ângulo: 0.0403 (rad)

TENSÕES NODAIS DO SISTEMA EM kV E º:

E(1) = 0.9557 (p.u.) ângulo = 18.3902 (º)
E(2) = 0.9717 (p.u.) ângulo = 18.9908 (º)
E(3) = 0.9672 (p.u.) ângulo = 19.2719 (º)
E(4) = 0.9980 (p.u.) ângulo = 23.0508 (º)
E(5) = 0.9982 (p.u.) ângulo = 23.3699 (º)
E(6) = 0.9837 (p.u.) ângulo = 20.7718 (º)
E(7) = 0.9854 (p.u.) ângulo = 20.3406 (º)
E(8) = 1.0150 (p.u.) ângulo = 27.8085 (º)
E(9) = 1.0429 (p.u.) ângulo = 35.0626 (º)
E(10) = 1.0500 (p.u.) ângulo = 42.6435 (º)
E(11) = 0.9838 (p.u.) ângulo = 20.3977 (º)
E(12) = 0.9900 (p.u.) ângulo = 20.0030 (º)
E(13) = 0.9639 (p.u.) ângulo = 18.5129 (º)
E(14) = 0.9798 (p.u.) ângulo = 18.6738 (º)

E(15) = 0.9568 (p.u.) ângulo = 16.6306 (º)
E(16) = 0.9802 (p.u.) ângulo = 18.9762 (º)
E(17) = 0.9833 (p.u.) ângulo = 19.2370 (º)
E(18) = 0.9530 (p.u.) ângulo = 16.8407 (º)
E(19) = 0.9491 (p.u.) ângulo = 16.0405 (º)
E(20) = 0.9488 (p.u.) ângulo = 15.9466 (º)
E(21) = 0.9527 (p.u.) ângulo = 16.8397 (º)
E(22) = 0.9669 (p.u.) ângulo = 18.6092 (º)
E(23) = 0.9996 (p.u.) ângulo = 22.2783 (º)
E(24) = 0.9920 (p.u.) ângulo = 18.4129 (º)
E(25) = 1.0500 (p.u.) ângulo = 31.5360 (º)
E(26) = 1.0150 (p.u.) ângulo = 33.7174 (º)
E(27) = 0.9680 (p.u.) ângulo = 22.3597 (º)
E(28) = 0.9616 (p.u.) ângulo = 20.7255 (º)
E(29) = 0.9632 (p.u.) ângulo = 19.8336 (º)
E(30) = 1.0050 (p.u.) ângulo = 23.6756 (º)
E(31) = 0.9670 (p.u.) ângulo = 19.9851 (º)
E(32) = 0.9678 (p.u.) ângulo = 20.4687 (º)
E(33) = 0.9542 (p.u.) ângulo = 15.0673 (º)
E(34) = 0.9656 (p.u.) ângulo = 14.6449 (º)
E(35) = 0.9600 (p.u.) ângulo = 14.2201 (º)
E(36) = 0.9595 (p.u.) ângulo = 14.2181 (º)
E(37) = 0.9707 (p.u.) ângulo = 15.1825 (º)
E(38) = 0.9978 (p.u.) ângulo = 18.9537 (º)
E(39) = 0.9633 (p.u.) ângulo = 13.8750 (º)
E(40) = 0.9700 (p.u.) ângulo = 14.0281 (º)
E(41) = 0.9668 (p.u.) ângulo = 13.5886 (º)
E(42) = 0.9850 (p.u.) ângulo = 15.2019 (º)
E(43) = 0.9648 (p.u.) ângulo = 12.6990 (º)
E(44) = 0.9814 (p.u.) ângulo = 12.4953 (º)
E(45) = 0.9861 (p.u.) ângulo = 13.3501 (º)
E(46) = 1.0050 (p.u.) ângulo = 15.1317 (º)
E(47) = 1.0131 (p.u.) ângulo = 14.0888 (º)
E(48) = 1.0206 (p.u.) ângulo = 16.8943 (º)
E(49) = 1.0250 (p.u.) ângulo = 17.9822 (º)
E(50) = 1.0022 (p.u.) ângulo = 17.0934 (º)
E(51) = 0.9692 (p.u.) ângulo = 15.9944 (º)
E(52) = 0.9595 (p.u.) ângulo = 15.4749 (º)
E(53) = 0.9473 (p.u.) ângulo = 15.6908 (º)
E(54) = 0.9550 (p.u.) ângulo = 17.4827 (º)

