UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA
ÊNFASE ELETROTÉCNICA

AGNO ANTONIO CAMARGO BUENO
LUIS FRANCISCO TAVARES
MARCOS VINICIUS ZANETTI MAROCHI

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE COM INTERFACE GRÁFICA PARA CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
JUNHO/2012

AGNO ANTONIO CAMARGO BUENO
LUIS FRANCISCO TAVARES
MARCOS VINICIUS ZANETTI MAROCHI

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE COM INTERFACE GRÁFICA PARA CÁLCULO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica - Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica - DAELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Andrea Lucia Costa, Dr. Eng.

CURITIBA

JUNHO/2012

Agno Antonio Camargo Bueno
Luis Francisco Tavares
Marcos Vinicius Zanetti Marochi

Desenvolvimento de Software com Interface Gráfica para Cálculo de Fluxo de Potência

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletrotécnico, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 06 de novembro de 2012.

_____
Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

_____
Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr. Eng.
Coordenador dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

_____
Andrea Lucia Costa, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

_____
Wanderley Szlichta, M. Sc.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

_____
Professor Raphael A. de S Benedito, Dr. Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

_____
Alvaro Augusto de Almeida, Esp.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

BUENO, Agno; MAROCHI, Marcos; TAVARES, Luis. Desenvolvimento de software com interface gráfica para cálculo de fluxo de potência. 2012. 100 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Eletrotécnica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

O programa para Simulação de Fluxo de Potência pelo método Newton-Raphson (Simpot) foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar docentes e alunos da disciplina de Sistemas de Potência I do curso de Engenharia Elétrica. O programa dispõe de uma interface gráfica amigável ao usuário, utiliza o método de Newton-Raphson para solucionar os problemas de fluxo de carga. Além disso, o Simpot dispõe de uma plataforma de programação de licença pública geral. Os resultados das simulações de sistemas elétricos obtidos pelo programa Simpot são similares aos resultados obtidos com o software Anarede, o qual é utilizado pelas concessionárias nacionais e também pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Com o intuito de auxiliar os usuários foi escrito o manual do programa Simpot, o qual orienta sobre todas as ferramentas disponíveis e também sobre sua própria utilização em uma simulação.

Palavras-chave: Software. Cálculo de Fluxo de Potência. Método de Newton-Raphson.

ABSTRACT

BUENO, Agno; MAROCHI, Marcos; TAVARES, Luis. Software development with GUI for power flow calculation. 2012. 100 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Eletrotécnica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

The simulation program for power flow by Newton-Raphson method (Simpot) was developed with the aim of helping professors and students of Power Systems I Course of Electrical Engineering. The program has a user-friendly graphical interface, it uses the Newton-Raphson method to solve the problems of load flow. In addition, it has a platform Simpot programming general public license. The results of simulations of power systems obtained with program Simpot were similar of results obtained of the Anarede software, which is used by utilities and also the National Operator System (ONS). In order to assist the users, it was written the manual of the Simpot program, which provides guidance on all the tools available and also about its own use in a simulation.

Keywords: Software. Power Flow Calculation. Newton-Raphson Method.

FIGURAS

FIGURA 1 – SISTEMA HIPOTÉTICO DE TRÊS BARRAS 18
FIGURA 2 – CIRCUITO Π-EQUIVALENTE PARA O SISTEMA HIPOTÉTICO DE 3 BARRAS 19
FIGURA 3 – ALGORITMO DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 29
FIGURA 4 – ESTRUTURA DAS CLASSES E PACOTES DO PROGRAMA SIMPOT 32
FIGURA 5 – DIAGRAMA DE CLASSES DO PACOTE MODEL NO SIMPOT 33
FIGURA 6 – TELA PRINCIPAL DO PROGRAMA SIMPOT 35
FIGURA 7 – SUB-MENU GERADOR DO PROGRAMA SIMPOT 37
FIGURA 8 – SUB-MENU INDUTOR DO PROGRAMA SIMPOT 38
FIGURA 9 – SUB-MENU CAPACITOR DO PROGRAMA SIMPOT 39
FIGURA 10 – SUB-MENU TRANSFORMADOR DO PROGRAMA SIMPOT 40
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO DO TRANSFORMADOR DE DOIS ENROLAMENTOS 41
FIGURA 12 – MODELO Π DO TRANSFORMADOR 43
FIGURA 13 – MODELO Π DO TRANSFORMADOR CONSTRUÍDO NO SIMPOT 43
FIGURA 14 – SUB-MENU CARGA DO PROGRAMA SIMPOT 44
FIGURA 15 – SUB-MENU BARRA DO PROGRAMA SIMPOT 45
FIGURA 16 – SUB-MENU LINHA DE TRANSMISSÃO DO PROGRAMA SIMPOT 46
FIGURA 17 – MODELO π DA LINHA DE TRANSMISSÃO 46
FIGURA 18 – INDICAÇÃO DO BOTÃO CALCULAR DO PROGRAMA SIMPOT 47
FIGURA 19 – ENTRADA DO ERRO MÁXIMO NO PROGRAMA SIMPOT 48
FIGURA 20 – ENTRADA DO NÚMERO DE ITERAÇÕES MÁXIMA NO PROGRAMA SIMPOT 48
FIGURA 21 – SISTEMA DE DUAS BARRAS PARA O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 54
FIGURA 22 – SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANAREDE PARA O SISTEMA DE DUAS BARRAS 56
FIGURA 23 – TELA DO SOFTWARE SIMPOT 57
FIGURA 24 – SISTEMA DE TRÊS BARRAS PARA O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 59
FIGURA 25 – SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANAREDE PARA O SISTEMA DE TRÊS BARRAS 61
FIGURA 26 – TELA DO SOFTWARE SIMPOT 62
FIGURA 27 – SISTEMA DE QUATRO BARRAS PARA O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 64
FIGURA 28 – SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANAREDE PARA O SISTEMA DE QUATRO BARRAS 66
FIGURA 29 – TELA DO SOFTWARE SIMPOT 67
FIGURA 30 – SISTEMA DE NOVE BARRAS PARA O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 69
FIGURA 31 – SIMULAÇÃO NO SOFTWARE SIMULIGHT PARA O SISTEMA DE NOVE BARRAS 71
FIGURA 32 – SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANAREDE PARA O SISTEMA DE NOVE BARRAS 71
FIGURA 33 – TELA DO SOFTWARE SIMPOT 72
FIGURA 34 – SISTEMA DE 20 BARRAS PARA O MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 75
FIGURA 35 – SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANAREDE PARA O SISTEMA DE VINTE BARRAS 79
FIGURA 36 – TELA DO SOFTWARE SIMPOT 81

TABELAS

TABELA 1 – DADOS DA MATRIZ BARRAS: SISTEMA DE DUAS BARRAS 54
TABELA 2 – DADOS DA LINHA: SISTEMA DE DUAS BARRAS 54
TABELA 3 – VALORES CALCULADOS PARA O SISTEMA DE DUAS BARRAS 55
TABELA 4 – RESULTADOS DO ANAREDE PARA O SISTEMA DE DUAS BARRAS 56
TABELA 5 – RESULTADOS EXTRAÍDOS DO RELATÓRIO DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE DUAS BARRAS 57
TABELA 6 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES CALCULADOS EM BORGES (2010), ANAREDE E SIMPOT 58
TABELA 7 – DADOS DA MATRIZ BARRAS: SISTEMA DE TRÊS BARRAS 59
TABELA 8 – DADOS DAS LINHAS: SISTEMA DE TRÊS BARRAS 59
TABELA 9 – VALORES CALCULADOS PARA O SISTEMA DE TRÊS BARRAS 60
TABELA 10 – RESULTADOS DO ANAREDE PARA O SISTEMA DE TRÊS BARRAS 61
TABELA 11 – RESULTADOS EXTRAÍDOS DO RELATÓRIO DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE TRÊS BARRAS 62
TABELA 12 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES CALCULADOS EM HAFFNER (2007), ANAREDE E SIMPOT 63
TABELA 13 – DADOS DA MATRIZ BARRAS: SISTEMA DE QUATRO BARRAS 64
TABELA 14 – DADOS DAS LINHAS: SISTEMA DE QUATRO BARRAS 64
TABELA 15 – VALORES CALCULADOS PARA O SISTEMA DE TRÊS BARRAS 65
TABELA 16 – RESULTADOS DO ANAREDE PARA O SISTEMA DE QUATRO BARRAS 66
TABELA 17 – RESULTADOS EXTRAÍDOS DO RELATÓRIO DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 4 BARRAS 67
TABELA 18 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES CALCULADOS EM HAFFNER (2007), ANAREDE E SIMPOT 68
TABELA 19 – DADOS DA MATRIZ BARRAS: SISTEMA DE NOVE BARRAS 69
TABELA 20 – DADOS DAS LINHAS: SISTEMA DE NOVE BARRAS 70
TABELA 21 – SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA O SISTEMA DE NOVE BARRAS 70
TABELA 22 – RESULTADOS DO ANAREDE PARA O SISTEMA DE NOVE BARRAS 72
TABELA 23 – RESULTADOS EXTRAÍDOS DO RELATÓRIO DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 9 BARRAS 73
TABELA 24 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES CALCULADOS NO SIMULIGHT, ANAREDE E SIMPOT 73
TABELA 25 – DADOS DA MATRIZ BARRAS: SISTEMA DE 20 BARRAS 76
TABELA 26 – DADOS DA LINHA: SISTEMA DE 20 BARRAS 77
TABELA 27 – SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA O SISTEMA DE 20 BARRAS 78
TABELA 28 – RESULTADOS DO ANAREDE PARA O SISTEMA DE VINTE BARRAS 80
TABELA 29 – RESULTADOS EXTRAÍDOS DO RELATÓRIO DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 20 BARRAS 82
TABELA 30 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES CALCULADOS EM COSTA (2000), ANAREDE E SIMPOT 83
TABELA 31 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES CALCULADOS EM COSTA (2000), ANAREDE E SIMPOT (CONCLUSÃO) 84

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Corrente Alternada
ANAREDE	Análise de Redes
DAO	Data Access Object
GPL	General Public License
GUI	Graphical User Interface
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	Organization for Standardization
NBR	Normas Brasileiras
ONS	Operador Nacional do Sistema
PU	Por Unidade
SFP	Simulador de Fluxo de Potência
SIMPOT	Simulação do Fluxo de Potência pelo Método de Newton-Raphson
SIMULIGHT	Simulador de Redes Elétricas com Geração Distribuída
TAP	Derivação
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
1.1. PROBLEMA 13
1.2. JUSTIFICATIVA 13
1.3. OBJETIVOS 14
1.3.1. OBJETIVO GERAL 14
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
1.4. MÉTODO DE PESQUISA 15
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO ESCRITO 15
2. FLUXO DE POTÊNCIA 16
2.1. INTRODUÇÃO 16
2.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DO FLUXO DE POTÊNCIA 17
2.2.1. TIPOS DE BARRAS 17
2.2.2. MATRIZ DE ADMITÂNCIAS 17
2.2.3. EQUAÇÕES 20
2.3. CONCLUSÃO 22
3. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA 23
3.1. INTRODUÇÃO 23
3.2. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON 23
3.3. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA O FLUXO DE POTÊNCIA 25
3.4. CONCLUSÃO 30
4. PROGRAMA COMPUTACIONAL SIMPOT 31
4.1. INTRODUÇÃO 31
4.2. LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO JAVA 31
4.3. ESTRUTURA DO SIMPOT 32
4.4. ENTRADA DE DADOS NO SIMPOT 34
4.4.1. TELA PRINCIPAL 35
4.4.2. TELA E ENTRADA DE DADOS DO GERADOR 37
4.4.3. TELA E ENTRADA DE DADOS DO INDUTOR 38
4.4.4. TELA E ENTRADA DE DADOS DO CAPACITOR 39
4.4.5. TELA E ENTRADA DE DADOS DO TRANSFORMADOR 40
4.4.5.1. INSERÇÃO DO TRANSFORMADOR COM TAP NO PROGRAMA SIMPOT 41
4.4.6. TELA E ENTRADA DE DADOS DA CARGA 44
4.4.7. TELA E ENTRADA DE DADOS DA BARRA 45
4.4.8. TELA E ENTRADA DE DADOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO 46
4.5. SAÍDA DE DADOS NO SIMPOT 47
4.6. MANUAL DO SIMPOT 49
4.7. CONCLUSÃO 50
5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES 51
5.1. INTRODUÇÃO 51
5.2. AVALIAÇÃO DE PRODUTOS DE SOFTWARE 51
5.3. AS NORMAS APLICADAS À AVALIAÇÃO DE PRODUTOS DE SOFTWARE 52
5.4. METODOLOGIA ADOTADA PARA SIMULAÇÃO DO SOFTWARE SIMPOT 52
5.5. FUNÇÕES TESTADAS 52
5.6. COMPROVAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE SIMPOT 53
5.6.1. SISTEMA DE DUAS BARRAS 53
5.6.1.1. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE DUAS BARRAS 55
5.6.2. SISTEMA DE TRÊS BARRAS 58
5.6.2.1. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 3 BARRAS 59
5.6.3. SISTEMA DE QUATRO BARRAS 63
5.6.3.1. RESULTADOS DOS CÁLCULOS DO SISTEMA DE QUATRO BARRAS 65
5.6.4. SISTEMA DE NOVE BARRAS 68
5.6.4.1. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE NOVE BARRAS 70
5.6.5. SISTEMA DE VINTE BARRAS 74
5.6.5.1. RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 20 BARRAS 78
5.7. CONCLUSÃO 84

6. CONCLUSÕES GERAIS 86
7. APÊNDICES 88
APÊNDICE A – MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA SIMPOT 89
A.1. TELA PRINCIPAL 90
A.1.1. TELA E ENTRADA DE DADOS DO GERADOR 92
A.1.3. TELA E ENTRADA DE DADOS DO INDUTOR 93
A.1.4. TELA E ENTRADA DE DADOS DO CAPACITOR 94
A.1.2. TELA E ENTRADA DE DADOS DO TRANSFORMADOR 95
A.1.2.1. INSERÇÃO DO TRANSFORMADOR COM TAP NO PROGRAMA SIMPOT 96
A.1.5. TELA E ENTRADA DE DADOS DA CARGA 99
A.1.6. TELA E ENTRADA DE DADOS DA BARRA 100
A.1.7. TELA E ENTRADA DE DADOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO 101
A.2. MONTAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO DE POTÊNCIA NO PROGRAMA SIMPOT 102
A.3. SAÍDA DE DADOS NO SIMPOT 106
APÊNDICE B – EXEMPLO DE RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA SIMPOT 107
APÊNDICE C – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA ANAREDE PARA O SISTEMA DE 2 BARRAS 110
APÊNDICE D – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 2 BARRAS 111
APÊNDICE E – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA ANAREDE PARA O SISTEMA DE 3 BARRAS 113
APÊNDICE F – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 3 BARRAS 116
APÊNDICE G – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA ANAREDE PARA O SISTEMA DE 4 BARRAS 118
APÊNDICE H – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 4 BARRAS 120
APÊNDICE I – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA ANAREDE PARA O SISTEMA DE 9 BARRAS 123
APÊNDICE J – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 9 BARRAS 127
APÊNDICE K – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA ANAREDE PARA O SISTEMA DE 20 BARRAS 134
APÊNDICE L – RELATÓRIO DE SAÍDA DO PROGRAMA SIMPOT PARA O SISTEMA DE 20 BARRAS 142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 175

1. INTRODUÇÃO

Em meados de 1890, nos Estados Unidos, foi implementada a primeira linha de transmissão em corrente alternada, com 20,9 km de extensão, com tensão abaixo de 1kV. Em 1960 algumas linhas de transmissão ao redor do mundo já operavam na ordem de 500 kV.

Até 1917 os sistemas de potência eram isolados uns dos outros, tendo assim sistemas vulneráveis a falhas e pouco eficientes. Como as cargas começavam a exigir grandes "pacotes" de energia repentinamente, as unidades geradoras trabalhavam muito tempo a vazio, com baixo fator de potência. Então, surgiram os estudos para interligação destes sistemas de potência, inicialmente interligando poucos sistemas. Estes estudos, geralmente denominados de estudos de fluxo de potência, caracterizam-se pela determinação das tensões complexas nas barras do sistema estudado e dos fluxos nas linhas, a partir de uma dada condição de geração e carga.

À medida que a demanda foi aumentando, a geração aumentou em número de unidades, as linhas de transmissão ficaram maiores e mais numerosas, tornando os cálculos para cada estudo de adição de unidades geradoras ou de transmissão ainda mais complicados. Surgiram assim, a partir de 1929, os primeiros aplicativos computacionais para cálculos de fluxo de potência, que eram computadores analógicos e foram chamados de "Analisadores de Rede AC" (STEVENSON, 1962, p. 1-16).

Com o aumento de configurações mais complexas de sistemas de potência em alta tensão, surgem problemas relacionados a desequilíbrios nas correntes e tensões, os quais levam ao aumento nas perdas pelo efeito corona nos condutores, redução da vida útil dos equipamentos por superaquecimento, atuações não previstas pelo sistema de proteção e outros problemas. Todos estes fatores embasam cada vez mais a necessidade de um planejamento prévio do sistema de energia elétrica em função da demanda apresentada pelo cenário econômico de um país. Além disso, para operar o sistema de forma segura devem ser feitos estudos de planejamento da operação, por meio de simulações de fluxos de potência, considerando diferentes condições de carga e configurações da rede elétrica.

Para o cálculo de fluxo de potência em sistemas de energia, podem ser utilizados alguns métodos numéricos, dentre os quais: Método de Gauss, Método de Gauss-Seidel, Método de Newton-Raphson, Método Ward e Hale, Método da Matriz Z_{BARRA}, Fluxo de Potência Desacoplado Rápido e Métodos baseados nas Matrizes Y_{BARRA} e Z_{BARRA}. Destes, os

mais utilizados são os métodos de Gauss-Seidel e de Newton-Raphson (ZOCOLOTTI *et al.*, 2002, p. 70-95).

O fluxo de potência para sistemas de potência em corrente alternada é modelado por um sistema de equações não-lineares, envolvendo funções como seno e cosseno. As correntes nos ramos não são conhecidas, apenas as potências das cargas são pré definidas, bem como as potências ativas geradas. O método iterativo de Gauss-Seidel foi um dos primeiros métodos desenvolvidos e utilizados para resolver as equações não-lineares do fluxo de potência. Quando aplicado a sistemas reais de potência, com elevado número de barras, o método numérico de Gauss-Seidel converge lentamente ou não converge. Por outro lado o método numérico de Newton-Raphson aplicado a fluxo de potência pode convergir próximo a quatro ou cinco iterações para esses mesmos sistemas elétricos.

Em 2002, foi apresentado na UTFPR o programa computacional Simulador de Fluxo de Potência (SFP) como parte de um Trabalho de Conclusão de Curso (ZOCOLOTTI *et al.*, 2002). O método utilizado foi o Gauss-Seidel. O SFP apresenta uma interface gráfica que auxilia na compreensão dos conceitos de Sistema de Potencia, tais como: tipos de barras, modelagem de linhas de transmissão e transformadores. Durante alguns semestres, este programa foi utilizado na disciplina de Sistemas de Potência I do curso de Engenharia Elétrica da UTFPR. Porém, o programa SFP possui uma plataforma antiga, que não é suportada pelos sistemas operacionais atuais, o que tem dificultado seu uso pelos alunos. Além disso, o programa SFP não tem critérios de convergência, portanto o aluno não tem certeza se os resultados são a solução do fluxo de potência. Por isso, este trabalho propôs o desenvolvimento de um novo software didático, com interface gráfica ao usuário, para cálculo do fluxo de potência. Este programa computacional foi desenvolvido utilizando o método de Newton-Raphson.

Dentre os diferentes tipos de linguagens de programação e softwares de programação, para este trabalho foi adotado a linguagem de programação Java, em especial Java Swing. Essa linguagem é orientada a objetos, o que atualmente é mais utilizado e natural para os programadores, além de ser uma linguagem consolidada nos meios comercial e acadêmico, é de livre utilização sob os termos da licença pública geral (GPL), possui sintaxe similar a linguagem C/C++ e é distribuída com uma vasta coleção de bibliotecas.

1.1. Problema

As equações para o cálculo de fluxo de potência são complexas e envolvem processos iterativos para sua solução. Por isso é comum o uso de programas computacionais para o cálculo do fluxo de potência. Estes programas geralmente possuem entrada de dados por arquivos de dados, e as saídas do programa são apresentadas na forma de listas com os valores das tensões nas barras e fluxos nas linhas de transmissão.

Os alunos de graduação, quando estudam fluxo de potência, geralmente têm dificuldade em entender todas as variáveis envolvidas no cálculo, e interpretar os resultados apresentados nos arquivos de saída. Além disso, existem poucos softwares de fluxo de potência disponibilizados gratuitamente para alunos ou para utilização no ambiente acadêmico. Este fato dificulta a simulação e o estudo de sistemas elétricos de potência nos cursos de engenharia elétrica.

Desta forma, surge a necessidade de softwares mais amigáveis, que possam se comunicar com o usuário por meio de telas gráficas, nas quais o aluno possa visualizar o sistema que está sendo simulado.

1.2. Justificativa

A necessidade da criação de uma ferramenta com interface gráfica para cálculo de fluxo de potência utilizando uma linguagem de programação que tenha licença pública geral está baseada na carência de materiais didáticos gratuitos que auxiliem na demonstração e compreensão do assunto. Além disso, sabe-se que as simulações dos sistemas de potência são imprescindíveis para avaliar as novas demandas que a matriz energética nacional possui.

Com o desenvolvimento deste trabalho, acredita-se que os alunos da UTFPR terão a sua disposição um material didático para apoio nas disciplinas da área de sistemas de potência. O software a ser desenvolvido com interface gráfica busca assemelhar-se a formatação visual apresentada pelos professores nas disciplinas de Sistemas de Potência 1 e 2.

Os professores terão disponível uma ferramenta gratuita para efetuar simulações de fluxo de potência, em sala de aula ou extra-classe, utilizando o método numérico de Newton-Raphson, com critério de convergência.

Além disso, foi observada uma carência em softwares para simulação de fluxo de potência de simples utilização, com rigor matemático, interface gráfica e de licença livre, pois os existentes não atendem a estes quatro requisitos simultaneamente.

Por fim, profissionais da área de sistemas de potência e instituições de ensino poderão realizar contribuições para a evolução e aperfeiçoamento do software após a conclusão deste trabalho, pois este foi desenvolvido em plataforma de licença pública geral.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolver um programa computacional com interface gráfica capaz de calcular o fluxo de potência de um sistema elétrico de energia, utilizando uma linguagem de programação que tenha licença pública geral.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foi necessário cumprir as seguintes metas:

- Estudar o Trabalho de Conclusão de Curso "Desenvolvimento de software didático para cálculo de fluxo de potência" (ZOCOLOTTI *et al.*, 2002).
- Estudar e aplicar os conhecimentos adquiridos nas áreas de circuitos elétricos, sistemas de potência, cálculo numérico, computação e máquinas elétricas.
- Estudar a linguagem de programação Java Swing.
- Estudar os métodos numéricos aplicáveis aos cálculos de fluxo de potência.
- Estudar o método numérico de Newton-Raphson, escolhido para o desenvolvimento deste trabalho.
- Elaborar um fluxograma que demonstra a rotina de cálculo do software.
- Desenvolver um software, utilizando uma linguagem de programação que tenha licença pública geral, para cálculo de fluxo de potência utilizando o método numérico Newton-Raphson.
- Elaborar um manual de instruções da ferramenta acima mencionada.
- Demonstrar o correto funcionamento do programa computacional desenvolvido simulando exemplos de sistemas de potência e comparando os resultados com saídas de softwares de fluxo de potência já conhecidos.

1.4. Método de Pesquisa

Para início do trabalho proposto foi estudada toda a teoria para cálculo de Fluxo de Potência e também os métodos de resolução de sistemas não-lineares, utilizando as bibliografias disponíveis, com o objetivo de nivelar o conhecimento dos integrantes da equipe.

Toda a teoria já mencionada foi aplicada no desenvolvimento do fluxograma que define o cálculo do fluxo de potência pelo método Newton-Raphson.

Como o objetivo do trabalho proposto foi desenvolver uma ferramenta para cálculo de fluxo de potência baseada em uma plataforma de programação com licença geral pública, foi necessário estudar a linguagem de programação Java Swing e também pesquisar as coleções de bibliotecas disponíveis que poderiam ser utilizadas no desenvolvimento do programa.

Com a conclusão do desenvolvimento desse software, foi necessário comparar seus resultados com o programa Anarede utilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), através de um estudo de caso já conhecido. Essa comparação dos resultados obtidos pelo programa proposto com os resultados apresentados pelo Anarede, permitiu comprovar o processamento adequado dos cálculos de fluxo de potência utilizando o método Newton-Raphson.

Para realizar essa comparação dos resultados dos dois programas, foi preciso pesquisar o programa Anarede que calcula o fluxo de carga e também é utilizado pelo ONS e pelas empresas de energia elétrica do país.

1.5. Estrutura do Trabalho Escrito

Este trabalho constitui-se de seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a proposta do Trabalho de Conclusão de Curso. O segundo capítulo apresenta um estudo das equações do problema de fluxo de potência. No terceiro, foi apresentado o detalhamento do procedimento de cálculo do método de Newton-Raphson aplicado ao fluxo de potência. O quarto capítulo aborda a metodologia de desenvolvimento do programa Simpot. O quinto capítulo é destinado à apresentação de resultados obtidos com o programa. O sexto capítulo apresenta as conclusões finais do TCC e orientações para trabalhos futuros. Além disso, o presente trabalho tem como anexo o Manual do Programa Simpot.