E(55) = 0.9517 (p.u.) ângulo = 17.0292 (º)
E(56) = 0.9543 (p.u.) ângulo = 17.1523 (º)
E(57) = 0.9717 (p.u.) ângulo = 16.7219 (º)
E(58) = 0.9605 (p.u.) ângulo = 16.1871 (º)
E(59) = 0.9850 (p.u.) ângulo = 21.6090 (º)
E(60) = 0.9933 (p.u.) ângulo = 20.9373 (º)
E(61) = 0.9950 (p.u.) ângulo = 21.5624 (º)
E(62) = 0.9981 (p.u.) ângulo = 20.6200 (º)
E(63) = 0.9975 (p.u.) ângulo = 21.1848 (º)
E(64) = 1.0015 (p.u.) ângulo = 20.9474 (º)
E(65) = 1.0050 (p.u.) ângulo = 19.9124 (º)
E(66) = 1.0500 (p.u.) ângulo = 22.6625 (º)
E(67) = 1.0202 (p.u.) ângulo = 20.9325 (º)
E(68) = 1.0071 (p.u.) ângulo = 14.7240 (º)
E(69) = 1.0350 (p.u.) ângulo = 0.0000 (º)
E(70) = 0.9765 (p.u.) ângulo = 2.3778 (º)
E(71) = 0.9823 (p.u.) ângulo = 3.6591 (º)
E(72) = 0.9800 (p.u.) ângulo = 10.7371 (º)
E(73) = 0.9910 (p.u.) ângulo = 3.5621 (º)
E(74) = 0.9500 (p.u.) ângulo = 0.7413 (º)
E(75) = 0.9571 (p.u.) ângulo = 1.8588 (º)
E(76) = 0.9205 (p.u.) ângulo = 3.8849 (º)
E(77) = 0.9875 (p.u.) ângulo = 13.3705 (º)
E(78) = 0.9870 (p.u.) ângulo = 13.5073 (º)
E(79) = 0.9961 (p.u.) ângulo = 14.6942 (º)
E(80) = 1.0400 (p.u.) ângulo = 19.3751 (º)
E(81) = 1.0250 (p.u.) ângulo = 16.3508 (º)
E(82) = 0.9658 (p.u.) ângulo = 20.9029 (º)
E(83) = 0.9604 (p.u.) ângulo = 23.9507 (º)
E(84) = 0.9622 (p.u.) ângulo = 29.4522 (º)
E(85) = 0.9734 (p.u.) ângulo = 32.4186 (º)
E(86) = 0.9787 (p.u.) ângulo = 30.6354 (º)
E(87) = 1.0150 (p.u.) ângulo = 30.3454 (º)
E(88) = 0.9796 (p.u.) ângulo = 38.2284 (º)
E(89) = 1.0050 (p.u.) ângulo = 44.0858 (º)
E(90) = 0.9850 (p.u.) ângulo = 42.7621 (º)
E(91) = 0.9800 (p.u.) ângulo = 40.6999 (º)
E(92) = 0.9874 (p.u.) ângulo = 37.3501 (º)
E(93) = 0.9756 (p.u.) ângulo = 32.3605 (º)
E(94) = 0.9775 (p.u.) ângulo = 28.4719 (º)

E(95) = 0.9643 (p.u.) ângulo = 25.5495 (º)
E(96) = 0.9741 (p.u.) ângulo = 22.9430 (º)
E(97) = 1.0014 (p.u.) ângulo = 20.7944 (º)
E(98) = 1.0189 (p.u.) ângulo = 22.2783 (º)
E(99) = 1.0100 (p.u.) ângulo = 27.4288 (º)
E(100) = 1.0170 (p.u.) ângulo = 30.5055 (º)
E(101) = 0.9897 (p.u.) ângulo = 32.5185 (º)
E(102) = 0.9866 (p.u.) ângulo = 35.6340 (º)
E(103) = 1.0100 (p.u.) ângulo = 29.6449 (º)
E(104) = 0.9758 (p.u.) ângulo = 27.6849 (º)
E(105) = 0.9719 (p.u.) ângulo = 27.4029 (º)
E(106) = 0.9668 (p.u.) ângulo = 27.0513 (º)
E(107) = 0.9520 (p.u.) ângulo = 27.5237 (º)
E(108) = 0.9707 (p.u.) ângulo = 27.5690 (º)
E(109) = 0.9704 (p.u.) ângulo = 27.6733 (º)
E(110) = 0.9733 (p.u.) ângulo = 28.2899 (º)
E(111) = 0.9800 (p.u.) ângulo = 29.9399 (º)
E(112) = 0.9750 (p.u.) ângulo = 28.2517 (º)
E(113) = 0.9930 (p.u.) ângulo = 19.1852 (º)
E(114) = 0.9628 (p.u.) ângulo = 20.7023 (º)
E(115) = 0.9624 (p.u.) ângulo = 20.7907 (º)
E(116) = 1.0050 (p.u.) ângulo = 14.7339 (º)
E(117) = 0.9738 (p.u.) ângulo = 18.4622 (º)
E(118) = 0.9332 (p.u.) ângulo = 2.3094 (º)

- - - - - - - - - - - - - - - - - Resultados referente ao Subsistema 2 - - - - - - - - - - - - - - - - -

FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA PELOS RAMOS:
P(1,2) : -13.1466 (MW) Q(1,2) = -11.2168 (MVAr)
P(2,1) : 13.2457 (MW) Q(2,1) = 11.5435 (MVAr)
P(1,3) : -37.8467 (MW) Q(1,3) = -14.1300 (MVAr)
P(3,1) : 38.0772 (MW) Q(3,1) = 14.8876 (MVAr)
P(2,12) : -33.2324 (MW) Q(2,12) = -18.6033 (MVAr)
P(12,2) : 33.5197 (MW) Q(12,2) = 19.5497 (MVAr)
P(3,5) : -66.2695 (MW) Q(3,5) = -10.6895 (MVAr)
P(5,3) : 67.4303 (MW) Q(5,3) = 15.8915 (MVAr)
P(3,12) : -10.8019 (MW) Q(3,12) = -10.4655 (MVAr)
P(12,3) : 10.9190 (MW) Q(12,3) = 10.8524 (MVAr)
P(4,5) : -66.6455 (MW) Q(4,5) = 12.3334 (MVAr)
P(5,4) : 66.7267 (MW) Q(5,4) = -11.9644 (MVAr)