2. FLUXO DE POTÊNCIA

2.1. Introdução

O cálculo do fluxo de potência das redes de energia elétrica consiste na avaliação do desempenho das redes de energia elétrica em regime permanente, ou seja, condição estática, e nesta modelagem, o sistema é representado por um conjunto de equações algébricas. Como o estudo é em regime permanente, as variações no tempo são muito lentas a ponto de se desprezar os transitórios. Trata-se de um cálculo de fundamental importância tanto na operação do sistema, quanto no planejamento e expansão destas redes.

A partir da avaliação de informações tais como, carregamento das linhas, carregamento dos geradores, tensões nas barras e perdas na transmissão, é possível definir alterações na rede elétrica, a fim de tornar sua operação segura e com alta disponibilidade. Estas alterações podem ser:

- ajuste das potências fornecidas ou consumidas pelos geradores;
- ajustes de taps dos transformadores;
- ajustes nos dispositivos de controle de tensão;
- trocas de cargas de uma linha para outra;
- mudanças de topologias.

Também é possível prever os resultados de instalação de novas fontes geradoras, novas cargas, novos dispositivos de controle de tensão e interconexão de redes.

O cálculo do fluxo de potência, na sua maioria, é efetuado por meio de métodos numéricos computacionais, desenvolvidos para solucionar as equações algébricas que modelam este estudo. Os principais métodos numéricos aplicados ao fluxo de potência são Método de Gauss, Método de Gauss-Seidel, Método de Newton-Raphson, Método Ward e Hale, Método da Matriz Z_{BARRA}, Fluxo de Potência Desacoplado Rápido e Métodos baseados nas Matrizes Y_{BARRA} e Z_{BARRA}.

2.2. Formulação do Problema do Fluxo de Potência

"Na formulação mais simples do problema a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas entram no problema como dados e duas como incógnitas"(MONTICELLI, 1983, p. 2):

- V_k é o módulo da tensão na barra k;
- θ_k é o ângulo da tensão na barra k;
- P_k é injeção líquida de potência ativa na barra k;
- Q_k é injeção líquida de potência reativa na barra k.

Relativo às variáveis associadas a cada barra, quais são incógnitas e quais são dados do problema, podem ser definidas três tipos de barras.

2.2.1. Tipos de barras

São geralmente definidos três tipos de barras:

- PQ, na qual P_k e Q_k são dados e calculados V_k e θ_k;
- PV, na qual P_k e V_k são dados e calculados Q_k e θ_k;
- $V\theta$, na qual V_k e θ_k são dados e calculados P_k e Q_k.

As barras dos tipos PQ e PV representam barras de carga e de geração, respectivamente. A barra $V\theta$ representa a barra de referência, e tem as funções de fornecer referência angular ao sistema, e, após a solução final do sistema, fechar o balanço de potência ativa e reativa, suprindo as perdas na transmissão.

2.2.2. Matriz de Admitâncias

A determinação do Fluxo de Potência depende, entre outros fatores, dos elementos da matriz de admitância das barras do sistema. Os elementos da matriz de admitância são determinados em função dos parâmetros da rede. Para exemplificar, considera-se um sistema de potência de três barras, como mostrado na Figura 1.

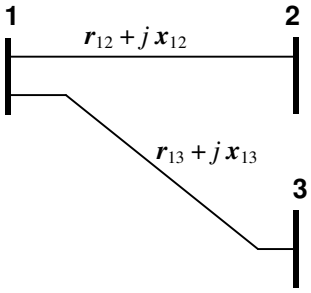

Figura 1 – Sistema hipotético de três barras
Fonte: Costa (2004).

Sejam as admitâncias série y_a e y_b definidas por:

$$y_a = \frac{1}{r_{12} + j \cdot x_{12}} \tag{2.1}$$

$$y_b = \frac{1}{r_{13} + j \cdot x_{13}} \tag{2.2}$$

onde as variáveis significam:

- r_{12}: resistência série da linha 1-2;
- x_{12}: reatância indutiva série da linha 1-2;
- r_{13}: resistência série da linha 1-3;
- x_{13}: reatância indutiva série da linha 1-3.

Cada linha possui ainda os elementos shunt, que são as susceptâncias capacitivas da linha para a terra. Deste modo, as admitâncias para a terra deste sistema são:

$$y_c = y_d = j\frac{B_{12}}{2} \tag{2.3}$$

$$y_e = y_f = j\frac{B_{13}}{2} \tag{2.4}$$

sendo B_{12} e B_{13} as susceptâncias capacitivas das linhas 1-2 e 1-3, respectivamente.

Então, representando as linhas do sistema de três barras da Figura 1 pelo modelo π, têm-se o sistema da Figura 2.

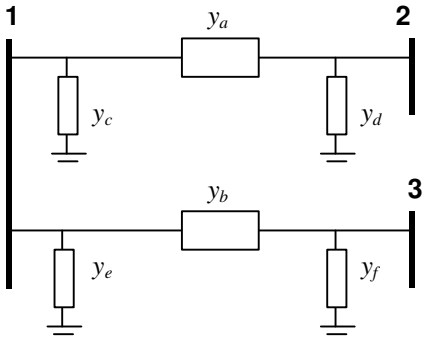

Figura 2 – Circuito π-equivalente para o sistema hipotético de 3 barras
Fonte: Costa (2004).

Para este sistema, a matriz de admitância das barras é definida por:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_a + y_b + y_c + y_e & -y_a & -y_b \\ -y_a & y_a + y_d & 0 \\ -y_b & 0 & y_b + y_f \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

desta forma, os elementos de uma matriz de admitâncias para um sistema de *n* barras podem ser descritos por:

$$Y_{ij} = -y_{ij} \tag{2.6}$$

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} y_{ij} + y_{ig} \tag{2.7}$$

onde as variáveis significam:

- y_{ij} : admitância série da linha *i*-*j*, sendo que *j* corresponde a todas as barras conectadas à barra *i*;
- y_{ig} : admitância para a terra, a qual se reduz à susceptância capacitiva jB_C.

Os elementos da matriz de admitância das barras podem ainda ser descritos em termos de suas partes reais e imaginárias:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \tag{2.8}$$

onde as variáveis significam:

- G_{ij} : parte real do elemento *i-j* da matriz de admitância de barras;
- B_{ij} : parte imaginária do elemento *i-j* da matriz de admitância de barras.

2.2.3. Equações

As equações que modelam o problema do fluxo de potência são duas para cada barra do sistema, uma para a potência ativa e outra para a potência reativa. Ambas as equações são baseadas na Primeira Lei de Kirchhoff, na qual o somatório de potências ativas ou reativas que são injetadas em uma barra, é igual ao somatório das potências ativas ou reativas que saem da barra. As expressões que definem a injeção de potência ativa e injeção de potência reativa são, respectivamente:

$$P_k(V,\theta) = V_k \cdot \sum_{m=1}^{NB} \left(G_{km} \cdot \cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}\right) \cdot V_m \tag{2.9}$$

$$Q_k(V,\theta) = V_k \cdot \sum_{m=1}^{NB} \left(G_{km} \cdot sen\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}\right) \cdot V_m \tag{2.10}$$

onde os índices e as variáveis significam:

- $P_k(V,\theta)$: injeção de potência ativa na barra k;
- $Q_k(V,\theta)$: injeção de potência reativa na barra k;
- $k = 1...NB$: sendo *NB* o número de barras do sistema;
- V_k, V_m : módulo das tensões das barras k e m;
- θ_{km} : defasagem angular entre as barras k e m;
- G_{km} : parte real do elemento k-m da matriz de admitância de barra;
- B_{km} : parte imaginária do elemento k-m da matriz de admitância de barra.

Nestas equações, a defasagem angular θ_{km} é calculado pela diferença $\theta_k - \theta_m$ logo, pode-se adicionar ou subtrair uma constante arbitrária a todos os ângulos das tensões que, obtém-se o mesmo resultado na resolução do problema dos fluxos de potência. Deste vem à necessidade da barra de referência. Portanto, conclui-se que deve ser adotado um ângulo de tensão como referência para todo o sistema.

As equações gerais para o cálculo do fluxo de potência nos ramos da rede elétrica são:

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

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

$$P_{mk} = V_m^{\ 2} \cdot g_{mk} - (a_{km} \cdot V_k) \cdot V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} sen(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (2.13)$$

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

onde os índices e as variáveis significam:

- V_k : fasor tensão da barra k;
- θ_k : ângulos da tensão na barras k;
- θ_{km}: diferença entre os ângulos das barras m e k, ou também chamada de abertura angular entre as barras m e k;
- P_{km} : fluxo de potência ativa da barra k em direção a barra m;
- P_{mk} : fluxo de potência ativa da barra m em direção a barra k;
- Q_{km} : fluxo de potência reativa da barra k em direção a barra m;
- Q_{mk} : fluxo de potência reativa da barra m em direção a barra k;
- a_{km} : relação de transformação de um transformador entre as barras k e m;
- b_{km}^{sh} : suceptância capacitiva da linha de transmissão entre as barras k e m.

Os parâmetros g_{km} e b_{km} são definidos respectivamente como sendo a condutância e susceptância indutiva do ramo entre as barras k e m, e podem ser calculados em função de r_{km} e x_{km} :

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \tag{2.15}$$

$$b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \tag{2.16}$$

onde os índices e as variáveis significam:

- r_{km} : resistência série da linha k-m ;
- x_{km} : reatância indutiva série da linha k-m.

Para as linhas de transmissão, $a_{km} = 1$ e $\varphi_{km} = 0$. Para transformadores em fase, $b_{km}^{sh} = 0$ e $\varphi_{km} = 0$. Para transformadores defasadores puros, $b_{km}^{sh} = 0$ e $a_{km} = 1$. E por fim para os transformadores defasadores, $b_{km}^{sh} = 0$.

2.3. Conclusão

Este capítulo descreve o problema do fluxo de potência em estudos de redes elétricas. É apresentada a formulação básica deste problema elétrico, além de uma descrição sucinta da Matriz de Admitâncias, que representa os parâmetros da rede elétrica. As equações gerais para o cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede são detalhadas.

Podem ser utilizados vários métodos para solução das equações do fluxo de potência.

No próximo capítulo é mostrado o método de Newton-Raphson que foi utilizado neste trabalho.

3. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

3.1. Introdução

À medida que os sistemas elétricos foram crescendo em tamanho e complexidade o método de *Newton-Raphson* passou a ser o mais utilizado. Este é o método com melhor desempenho para redes de transmissão e sub-transmissão, porque converge para um ótimo local seguindo a direção da Jacobiana do sistema elétrico. Portanto a convergência depende muito do ponto inicial de partida (por exemplo, ângulos iguais a zero radianos e as magnitudes de tensões das barras iguais a um pu para as barras PQ e ângulos iguais a zero radianos para as barras PV).

Há versões derivadas do método de *Newton-Raphson* que utilizam uma Jacobiana constante ao longo do processo de solução, aumentando assim a rapidez computacional do algoritmo; entretanto, estes métodos em alguns casos não apresentam a mesma boa convergência do método de *Newton-Raphson* e suas versões desacopladas. Cabe ressaltar que desenvolveram-se métodos especializados para sistemas elétricos que apresentam características específicas, como o caso dos métodos para redes de distribuição onde a relação R/X e o número de barras são frequentemente maiores do que em sistemas de transmissão. Estes métodos apresentam um melhor desempenho computacional comparando-se com o método de *Newton-Raphson* para redes de distribuição (CASTRO, 2005).

3.2. Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é uma técnica de iteração com o intuito de resolver um conjunto de equações não lineares. A equação (3.1), representa um sistema de *n* equações não-lineares com *n* incógnitas (KUNDUR, 1994, p. 260).

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2 \ldots x_n) &= b_1 \\ f_2(x_1, x_2 \ldots x_n) &= b_2 \\ \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots & \\ f_n(x_1, x_2 \ldots x_n) &= b_n \end{aligned} \tag{3.1}$$

Para resolver o sistema mostrado na equação (3.1), estima-se os valores iniciais $x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0$ para as incógnitas e também as compensações $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_n$, para que as estimativas sejam atendidas, ou seja:

$$\begin{aligned} &f_1(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \ldots x_n^0 + \Delta x_n) = b_1 \\ &f_2(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \ldots x_n^0 + \Delta x_n) = b_2 \\ &\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \\ &f_n(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \ldots x_n^0 + \Delta x_n) = b_n \end{aligned} \tag{3.2}$$

utilizando o Teorema de Taylor e aplicando-o na Equação (3.2), vê-se a expansão:

$$\begin{aligned} &f_i(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \ldots x_n^0 + \Delta x_n) = \\ &= f_i(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0) + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1}\right)_0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2}\right)_0 \Delta x_2 + \cdots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n}\right)_0 \Delta x_n = b_i \end{aligned} \tag{3.3}$$

os termos de ordem superior podem ser negligenciados, se a estimativa inicial estiver perto da solução (KUNDUR, 1994, p. 261).

O resultante matricial da equações lineares é mostrada conforme a Equação (3.4).

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0) \\ b_2 - f_2(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0) \\ \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \\ b_n - f_n(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)_0 & \ldots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)_0 & \ldots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)_0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)_0 & \ldots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \ldots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Este sistema matricial pode ser expresso na forma vetorial, conforme mostrado na equação (3.5).

$$\Delta f = J \cdot \Delta x \tag{3.5}$$

Onde J é a matriz Jacobiana, Δf são os erros finitos e Δx são as compensações. Os erros finitos e as compensações podem ser iguais a zero, caso as estimativas iniciais sejam

exatas. A equação (3.4) mostra a relação de linearização entre erros e compensações através do Jacobiano das equações simultâneas. Qualquer método, desde que adequado para a solução de sistemas de equações lineares, pode resolver Δx. A equação (3.6) mostra como é calculado os valores atualizados de *x*.

$$x_i^1 = x_i^0 + \Delta x_i \tag{3.6}$$

O processo é repetido até que os erros sejam menores do que ε, que é uma tolerância especificada. As iterações tem convergência quadrática. O Jacobiano tem que ser recalculado a cada passo (KUNDUR, 1994, p. 262).

3.3. Aplicação do Método de Newton-Raphson para o Fluxo de Potência

A solução do fluxo de potência consite do conjunto de tensões complexas de todas as barras da rede elétrica estudada para as quais as potências das cargas e potências ativas geradas sejam iguais aos valores especificados para as barras. Ou seja, os valores de *V* e θ (sendo V o vetor dos módulos das tensões nas barras e θ é o vetor dos ângulos dessas tensões complexas), que satisfazem as equações descritas pelo subsistema 1 (S1), que é dado por:

$$S_1 = \begin{cases} \Delta P = P^{esp} - P(V,\theta) = 0 \\ \Delta Q = Q^{esp} - Q(V,\theta) = 0 \end{cases} \tag{3.7}$$

$$S_1 = \begin{cases} \Delta P_k = P_k{}^{esp} - P_k(V,\theta) = 0 \rightarrow k \in (barras\ PQ\ e\ PV) \\ \Delta Q_k = Q_k{}^{esp} - Q_k(V,\theta) = 0 \rightarrow k \in (barras\ PQ) \end{cases} \tag{3.8}$$

no qual $P_k^{esp}\ e\ Q_k^{esp}$ são os respectivos valores das injeções de potência ativa e reativa especificados para as barras, sendo dados por:

$$P_K^{esp} = P_k{}^G - P_k^C \tag{3.9}$$

$$Q_k^{esp} = Q_k^G - Q_k^C \cdot P_k^{calc}(V,\theta) \tag{3.10}$$

$$Q_k^{calc}(V,\theta) \tag{3.11}$$

no qual:

P_k^G: Potência ativa gerada na barra k;

P_k^C: Potência ativa consumida na barra k;

Q_k^G: Potência reativa gerada na barra k;

Q_k^C: Potência reativa consumida na barra k.

Os valores P_k^{calc} e Q_k^{calc} são calculados através das equações das potências nodais.

$\Delta P_k \, e \, \Delta Q_k$ são chamados de *mismatches* (resíduos) de potência ativa e reativa, respectivamente. O ponto central da resolução do subsistema 1 consiste em determinar o vetor de correções Δx (sendo que x é o vetor das variáveis V e θ). Como descrito anteriormente, a solução pelo Método de Newton-Raphson é dada por:

$$g(x^i) = -J(x^i)\Delta x^i \rightarrow \Delta x^i = [-J(x^i)]^{-1} g(x^i) \tag{3.12}$$

assim, tem-se:

$$\Delta x^i = \left[\frac{\Delta \theta^i}{\Delta V^i}\right] \begin{matrix} NPV + NPQ \\ NPQ \end{matrix} \tag{3.13}$$

$$g(x^i) = \left[\frac{\Delta P^i}{\Delta Q^i}\right] \begin{matrix} NPV + NPQ \\ NPQ \end{matrix} \tag{3.14}$$

no qual NPV e NPQ referem-se ao número de equações das barras do tipo PV e PQ respectivamente.

Considerando as expressões dos vetores $\Delta P \, e \, \Delta Q$, em que $P^{esp} \; e \; Q^{esp}$ são constantes, a matriz Jacobiana pode ser escrita da seguinte maneira:

$$J(x^i) = \begin{bmatrix} -\dfrac{\partial P(V,\theta)}{\partial \theta} & -\dfrac{\partial P(V,\theta)}{\partial V} \\ -\dfrac{\partial Q(V,\theta)}{\partial \theta} & -\dfrac{\partial Q(V,\theta)}{\partial V} \end{bmatrix}^{(i)} \tag{3.15}$$

sendo que as submatrizes são representadas por:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\partial P(V,\theta)}{\partial \theta} \quad N = \frac{\partial P(V,\theta)}{\partial V} \\ M &= \frac{\partial Q(V,\theta)}{\partial \theta} \quad L = \frac{\partial Q(V,\theta)}{\partial V} \end{aligned} \tag{3.16}$$

assim, a equação que define a aplicação do método de *Newton-Raphson* ao fluxo de potência fica sendo:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^i \\ \Delta Q^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta^i \\ \Delta V^i \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

as submatrizes que compõem a matriz Jacobiana são dadas por:

$$H = \begin{cases} H_{km} = \dfrac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m [G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}] \\ H_{kk} = \dfrac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in k} V_m [G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}] \end{cases} \tag{3.18}$$

$$N = \begin{cases} N_{km} = \dfrac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k [G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}] \\ N_{kk} = \dfrac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in k} V_m [G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}] \end{cases} \tag{3.19}$$

$$M = \begin{cases} M_{km} = \dfrac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m [G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}] \\ M_{kk} = \dfrac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in k} V_m [G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} sen\theta_{km}] \end{cases} \tag{3.20}$$

$$L = \begin{cases} L_{km} = \dfrac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = V_k [G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}] \\ L_{kk} = \dfrac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in k} V_m [G_{km} sen\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}] \end{cases} \tag{3.21}$$

os passos a serem executados para solução do fluxo de potência pelo método de *Newton-Raphson* são os seguintes:

1- Fazer i = 0, escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e as magnitude das tensões das barras PQ;

2- Calcular $P_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ e PV, $Q_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ, e determinar o vetor dos resíduos ("*mismatches*") $\Delta P_k^i \ e \ \Delta Q_k^i$;

3- Testar a convergência:

$$\max_{k\in(PQ+PV)}\{\left|\Delta P_k^i\right|\} \leq \in_p \tag{3.22}$$

$$\max_{k\in(PQ+PV)}\{\left|\Delta Q_k^i\right|\} \leq \in_q \tag{3.23}$$

Nesta etapa, verificar se o processo convergiu para a solução $(V^i\theta^i)$, caso contrário, continuar;

4- Calcular a matriz Jacobiana

$$J(V^i,\theta^i) = \begin{bmatrix} H(V^i,\theta^i) & N(V^i,\theta^i) \\ M(V^i,\theta^i) & L(V^i,\theta^i) \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

5- Determinar a nova solução (V^{i+1}, θ^{i+1}) ,em $\theta^{i+1} = \theta^i + \Delta\theta^i \ e \ V^{i+1} = V^i + \Delta V^i$ que sendo que $\Delta\theta^i \ e \ \Delta V^i$, são obtidos com a solução do seguinte sistema linear;

$$\begin{bmatrix} \Delta P(V^i,\theta^i) \\ \Delta Q(V^i,\theta^i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(V^i,\theta^i) & N(V^i,\theta^i) \\ M(V^i,\theta^i) & L(V^i,\theta^i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta^i \\ \Delta V^i \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

6- Fazer i = i + 1 e voltar para o passo 2).

A Figura 3 apresenta o fluxograma para o algoritmo de solução do fluxo de potência usando o Método de Newton-Raphson.

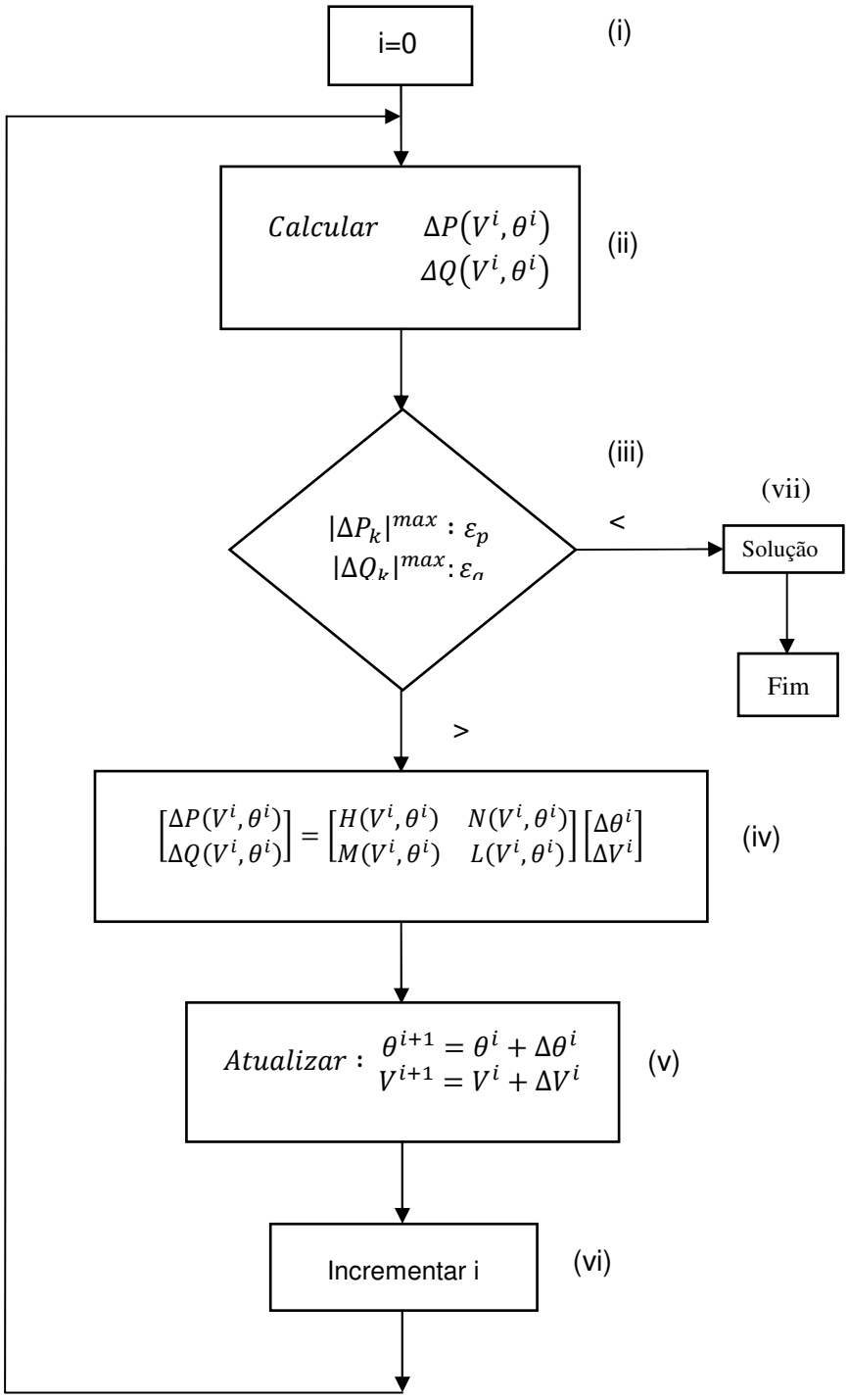

Figura 3 – Algoritmo do Método de Newton-Raphson
Fonte: Canossa (2007).

3.4. Conclusão

Este capítulo apresentou uma descrição do Método de Newton-Raphson e sua utilização para solução do Fluxo de Potência. Foram apresentadas aas equações que definem a matriz Jacobiana, sendo que essas equações serão calculadas pelo programa computacional proposto. Além disso, apresentou-se o algoritmo do Método de Newton-Raphson aplicado ao Fluxo de Potência.

4. PROGRAMA COMPUTACIONAL SIMPOT

4.1. Introdução

A ferramenta de auxílio ao cálculo do fluxo de potência desenvolvida neste trabalho foi chamada Simulação do Fluxo de Potência pelo Método de Newton-Raphson (Simpot). Nas seções seguintes são apresentados conceitos da linguagem de programação *Java* relacionados a estrutura e funcionamento do programa Simpot. Também neste capítulo são apresentadas as estruturas de classe do algoritmo principal e as principais telas do programa computacional proposto.

4.2. Linguagem de Programação JAVA

A linguagem de programação *Java* é orientada a objetos, ou seja, possui as características que permitem a melhor estruturação de um programa e também a herança entre classes.

A herança é uma forma de reutilização de software em que novas classes são criadas a partir das classes existentes, absorvendo seus atributos e comportamentos e adicionando novos recursos que as novas classes exigem (DEITEL e DEITEL, 2003, p. 431).

Para a correta compreensão da estrutura do Simpot, se faz necessário ter claro os conceitos de pacotes, classes, métodos e atributos. Uma classe é um tipo definido pelo usuário que contém o molde, ou seja, a especificação para os objetos. A classe envolve, associa funções e dados, controlando o acesso a estes, defini-la implica em especificar os seus atributos e seus métodos. Os métodos são as funções de uma classe e os atributos são as características de uma classe. Um pacote de classes da linguagem de programação *Java* é uma coleção de classes semelhantes e possivelmente cooperantes. No Simpot este conceito de pacotes foi utilizado para organizar a estrutura do software.

No Simpot também foram utilizadas classes de pacotes públicos, ou seja, pacotes desenvolvidos por outros programadores.

4.3. Estrutura do SIMPOT

O Simpot foi estruturado em cinco pacotes, são eles: *Controller* no qual são realizados os cálculos do método numérico; *DAO* (*Data Access Object*) no qual são realizadas comunicações com arquivos externos; *Main* é a classe principal; *Model* recebe todos as classes de componentes do fluxo de potência como linha de transmissão e transformador; *View* armazena as classes de interface com o usuário, tais como menus e barras de informação. A Figura 4 exibe a estrutura das classes e pacotes supracitados.

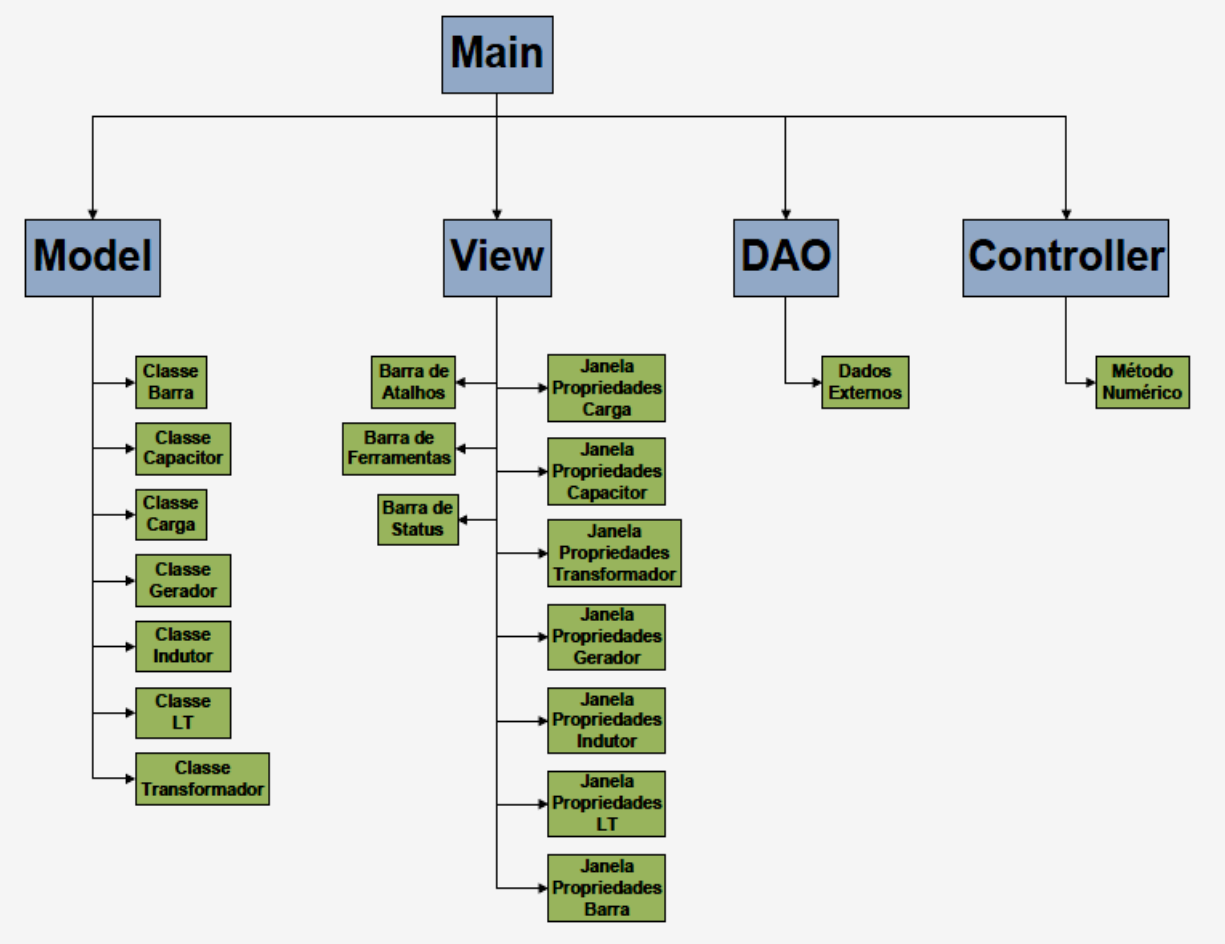

Figura 4 – Estrutura das classes e pacotes do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

A Figura 5 mostra a estrutura de comunicação entre as classes do pacote *Model*, e os atributos de cada classe.

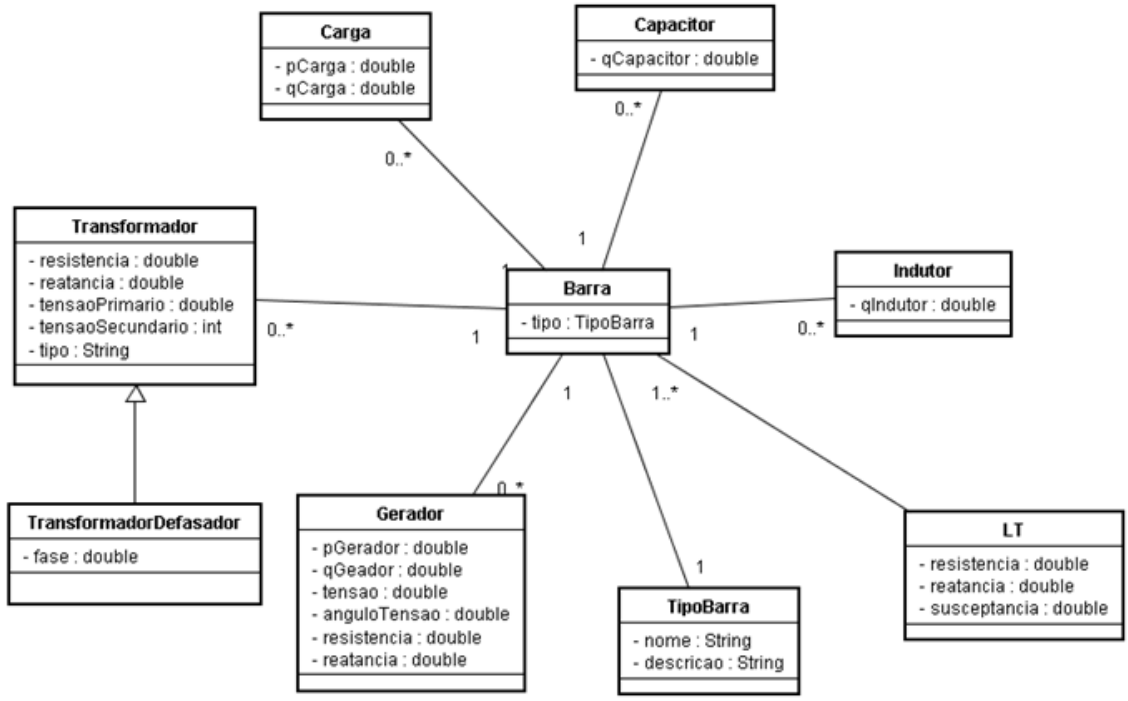

Figura 5 – Diagrama de Classes do pacote Model no Simpot
Fonte: Autoria própria

Vê-se na Figura 5 como as classes do pacote *Model* relacionam-se, ou seja, as classes denominadas Carga, Capacitor, Indutor, LT, TipoBarra, Gerador, Transformador, estão relacionadas diretamente com a classe Barra, no qual as classes se relacionam da seguinte forma:

- Toda classe Barra está associada diretamente com uma classe TipoBarra, ou seja, quando for definido o elemento barra no software, este solicita os atributos declarados na classe TipoBarra;
- A Classe TransformadorDefasador herda todos os atributos da classe Transformador e possui mais o atributo fase;
- A classe Carga deve se relacionar com uma classe Barra, por outro lado uma classe Barra pode conter nenhuma ou muitas classes Carga, ou seja, uma carga deve ter uma barra e uma barra pode não ter carga ou ter muitas cargas;

- A classe Capacitor deve se relacionar com uma classe Barra, por outro lado uma classe Barra pode conter nenhuma ou muitas classes Capacitor, ou seja, um banco de capacitores deve ter uma barra e uma barra pode não ter banco de capacitores ou ter muitos bancos;
- A classe Indutor deve se relacionar com uma classe Barra, por outro lado uma classe Barra pode conter nenhuma ou muitas classes Indutor, ou seja, um banco de indutores deve ter uma barra e uma barra pode não ter banco de indutores ou ter muitos bancos;
- A classe LT deve se relacionar com duas instancias da classe Barra, por outro lado uma classe Barra pode conter nenhuma ou muitas classes LT, ou seja, uma linha de transmissão deve ter duas barras e uma barra pode não ter linha de transmissão ou ter muitas linhas de transmissão;
- A classe Gerador deve se relacionar com uma classe Barra, por outro lado uma classe Barra pode conter nenhuma ou muitas classes Gerador, ou seja, um gerador deve ter uma barra e uma barra pode não ter gerador ou ter muitos geradores.
- A classe Transformador deve se relacionar com uma classe Barra, por outro lado uma classe Barra pode conter nenhuma ou muitas classes Transformador, ou seja, um transformador deve ter uma barra e uma barra pode não ter transformador ou ter muitos transformadores.

4.4. Entrada de Dados no Simpot

Ao iniciar a execução do programa Simpot, é aberta a sua tela principal, conforme mostra a Figura 6, onde estão disponibilizadas as ferramentas necessárias para a simulação de um sistema elétrico de potência.

As telas de opções representadas pelas Figuras 7, 8, 12, 13, 14, 15 e 16, mostram que os valores a serem inseridos devem ser em valores por unidade (pu). Portanto, os valores das impedâncias de todos os elementos do circuito a serem inseridos no programa devem ser previamente calculados em pu, considerando uma base comum de potência e bases adequadas de tensão.

Para cada entrada de dados não válidas o software retornará ao usuário uma tela de mensagem de erro.

4.4.1. Tela Principal

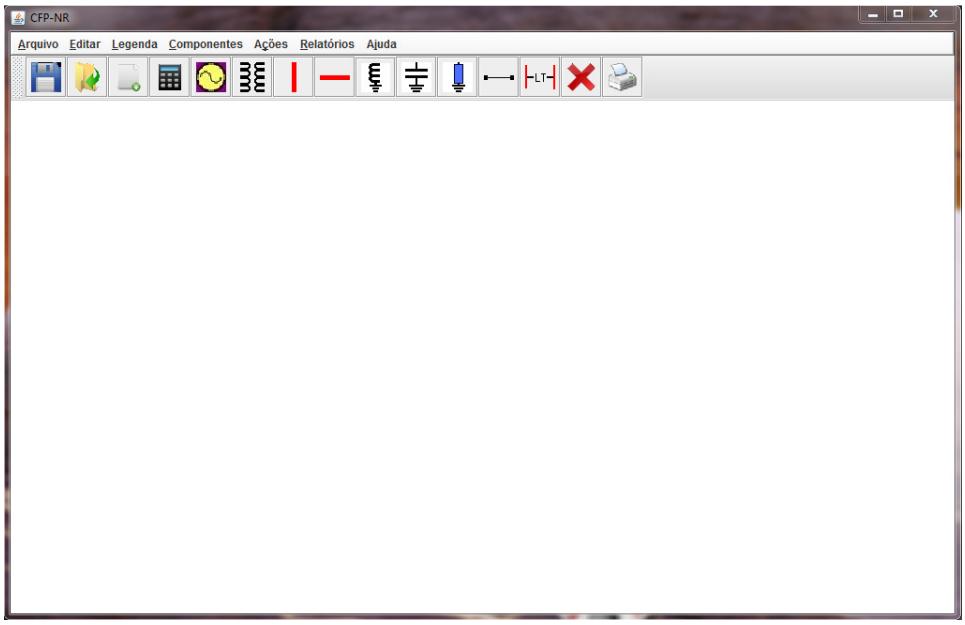

Figura 6 – Tela principal do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

A tela principal está dividida em barra de menus, barra de atalhos e área de trabalho. A barra de menus possui as seguintes estruturas:

- A ferramenta Arquivo disponibiliza os seguintes sub-menus: novo, abrir, fechar, salvar, imprimir e sair. Os sub-menus novo e abrir, representam respectivamente as funções de abrir uma nova página para simulação e para abrir uma simulação já existente;
- A ferramenta Editar disponibiliza os seguintes sub-menus: grid e plano de fundo. Estes sub-menus representam respectivamente as funções de inserir pontos na tela e para alterar a cor da página onde será construído o projeto a ser simulado;
- A ferramenta Legenda disponibiliza os seguintes sub-menus: exibir e ocultar. Estes sub-menus representam respectivamente as funções de mostrar ou não a descrição dos componentes inseridos no sistema a ser simulado;
- A ferramenta Componentes disponibiliza os seguintes sub-menus: gerador, transformador, barra vertical, barra horizontal, indutor, capacitor, ponto de conexão, carga e linha de transmissão. Estes sub-menus são melhor verificados nas figuras a seguir;

- A ferramenta Ações disponibiliza o seguinte sub-menu: calcular. O sub-menu calcular representa a função de cálculo do fluxo de potência propriamente dita;
- A ferramenta Relatórios disponibiliza os seguintes relatórios: matriz admitância de barras, matriz impedância de barras e fluxo entre barras. Os sub-menus novo e abrir representam respectivamente as funções de gerar tabelas contendo a matriz admitância de barras, a matriz impedância de barras e do cálculo do fluxo de potência explicitando inclusive o número de iterações;
- A ferramenta Ajuda disponibiliza o seguinte sub-menu: procedimento de utilização do software. Os sub-menu procedimento de utilização do software representa a função de abrir um texto que orienta o usuário na utilização das ferramentas disponibilizadas.

A barra de atalhos é composta por ícones que estão relacionados diretamente aos sub-menus da barra de menus, possibilitando ao usuário uma maior agilidade na construção e cálculo do sistema elétrico de potência que será simulado. Os ícones da barra de atalhos, conforme mostrada na Figura 6, podem ser descritos na ordem da esquerda para a direita como: salvar, novo, calcular, gerador, transformador, indutor, capacitor e barra.

Quando aciona-se algum sub-menu ou ícone relacionado ao menu Componentes, abre uma tela de opções para cada sub-menu selecionado, conforme mostram as Figuras 7, 8, 9, 10, 14, 15 e 16.

A área de trabalho é a região onde pode ser desenhado o circuito elétrico de potência para que seja possível efetuar o cálculo.

4.4.2. Tela e Entrada de Dados do Gerador

O Sub-Menu do Gerador, representado pela Figura 7, mostra que os valores inseridos devem estar em valores por unidade (pu), calculados a partir de uma base comum para todo o sistema. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como exemplo “G1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

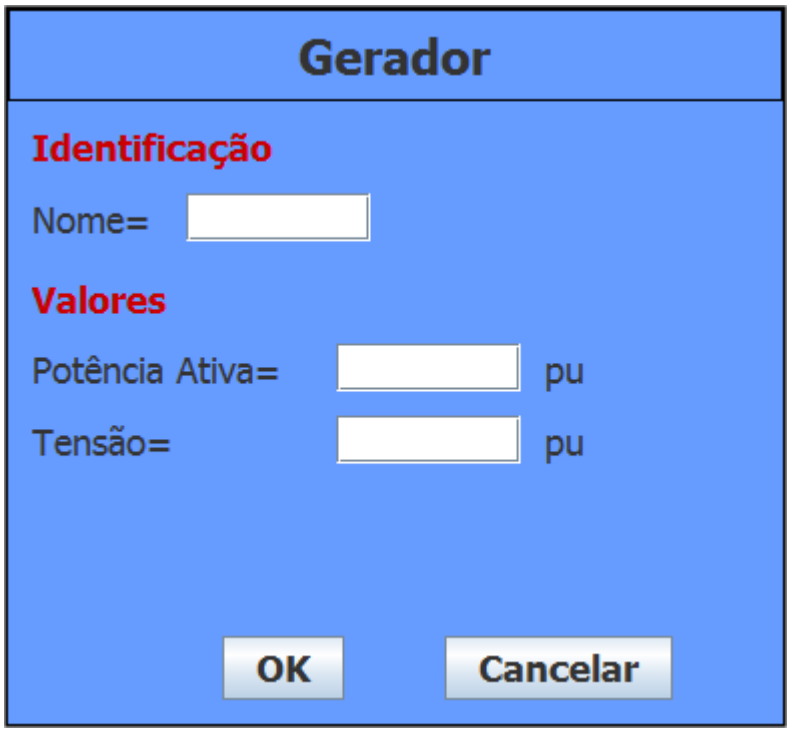

Figura 7 – Sub-menu Gerador do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

O gerador conectado à uma barra PV deve ter necessariamente os valores de potência ativa gerada e módulo da tensão. O gerador conectado à barra de referência (barra $V\theta$) deve ter o valor do módulo da tensão diferente de zero. Não é necessário entrar com o valor de potência ativa neste caso.

4.4.3. Tela e Entrada de Dados do Indutor

O Sub-Menu do Indutor é representado pela Figura 8. No campo de Identificação, pode-se nomear o componente, como exemplo “Ind1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

O valor do indutor é dado por sua susceptância indutiva em pu.

Figura 8 – Sub-menu Indutor do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

4.4.4. Tela e Entrada de Dados do Capacitor

O Sub-Menu do Capacitor é representado pela Figura 9. No campo de Identificação pode-se nomear o componente, como exemplo “Cap1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

O valor do capacitor é inserido por meio do valor da sua susceptância capacitiva em pu.

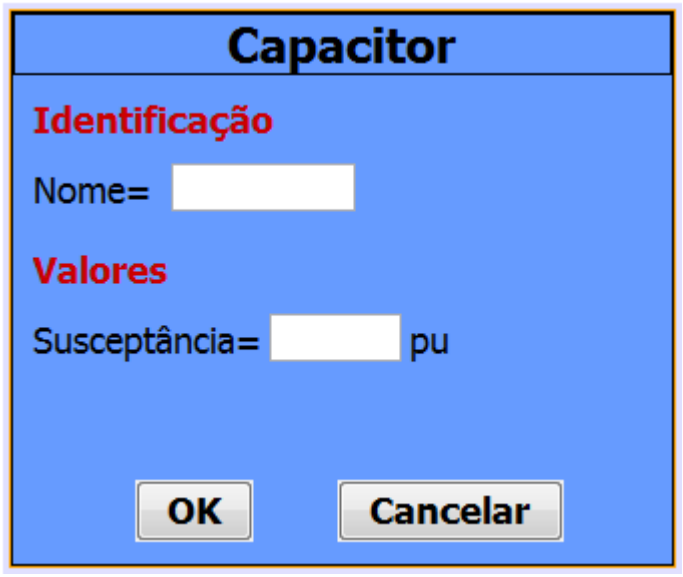

Figura 9 – Sub-menu Capacitor do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

4.4.5. Tela e Entrada de Dados do Transformador

O Sub-Menu do Transformador, representado pela Figura 10, mostra que os valores inseridos devem estar em valores por unidade (pu), calculados a partir de uma base comum para todo o sistema. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como exemplo “TR1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

Figura 10 – Sub-menu Transformador do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Neste Sub-Menu, existem algumas considerações a serem feitas em relação a entrada de dados. O Transformador é representado por seu equivalente monofásico de dois enrolamentos, como é usual nos diagramas dos circuitos em valores por unidade (pu).

A impedância (resistência e reatância de dispersão) a ser inserida é o valor da impedância equivalente nominal em pu, calculada a partir dos valores de base escolhidos pelo usuário.

O programa Simpot não possibilita a entrada de transformador com TAP variável (transformador que pode mudar a relação de espiras entre os enrolamentos do primário e secundário por meio de chaveamento ou taps). Entretanto, caso o usuário queira inserir em seu circuito um transformador com TAP em posição diferente dos valores nominais de tensão,

isso pode ser feito a partir de alguns cálculos realizados pelo próprio usuário, como explicado a seguir.

4.4.5.1. Inserção do Transformador com TAP no Programa Simpot

Todos os transformadores em sistemas de potência podem ser representados por um circuito composto por sua impedância equivalente *Zeq* em pu e por um transformador ideal com relação de transformação *a:1*, como mostra a Figura 11.

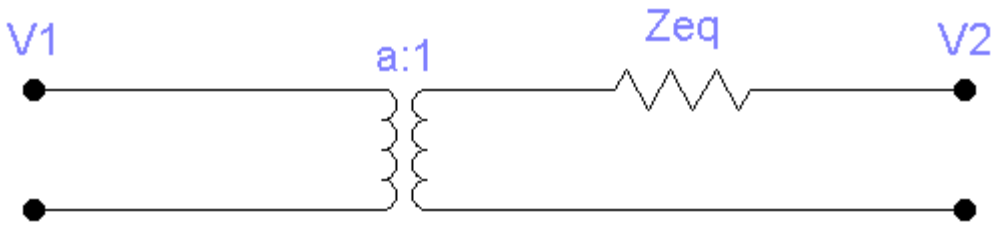

Figura 11 – Representação do Circuito do Transformador de Dois Enrolamentos
Fonte: Autoria própria.

Os transformadores sem TAP, ou com TAPs conectados na posição nominal, quando representados em valores por unidade (pu), têm relação de transformação *1:1*, ou seja *a=1*. Portanto, a relação de transformação pode ser desprezada nestes casos.

Os transformadores com TAPs em posições diferentes dos valores nominais de tensão têm valores de *a* diferentes de *1* e portanto o transformador ideal com relação *a:1* não pode ser desprezado. É possível calcular um circuito equivalente π para o transformador neste caso, a partir do valor de *a* e de sua impedância equivalente nominal Zeq em pu.

O valor de *a* é o valor da relação de transformação em pu, calculada por:

$$a = \frac{\frac{V_1}{V_2}}{\frac{V_{B1}}{V_{B2}}} \tag{4.1}$$

Onde as variáveis significam:

- V_1 : tensão nominal do enrolamento do primário;
- V_2 : tensão nominal do enrolamento do secundário;
- V_{B1} : tensão de base escolhida pelo usuário para o enrolamento do primário;
- V_{B2} : tensão de base escolhida pelo usuário para o enrolamento do secundário.

Caso o Transformador tenha Tap variável no primário o valor da tensão a ser considerada no secundário é V_2 e caso o Transformador tenha Tap variável no secundário o valor da tensão a ser considerada no primário é V_1.

Como pode-se observar, o valor de *a* calculado pela Equação 4.1 é uma relação de transformação em pu. Essa relação é geralmente um número entre 0,9 e 1,1.

O circuito representado na Figura 11 não pode ser inserido no programa, porém é possível converter esse circuito em um equivalente π como mostrado na Figura 12, sendo que o valor de cada impedância desse circuito π é calculado por (COSTA, 2010):

$$Z_{12} = a \cdot Zeq \quad [pu] \tag{4.2}$$

$$Z_{1T} = \left(\frac{a^2}{1-a} \right) \cdot Zeq \quad [pu] \tag{4.3}$$

$$Z_{2T} = \left(\frac{a}{a-1} \right) \cdot Zeq \quad [pu] \tag{4.4}$$

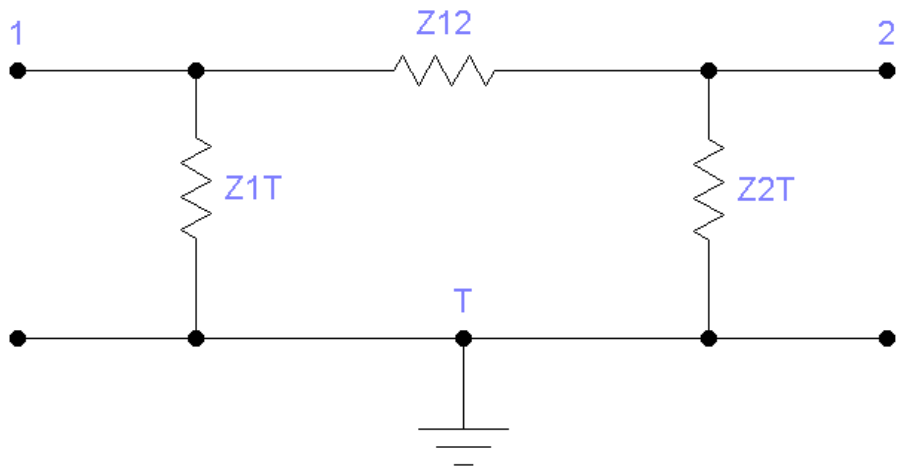

Figura 12 – Modelo π do Transformador
Fonte: Autoria própria.