P(4,11) : 66.6237 (MW) Q(4,11) = 1.8554 (MVAr)
P(11,4) : -65.6916 (MW) Q(11,4) = 1.2131 (MVAr)
P(5,6) : 84.6390 (MW) Q(5,6) = 10.0386 (MVAr)
P(6,5) : -83.7714 (MW) Q(6,5) = -6.1016 (MVAr)
P(5,8) : -293.6695 (MW) Q(5,8) = -51.4196 (MVAr)
P(8,5) : 293.6695 (MW) Q(8,5) = 75.2376 (MVAr)
P(5,11) : 74.8728 (MW) Q(5,11) = 0.6964 (MVAr)
P(11,5) : -73.7306 (MW) Q(11,5) = 3.1409 (MVAr)
P(6,7) : 31.7741 (MW) Q(6,7) = -14.9404 (MVAr)
P(7,6) : -31.7156 (MW) Q(7,6) = 15.2054 (MVAr)
P(7,12) : 12.7208 (MW) Q(7,12) = -16.5160 (MVAr)
P(12,7) : -12.6822 (MW) Q(12,7) = 16.6682 (MVAr)
P(8,9) : -440.6352 (MW) Q(8,9) = -29.8775 (MVAr)
P(9,8) : 445.2548 (MW) Q(9,8) = 87.6230 (MVAr)
P(8,30) : 146.9662 (MW) Q(8,30) = 12.8767 (MVAr)
P(30,8) : -146.0556 (MW) Q(30,8) = -2.2290 (MVAr)
P(9,10) : -445.2547 (MW) Q(9,10) = 42.4633 (MVAr)
P(10,9) : 450.0001 (MW) Q(10,9) = 16.7616 (MVAr)
P(11,12) : 22.7563 (MW) Q(11,12) = -37.7945 (MVAr)
P(12,11) : -22.6367 (MW) Q(12,11) = 38.1886 (MVAr)
P(11,13) : 46.7107 (MW) Q(11,13) = 13.2813 (MVAr)
P(13,11) : -46.1685 (MW) Q(13,11) = -11.5002 (MVAr)
P(12,14) : 33.2163 (MW) Q(12,14) = 4.5708 (MVAr)
P(14,12) : -32.9697 (MW) Q(14,12) = -3.7598 (MVAr)
P(12,16) : 22.4198 (MW) Q(12,16) = 6.1747 (MVAr)
P(16,12) : -22.3028 (MW) Q(16,12) = -5.7145 (MVAr)
P(12,117) : 20.1503 (MW) Q(12,117) = 6.9515 (MVAr)
P(117,12) : -19.9978 (MW) Q(117,12) = -6.3025 (MVAr)
P(13,15) : 12.1782 (MW) Q(13,15) = -0.7136 (MVAr)
P(15,13) : -12.0590 (MW) Q(15,13) = 1.1051 (MVAr)
P(14,15) : 18.9846 (MW) Q(14,15) = 6.0430 (MVAr)
P(15,14) : -18.7386 (MW) Q(15,14) = -5.2367 (MVAr)
P(15,17) : -105.1306 (MW) Q(15,17) = -23.9225 (MVAr)
P(17,15) : 106.8067 (MW) Q(17,15) = 29.4712 (MVAr)
P(15,19) : 26.9827 (MW) Q(15,19) = 10.6541 (MVAr)
P(19,15) : -26.8724 (MW) Q(19,15) = -10.2919 (MVAr)
P(15,33) : 18.9595 (MW) Q(15,33) = -3.4766 (MVAr)
P(33,15) : -18.8052 (MW) Q(33,15) = 3.9814 (MVAr)
P(16,17) : -2.6925 (MW) Q(16,17) = -1.0191 (MVAr)
P(17,16) : 2.6964 (MW) Q(17,16) = 1.0346 (MVAr)

P(17,18) : 87.1776 (MW) Q(17,18) = 39.4038 (MVAr)
P(18,17) : -86.0133 (MW) Q(18,17) = -34.6232 (MVAr)
P(17,30) : -197.1031 (MW) Q(17,30) = -47.3401 (MVAr)
P(30,17) : 197.1031 (MW) Q(30,17) = 63.8300 (MVAr)
P(17,31) : -4.4151 (MW) Q(17,31) = 11.6354 (MVAr)
P(31,17) : 4.4910 (MW) Q(31,17) = -11.3850 (MVAr)
P(17,113) : -6.1335 (MW) Q(17,113) = -29.8761 (MVAr)
P(113,17) : 6.2213 (MW) Q(113,17) = 30.1657 (MVAr)
P(18,19) : 26.0159 (MW) Q(18,19) = 1.7312 (MVAr)
P(19,18) : -25.9321 (MW) Q(19,18) = -1.3621 (MVAr)
P(19,20) : 1.2653 (MW) Q(19,20) = 0.0221 (MVAr)
P(20,19) : -1.2649 (MW) Q(20,19) = -0.0201 (MVAr)
P(19,34) : 6.5370 (MW) Q(19,34) = -8.2109 (MVAr)
P(34,19) : -6.4451 (MW) Q(34,19) = 8.5129 (MVAr)
P(20,21) : -16.7380 (MW) Q(20,21) = -0.6666 (MVAr)
P(21,20) : 16.7951 (MW) Q(21,20) = 0.9312 (MVAr)
P(21,22) : -30.7958 (MW) Q(21,22) = -6.8346 (MVAr)
P(22,21) : 31.0249 (MW) Q(22,21) = 7.8981 (MVAr)
P(22,23) : -41.0213 (MW) Q(22,23) = -9.8599 (MVAr)
P(23,22) : 41.6724 (MW) Q(23,22) = 12.8873 (MVAr)
P(23,24) : 131.4931 (MW) Q(23,24) = -15.9616 (MVAr)
P(24,23) : -129.1228 (MW) Q(24,23) = 24.6000 (MVAr)
P(23,25) : -211.9516 (MW) Q(23,25) = -4.5008 (MVAr)
P(25,23) : 218.9678 (MW) Q(25,23) = 40.4813 (MVAr)
P(23,32) : 31.7924 (MW) Q(23,32) = 19.2598 (MVAr)
P(32,23) : -31.3541 (MW) Q(32,23) = -17.6655 (MVAr)
P(24,70) : 64.2634 (MW) Q(24,70) = -3.0620 (MVAr)
P(70,24) : -59.9647 (MW) Q(70,24) = 20.3705 (MVAr)
P(24,72) : 64.8488 (MW) Q(24,72) = -5.6282 (MVAr)
P(72,24) : -62.7476 (MW) Q(72,24) = 14.0673 (MVAr)
P(25,26) : -106.1907 (MW) Q(25,26) = 98.2258 (MVAr)
P(26,25) : 106.1907 (MW) Q(26,25) = -90.9757 (MVAr)
P(25,27) : 107.2222 (MW) Q(25,27) = 39.8841 (MVAr)
P(27,25) : -103.4473 (MW) Q(27,25) = -20.5350 (MVAr)
P(26,30) : 207.8109 (MW) Q(26,30) = 10.6904 (MVAr)
P(30,26) : -204.4528 (MW) Q(30,26) = 25.4548 (MVAr)
P(27,28) : 31.2099 (MW) Q(27,28) = 0.7326 (MVAr)
P(28,27) : -31.0110 (MW) Q(28,27) = 0.1567 (MVAr)
P(27,32) : 37.7435 (MW) Q(27,32) = -10.5567 (MVAr)
P(32,27) : -37.3681 (MW) Q(32,27) = 11.7944 (MVAr)