Então, para simular um transformador com TAP variável é necessário inserir um transformador entre duas barras com impedância Z_{12} e dois elementos shunt capacitivos, conectados em cada barra, como mostra a Figura 13. Os valores das impedâncias nos elementos shunt são os inversos (susceptâncias) dos valores calculados de Z_{1T} e Z_{2T}, como mostrado na Figura 13.

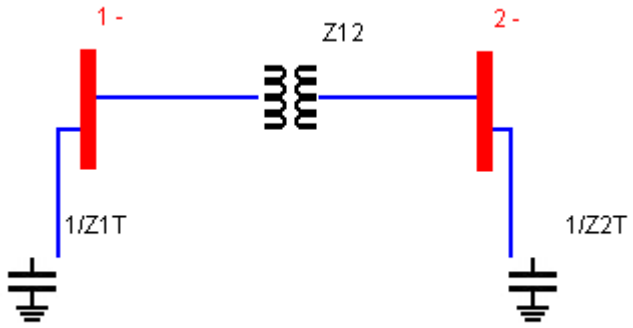

Figura 13 – Modelo π do Transformador construído no Simpot
Fonte: Autoria própria.

4.4.6. Tela e Entrada de Dados da Carga

O Sub-Menu da Carga é mostrado na Figura 14. Os valores a serem inseridos devem estar em valores por unidade (pu), calculados a partir de uma base comum para todo o sistema. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como por exemplo “Carga1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

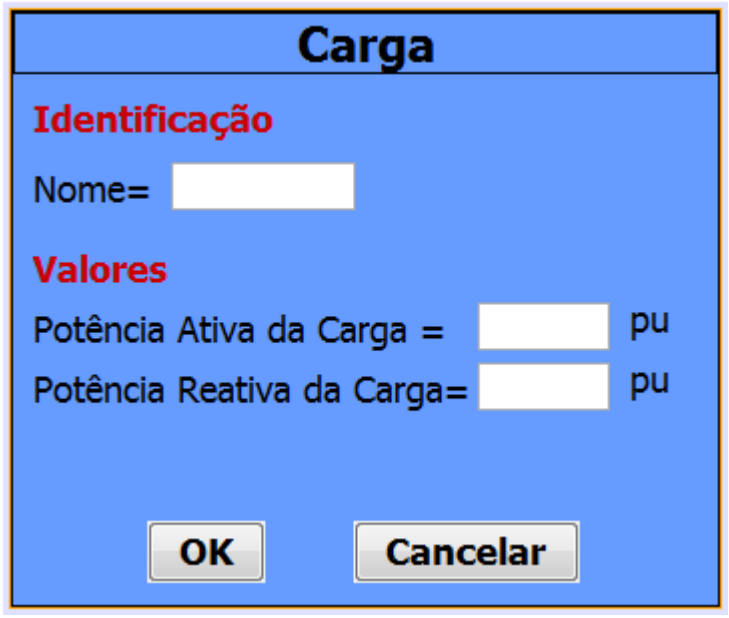

Figura 14 – Sub-menu Carga do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

A carga corresponde a uma injeção de potência negativa na barra, pois esta potência está sendo consumida pela carga conectada à barra. Por isso o valor das potências de carga devem ser negativas.

4.4.7. Tela e Entrada de Dados da Barra

O Sub-Menu Propriedades da Barra, representado pela Figura 15, mostra os tipos de barra que podem ser escolhidos. Os tipos de barra relacionam-se aos equipamentos conectados à estas barras e sua função no sistema elétrico. Foram considerados neste trabalho os principais tipos de barra:

- Barra *PV*: é uma barra de geração para a qual são especificados a potência ativa gerada e o módulo da tensão;
- Barra *PQ*: é uma barra na qual está conectada uma carga. Não possui gerador conectado à essa barra;
- Barra $V\theta$: é uma barra de geração para a qual são especificados o módulo e o ângulo da tensão, este geralmente zero. Por isso também é conhecida como barra de referência.

Deve-se ressaltar que para o programa Simpot só pode haver uma única Barra de Referência, ou seja um único $V\theta$. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como exemplo "Barra1", com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

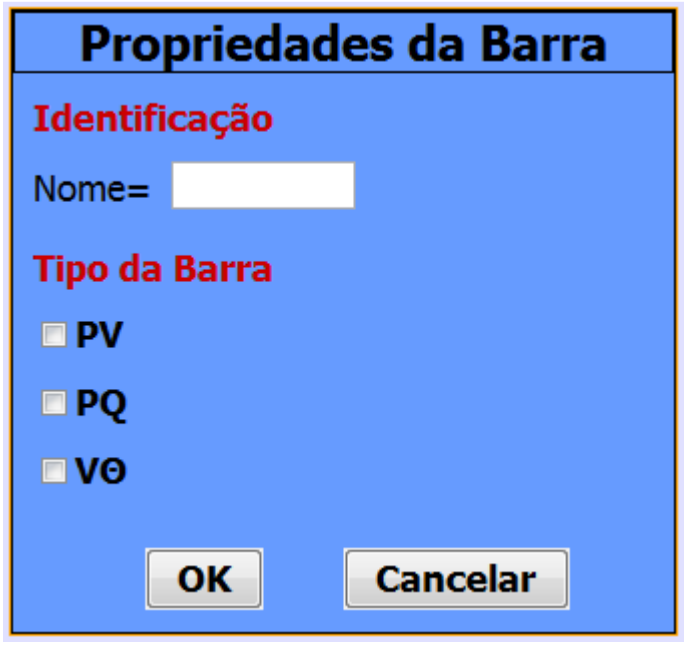

Figura 15 – Sub-menu Barra do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

4.4.8. Tela e Entrada de Dados da Linha de Transmissão

O Sub-Menu da Linha de Transmissão é mostrado na Figura 16. Os valores a serem inseridos devem estar em valores por unidade. No campo de Identificação pode-se nomear o componente, como exemplo “LT1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

Figura 16 – Sub-menu Linha de Transmissão do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

O modelo de linha de transmissão considerado no programa Simpot foi o modelo π, como está representado na Figura 16, sendo R a resistência, X a reatância e B_c a susceptância.

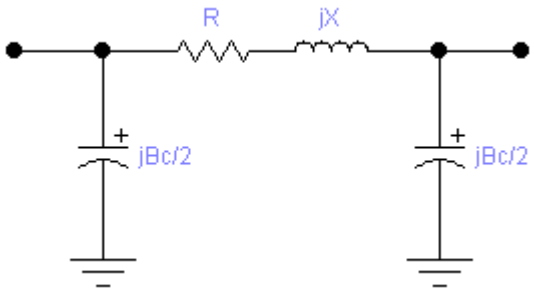

Figura 17 – Modelo π da linha de transmissão
Fonte: Autoria própria.

4.5. Saída de Dados no Simpot

A saída de dados do programa Simpot é gerada automaticamente na forma de um relatório, que só é mostrado para o usuário após a entrada de dados de uma simulação de fluxo de carga e do acionamento do botão Calcular (Figura 17).

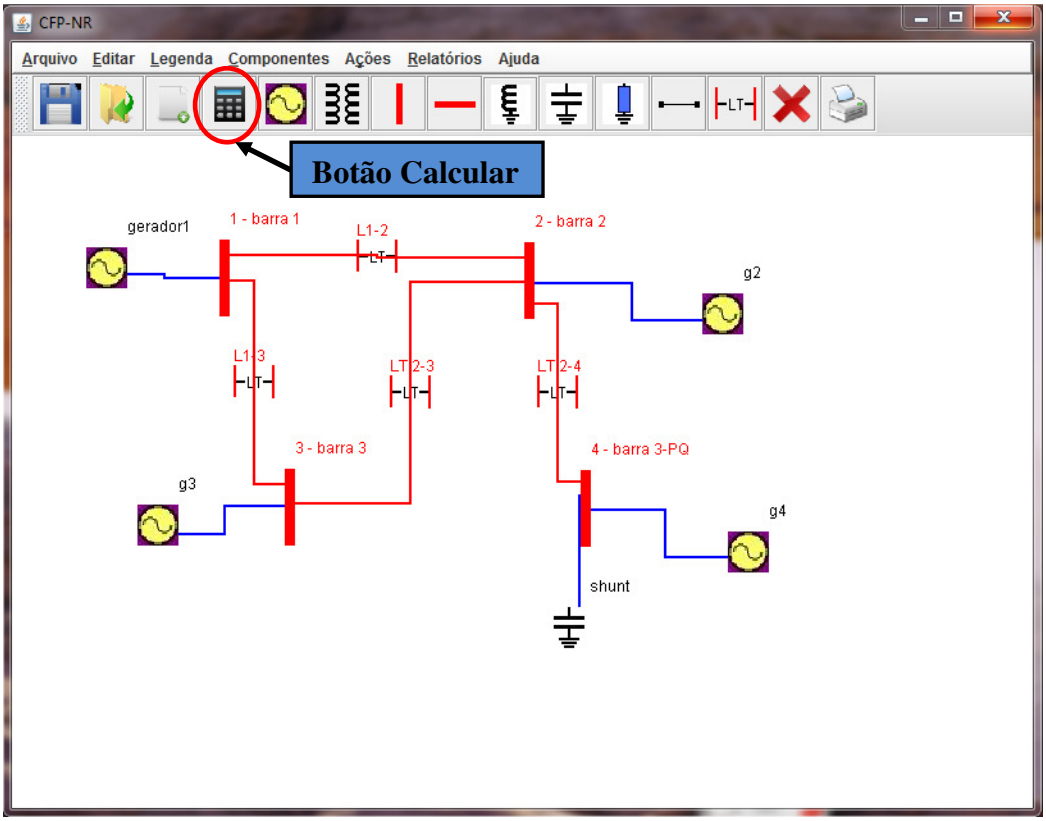

Figura 18 – Indicação do botão Calcular do Programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Ao acionar o botão Calcular será solicitado ao usuário duas informações, a primeira é o erro máximo e a segunda é o número de iterações para o cálculo do fluxo de carga, conforme mostram as Figuras 18 e 19.

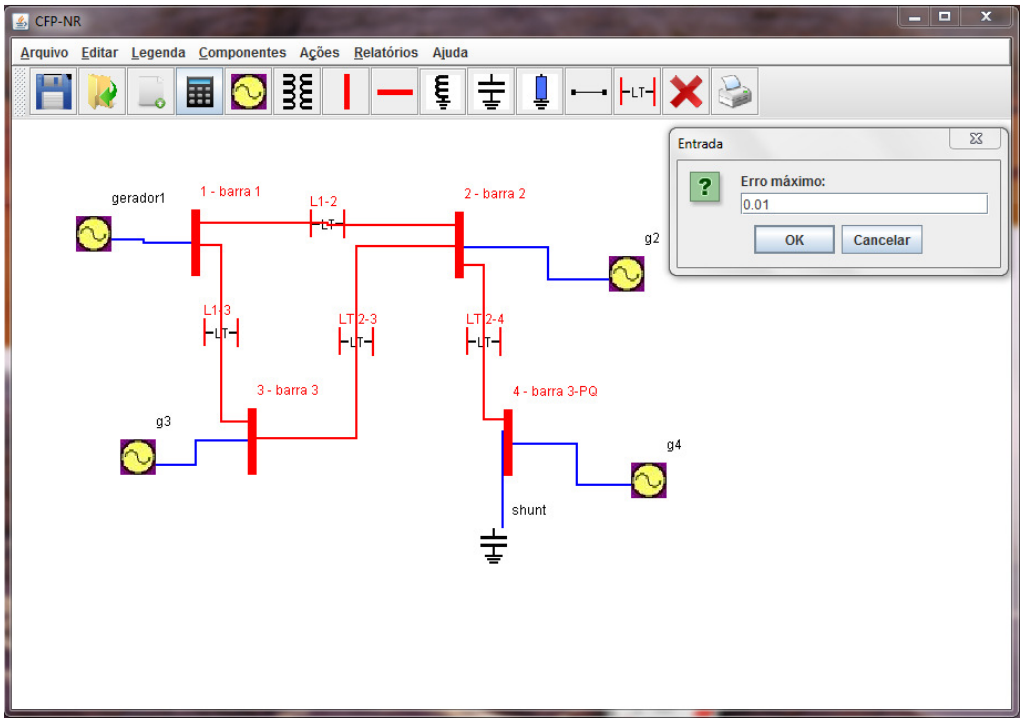

Figura 19 – Entrada do Erro Máximo no Programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

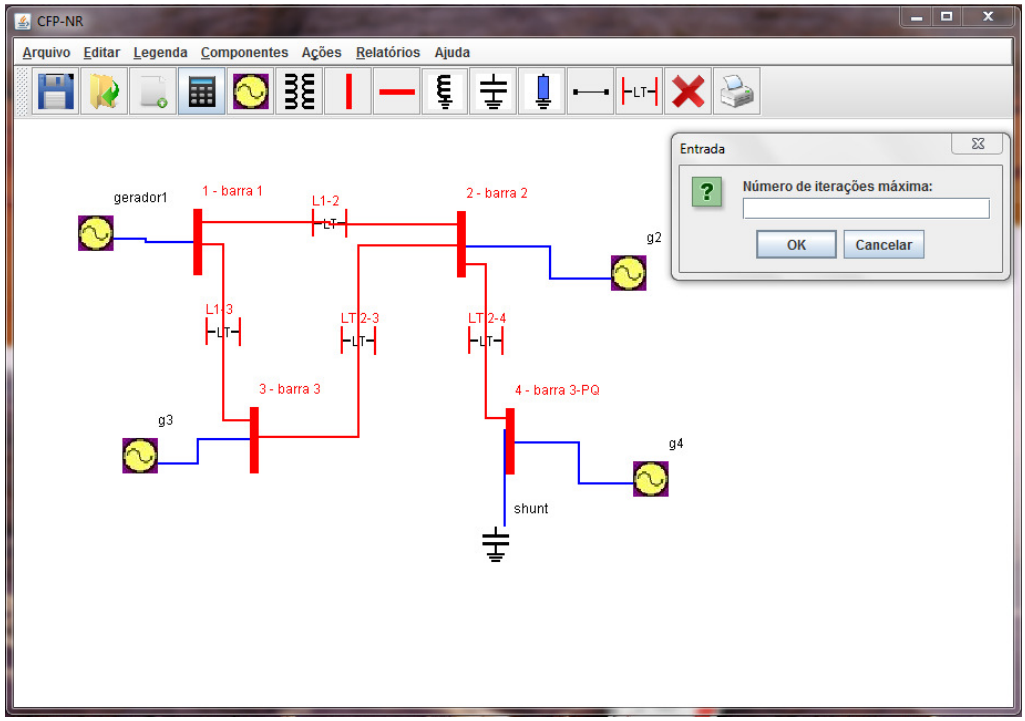

Figura 20 – Entrada do Número de Iterações Máxima no Programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Após a conclusão do cálculo, o programa Simpot gera automaticamente um relatório no formato de arquivo com extensão pdf, conforme o Apêndice B. Através deste relatório verifica-se os dados de entrada e também os dados de saída que expressam os resultados dos cálculos. O relatório de saída mostra as seguintes informações ao usuário:

- número de iterações;
- erro máximo,
- dados das barras;
- dados das linhas;
- admitância das linhas;
- valores calculados da matriz Y_{BARRA} ;
- mismatches de potências;
- iteração atual;
- maior erro;
- Jacobiana;
- deltas de módulos e ângulos das tensões;
- módulo e ângulo das tensões nas barras;
- potência nas barras;
- fluxo de potência entre barras.

4.6. Manual do Simpot

O Manual para utilização do Simpot é necessário para auxiliar a utilização do software adequadamente pelos usuários capacitados. O Manual de utilização do Simpot está em anexo neste trabalho (Apêndice A) e além disso, o Manual pode ser acessado do próprio programa Simpot através do menu Ajuda.

4.7. Conclusão

Para a utilização do programa para Simulação de Fluxo de Potência pelo método Newton-Raphson (Simpot) é necessário transformar os valores compreendidos no sistema elétrico de potência a ser desenhado em valores de mesma referência de potência e tensão expressos em pu. Este sistema elétrico a ser simulado no Simpot é inserido por meio de desenho na tela gráfica, e essa ação é facilitada pela interface amigável que o programa dispõe. Além disso, o usuário pode utilizar o Manual de utilização disponibilizado no próprio programa.

Como resultado do cálculo do fluxo de potência de um sistema elétrico simulado usando o Simpot, é disponibilizado um relatório com todas as informações pertinentes das variáveis de entrada e saída, no formato de tabelas, facilitando a rápida análise do problema.

Os resultados da simulação também são apresentados na tela gráfica com o sistema elétrico inserido pelo usuário e os valores de módulo e ângulo da tensão em cada barra, além das injeções de potência ativa e reativa na barras.

Vale dizer que o programa Simpot, durante as iterações para o cálculo do fluxo de potência, não limita os valores dos módulos das tensões nas barras ou os fluxos nas linhas de transmissão. Essas limitações não foram consideradas no algoritmo porque o programa Simpot é um software didático a ser utilizado por alunos de graduação que têm, pela primeira vez, contato com os conceitos sobre fluxo de potência. Desta forma, considerou-se que os resultados encontrados de tensão e fluxos nas linhas deveriam ser livres de limites para que o usuário do programa (o aluno) possa perceber, na própria tela do Simpot, quando ocorre a violação desses limites. Além disso, acredita-se que o exercício da busca por valores de tensão e fluxo aceitáveis (por meio de várias simulações e alterações nos valores das cargas ou da geração) proporcionará ao aluno a possibilidade de aprofundar seus conhecimentos em sistemas de potência.

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

5.1. Introdução

Após a implementação do programa Simpot com sua interface gráfica e rotina de cálculo, foram realizadas várias simulações com o objetivo de comprovar a operação correta do algoritmo de solução pelo Método de Newton–Raphson, bem como garantir a eficácia e facilidade de utilização do programa Simpot em relação à suas telas gráficas.

Este capítulo apresenta os resultados de simulações de vários circuitos de sistemas de potência de pequeno porte até 20 barras, embora o programa Simpot não tenha uma limitação em relação ao número de barras a ser inserido.

Os resultados são apresentados e comparados com simulações utilizando-se software Anarede.

5.2. Avaliação de Produtos de Software

A avaliação do software é uma investigação do seu funcionamento que visa obter os resultados de qualidade esperados.

Não há garantias de que o programa computacional funcione da forma desejada após a sua implementação, porém com a concepção planejada do software e desenvolvido por profissionais capacitados para o assunto, há uma maior facilidade em encontrar os defeitos e corrigi-los de forma a atender aos anseios.

Falhas podem ser originadas por diversos motivos. Por exemplo, a especificação pode estar errada ou incompleta, ou pode conter requisitos impossíveis de serem implementados, devido a limitações de hardware ou software. A implementação também pode estar errada ou incompleta, como um erro de um algoritmo. Portanto, uma falha é o resultado de um ou mais defeitos em algum aspecto do sistema.

Para garantir a qualidade do programa computacional, devem-se adotar as Normas Regulamentadoras, que auxiliam neste trabalho e que também dão as diretrizes para a sua validação como produto.

5.3. As Normas aplicadas à Avaliação de Produtos de Software

As normas técnicas que avaliam a qualidade do produto de um software, estão listadas abaixo (ANJOS, 2010):

- ISO/IEC 9126 – Características de Qualidade de Software;
- ISO/IEC 14598 – Guias para Avaliação de Produto de Software;
- ISO/IEC 12119 – Requisitos de Qualidade e Testes de Pacotes de Software.

Há também as versões que são traduzidas para o português, que são realizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e que podem ter códigos diferentes dos originais, produzidos e revisados pelos órgãos internacionais regulamentadores, International Organization for Standardization (ISO) e International Electrotechnical Commission (IEC) (ANJOS, 2010).

5.4. Metodologia Adotada para Simulação do Software Simpot

A metodologia para testar o software Simpot foi baseada na Norma ISO/IEC 12119, na seção 2.6 que é uma instrução documentada para o responsável pelo teste. Esta seção especifica como deve ou convém que seja testada uma função ou uma combinação de funções. Um guia de teste inclui informações detalhadas sobre as seguintes questões:

- Objetivo do teste;
- Funções a serem testadas;
- Ambiente de testes e outras condições (detalhes de configuração e trabalho preparatório);
- Dados de testes;
- Procedimento;
- Comportamento esperado do sistema.

5.5. Funções testadas

A tela principal da interface gráfica teve todas as funções testadas no ambiente de simulação com diversos exemplos de circuitos de sistemas de potência, variando a configuração e número de componentes.

As funções de arrastar componentes, ligar e carregar os parâmetros que são os dados dos problemas também foram testados.

Para testar o algoritmo de cálculo pelo método proposto, foram utilizados diversos exemplos existentes na literatura.

Os resultados dos circuitos exemplos simulados foram comparados com os cálculos, utilizando o método de Newton-Raphson e também simulados no software Anarede.

> O Anarede é o programa computacional mais utilizado no Brasil na área de sistemas elétricos de potência. É formado por um conjunto de aplicações integradas que inclui Fluxo de Potência, Equivalente de Redes, Análise de Contingências, Análise de Sensibilidade de Tensão e Fluxo e Análise de Segurança de Tensão. O programa dispõe ainda de modelo de curva de carga, modelo de bancos chaveados de capacitores e reatores para controle de tensão, modelos de equipamentos equivalentes e individualizados, algoritmo para verificação de conflito de controles e facilidades para estudos de recomposição do sistema (CEPEL, 2011).

5.6. Comprovação do funcionamento do Software Simpot

Para comprovar o funcionamento do software Simpot, foram utilizados diversos exemplos da literatura, de circuitos com duas barras, três barras, quatro barras, nove barras e vinte barras. Os circuitos apresentam variações quanto as suas configurações, por exemplo existem circuitos que apresentam transformadores e outros circuitos que não possuem transformadores.

Além disso, os dados de entrada para as simulações dos cálculos de fluxo de potência a seguir, devem ser os mesmos para todas as ferramentas de cálculos que servirão de comparação e comprovação do funcionamento do programa Simpot.

5.6.1. Sistema de Duas Barras

O primeiro circuito simulado é o exemplo 3.6 da apostila “Análise de Sistemas de Potência” (BORGES, 2010). Este é um circuito de duas barras como mostrado na Figura 21.

Os dados estão em pu em uma base comum para o sistema. O exemplo foi resolvido utilizando o Método de Newton-Raphson para comparação com os resultados obtidos com o programa Simpot. Foi considerada uma tolerância de $\varepsilon = 0{,}003$. O ângulo de referência é o ângulo da tensão na barra 1. Foi considerado o valor inicial de θ_2 igual a zero.

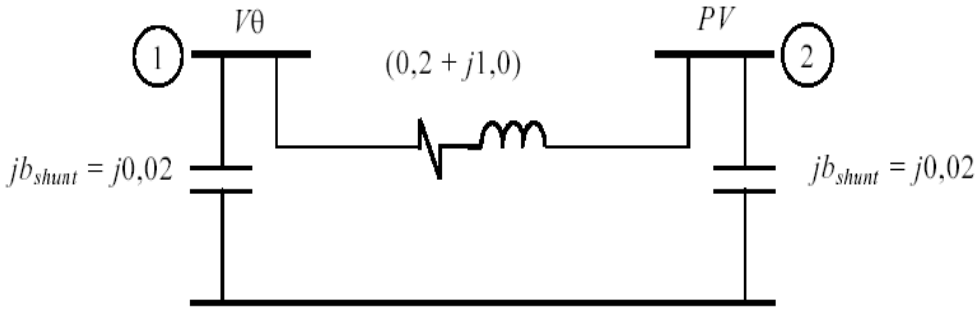

Figura 21 – Sistema de duas barras para o método de Newton-Raphson
Fonte: Borges (2010).

As Tabelas 1 e 2 fornecem respectivamente os dados referentes a matriz Barras e matriz Linha, ou seja, são os dados necessários para a simulação nos programas Anarede e Simpot.

Tabela 1 – Dados da Matriz Barras: Sistema de duas barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)	b(pu)
1	Vθ	1,0000	0,00	0,00	-	-	-
2	PV	1,0000	-	-	0,4	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Dados da Linha: Sistema de duas barras

Linha	k	m	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância (pu)	Tap
L1	1	2	0,2000	1,0000	0,02	-

Fonte: Autoria própria.

5.6.1.1. Resultados para o sistema de duas barras

Os resultados apresentados a seguir foram retirados da apostila "Análise de Sistemas de Potência" (BORGES, 2010). Os valores da matriz admitância são:

$$Y_{Barra} = G_{Barra} + jB_{Barra} \tag{5.1}$$

$$G_{Barra} = \begin{bmatrix} 0{,}19 & -0{,}19 \\ -0{,}19 & 0{,}19 \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

$$B_{Barra} = \begin{bmatrix} -0{,}94 & 0{,}96 \\ 0{,}96 & -0{,}94 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

A solução para todas as variáveis de estado e injeções de potência nas barras foram retiradas da apostila "Análise de Sistemas de Potência" (BORGES, 2010). Os valores são:

$$V_1 = 1{,}0\,pu \tag{5.4}$$

$$V_2 = 1{,}0\,pu \tag{5.5}$$

$$\theta_2 = -0{,}45\ radianos \cong -25{,}79^{\circ} \tag{5.6}$$

$$P_1 = 1{,}0\,pu \tag{5.7}$$

$$Q_1 = -7{,}89 \cdot 10^{-3}\ pu \tag{5.8}$$

$$Q_2 = 0{,}16\,pu \tag{5.9}$$

A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores apresentados da apostila "Análise de Sistemas de Potência" (BORGES, 2010).