P(27,115) : 34.4650 (MW) Q(27,115) = 0.1966 (MVAr)
P(115,27) : -34.2571 (MW) Q(115,27) = 0.7428 (MVAr)
P(28,29) : 14.0179 (MW) Q(28,29) = -5.0578 (MVAr)
P(29,28) : -13.9610 (MW) Q(29,28) = 5.2843 (MVAr)
P(29,31) : -9.9869 (MW) Q(29,31) = -7.7953 (MVAr)
P(31,29) : 10.0056 (MW) Q(31,29) = 7.8525 (MVAr)
P(30,38) : 153.4216 (MW) Q(30,38) = 6.5696 (MVAr)
P(38,30) : -152.3382 (MW) Q(38,30) = 6.0384 (MVAr)
P(31,32) : -7.5639 (MW) Q(31,32) = 1.5055 (MVAr)
P(32,31) : 7.5829 (MW) Q(32,31) = -1.4429 (MVAr)
P(32,113) : 6.4164 (MW) Q(32,113) = -13.8244 (MVAr)
P(113,32) : -6.2639 (MW) Q(113,32) = 14.3278 (MVAr)
P(32,114) : -4.2444 (MW) Q(32,114) = 8.9011 (MVAr)
P(114,32) : 4.2584 (MW) Q(114,32) = -8.8375 (MVAr)
P(33,37) : -4.1938 (MW) Q(33,37) = -9.8631 (MVAr)
P(37,33) : 4.2462 (MW) Q(37,33) = 10.0422 (MVAr)
P(34,36) : 29.7821 (MW) Q(34,36) = 12.4012 (MVAr)
P(36,34) : -29.6849 (MW) Q(36,34) = -12.1020 (MVAr)
P(34,37) : -100.2640 (MW) Q(34,37) = -24.5917 (MVAr)
P(37,34) : 100.5566 (MW) Q(37,34) = 25.6662 (MVAr)
P(34,43) : 17.9232 (MW) Q(34,43) = -3.6424 (MVAr)
P(43,34) : -17.7750 (MW) Q(43,34) = 4.2455 (MVAr)
P(35,36) : 1.3185 (MW) Q(35,36) = 4.5137 (MVAr)
P(36,35) : -1.3180 (MW) Q(36,35) = -4.5113 (MVAr)
P(35,37) : -34.3210 (MW) Q(35,37) = -12.7811 (MVAr)
P(37,35) : 34.4811 (MW) Q(37,35) = 13.5044 (MVAr)
P(37,38) : -169.8670 (MW) Q(37,38) = -64.4624 (MVAr)
P(38,37) : 169.8670 (MW) Q(38,37) = 77.6001 (MVAr)
P(37,39) : 20.3848 (MW) Q(37,39) = 0.8466 (MVAr)
P(39,37) : -20.2430 (MW) Q(39,37) = -0.3783 (MVAr)
P(37,40) : 10.2012 (MW) Q(37,40) = -3.0896 (MVAr)
P(40,37) : -10.1297 (MW) Q(40,37) = 3.2921 (MVAr)
P(38,65) : -17.5274 (MW) Q(38,65) = -5.5907 (MVAr)
P(65,38) : 17.5580 (MW) Q(65,38) = 5.9260 (MVAr)
P(39,40) : -6.7571 (MW) Q(39,40) = -8.6499 (MVAr)
P(40,39) : 6.7810 (MW) Q(40,39) = 8.7285 (MVAr)
P(40,41) : 15.3107 (MW) Q(40,41) = 1.8100 (MVAr)
P(41,40) : -15.2740 (MW) Q(41,40) = -1.6870 (MVAr)
P(40,42) : -11.9720 (MW) Q(40,42) = -4.2104 (MVAr)
P(42,40) : 12.0670 (MW) Q(42,40) = 4.5237 (MVAr)