Tabela 3 – Valores calculados para o sistema de duas barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ	1,0000	0,00	0,0000	0,4400	0,00789
2	PV	1,0000	-25,79	-0,4499	0,4000	0,1600

Fonte: Autoria própria.

Este sistema de duas barras também foi simulado no software Anarede, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Anarede são mostrados na Figura 22, que apresenta a tela do programa Anarede, e na Tabela 4.

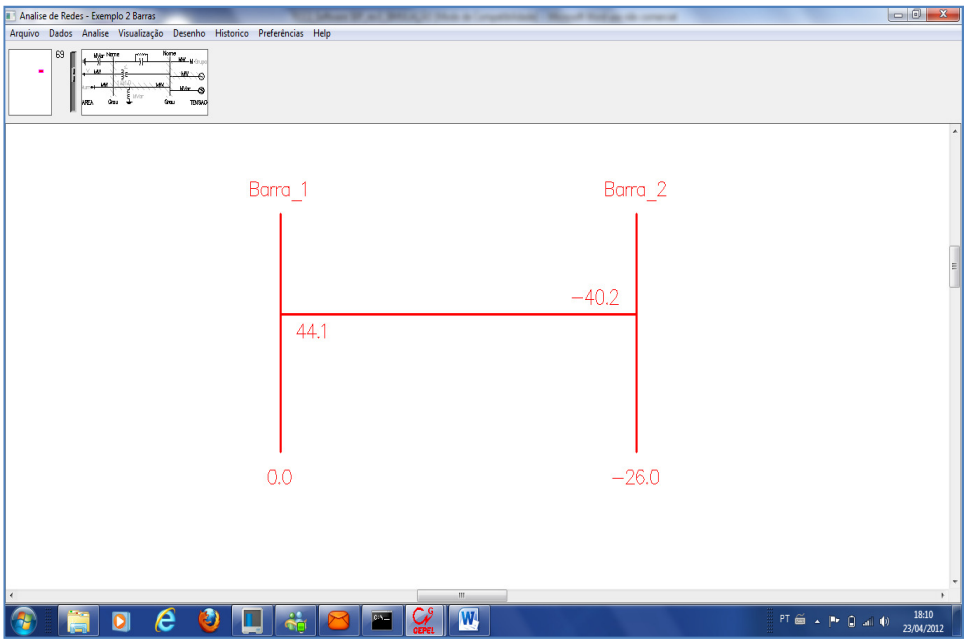

Figura 22 – Simulação no software Anarede para o sistema de duas barras
Fonte: Autoria própria

Tabela 4 – Resultados do Anarede para o sistema de duas barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ	1,0000	0,00	0,0000	0,4400	0,00789
2	PV	1,0000	-25,79	-0,4499	0,4000	0,1600

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de duas barras gerado pelo programa Anarede, está evidenciado no Apêndice C, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Este sistema de duas barras também foi simulado no programa Simpot, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Simpot são mostrados na Figura 23, que apresenta a tela do programa Simpot, e na Tabela 5.

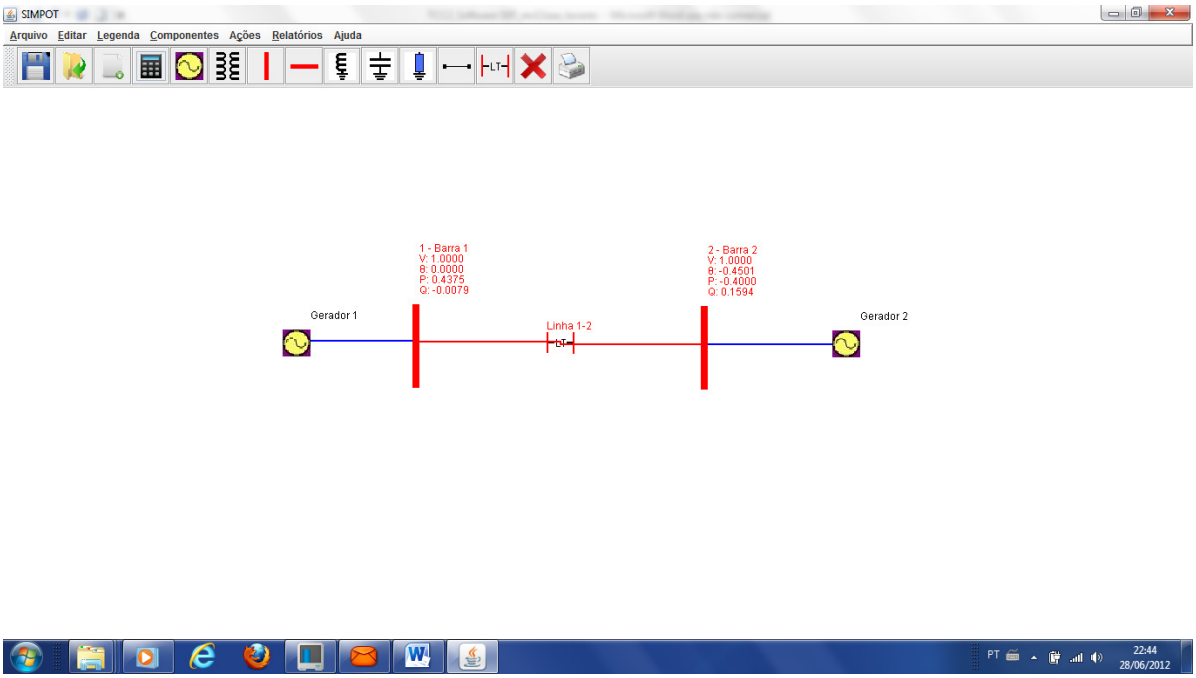

Figura 23 – Tela do Software Simpot
Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Resultados extraídos do relatório do programa Simpot para o sistema de duas barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ	1,0000	0,00	0,0000	0,4375	-0,0079
2	PV	1,0000	-25,80	-0,4501	0,4000	0,1594

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de duas barras gerado pelo programa Simpot, está evidenciado no Apêndice D, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Os resultados dos cálculos apresentados em Borges (2010) e comparados com os resultados da simulação no software Anarede e da simulação no programa Simpot, são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação entre os valores calculados em Borges (2010), Anarede e Simpot

Valores	Cálculo	Anarede	Simpot
P_1 (pu)	0,4400	0,4400	0,4375
Q_1 (pu)	0,00789	0,0080	0,0079
Q_2 (pu)	0,1600	0,1600	0,1594
θ_2 (graus)	-25,80	-25,79	-25,80

Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos pelo Simpot com os resultados do Anarede e os apresentados em Borges (2010), considerou-se o desempenho do programa Simpot como satisfatório, pois os maiores erros percentuais em módulo, encontrados entre Simpot e Borges (2010) e entre Simpot e Anarede foram respectivamente 0,57% e 1,25%. A medida que diminui-se os erros especificados nas simulações, os erros percentuais em módulo entre o Simpot e o Anarede são minimizados.

5.6.2. Sistema de três barras

O segundo circuito simulado é um exemplo da apostila "Sistemas de Energia I" (HAFFNER, 2007). Este é um circuito de três barras mostrado na Figura 24.

Os dados estão em pu em uma base comum para o sistema. O exemplo foi resolvido utilizando o Método de Newton-Raphson para comparação com os resultados obtidos com o programa Simpot. Foi considerada uma tolerância de $\varepsilon = 0{,}001$. O ângulo de referência é o ângulo da tensão na barra 2. Foram considerados os valores iniciais de θ_1 e θ_3 iguais a zero.

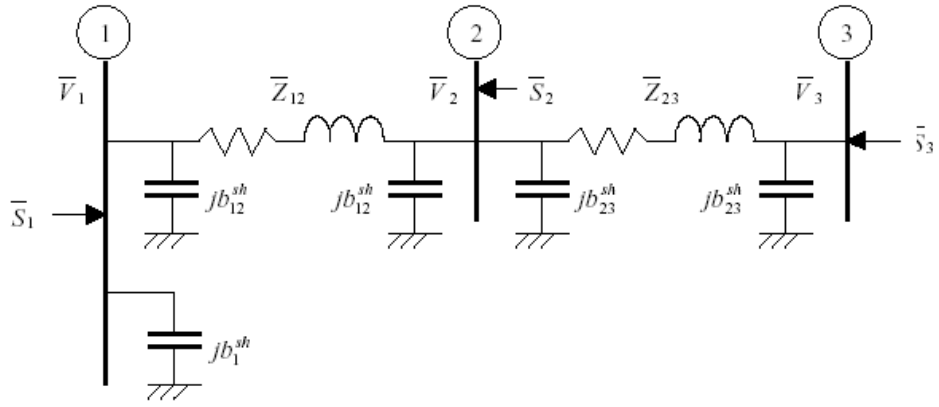

Figura 24 – Sistema de três barras para o método de Newton-Raphson
Fonte: Haffner (2007).

A Tabelas 7 e 8 fornecem respectivamente os dados referentes a matriz Barras e matriz Linha, ou seja, são os dados necessários para a simulação nos programas Anarede e Simpot.

Tabela 7 – Dados da Matriz Barras: Sistema de três barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)	b(pu)
1	PQ	-	-	-	-0,1500	0,0500	0,0500
2	Vθ	1,0000	0,00	0,00	-	-	-
3	PV	1,0000	-	-	0,2000	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Dados das Linhas: Sistema de três barras

Linha	k	m	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância (pu)	Tap
L1	1	2	0,030	0,30	0,020	-
L2	2	3	0,050	0,80	0,010	-

Fonte: Autoria própria.

5.6.2.1. Resultados para o Sistema de 3 barras

Os resultados apresentados a seguir foram retirados da apostila "Sistemas de Energia I" (HAFFNER, 2007). Os valores da matriz admitância são:

$$Y_{Barra} = G_{Barra} + jB_{Barra} \tag{5.10}$$

$$G_{Barra} = \begin{bmatrix} 0,33 & -0,33 & 0 \\ -0,33 & 0,4078 & -0,0778 \\ 0 & -0,0778 & 0,0778 \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

$$B_{Barra} = \begin{bmatrix} -3,2303 & 3,3003 & 0 \\ 3,3003 & -4,5154 & 1,2451 \\ 0 & 1,2451 & -1,2351 \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

A solução para todas as variáveis de estado e injeções de potência nas barras foram retiradas da apostila "Sistemas de Energia I" (HAFFNER, 2007). Os valores são:

$$V_1 = 1,0307 pu \tag{5.13}$$

$$\theta_1 = -0,047\ radianos \cong -2,71º \tag{5.14}$$

$$\theta_3 = -0,16\ radianos \cong 9,2º \tag{5.15}$$

$$P_2 = -0,0469 pu \tag{5.16}$$

$$Q_1 = -0,1152 pu \tag{5.17}$$

$$Q_2 = -0,0064 pu \tag{5.18}$$

A Tabela 9 apresenta um resumo dos valores apresentados da apostila "Sistemas de Energia I" (HAFFNER, 2007).

Tabela 9 – Valores calculados para o sistema de três barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	PQ	1,0307	-2,71	-0,0470	-0,1500	0,0500
2	Vθ	1,0000	0,00	0,0000	-0,0469	-0,1152
3	PV	1,0000	9,20	0,0160	0,2000	-0,0064

Fonte: Autoria própria.

Este sistema de três barras também foi simulado no software Anarede, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Anarede são mostrados na Figura 25, que apresenta a tela do programa Anarede, e na Tabela 10.

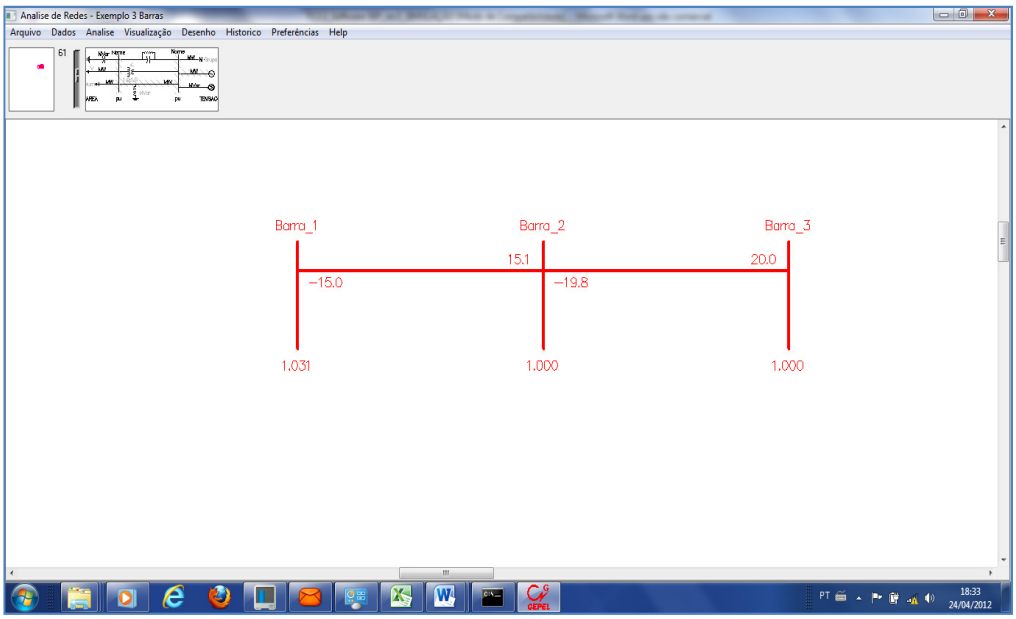

Figura 25 – Simulação no software Anarede para o sistema de três barras
Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Resultados do Anarede para o sistema de três barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	PQ	1,0310	-2,70	-0,0470	-0,1500	0,0500
2	Vθ	1,0000	0,00	0,0000	-0,0047	-0,1150
3	PV	1,0000	9,20	0,0160	0,2000	-0,0060

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de três barras gerado pelo programa Anarede, está evidenciado no Apêndice E, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Este sistema de três barras também foi simulado no programa Simpot, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Simpot são mostrados na Figura 26, que apresenta a tela do programa Simpot, e na Tabela 11.

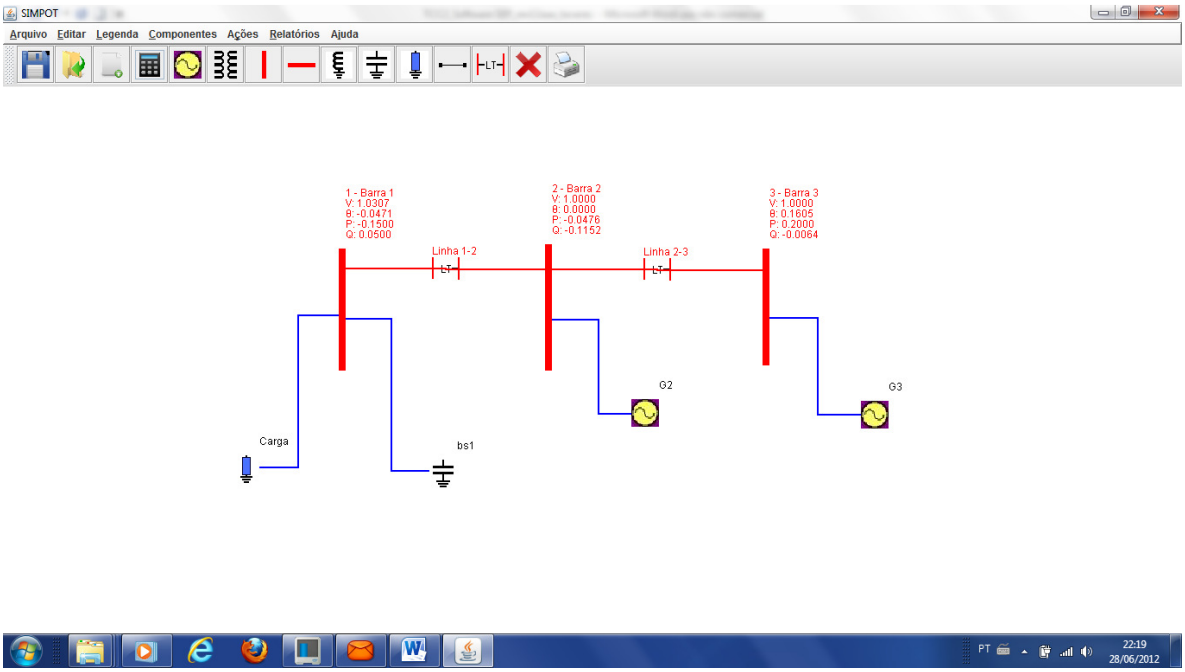

Figura 26 – Tela do Software Simpot
Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 – Resultados extraídos do relatório do programa Simpot para o sistema de três barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	PQ	1,0307	-2,70	-0,0471	-0,1500	0,0500
2	Vθ	1,0000	0,00	0,000	-0,0476	-0,1152
3	PV	1,0000	9,20	0,1605	0,2000	-0,0064

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de três barras gerado pelo programa Simpot, está evidenciado no Apêndice F, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Os resultados dos cálculos apresentados em Haffner (2007) e comparados com os resultados da simulação no software Anarede e da simulação no programa Simpot, são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação entre os valores calculados em Haffner (2007), Anarede e Simpot

Valores	Cálculo	Anarede	Simpot
V_1 (pu)	1,0307	1,0310	1,0307
θ_1 (graus)	-2,71	-2,70	-2,70
P_2 (pu)	-0,0469	-0,0047	-0,0476
Q_2 (pu)	-0,1152	-0,1150	-0,1152
θ_3 (graus)	9,20	9,20	9,20
Q_3 (pu)	-0,0064	-0,0060	-0,0064

Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos pelo Simpot com os resultados do Anarede e os apresentados em Haffner (2007), considerou-se o desempenho do programa Simpot como satisfatório, pois os maiores erros percentuais em módulo, encontrados entre Simpot e Hafner (2007) e entre Simpot e Anarede foram respectivamente 1,49% e 6,67%. A medida que diminui-se os erros especificados nas simulações, os erros percentuais em módulo entre o Simpot e o Anarede são minimizados.

5.6.3. Sistema de quatro barras

O terceiro circuito simulado é um exemplo da apostila "Sistemas de Energia I" (HAFFNER, 2007). Este é um circuito de quatro barras como mostrado na Figura 27.

Os dados estão em pu em uma base comum para o sistema. O exemplo foi resolvido utilizando o Método de Newton-Raphson para comparação com os resultados obtidos com o programa Simpot. Foi considerada uma tolerância de $\varepsilon = 0{,}001$. O ângulo de referência é o ângulo da tensão na barra 2. Foram considerados os valores iniciais dos demais ângulos das tensões nas barras são iguais à zero.

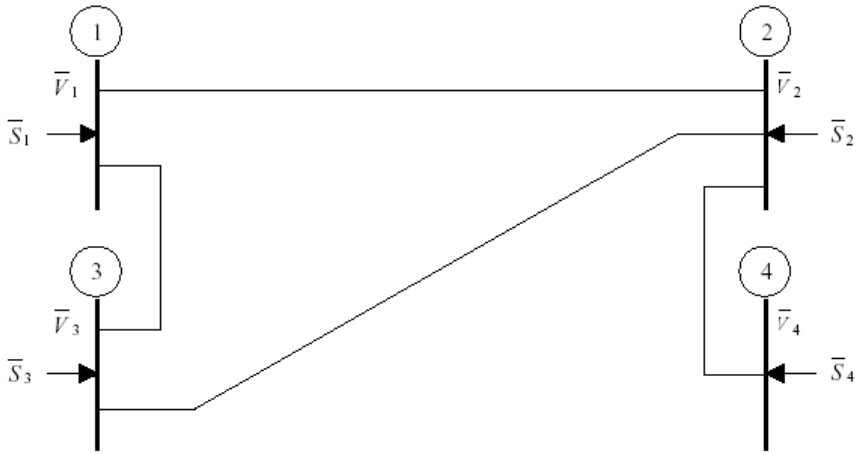

Figura 27 – Sistema de quatro barras para o método de Newton-Raphson
Fonte: Haffner (2007).

A Tabelas 13 e 14 fornecem respectivamente os dados referentes a matriz Barras e matriz Linha, ou seja, são os dados necessários para a simulação nos programas Anarede e Simpot.

Tabela 13 – Dados da Matriz Barras: Sistema de quatro barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)	b(pu)
1	PV	1,0500	-	-	0,2000	-	-
2	Vθ	0,9500	0,00	0,0000	-	-	-
3	PQ	-	-	-	-0,3000	-0,1000	-
4	PQ	-	-	-	-0,3000	-0,4000	0,2000

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Dados das Linhas: Sistema de quatro barras

Linha	k	m	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância (pu)	Tap
L1	1	2	0,0200	0,1000	0,1800	-
L2	1	3	0,0100	0,0500	-	-
L4	2	3	0,0400	0,2000	0,0900	-
L3	2	4	0,0000	0,0500	-	-

Fonte: Autoria própria.

5.6.3.1. Resultados dos cálculos do Sistema de quatro barras

Os resultados apresentados a seguir foram retirados da apostila "Sistemas de Energia I" (HAFFNER, 2007). Os valores da matriz admitância são:

$$Y_{Barra} = G_{Barra} + jB_{Barra} \tag{5.19}$$

$$G_{Barra} = \begin{bmatrix} 5{,}7693 & -1{,}9231 & -3{,}8462 & 0 \\ -1{,}9231 & 2{,}8846 & -0{,}9615 & 0 \\ -3{,}8462 & -0{,}9615 & 4{,}8077 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

$$B_{Barra} = \begin{bmatrix} 28{,}6662 & 9{,}6154 & 19{,}2308 & 0 \\ 9{,}6154 & -34{,}1531 & 4{,}8077 & 20 \\ 19{,}2308 & 4{,}8077 & -23{,}9485 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & -19{,}80 \end{bmatrix} \tag{5.21}$$

A Tabela 15 apresenta um resumo dos resultados obtidos pelos cálculos por Haffner (2007), para todas as variáveis de estado e injeções de potência nas barras.

Tabela 15 – Valores calculados para o sistema de três barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	PV	-	-3,13	-0,0550	-	1,3858
2	Vθ	-	-	-	0,8356	-1,4129
3	PQ	1,0272	-3,20	-0,0558	-	-
4	PQ	0,9379	-0,96	-0,0167	-	-

Fonte: Autoria própria.

Este sistema de quatro barras também foi simulado no software Anarede, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Anarede são mostrados na Figura 28, que apresenta a tela do programa Anarede, e na Tabela 16.

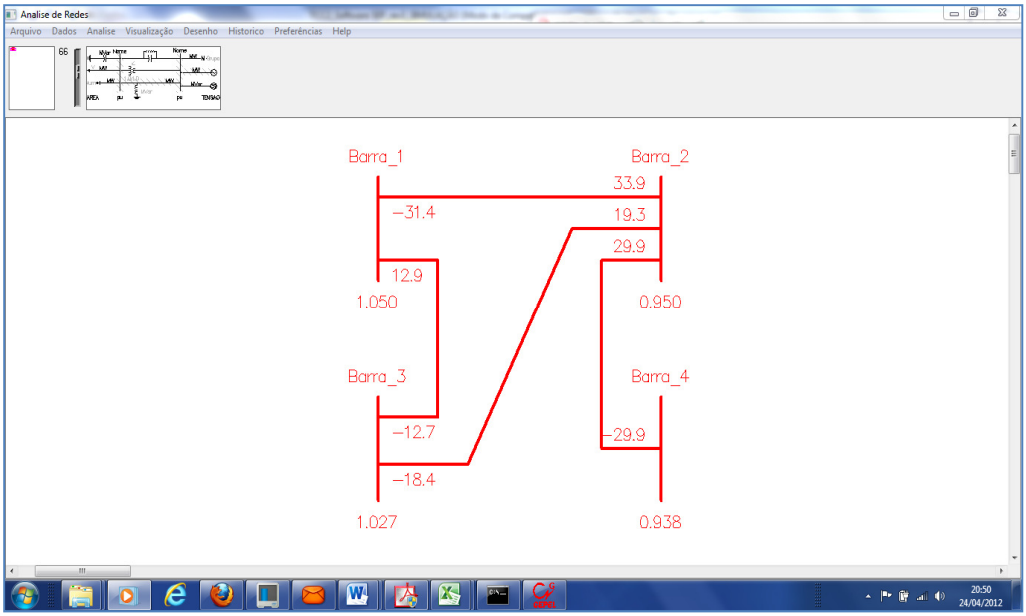

Figura 28 – Simulação no software Anarede para o sistema de quatro barras
Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 – Resultados do Anarede para o sistema de quatro barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	PV	1,05	-3,10	-0,0541	0,2000	1,3860
2	Vθ	0,95	0,0	0,0	0,8360	-1,4130
3	PQ	1,0270	-3,20	-0,0558	-0,3000	-0,1000
4	PQ	0,9380	-1,00	-0,0174	-0,3000	-0,4000

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de quatro barras gerado pelo programa Anarede, está evidenciado no Apêndice G, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Este sistema de quatro barras também foi simulado no programa Simpot, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Simpot são mostrados na Figura 29, que apresenta a tela do programa Simpot, e na Tabela 17.