P(41,42) : -21.7233 (MW) Q(41,42) = -6.1351 (MVAr)
P(42,41) : 21.9468 (MW) Q(42,41) = 6.8709 (MVAr)
P(42,49) : -34.0145 (MW) Q(42,49) = -16.1704 (MVAr)
P(49,42) : 34.5379 (MW) Q(49,42) = 18.5242 (MVAr)
P(43,44) : -0.2262 (MW) Q(43,44) = -6.4514 (MVAr)
P(44,43) : 0.2535 (MW) Q(44,43) = 6.5612 (MVAr)
P(44,45) : -16.2533 (MW) Q(44,45) = -0.9284 (MVAr)
P(45,44) : 16.3149 (MW) Q(45,44) = 1.1764 (MVAr)
P(45,46) : -24.5457 (MW) Q(45,46) = -6.1833 (MVAr)
P(46,45) : 24.8093 (MW) Q(46,45) = 7.0769 (MVAr)
P(45,49) : -44.7690 (MW) Q(45,49) = -2.4085 (MVAr)
P(49,45) : 46.1830 (MW) Q(49,45) = 6.2537 (MVAr)
P(46,47) : 11.6611 (MW) Q(46,47) = -9.7968 (MVAr)
P(47,46) : -11.5738 (MW) Q(47,46) = 10.0884 (MVAr)
P(46,48) : -17.4722 (MW) Q(46,48) = -2.4565 (MVAr)
P(48,46) : 17.6574 (MW) Q(48,46) = 3.0390 (MVAr)
P(47,49) : -107.4851 (MW) Q(47,49) = 17.4546 (MVAr)
P(49,47) : 109.6915 (MW) Q(49,47) = -10.2345 (MVAr)
P(47,69) : 85.0607 (MW) Q(47,69) = -22.4613 (MVAr)
P(69,47) : -78.6967 (MW) Q(69,47) = 43.4085 (MVAr)
P(48,49) : -37.6544 (MW) Q(48,49) = 4.7293 (MVAr)
P(49,48) : 37.9019 (MW) Q(49,48) = -4.0309 (MVAr)
P(49,50) : 28.6808 (MW) Q(49,50) = 21.0972 (MVAr)
P(50,49) : -28.3587 (MW) Q(50,49) = -20.1898 (MVAr)
P(49,51) : 35.6257 (MW) Q(49,51) = 29.5210 (MVAr)
P(51,49) : -34.6355 (MW) Q(51,49) = -26.7296 (MVAr)
P(49,54) : 8.5770 (MW) Q(49,54) = 19.5490 (MVAr)
P(54,49) : -8.1498 (MW) Q(54,49) = -18.1436 (MVAr)
P(49,66) : -193.3056 (MW) Q(49,66) = -10.1062 (MVAr)
P(66,49) : 196.5153 (MW) Q(66,49) = 26.4758 (MVAr)
P(49,69) : 96.1034 (MW) Q(49,69) = -16.3860 (MVAr)
P(69,49) : -87.1927 (MW) Q(69,49) = 45.6963 (MVAr)
P(50,57) : 11.3600 (MW) Q(50,57) = 18.7961 (MVAr)
P(57,50) : -11.1324 (MW) Q(57,50) = -18.1526 (MVAr)
P(51,52) : 17.7917 (MW) Q(51,52) = 10.0001 (MVAr)
P(52,51) : -17.7017 (MW) Q(52,51) = -9.7394 (MVAr)
P(51,58) : -0.1573 (MW) Q(51,58) = 11.8343 (MVAr)
P(58,51) : 0.1953 (MW) Q(58,51) = -11.7271 (MVAr)
P(52,53) : -0.2979 (MW) Q(52,53) = 7.2526 (MVAr)
P(53,52) : 0.3211 (MW) Q(53,52) = -7.1590 (MVAr)