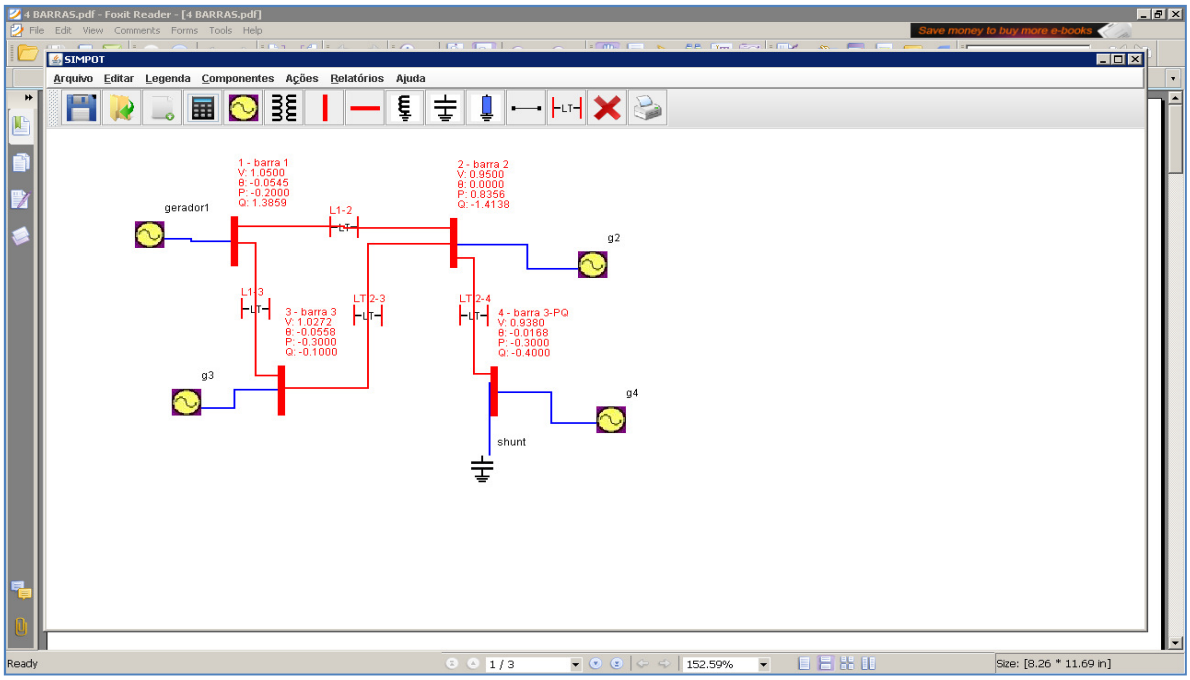

Figura 29 – Tela do Software Simpot
Fonte: Autoria própria.

Tabela 17 – Resultados extraídos do relatório do programa Simpot para o sistema de 4 barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	PV	1,0500	-3,12	-0,0544	0,2000	1,3860
2	Vθ	0,9500	0,00	0,0000	0,8360	-1,4140
3	PQ	1,0280	-3,21	-0,0560	-0,3000	-0,1000
4	PQ	0,9420	-0,96	-0,0159	-0,3000	-0,4000

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de quatro barras gerado pelo programa Simpot, está evidenciado no Apêndice H, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Os resultados dos cálculos apresentados em Haffner (2007) e comparados com os resultados da simulação no software Anarede e da simulação no programa Simpot, são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Comparação entre os valores calculados em Haffner (2007), Anarede e Simpot

Valores	Cálculo	Anarede	Simpot
Q_1 (pu)	1,3858	1,386	1,3859
θ_1 (graus)	-3,13	-3,10	-3,12
P_2 (pu)	0,8356	0,8360	0,8356
Q_2 (pu)	-1,4129	-1,4130	-1,4138
V_3 (pu)	1,0272	1,0270	1,0280
θ_3 (graus)	-3,20	-3,20	-3,21
V_4 (pu)	0,9379	0,9380	0,9417
θ_4 (graus)	-0,96	-1,00	-0,96

Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos pelo Simpot com os resultados do Anarede e os apresentados em Haffner (2007), considerou-se o desempenho do programa Simpot como satisfatório, pois os maiores erros percentuais em módulo, encontrados entre Simpot e Hafner (2007) e entre Simpot e Anarede foram respectivamente 0,41% e 4,00%. A medida que diminui-se os erros especificados nas simulações, os erros absolutos entre o Simpot e o Anarede são minimizados.

5.6.4. Sistema de nove barras

O quarto circuito simulado é o exemplo 7.1 apresentado no manual do usuário do software Simulight. Este é um circuito de nove barras como mostrado na Figura 30.

Os dados estão em pu em uma base comum para o sistema. O exemplo foi resolvido utilizando o Método de Newton-Raphson para comparação com os resultados obtidos com o programa Simpot. Foi considerada uma tolerância de $\varepsilon = 0{,}01$. O ângulo de referência é o ângulo da tensão na barra 1. Foram considerados os valores iniciais dos demais ângulos das tensões nas barras são iguais à zero.

Não são apresentados os cálculos do exemplo 7.1 pertencente ao manual do usuário do software Simulight.

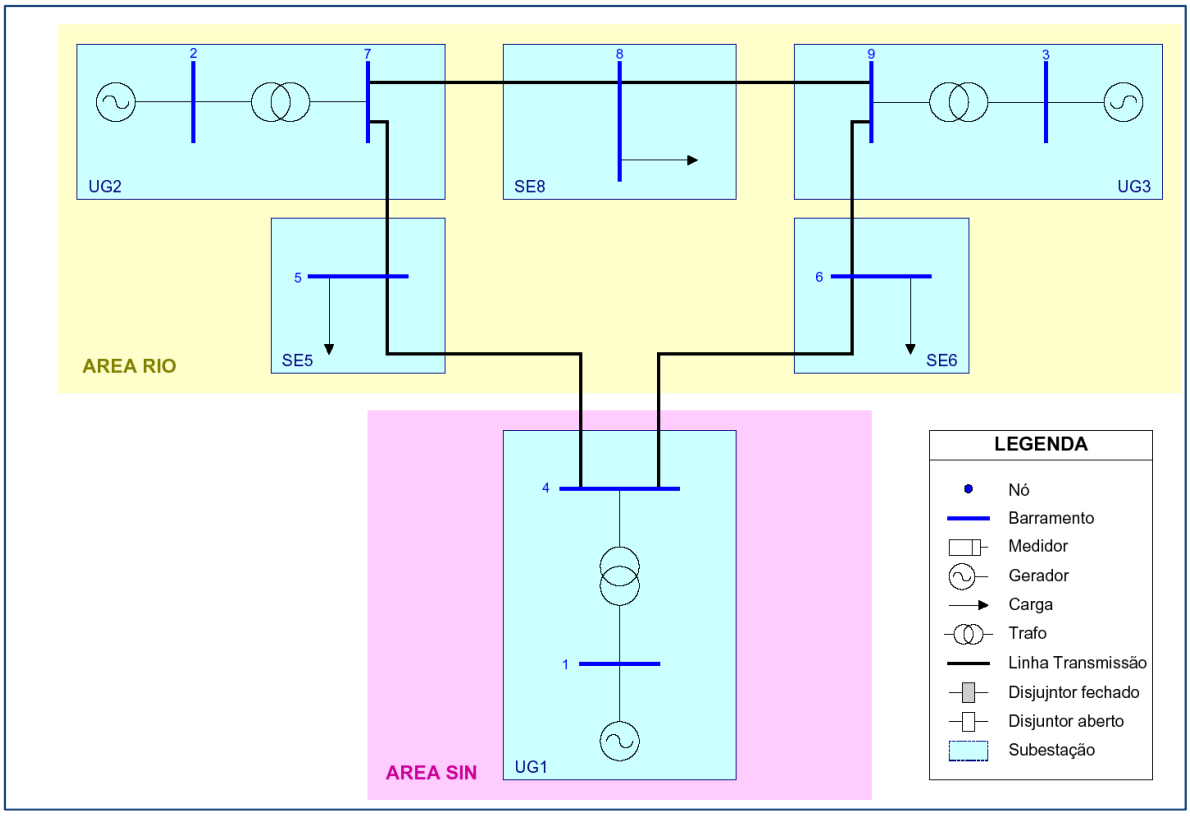

Figura 30 – Sistema de nove barras para o método de Newton-Raphson
Fonte: Escalante (2011).

As Tabelas 19 e 20 fornecem respectivamente os dados referentes a matriz Barras e matriz Linha, ou seja, são os dados necessários para a simulação nos programas Anarede e Simpot.

Tabela 19 – Dados da Matriz Barras: Sistema de nove barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)	b(pu)
1	Vθ	1,04	0	0			
2	PV	1,025			1,6300		
3	PV	1,025			0,8500		
4	PQ				0,0000	0,0000	0,00
5	PQ				-1,2500	0,5000	0,00
6	PQ				-0,3000	0,0000	
7	PQ				0,0000	0,0000	0,00
8	PQ				-1,0000	0,3500	0,00
9	PQ				0,0000	0,0000	0,00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 20 – Dados das Linhas: Sistema de nove barras

Linha	k	m	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância (pu)	Tap
L1	1	4	0,0000	0,0576	0,000	1,00
L2	2	7	0,0000	0,0625	0,000	1,00
L3	3	9	0,0000	0,0586	0,000	1,00
L4	4	5	0,0100	0,0850	0,176	
L5	4	6	0,0170	0,0920	0,158	
L6	5	7	0,0320	0,1610	0,306	
L7	6	9	0,0390	0,1700	0,358	
L8	7	8	0,0085	0,0720	0,149	
L9	8	9	0,0119	0,1008	0,209	

Fonte: Autoria própria.

5.6.4.1. Resultados para o sistema de nove barras

A Tabela 21 e a Figura 31 apresentam os valores das variáveis de estado e injeções de potência ativa e reativa nas barras do exemplo 7.1 apresentado no manual do usuário do software Simulight.

Tabela 21 – Solução do fluxo de potência para o sistema de nove barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ				0,7160	0,2710
2	PV		9,28	0,1619	1,6300	0,0660
3	PV		4,67	0,0815	0,8500	-0,1090
4	PQ	1,0260	-2,22	-0,0387	0,0000	0,0000
5	PQ	0,9960	-4,00	-0,0698	1,2500	0,5000
6	PQ	1,0130	-3,69	-0,0644	0,3000	0,0000
7	PQ	1,0260	3,72	0,0649	0,0000	0,0000
8	PQ	1,0160	0,73	0,0127	1,0000	0,3500
9	PQ	1,0320	1,97	0,0344	0,000	0,0000

Fonte: Escalante (2011).

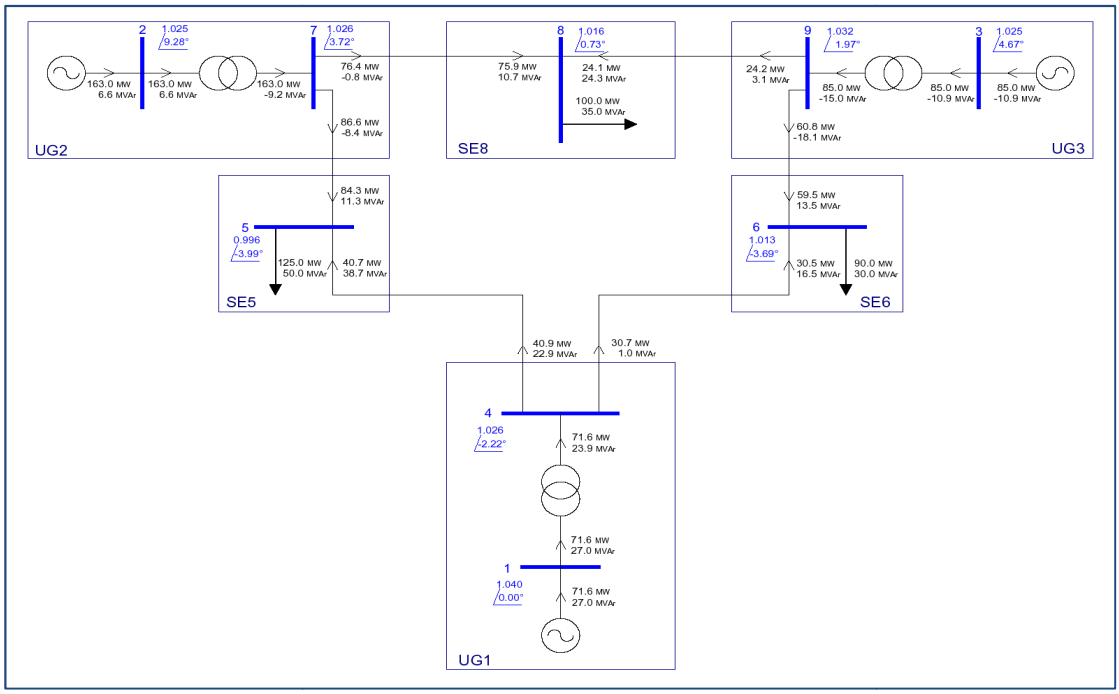

Figura 31 – Simulação no software Simulight para o sistema de nove barras
Fonte: Escalante (2011).

Este sistema nove barras também foi simulado no software Anarede, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Anarede são mostrados na Figura 32, que apresenta a tela do programa Anarede, e na Tabela 22.

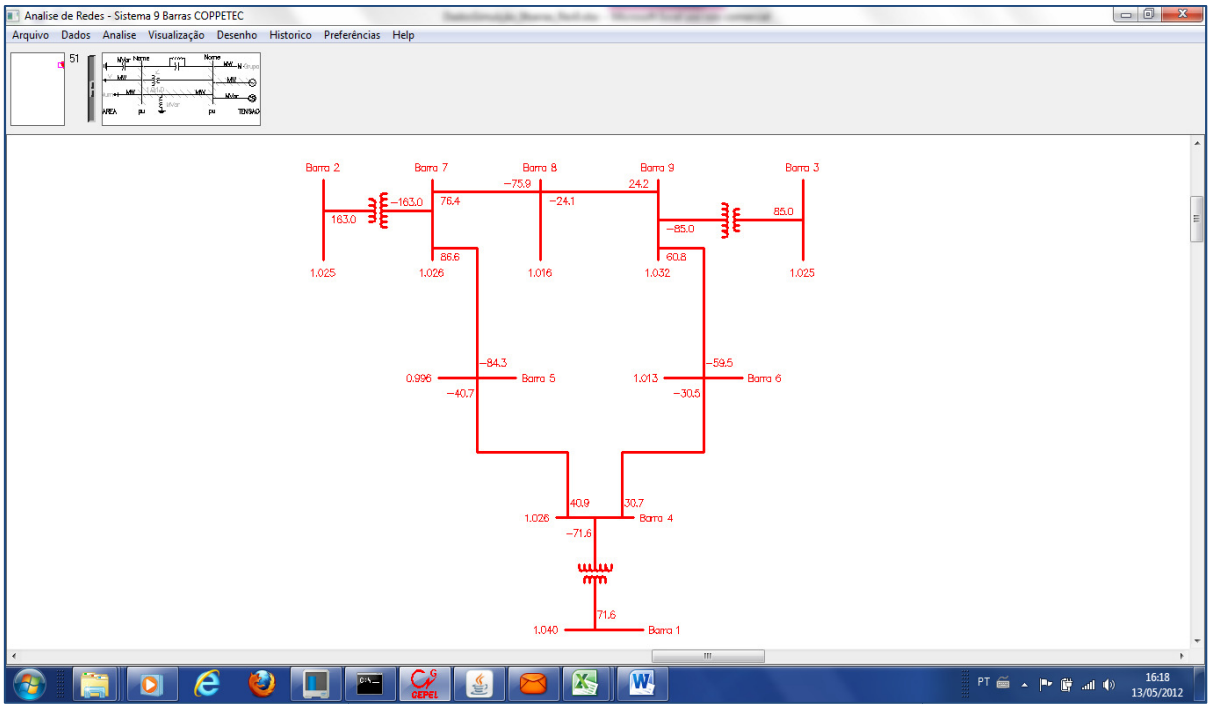

Figura 32 – Simulação no software Anarede para o sistema de nove barras
Fonte: Autoria própria

Tabela 22 – Resultados do Anarede para o sistema de nove barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ				0,7160	0,2710
2	PV		9,30	0,1622		0,0670
3	PV		4,70	0,0820		-0,1090
4	PQ	1,0260	-2,20	-0,0384		
5	PQ	0,9960	-4,00	-0,0698		
6	PQ	1,0130	-3,70	-0,0645		
7	PQ	1,0260	3,70	0,0645		
8	PQ	1,0160	0,70	0,0122		
9	PQ	1,0320	2,00	0,0349		

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de nove barras gerado pelo programa Anarede, está evidenciado no Apêndice I, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Este sistema de nove barras também foi simulado no software Simpot, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Simpot são mostrados na Figura 33, que apresenta a tela do programa Simpot, e na Tabela 23.

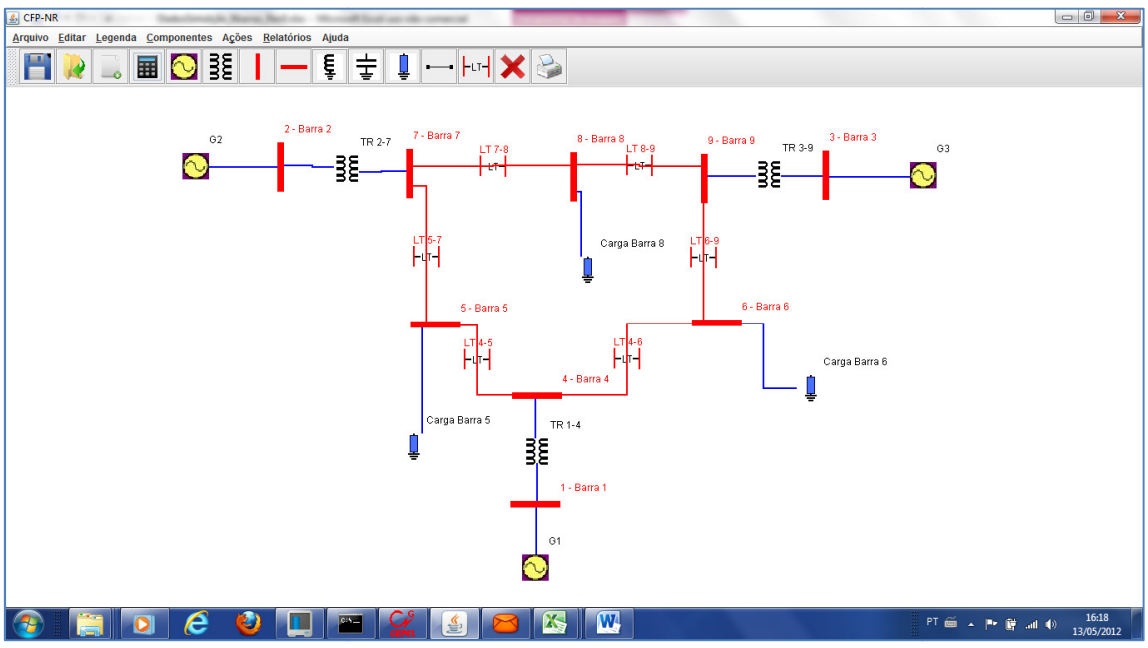

Figura 33 – Tela do Software Simpot
Fonte: Autoria própria

Tabela 23 – Resultados extraídos do relatório do programa Simpot para o sistema de 9 barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ				0,7169	0,2705
2	PV		9,26	0,1615		0,0670
3	PV		4,67	0,0815		-0,1084
4	PQ	1,0260	-2,20	-0,0384		
5	PQ	0,9960	-3,99	-0,0696		
6	PQ	1,0130	-3,69	-0,0644		
7	PQ	1,0260	3,72	0,0649		
8	PQ	1,0160	0,72	0,0126		
9	PQ	1,0320	1,96	0,0342		

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de 9 barras gerado pelo programa Simpot, está evidenciado no Apêndice J, pemitindo uma melhor análise dos resultados.

Os resultados dos cálculos apresentados no exemplo 7.1 do manual do usuário do software Simulight e comparados com os resultados da simulação no software Anarede e da simulação no programa Simpot, são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 – Comparação entre os valores calculados no Simulight, Anarede e Simpot

Valores	Simulight	Anarede	Simpot
P_1 (pu)	0,7160	0,7160	0,7169
Q_1 (pu)	0,2710	0,2710	0,2705
θ_2 (graus)	9,28	9,30	9,26
Q_2 (pu)	0,0660	0,0670	0,0670
θ_3 (graus)	4,67	4,70	4,67
Q_3 (pu)	-0,1090	-0,1090	-0,1084
V_4 (graus)	1,0260	1,0260	1,0260
θ_4 (graus)	-2,22	-2,20	-2,20
V_5 (graus)	0,9960	0,9960	0,9960
θ_5 (graus)	-4,00	-4,00	-3,99
V_6 (graus)	1,0130	1,0130	1,0130
θ_6 (graus)	-3,69	-3,70	-3,69
V_7 (graus)	1,0260	1,0260	1,0260

θ_7 (graus)	3,72	3,70	3,72
V_8 (graus)	1,0160	1,0160	1,0160
θ_8 (graus)	0,73	0,70	0,72
V_9 (graus)	1,0320	1,0320	1,0320
θ_9 (graus)	1,97	2,00	1,96

Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos pelo Simpot com os resultados do Anarede e os apresentados no exemplo 7.1 do manual do usuário do software Simulight, considerou-se o desempenho do programa Simpot como satisfatório, pois os maiores erros percentuais em módulo, encontrados entre Simpot e Simulight e entre Simpot e Anarede foram respectivamente 1,52% e 2,86%. A medida que diminui-se os erros especificados nas simulações, os erros absolutos entre o Simpot e o Anarede são minimizados.

5.6.5. Sistema de vinte barras

O quinto circuito simulado é apresentado em Costa (2000). Este é um circuito de vinte barras como mostrado na Figura 34.

Os dados estão em pu em uma base comum para o sistema. Foi considerada uma tolerância de $\varepsilon = 0{,}001$. O ângulo de referência é o ângulo da tensão na barra 1. Foram considerados os valores iniciais dos demais ângulos das tensões nas barras são iguais à zero. Os cálculos não são apresentados em Costa (2000), tem-se apenas a solução do fluxo de potência. Os resultados do programa Simpot são comparados com essa solução.

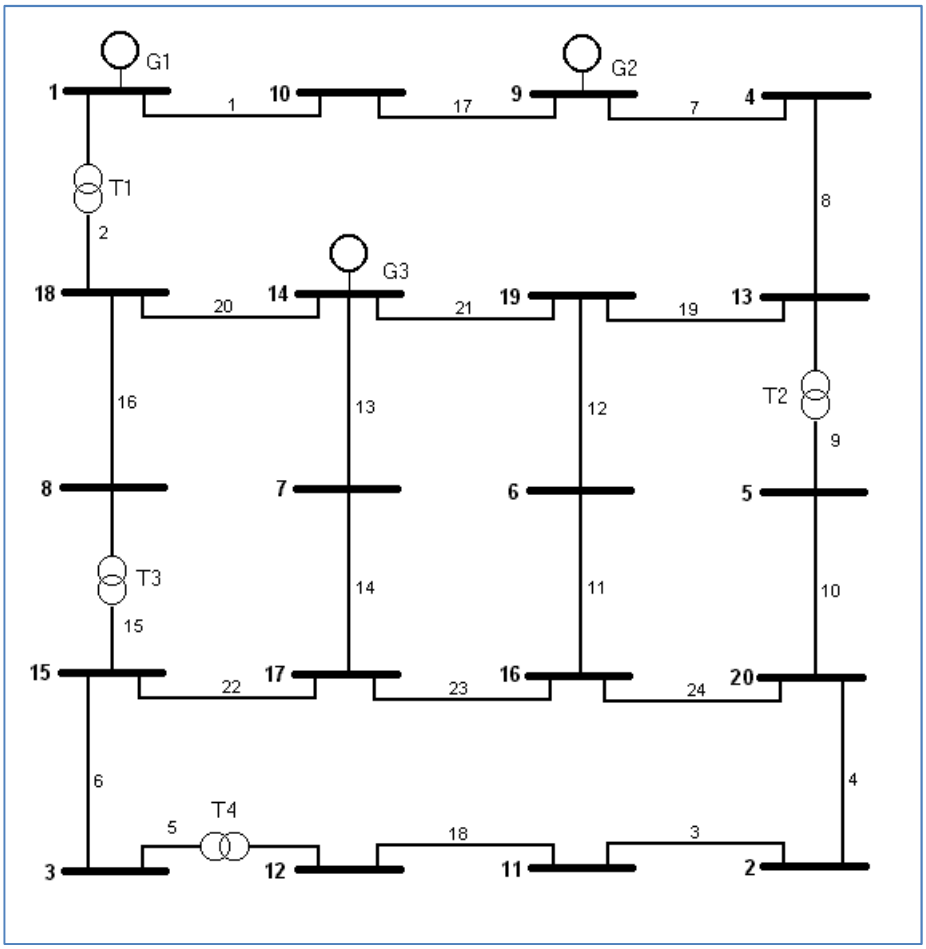

Figura 34 – Sistema de 20 barras para o método de Newton-Raphson
Fonte: Costa (2000).

As Tabelas 25 e 26 fornecem respectivamente os dados referentes a matriz Barras e matriz Linha, ou seja, são os dados necessários para a simulação nos programas Anarede e Simpot.