P(53,54) : -23.3208 (MW) Q(53,54) = -0.6242 (MVAr)
P(54,53) : 23.4803 (MW) Q(54,53) = 1.3642 (MVAr)
P(54,55) : 10.6532 (MW) Q(54,55) = 1.9971 (MVAr)
P(55,54) : -10.6314 (MW) Q(55,54) = -1.9061 (MVAr)
P(54,56) : 52.5750 (MW) Q(54,56) = -7.5624 (MVAr)
P(56,54) : -52.4899 (MW) Q(56,54) = 7.8593 (MVAr)
P(54,59) : -30.5561 (MW) Q(54,59) = -4.7282 (MVAr)
P(59,54) : 31.0834 (MW) Q(59,54) = 7.1319 (MVAr)
P(55,56) : -16.4879 (MW) Q(55,56) = -11.0189 (MVAr)
P(56,55) : 16.5091 (MW) Q(56,55) = 11.0845 (MVAr)
P(55,59) : -35.8781 (MW) Q(55,59) = -5.4342 (MVAr)
P(59,55) : 36.5671 (MW) Q(59,55) = 8.5718 (MVAr)
P(56,57) : 0.9840 (MW) Q(56,57) = -17.5351 (MVAr)
P(57,56) : -0.8678 (MW) Q(57,56) = 17.8624 (MVAr)
P(56,58) : 12.2926 (MW) Q(56,58) = -10.3942 (MVAr)
P(58,56) : -12.1950 (MW) Q(58,56) = 10.6691 (MVAr)
P(56,59) : -61.3017 (MW) Q(56,59) = -1.2834 (MVAr)
P(59,56) : 62.9820 (MW) Q(59,56) = 6.2377 (MVAr)
P(59,60) : 6.3848 (MW) Q(59,60) = -6.9765 (MVAr)
P(60,59) : -6.3556 (MW) Q(60,59) = 7.1101 (MVAr)
P(59,61) : -0.8627 (MW) Q(59,61) = -6.3778 (MVAr)
P(61,59) : 0.8767 (MW) Q(61,59) = 6.4419 (MVAr)
P(59,63) : 18.8455 (MW) Q(59,63) = -31.7799 (MVAr)
P(63,59) : -18.8455 (MW) Q(63,59) = 32.3230 (MVAr)
P(60,61) : -79.2171 (MW) Q(60,61) = 3.2967 (MVAr)
P(61,60) : 79.3853 (MW) Q(61,60) = -2.4366 (MVAr)
P(60,62) : 7.5728 (MW) Q(60,62) = -10.1066 (MVAr)
P(62,60) : -7.5529 (MW) Q(62,60) = 10.1973 (MVAr)
P(61,62) : 39.8265 (MW) Q(61,62) = -16.4924 (MVAr)
P(62,61) : -39.6719 (MW) Q(62,61) = 17.1981 (MVAr)
P(61,64) : 39.9114 (MW) Q(61,64) = -23.8856 (MVAr)
P(64,61) : -39.9114 (MW) Q(64,61) = 24.4712 (MVAr)
P(62,66) : -21.2826 (MW) Q(62,66) = -18.7645 (MVAr)
P(66,62) : 21.6722 (MW) Q(66,62) = 20.5263 (MVAr)
P(62,67) : -8.4925 (MW) Q(62,67) = -16.9878 (MVAr)
P(67,62) : 8.5859 (MW) Q(67,62) = 17.4114 (MVAr)
P(63,64) : 18.8455 (MW) Q(63,64) = -21.5773 (MVAr)
P(64,63) : -18.8313 (MW) Q(64,63) = 21.7423 (MVAr)
P(64,65) : 58.7427 (MW) Q(64,65) = -16.3246 (MVAr)
P(65,64) : -58.6430 (MW) Q(65,64) = 17.4438 (MVAr)

P(65,66) : -136.8399 (MW) Q(65,66) = -118.9451 (MVAr)
P(66,65) : 136.8399 (MW) Q(66,65) = 130.9874 (MVAr)
P(65,68) : 568.9239 (MW) Q(65,68) = -36.0976 (MVAr)
P(68,65) : -564.4838 (MW) Q(68,65) = 87.5779 (MVAr)
P(66,67) : 36.9727 (MW) Q(66,67) = 23.1557 (MVAr)
P(67,66) : -36.5861 (MW) Q(67,66) = -21.4035 (MVAr)
P(68,69) : 715.9880 (MW) Q(68,69) = 16.4638 (MVAr)
P(69,68) : -715.9880 (MW) Q(69,68) = 170.6609 (MVAr)
P(68,81) : -151.5134 (MW) Q(68,81) = -74.2916 (MVAr)
P(81,68) : 152.0048 (MW) Q(81,68) = 79.9633 (MVAr)
P(68,116) : 0.0086 (MW) Q(68,116) = 51.8908 (MVAr)
P(116,68) : 0.0004 (MW) Q(116,68) = -51.7846 (MVAr)
P(69,70) : -20.4499 (MW) Q(69,70) = 53.2015 (MVAr)
P(70,69) : 21.3597 (MW) Q(70,69) = -49.3501 (MVAr)
P(69,75) : -3.8307 (MW) Q(69,75) = 67.7970 (MVAr)
P(75,69) : 5.5741 (MW) Q(75,69) = -62.5455 (MVAr)
P(69,77) : -192.6761 (MW) Q(69,77) = 135.0806 (MVAr)
P(77,69) : 208.6481 (MW) Q(77,69) = -82.8745 (MVAr)
P(70,71) : -60.4742 (MW) Q(70,71) = -0.2410 (MVAr)
P(71,70) : 60.8125 (MW) Q(71,70) = 1.6026 (MVAr)
P(70,74) : 23.8398 (MW) Q(70,74) = 12.5849 (MVAr)
P(74,70) : -23.5342 (MW) Q(74,70) = -11.5766 (MVAr)
P(70,75) : 9.2396 (MW) Q(70,75) = 10.6579 (MVAr)
P(75,70) : -9.1503 (MW) Q(75,70) = -10.3637 (MVAr)
P(71,72) : -60.8442 (MW) Q(71,72) = 20.3971 (MVAr)
P(72,71) : 62.7477 (MW) Q(72,71) = -12.7148 (MVAr)
P(71,73) : 0.0313 (MW) Q(71,73) = -18.8638 (MVAr)
P(73,71) : 0.0007 (MW) Q(73,71) = 19.0313 (MVAr)
P(74,75) : -44.4663 (MW) Q(74,75) = -2.6070 (MVAr)
P(75,74) : 44.7367 (MW) Q(75,74) = 3.4995 (MVAr)
P(75,77) : -87.9201 (MW) Q(75,77) = 21.3964 (MVAr)
P(77,75) : 93.2921 (MW) Q(77,75) = -3.5285 (MVAr)
P(75,118) : -0.2405 (MW) Q(75,118) = 47.6437 (MVAr)
P(118,75) : 0.5998 (MW) Q(118,75) = -46.4517 (MVAr)
P(76,77) : -102.0118 (MW) Q(76,77) = -2.6661 (MVAr)
P(77,76) : 107.4688 (MW) Q(77,76) = 20.8561 (MVAr)
P(76,118) : 34.0101 (MW) Q(76,118) = -31.1988 (MVAr)
P(118,76) : -33.5978 (MW) Q(118,76) = 32.5664 (MVAr)
P(77,78) : -16.1013 (MW) Q(77,78) = 8.7688 (MVAr)
P(78,77) : 16.1142 (MW) Q(78,77) = -8.7261 (MVAr)