Tabela 25 – Dados da Matriz Barras: Sistema de 20 barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)	b(pu)
1	Vθ	1,0500	0,00	0,0000			
2	PQ				-1,0000	0,9540	
3	PQ				0,0000	0,0000	
4	PQ				0,0000	-0,1000	
5	PQ				0,0000	-0,1000	
6	PQ				-1,0000	-0,2000	
7	PQ				0,0000	0,1000	
8	PQ				0,0000	-0,2000	
9	PV	1,0450			1,0000		
10	PQ				0,0000	0,0000	
11	PQ				0,0000	0,0000	
12	PQ				0,0000	0,0000	
13	PQ				0,0000	0,0000	
14	PV	1,0400			1,0000		
15	PQ				0,0000	0,0000	
16	PQ				-0,5000	0,2000	
17	PQ				0,0000	0,0000	
18	PQ				0,0000	0,0000	
19	PQ				0,0000	0,0000	
20	PQ				-0,5000	0,2000	

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26 – Dados da Linha: Sistema de 20 barras

Linha	k	m	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância (pu)	Tap
1	1	10	0,019977	0,069999	0.00	
2	1	18	0.00	0,090009	0.00	1
3	2	11	0,070156	0,200125	0.05	
4	2	20	0,019976	0,079972	0.02	
5	3	12	0.00	0,120048	0.00	1
6	3	15	0,019952	0,099968	0.03	
7	4	9	0,030005	0,100053	0.03	
8	4	13	0,01001	0,049998	0.01	
9	5	13	0.00	0,149925	0.00	1
10	5	20	0,019952	0,099968	0.04	
11	6	16	0,01001	0,049998	0.02	
12	6	19	0,019972	0,11998	0.03	
13	7	14	0,029863	0,200041	0.05	
14	7	17	0,019972	0,11998	0.04	
15	8	15	0.00	0,08	0.00	1
16	8	18	0,029958	0,150024	0.03	
17	9	10	0,01001	0,049998	0.01	
18	11	12	0,019977	0,069999	0.02	
19	13	19	0,030005	0,100053	0.03	
20	14	18	0,030012	0,120048	0.04	
21	14	19	0,019976	0,079972	0.02	
22	15	17	0,039904	0,199936	0.05	
23	16	17	0,030012	0,120048	0.04	
24	16	20	0,040054	0,150082	0.04	

Fonte: Autoria própria.

5.6.5.1. Resultados para o sistema de 20 barras

A Tabela 27 apresenta a solução do fluxo de potência descrita em Costa (2000), com os valores das variáveis de estado e injeções de potência ativa e reativa nas barras.

Tabela 27 – Solução do fluxo de potência para o sistema de 20 barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ	1,0500	0,00	0,00	1,1850	0,1670
2	PQ	0,9540	-25,25	-0,4405	-1,0000	-0,1000
3	PQ	0,9940	-15,48	-0,2700	0,0000	0,0000
4	PQ	0,9990	-6,66	-0,1162	0,0000	-0,1000
5	PQ	0,9800	-17,30	-0,3018	0,0000	-0,1000
6	PQ	0,9760	-19,51	-0,3403	-1,0000	-0,2000
7	PQ	1,0310	-12,67	-0,2210	0,0000	0,1000
8	PQ	0,9980	-10,10	-0,1762	0,0000	-0,2000
9	PV	1,045	-0,78	-0,0136	1,0000	0.157
10	PQ	1,0470	-0,46	-0,0080	0,0000	0,0000
11	PQ	0,9850	-20,20	-0,3524	0,0000	0,0000
12	PQ	0,9940	-18,45	-0,3219	0,0000	0,0000
13	PQ	0,9900	-9,82	-0,1713	0,0000	0,0000
14	PV	1,040	-7,70	-0,1343	1,0000	0.350
15	PQ	1,0040	-13,03	-0,2273	0,0000	0,0000
16	PQ	0,9870	-20,03	-0,3494	-0,5000	0,2000
17	PQ	1,0110	-15,57	-0,2716	0,0000	0,0000
18	PQ	1,0400	-5,00	-0,0872	0,0000	0,0000
19	PQ	1,0010	-11,49	-0,2004	0,0000	0,0000
20	PQ	0,9740	-22,44	-0,3915	-0,5000	0,2000

Fonte: Costa (2000).

O sistema de 20 barras também foi simulado no software Anarede, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Anarede são mostrados na Figura 35, que apresenta a tela do programa Anarede, e na Tabela 28.

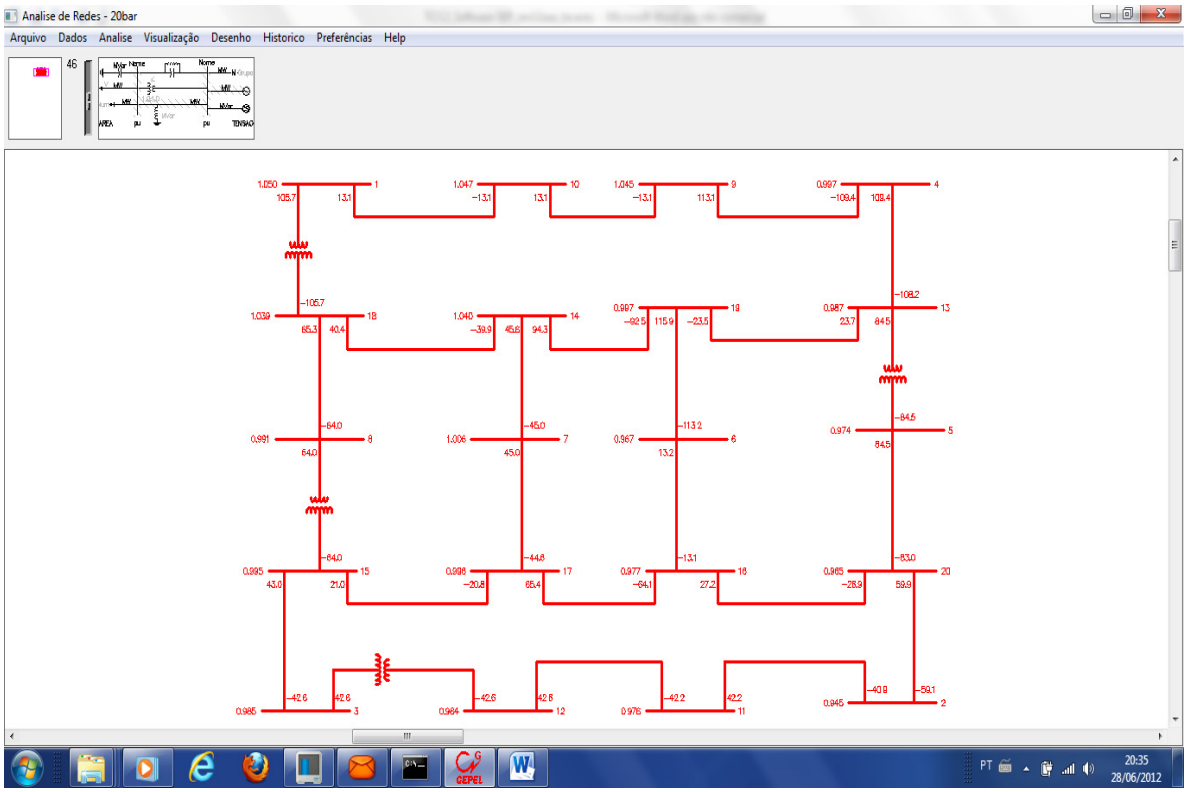

Figura 35 – Simulação no software Anarede para o sistema de vinte barras
Fonte: Autoria própria

Tabela 28 – Resultados do Anarede para o sistema de vinte barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ	1,0500	0,00	0,0000	1,1880	0,1880
2	PQ	0,9450	-25,50	-0,4448		
3	PQ	0,9850	-15,60	-0,2721		
4	PQ	0,9970	-6,70	-0,1169		
5	PQ	0,9740	-17,40	-0,3035		
6	PQ	0,9670	-19,70	-0,3436		
7	PQ	1,0060	-12,50	-0,2180		
8	PQ	0,991	-10,10	-0,1762		
9	PV	1,0450	-0,80	-0,0139	1,0000	0,0610
10	PQ	1,0470	-0,50	-0,0087		
11	PQ	0,9760	-20,40	-0,3558		
12	PQ	0,9840	-18,60	-0,3244		
13	PQ	0,9870	-9,90	-0,1727		
14	PV	1,0400	-7,70	-0,1343	1,0000	0,5350
15	PQ	0,9950	-13,10	-0,2337		
16	PQ	0,9770	-20,20	-0,3523		
17	PQ	0,9960	-15,60	-0,2721		
18	PQ	1,0390	-5,00	-0,0872		
19	PQ	0,9970	-11,50	-0,2006		
20	PQ	0,9650	-22,60	-0,3942		

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de 20 barras gerado pelo programa Anarede, está evidenciado no Apêndice K, o que possibilita uma melhor análise dos resultados.

Este sistema de 20 barras também foi simulado no programa Simpot, utilizando sua interface gráfica. Os resultados obtidos no Simpot são mostrados na Figura 36, que apresenta a tela do programa Simpot, e na Tabela 29.

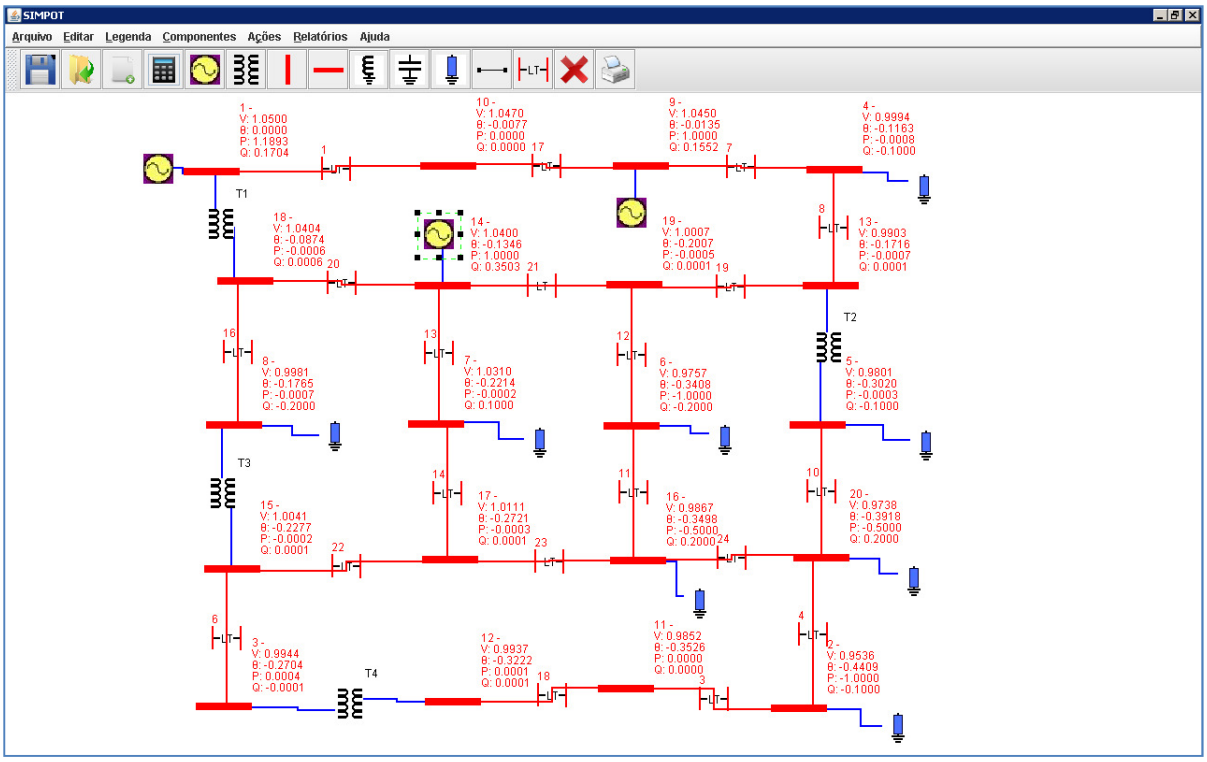

Figura 36 – Tela do Software Simpot
Fonte: Autoria própria

Tabela 29 – Resultados extraídos do relatório do programa Simpot para o sistema de 20 barras

Barra	Tipo da Barra	V(pu)	θ(graus)	θ(rad)	P(pu)	Q(pu)
1	Vθ				1,1890	0,1700
2	PQ	0,954	-25,27	-0,44		
3	PQ	0,994	-15,50	-0,27		
4	PQ	0,999	-6,67	-0,12		
5	PQ	0,980	-17,31	-0,30		
6	PQ	0,976	-19,54	-0,34		
7	PQ	1,031	-12,69	-0,22		
8	PQ	0,998	-10,12	-0,18		
9	PV		-0,77	-0,01		0,155
10	PQ	1,047	-0,44	-0,01		
11	PQ	0,985	-20,21	-0,35		
12	PQ	0,994	-18,47	-0,32		
13	PQ	0,990	-9,84	-0,17		
14	PV		-7,72	-0,13		0,350
15	PQ	1,004	-13,05	-0,23		
16	PQ	0,987	-20,05	-0,35		
17	PQ	1,011	-15,60	-0,27		
18	PQ	1,040	-5,01	-0,09		
19	PQ	1,001	-11,51	-0,20		
20	PQ	0,974	-22,46	-0,39		

Fonte: Autoria própria.

O relatório de resultados do sistema de vinte barras gerado pelo programa Simpot, está evidenciado no Apêndice L.

A comparação entre a solução apresentada em Costa (2000) com os resultados da simulação no software Anarede e da simulação no programa Simpot é mostrada nas Tabelas 30 e 31.

Tabela 30 – Comparação entre os valores calculados em Costa (2000), Anarede e Simpot

Valores	Cálculo	Anarede	Simpot
P_1 (pu)	1,1850	1,1880	1,1890
Q_1 (pu)	0,1670	0,1880	0,1700
V_2 (pu)	0,9540	0,9450	0,9540
θ_2 (graus)	-25,25	-25,50	-25,27
V_3 (pu)	0,9940	0,9850	0,9940
θ_3 (graus)	-15,48	-15,60	-15,50
V_4 (pu)	0,9940	0,9970	0,9990
θ_4 (graus)	-6,66	-6,70	-6,67
V_5 (pu)	0,9800	0,9740	0,9800
θ_5 (graus)	-17,30	-17,40	-17,31
V_6 (pu)	0,9760	0,9670	0,9760
θ_6 (graus)	-19,51	-19,70	-19,54
V_7 (pu)	1,0310	1,0060	1,0310
θ_7 (graus)	-12,67	-12,50	-12,69
V_8 (pu)	0,9980	0,9910	0,9980
θ_8 (graus)	-10,10	-10,10	-10,12
Q_9 (graus)	0,1570	0,1810	0,1550
θ_9 (graus)	-0,78	-0,80	-0,77
V_{10} (pu)	1,0470	1,0470	1,0470
θ_{10} (graus)	-0,46	-0,50	-0,44
V_{11} (pu)	0,9850	0,9760	0,9850
θ_{11} (graus)	-20,20	-20,40	-20,21
V_{12} (pu)	0,9940	0,9840	0,9940
θ_{12} (graus)	-18,45	-18,60	-18,47
V_{13} (pu)	0,9900	0,9870	0,9900
θ_{13} (graus)	-9,82	-9,90	-9,84
Q_{14} (graus)	0,3500	0,5350	0,3500
θ_{14} (graus)	-7,70	-7,70	-7,72
V_{15} (pu)	1,0040	0,9950	1,0040
θ_{15} (graus)	-13,03	-13,10	-13,05
V_{16} (pu)	0,9870	0,9770	0,9870
θ_{16} (graus)	-20,03	-20,20	-20,05

Fonte: Autoria própria.

Tabela 31 – Comparação entre os valores calculados em Costa (2000), Anarede e Simpot (Conclusão)

Valores	Cálculo	Anarede	Simpot
V_{17} (pu)	1,011	0,9960	1,011
θ_{17} (graus)	-15,57	-15,60	15,60
V_{18} (pu)	1,0400	1,0390	1,0400
θ_{18} (graus)	-5,00	-5,00	-5,01
V_{19} (pu)	1,0010	0,9970	1,0010
θ_{19} (graus)	-11,49	-11,50	-11,51
V_{20} (pu)	0,9740	0,9650	0,9740
θ_{20} (graus)	-22,44	-22,60	-22,46

Fonte: Autoria própria.

Comparando os resultados obtidos pelo Simpot com os resultados do Anarede e os apresentados em Costa (2000), considerou-se o desempenho do programa Simpot como satisfatório, pois os maiores erros percentuais em módulo, encontrados entre Simpot e Simulight e entre Simpot e Anarede foram respectivamente 4,35% e 34,58%. A medida que diminui-se os erros especificados nas simulações, os erros absolutos entre o Simpot e o Anarede são minimizados.

5.7. Conclusão

Durante o desenvolvimento do programa computacional Simpot foram realizados inúmeros testes e simulações para verificar possíveis erros de programação. A interface gráfica foi aprimorada, mas além disso buscou-se uma confiança nos resultados obtidos com o programa.

Este capítulo apresenta os resultados de simulações de sistemas de potência obtidos pelo Simpot, comparando-os com resultados do Anarede. Como o método numérico utilizado no Simpot e no Anarede é o Método de Newton-Raphson, esperava-se que esses resultados fossem bem próximos. Essa hipótese foi comprovada, os resultados obtidos com o Simpot são similares aos resultados obtidos em simulações com o Anarede. Sendo o Anarede um software de uso já consagrado pelas empresas de energia elétrica, acredita-se que o objetivo

do programa Simpot foi alcançado, pois o programa possui uma interface didática e amigável ao usuário e seus resultados são confiáveis.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O Simpot é um programa computacional capaz de calcular o fluxo de potência de um sistema elétrico utilizando o método numérico de Newton-Raphson, que ficou validado através das comparações entre os resultados obtidos por outros programas e também por exemplos de fluxos de potência calculados em algumas literaturas. Com isso, os objetivos principais e específicos deste trabalho foram atingidos com sucesso.

Esse programa dispõe de uma utilização intuitiva e de um bom rigor matemático, entregando ao final do cálculo um relatório com todos os detalhes das iterações realizadas.

Para o desenvolvimento do Simpot, primeiramente foi necessário o estudo da teoria relacionada ao cálculo do fluxo de potência, eletricidade, métodos numéricos e os campos do conhecimento que envolvem matemática matricial.

Em uma segunda fase do desenvolvimento do Simpot, foi necessário escolher uma linguagem de programação e ferramentas de desenvolvimento de licença pública geral. Optou-se pela linguagem de programação Java e pelas ferramentas de desenvolvimento de software *NetBeans* e *Eclipse*, que são as principais ferramentas de licença pública geral para esta linguagem. A grande vantagem destas escolhas está relacionada a minimização das dificuldades encontradas na construção do programa Simpot, já que as ferramentas de desenvolvimento de licença pública geral dispõe de uma grande quantidade de bibliografias e de uma grande quantidade de códigos abertos em depositórios eletrônicos.

O desenvolvimento do programa Simpot foi marcado pelas dificuldades na utilização das ferramentas de desenvolvimento e de como estruturar o software, com isso foi necessária algumas vezes a interrupção do desenvolvimento do programa para o estudo da linguagem de programação Java e de suas ferramentas. Além disso, as dúvidas em implementar os conhecimentos em sistemas de potência, métodos numéricos, matemática matricial e demais campos do conhecimento empregados neste trabalho, proporcionaram um tempo de trabalho maior no desenvolvimento do programa, pois foi necessária a implementação e teste de cada pequena parte do programa.

Algumas etapas que valem ser citadas, principalmente em função das dificuldades teóricas ou de implementação são as relacionadas ao método de Newton-Raphson, a resolução de matrizes esparsas, a resolução de matrizes Jacobianas, ao desenvolvimento da interface gráfica do Simpot, a tratativa de números complexos na linguagem Java, a resolução de matrizes esparsas na linguagem Java e a disponibilização do relatório de cálculo do Simpot.

A dificuldade em desenvolver o programa Simpot proporcionou aos desenvolvedores do programa um grande aprendizado tanto em relação ao conhecimento inerente ao trabalho mas também ao relacionado a pessoas, e tudo isso traduz-se em motivação.

Conclui-se que softwares de engenharia não podem ser desenvolvidos por profissionais de tecnologia da informação sem a participação de um ou mais engenheiros, bem como estes tornam-se onerosos se desenvolvidos apenas por engenheiros, porém engenheiros com habilidades em desenvolvimento de softwares possuem plenas condições de desenvolvê-los, mas imagina-se que o melhor desempenho será conquistado com profissionais de ambas as áreas.

Sugere-se que o programa Simpot seja aprimorada por uma equipe multidisciplinar, com estudantes de engenharia elétrica e com estudantes de tecnologia da informação. Os estudantes de engenharia elétrica poderiam implementar novas funções como cálculos por diferentes métodos de solução, comparativos entre os diferentes métodos, cálculo de curto-circuito, cálculo de queda de tensão, opções de entrada de dados em valores de engenharia ou por unidade (pu) e cálculos para sistemas não equilibrados. Com a implementação dessas sugestões, tornariam-se necessárias novas implementações na interface gráfica do Simpot, como exemplo mais opções de relatórios, mensagens de ajuda, controle de revisões, novos componentes, mais opções de grid, opções gráficas como tamanho de símbolos, cor dos símbolos e conexões, auto alinhamento dos componentes do circuito com o grid entre outros que surgirem.

7. APÊNDICES

APÊNDICE A – Manual de Utilização do Programa Simpot

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SIMPOT

O Simpot (Simulação de Fluxo de Potência pelo método Newton-Raphson) é um programa computacional com interface gráfica para cálculo do fluxo de potência de um sistema elétrico de potência inserido em sua tela principal.

O método de resolução do fluxo de potência é o método de Newton-Raphson. Ao final das iterações do método (após alcançar a convergência ou o número máximo de iterações) é criado um arquivo que contém o relatório com os principais detalhes das iterações realizadas, tais como dados das barras, dados das linhas, matriz de admitâncias de barra, Jacobiana, e os resultados dos deltas, módulos e ângulos das tensões e injeções de potência nas barras.

Limites do módulo das tensões das barras ou limites de fluxo de potência nas linhas não são considerados no cálculo das iterações.

O Simpot foi desenvolvido em linguagem de programação Java, utilizando ferramentas de desenvolvimento de software *NetBeans* e *Eclipse*, que são as principais ferramentas de licença pública geral para esta linguagem.

Quando iniciada a execução do programa Simpot, será aberta a sua tela principal, conforme mostra a Figura A.1, onde estão disponibilizadas as ferramentas necessárias para a simulação de um sistema elétrico de potência.

As telas de opções representadas pelas Figuras A.3, A.4, A.5, A.6, A.10, A.11 e A.12, mostram que o valor a ser inserido deverá respeitar a unidade indicada. Para cada entrada de dados não válidas o software retornará ao usuário uma tela de mensagem de erro.

A.1. Tela Principal

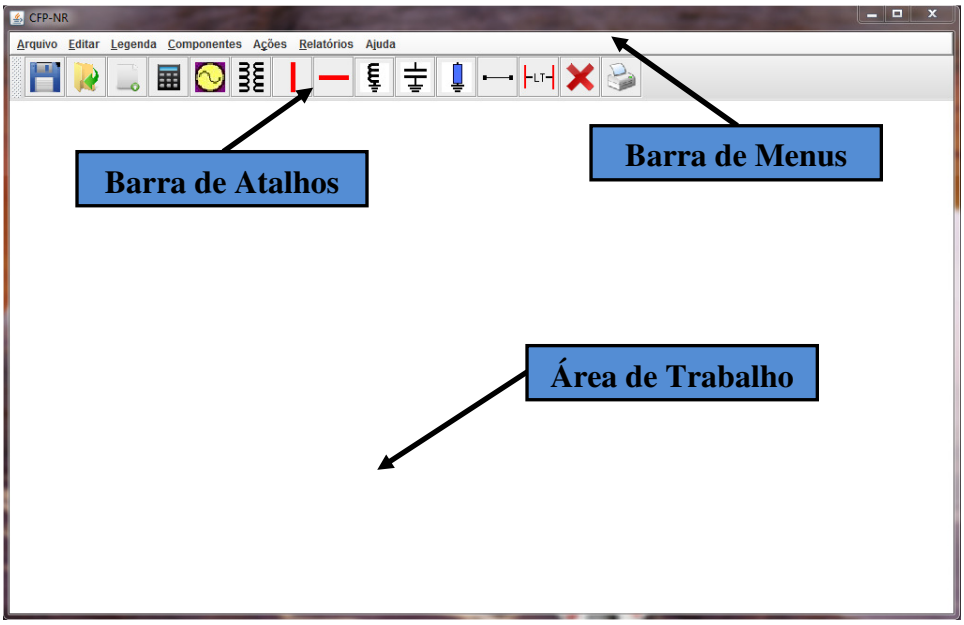

Figura A.1 – Barras de Menus e Atalhos na Tela principal do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Figura A.2 – Detalhe da Barra de Atalhos na Tela principal do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

A tela principal está dividida em barra de menus, barra de atalhos e área de trabalho. A barra de menus possui as seguintes estruturas:

- A ferramenta Arquivo disponibiliza os seguintes sub-menus: novo, abrir, fechar, salvar, salvar como, imprimir e sair. Os sub-menus novo e abrir, representam respectivamente as funções de abrir uma nova página para simulação e para abrir uma simulação já existente;
- A ferramenta Editar disponibiliza os seguintes sub-menus: grid e plano de fundo. Estes sub-menus representam respectivamente as funções de inserir pontos na tela e para alterar a cor da página onde será construído o projeto a ser simulado;

- A ferramenta Legenda disponibiliza os seguintes sub-menus: exibir e ocultar. Estes sub-menus representam respectivamente as funções de mostrar ou não a descrição dos componentes inseridos no sistema a ser simulado;
- A ferramenta Componentes disponibiliza os seguintes sub-menus: gerador, transformador, indutor, capacitor, carga, barra e linha de transmissão. Estes sub-menus são melhor verificados a seguir;
- A ferramenta Ações disponibiliza o seguinte sub-menu: calcular. O sub-menu calcular representa a função de cálculo do fluxo de potência propriamente dita;
- A ferramenta Relatórios disponibiliza os seguintes relatórios: matriz admitância de barras, matriz impedância de barras e fluxo entre barras. Os sub-menus novo e abrir, representam respectivamente as funções de gerar tabelas contendo a matriz admitância de barras, a matriz impedância de barras e do cálculo do fluxo de potência explicitando inclusive o número de iterações;
- A ferramenta Ajuda disponibiliza o seguinte sub-menu: procedimento de utilização do software. Os sub-menu procedimento de utilização do software representa a função de abrir um texto que orienta o usuário na utilização das ferramentas disponibilizadas.