P(77,80) : -334.5220 (MW) Q(77,80) = -30.5373 (MVAr)
P(80,77) : 347.0197 (MW) Q(80,77) = 68.8402 (MVAr)
P(77,82) : -119.7946 (MW) Q(77,82) = 76.6087 (MVAr)
P(82,77) : 125.9739 (MW) Q(82,77) = -58.9209 (MVAr)
P(78,79) : -87.1137 (MW) Q(78,79) = -16.3436 (MVAr)
P(79,78) : 87.5540 (MW) Q(79,78) = 18.3114 (MVAr)
P(79,80) : -126.5546 (MW) Q(79,80) = -29.2186 (MVAr)
P(80,79) : 129.2072 (MW) Q(80,79) = 41.1891 (MVAr)
P(80,81) : 152.0048 (MW) Q(80,81) = 46.1499 (MVAr)
P(81,80) : -152.0048 (MW) Q(81,80) = -37.5173 (MVAr)
P(80,96) : -26.0687 (MW) Q(80,96) = 43.8222 (MVAr)
P(96,80) : 26.9245 (MW) Q(96,80) = -39.4473 (MVAr)
P(80,97) : -18.4187 (MW) Q(80,97) = 46.9537 (MVAr)
P(97,80) : 18.8492 (MW) Q(97,80) = -44.7569 (MVAr)
P(80,98) : -42.8520 (MW) Q(80,98) = 31.0464 (MVAr)
P(98,80) : 43.4682 (MW) Q(98,80) = -28.2504 (MVAr)
P(80,99) : -63.8885 (MW) Q(80,99) = 34.2550 (MVAr)
P(99,80) : 66.0943 (MW) Q(99,80) = -24.2461 (MVAr)
P(82,83) : -118.2504 (MW) Q(82,83) = 53.9042 (MVAr)
P(83,82) : 120.2784 (MW) Q(83,82) = -47.2771 (MVAr)
P(82,96) : -61.7262 (MW) Q(82,96) = 4.7908 (MVAr)
P(96,82) : 62.3920 (MW) Q(96,82) = -2.6127 (MVAr)
P(83,84) : -54.0829 (MW) Q(83,84) = 27.5337 (MVAr)
P(84,83) : 56.5784 (MW) Q(84,83) = -22.2631 (MVAr)
P(83,85) : -86.1845 (MW) Q(83,85) = 23.5151 (MVAr)
P(85,83) : 89.9048 (MW) Q(85,83) = -10.7101 (MVAr)
P(84,85) : -67.5945 (MW) Q(84,85) = 17.0269 (MVAr)
P(85,84) : 69.1795 (MW) Q(85,84) = -13.6629 (MVAr)
P(85,86) : 21.2902 (MW) Q(85,86) = -9.8788 (MVAr)
P(86,85) : -21.0867 (MW) Q(86,85) = 10.5939 (MVAr)
P(85,88) : -91.3285 (MW) Q(85,88) = 16.8133 (MVAr)
P(88,85) : 93.1488 (MW) Q(88,85) = -7.5297 (MVAr)
P(85,89) : -113.0374 (MW) Q(85,89) = 9.5114 (MVAr)
P(89,85) : 116.2833 (MW) Q(89,85) = 13.9841 (MVAr)
P(86,87) : 0.0867 (MW) Q(86,87) = -17.1410 (MVAr)
P(87,86) : 0.0000 (MW) Q(87,86) = 17.7772 (MVAr)
P(88,89) : -141.1488 (MW) Q(88,89) = -0.2202 (MVAr)
P(89,88) : 144.0348 (MW) Q(89,88) = 15.0034 (MVAr)
P(89,90) : 40.2102 (MW) Q(89,90) = 21.4563 (MVAr)
P(90,89) : -39.8852 (MW) Q(90,89) = -20.1133 (MVAr)

P(89,92) : 306.4716 (MW) Q(89,92) = 0.8689 (MVAr)
P(92,89) : -299.1251 (MW) Q(92,89) = 34.4686 (MVAr)
P(90,91) : 39.8852 (MW) Q(90,91) = -5.4793 (MVAr)
P(91,90) : -39.4609 (MW) Q(91,90) = 6.8759 (MVAr)
P(91,92) : 39.4608 (MW) Q(91,92) = -16.4041 (MVAr)
P(92,91) : -38.7249 (MW) Q(92,91) = 18.8228 (MVAr)
P(92,93) : 95.4445 (MW) Q(92,93) = -11.0372 (MVAr)
P(93,92) : -93.0016 (MW) Q(93,92) = 19.0666 (MVAr)
P(92,94) : 90.0462 (MW) Q(92,94) = -13.8949 (MVAr)
P(94,92) : -85.9506 (MW) Q(94,92) = 27.3481 (MVAr)
P(92,100) : 37.1323 (MW) Q(92,100) = -15.6393 (MVAr)
P(100,92) : -36.0533 (MW) Q(100,92) = 20.5514 (MVAr)
P(92,102) : 50.2273 (MW) Q(92,102) = -8.9195 (MVAr)
P(102,92) : -49.8990 (MW) Q(102,92) = 10.4116 (MVAr)
P(93,94) : 81.0015 (MW) Q(93,94) = -24.1344 (MVAr)
P(94,93) : -79.3279 (MW) Q(94,93) = 29.6280 (MVAr)
P(94,95) : 110.4005 (MW) Q(94,95) = -1.0666 (MVAr)
P(95,94) : -108.7165 (MW) Q(95,94) = 6.6034 (MVAr)
P(94,96) : 98.8445 (MW) Q(94,96) = -21.7274 (MVAr)
P(96,94) : -95.9608 (MW) Q(96,94) = 31.0428 (MVAr)
P(94,100) : -73.9654 (MW) Q(94,100) = -42.8299 (MVAr)
P(100,94) : 75.3263 (MW) Q(100,94) = 47.2645 (MVAr)
P(95,96) : 66.7160 (MW) Q(95,96) = -36.4039 (MVAr)
P(96,95) : -65.6538 (MW) Q(96,95) = 39.8018 (MVAr)
P(96,97) : 34.2993 (MW) Q(96,97) = -35.9324 (MVAr)
P(97,96) : -33.8494 (MW) Q(97,96) = 38.2338 (MVAr)
P(98,100) : -77.4682 (MW) Q(98,100) = 24.2056 (MVAr)
P(100,98) : 79.9874 (MW) Q(100,98) = -12.8472 (MVAr)
P(99,100) : -66.0943 (MW) Q(99,100) = 7.7584 (MVAr)
P(100,99) : 66.8758 (MW) Q(100,99) = -4.2288 (MVAr)
P(100,101) : -22.0278 (MW) Q(100,101) = 27.2886 (MVAr)
P(101,100) : 22.3572 (MW) Q(101,100) = -25.7880 (MVAr)
P(100,103) : 30.7313 (MW) Q(100,103) = 4.4150 (MVAr)
P(103,100) : -30.5821 (MW) Q(103,100) = -3.9257 (MVAr)
P(100,104) : 27.2783 (MW) Q(100,104) = 15.1078 (MVAr)
P(104,100) : -26.8543 (MW) Q(104,100) = -13.1900 (MVAr)
P(100,106) : 29.8818 (MW) Q(100,106) = 15.1894 (MVAr)
P(106,100) : -29.2245 (MW) Q(106,100) = -12.7016 (MVAr)
P(101,102) : -44.3572 (MW) Q(101,102) = 13.7855 (MVAr)
P(102,101) : 44.8990 (MW) Q(102,101) = -11.3187 (MVAr)

P(103,104) : 25.5916 (MW) Q(103,104) = 14.6544 (MVAr)
P(104,103) : -25.1943 (MW) Q(104,103) = -13.3040 (MVAr)
P(103,105) : 28.4997 (MW) Q(103,105) = 14.7901 (MVAr)
P(105,103) : -27.9590 (MW) Q(105,103) = -13.1478 (MVAr)
P(103,110) : 16.4921 (MW) Q(103,110) = 17.0368 (MVAr)
P(110,103) : -16.2768 (MW) Q(110,103) = -16.0375 (MVAr)
P(104,105) : 14.0484 (MW) Q(104,105) = 6.4784 (MVAr)
P(105,104) : -14.0235 (MW) Q(105,104) = -6.3834 (MVAr)
P(105,106) : 12.0672 (MW) Q(105,106) = 5.9585 (MVAr)
P(106,105) : -12.0403 (MW) Q(106,105) = -5.8536 (MVAr)
P(105,107) : 1.8340 (MW) Q(105,107) = 10.0125 (MVAr)
P(107,105) : -1.7759 (MW) Q(107,105) = -9.8118 (MVAr)
P(105,108) : -2.9190 (MW) Q(105,108) = 2.6176 (MVAr)
P(108,105) : 2.9232 (MW) Q(108,105) = -2.6062 (MVAr)
P(106,107) : -1.7354 (MW) Q(106,107) = 8.3267 (MVAr)
P(107,106) : 1.7764 (MW) Q(107,106) = -8.1851 (MVAr)
P(108,109) : -4.9232 (MW) Q(108,109) = 2.8312 (MVAr)
P(109,108) : 4.9268 (MW) Q(109,108) = -2.8214 (MVAr)
P(109,110) : -12.9269 (MW) Q(109,110) = 1.1304 (MVAr)
P(110,109) : 12.9766 (MW) Q(110,109) = -0.9942 (MVAr)
P(110,111) : -35.7046 (MW) Q(110,111) = 2.3062 (MVAr)
P(111,110) : 36.0018 (MW) Q(111,110) = -1.2860 (MVAr)
P(110,112) : -0.0013 (MW) Q(110,112) = -2.5660 (MVAr)
P(112,110) : 0.0030 (MW) Q(112,110) = 2.5704 (MVAr)
P(114,115) : -12.2589 (MW) Q(114,115) = 6.7228 (MVAr)
P(115,114) : 12.2637 (MW) Q(115,114) = -6.7009 (MVAr)

PERDAS DE POTÊNCIA ATIVA TOTAIS:
194.1578 (MW)

PERDAS DE POTÊNCIA REATIVA TOTAIS:
1161.6412 (MVAr)

- -

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO:
CONVERGÊNCIA: Convergiu

6 iterações necessárias para o subproblema P0 com tolerância de: 0.00100000
6 iterações necessárias para o subproblema QV com tolerância de: 0.00100000