A barra de atalhos é composta por ícones que estão relacionados diretamente aos sub-menus da barra de menus, possibilitando ao usuário uma maior agilidade na construção e cálculo do sistema elétrico de potência que será simulado. Os ícones da barra de atalhos, conforme mostrada nas Figuras A.1 e A.2, podem ser descritos na ordem da esquerda para a direita como: salvar, novo, calcular, gerador, transformador, barra vertical, barra horizontal, indutor, capacitor, carga, conexão, linha de transmissão, excluir e impressora ou ainda, basta passar o ponteiro do mouse sobre o ícone que o programa mostra o nome do atalho, conforme mostrado na Figura A.2.

Quando aciona-se algum sub-menu ou ícone relacionado ao menu Componentes, abre uma tela de opções para cada sub-menu selecionado, conforme mostram as figuras A.3, A.4, A.5, A.6, A.10, A.11 e A.12.

A área de trabalho é a região onde pode ser construído o circuito elétrico de potência para que seja possível efetuar o cálculo.

A.1.1. Tela e Entrada de Dados do Gerador

O Sub-Menu do Gerador, representado pela Figura A.3, mostra que os valores inseridos devem estar em valores por unidade (pu), calculados a partir de uma base comum para todo o sistema. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como exemplo "G1", com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

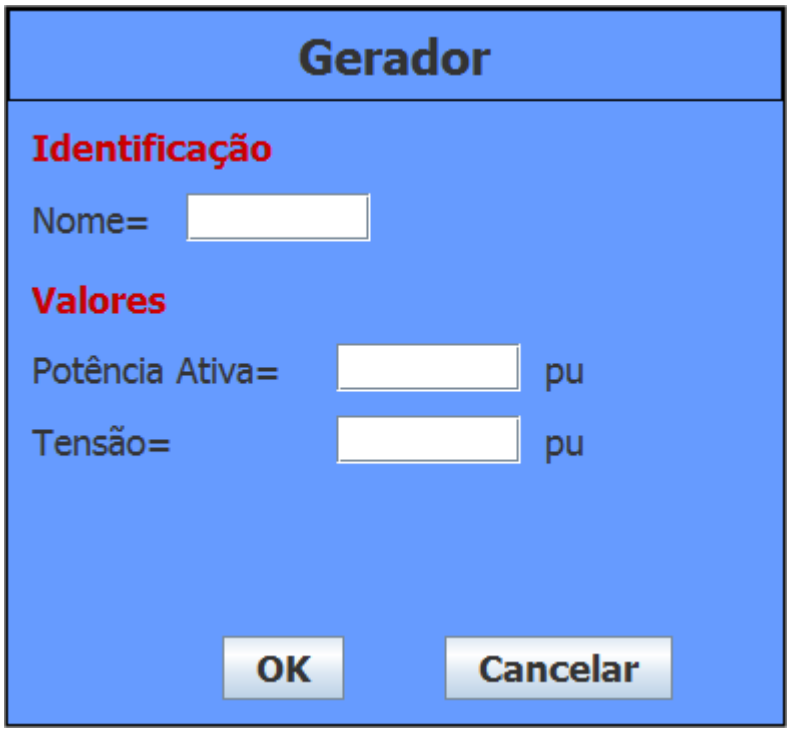

Figura A.3 – Sub-menu Gerador do programa Simpot
Fonte: Autoria própria

O gerador conectado à uma barra PV deve ter necessariamente os valores de potência ativa gerada e módulo da tensão. O gerador conectado à barra de referência (barra $V\theta$) deve ter o valor do módulo da tensão diferente de zero. Não é necessário entrar com o valor de potência ativa neste caso.

A.1.3. Tela e Entrada de Dados do Indutor

O Sub-Menu do Indutor é representado pela Figura A.4. No campo de Identificação, pode-se nomear o componente, como exemplo “Ind1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

O valor do indutor é dado por sua susceptância indutiva em pu.

Figura A.4 – Sub-menu Indutor do programa Simpot
Fonte: Autoria própria

A.1.4. Tela e Entrada de Dados do Capacitor

O Sub-Menu do Capacitor é representado pela Figura A.5. No campo de Identificação pode-se nomear o componente, como exemplo “Cap1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

O valor do capacitor é inserido por meio do valor da sua susceptância capacitiva em pu.

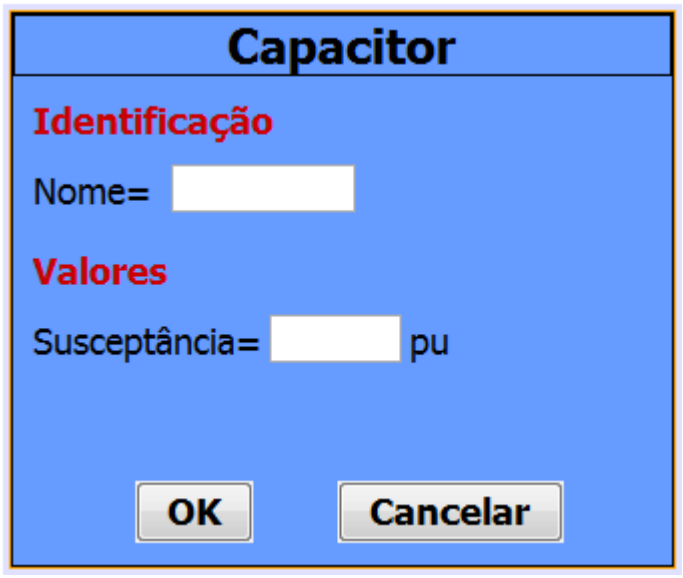

Figura A.5 – Sub-menu Capacitor do programa Simpot
Fonte: Autoria própria

A.1.2. Tela e Entrada de Dados do Transformador

O Sub-Menu do Transformador, representado pela Figura A.6, mostra que os valores inseridos devem estar em valores por unidade (pu), calculados a partir de uma base comum para todo o sistema. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como exemplo “TR1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

Figura A.6 – Sub-menu Transformador do programa Simpot
Fonte: Autoria própria

Neste Sub-Menu, existem algumas considerações a serem feitas em relação a entrada de dados. O Transformador é representado por seu equivalente monofásico de dois enrolamentos, como é usual nos diagramas dos circuitos em valores por unidade (pu).

A impedância (resistência e reatância de dispersão) a ser inserida é o valor da impedância equivalente nominal em pu, calculada a partir dos valores de base escolhidos pelo usuário.

O programa Simpot não possibilita a entrada de transformador com TAP variável (transformador que pode mudar a relação de espiras entre os enrolamentos do primário e secundário por meio de chaveamento ou taps). Entretanto, caso o usuário queira inserir em seu circuito um transformador com TAP em posição diferente dos valores nominais de tensão,

isso pode ser feito a partir de alguns cálculos realizados pelo próprio usuário, como explicado a seguir.

A.1.2.1. Inserção do Transformador com TAP no Programa Simpot

Todos os transformadores em sistemas de potência podem ser representados por um circuito composto por sua impedância equivalente *Zeq* em pu e por um transformador ideal com relação de transformação *a:1*, como mostra a Figura A.7.

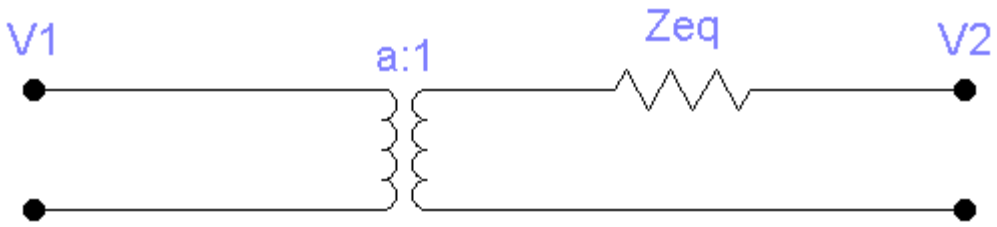

Figura A.7 – Representação do Circuito do Transformador de Dois Enrolamentos
Fonte: Autoria própria

Os transformadores sem TAP, ou com TAPs conectados na posição nominal, quando representados em valores por unidade (pu), têm relação de transformação *1:1*, ou seja *a=1*. Portanto, a relação de transformação pode ser desprezada nestes casos.

Os transformadores com TAPs em posições diferentes dos valores nominais de tensão têm valores de *a* diferentes de *1* e portanto o transformador ideal com relação *a:1* não pode ser desprezado. É possível calcular um circuito equivalente π para o transformador neste caso, a partir do valor de *a* e de sua impedância equivalente nominal Zeq em pu.

O valor de *a* é o valor da relação de transformação em pu, calculada por:

$$a = \frac{\frac{V_1}{V_2}}{\frac{V_{B1}}{V_{B2}}} \tag{A.1}$$

Onde as variáveis significam:

- V_1 : tensão nominal do enrolamento do primário;
- V_2 : tensão nominal do enrolamento do secundário;
- V_{B1} : tensão de base escolhida pelo usuário para o enrolamento do primário;
- V_{B2} : tensão de base escolhida pelo usuário para o enrolamento do secundário.

Caso o Transformador tenha Tap variável no primário o valor da tensão a ser considerada no secundário é V_2 e caso o Transformador tenha Tap variável no secundário o valor da tensão a ser considerada no primário é V_1.

Como pode-se observar, o valor de *a* calculado pela Equação A.1 é uma relação de transformação em pu. Essa relação é geralmente um número entre 0,9 e 1,1.

O circuito representado na Figura A.7 não pode ser inserido no programa, porém é possível converter esse circuito em um equivalente π como mostrado na Figura A.8, sendo que o valor de cada impedância desse circuito π é calculado por (COSTA, 2010):

$$Z_{12} = a \cdot Zeq \quad [pu] \tag{A.2}$$

$$Z_{1T} = \left(\frac{a^2}{1-a} \right) \cdot Zeq \quad [pu] \tag{A.3}$$

$$Z_{2T} = \left(\frac{a}{a-1} \right) \cdot Zeq \quad [pu] \tag{A.4}$$

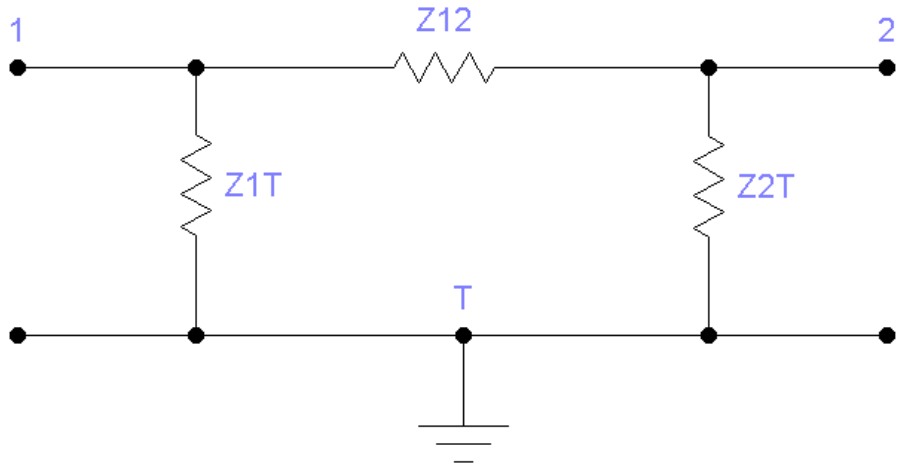

Figura A.8 – Modelo π do Transformador
Fonte: Autoria própria

Então, para simular um transformador com TAP variável é necessário inserir um transformador entre duas barras com impedância Z_{12} e dois elementos shunt capacitivos, conectados em cada barra, como mostra a Figura A.9. Os valores das impedâncias nos elementos shunt são os inversos (susceptâncias) dos valores calculados de Z_{1T} e Z_{2T}, como mostrado na Figura A.9.

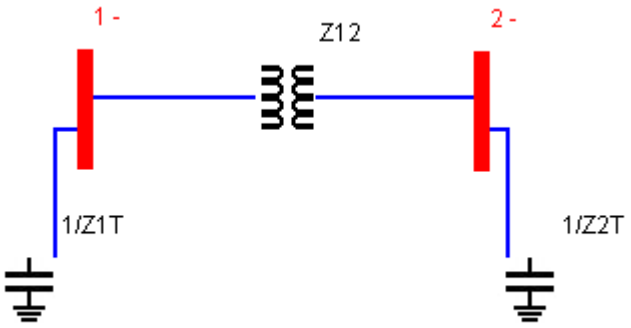

Figura A.9 – Modelo π do Transformador construído no Simpot
Fonte: Autoria própria

A.1.5. Tela e Entrada de Dados da Carga

O Sub-Menu da Carga é mostrado na Figura A.10. Os valores a serem inseridos devem estar em valores por unidade (pu), calculados a partir de uma base comum para todo o sistema. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como por exemplo “Carga1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

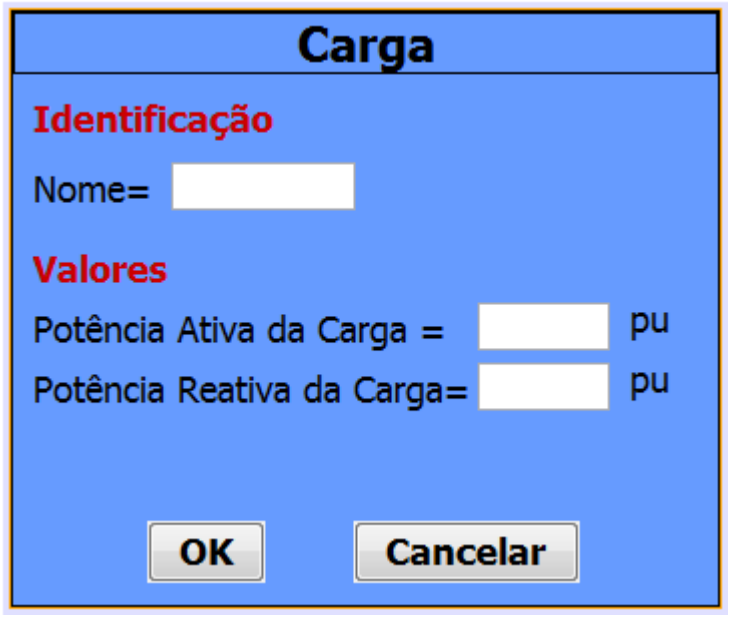

Figura A.10 – Sub-menu Carga do programa Simpot
Fonte: Autoria própria

A carga corresponde a uma injeção de potência negativa na barra, pois esta potência está sendo consumida pela carga conectada à barra. Por isso o valor das potências de carga devem ser negativas.

A.1.6. Tela e Entrada de Dados da Barra

O Sub-Menu Propriedades da Barra, representado pela Figura A.11, mostra os tipos de barra que podem ser escolhidos. Os tipos de barra relacionam-se aos equipamentos conectados à estas barras e sua função no sistema elétrico. Foram considerados neste trabalho os principais tipos de barra:

- Barra *PV*: é uma barra de geração para a qual são especificados a potência ativa gerada e o módulo da tensão;
- Barra *PQ*: é uma barra na qual está conectada uma carga. Não possui gerador conectado à essa barra;
- Barra $V\theta$: é uma barra de geração para a qual são especificados o módulo e o ângulo da tensão, este geralmente zero. Por isso também é conhecida como barra de referência.

Deve-se ressaltar que para o programa Simpot só pode haver uma única Barra de Referência, ou seja um único $V\theta$. Além disso, há o campo de Identificação, onde pode-se nomear o componente, como exemplo "Barra1", com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

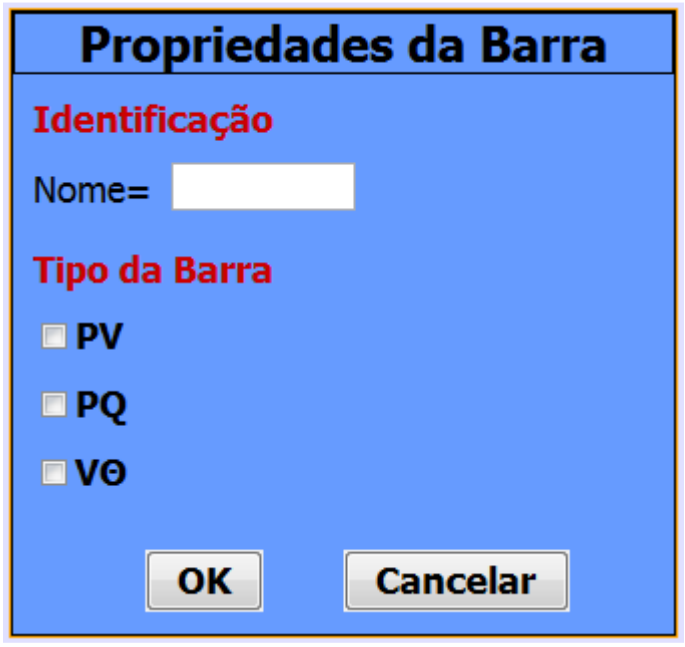

Figura A.11 – Sub-menu Barra do programa Simpot
Fonte: Autoria própria

A.1.7. Tela e Entrada de Dados da Linha de Transmissão

O Sub-Menu da Linha de Transmissão é mostrado na Figura A.12. Os valores a serem inseridos devem estar em valores por unidade. No campo de Identificação pode-se nomear o componente, como exemplo “LT1”, com o intuito de diferenciar os componentes do sistema.

Figura A.12 – Sub-menu Linha de Transmissão do programa Simpot
Fonte: Autoria própria

O modelo de linha de transmissão considerado no programa Simpot foi o modelo π, como está representado na Figura A.13, sendo R a resistência, X a reatância e B_c a susceptância.

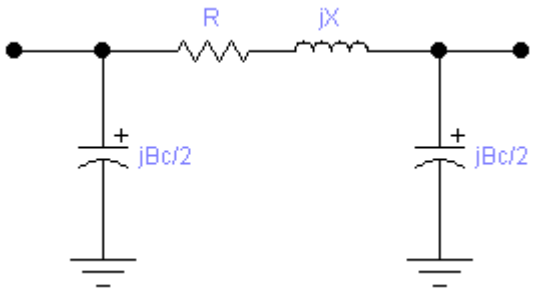

Figura A.13 – Modelo π da linha de transmissão
Fonte: Autoria própria

A.2. Montagem e Simulação do Circuito Elétrico de Potência no Programa Simpot

Para simular a operação de um circuito elétrico de potência pelo Simpot, é importante dizer que antes de inserir um componente na área de trabalho, deve-se inicialmente clicar no componente na barra de atalhos e depois clicar em uma posição na área de trabalho. Ao inserir um Componente na área de trabalho as telas de Sub-Menus serão invocadas para o preenchimento dos seus valores para o cálculo. A Figura A.14 ilustra este processo.

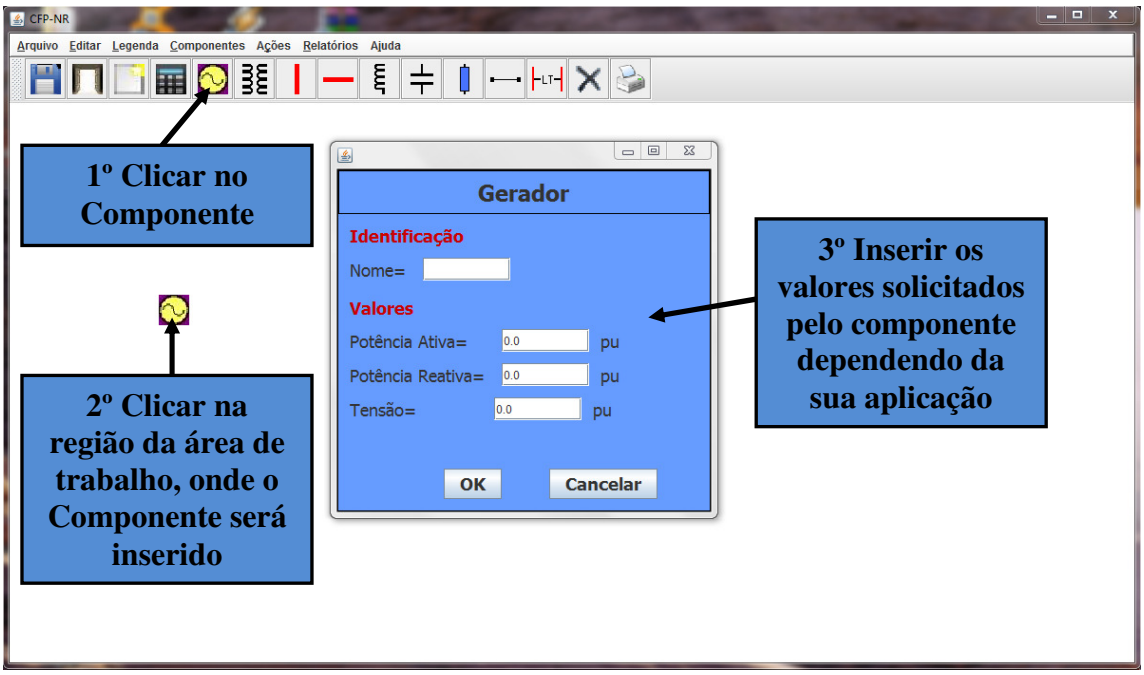

Figura A.14 – Componente Gerador inserido na área de trabalho do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Para excluir qualquer componente da área de trabalho, é necessário clicar sobre o componente e logo depois clicar no ícone "X" que está contido na barra de atalhos e que é denominado como a ação de Excluir. A Figura A.15 ilustra este processo.

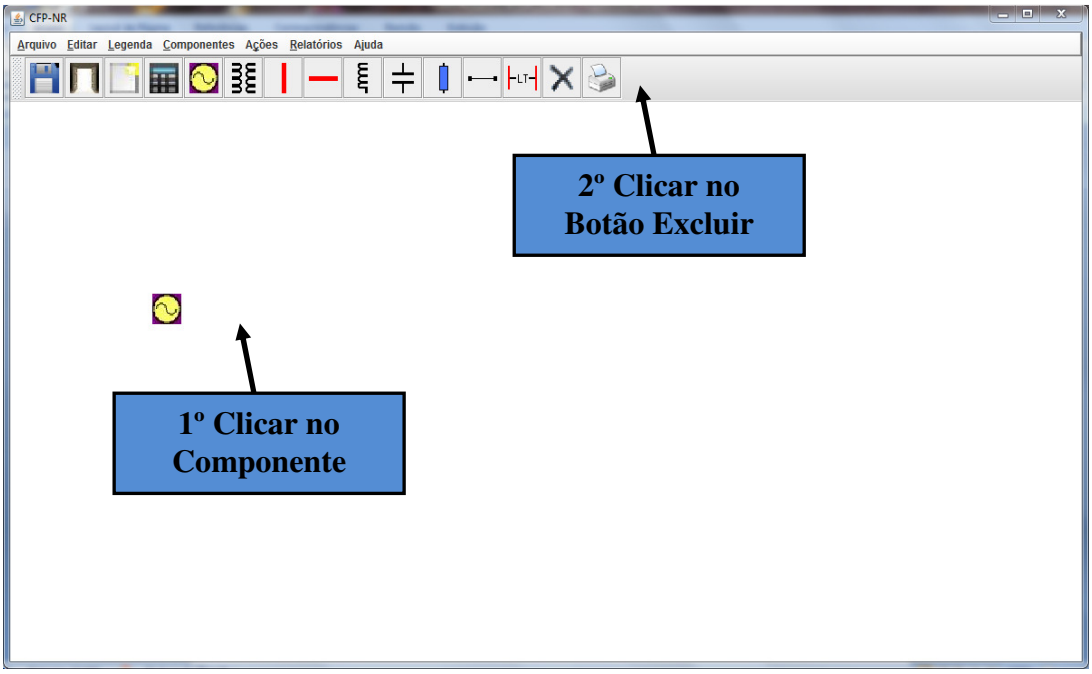

Figura A.15 – Componente Gerador excluído da área de trabalho do programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Sabendo-se disso, o sistema elétrico a ser inserido pode ser concluído, como mostra a figura A.16. Lembra-se ainda que as linhas de conexão no circuito são componentes de conexão, ou seja, conecta os componentes Gerador, Indutor, Capacitor e Carga à sua respectiva barra.

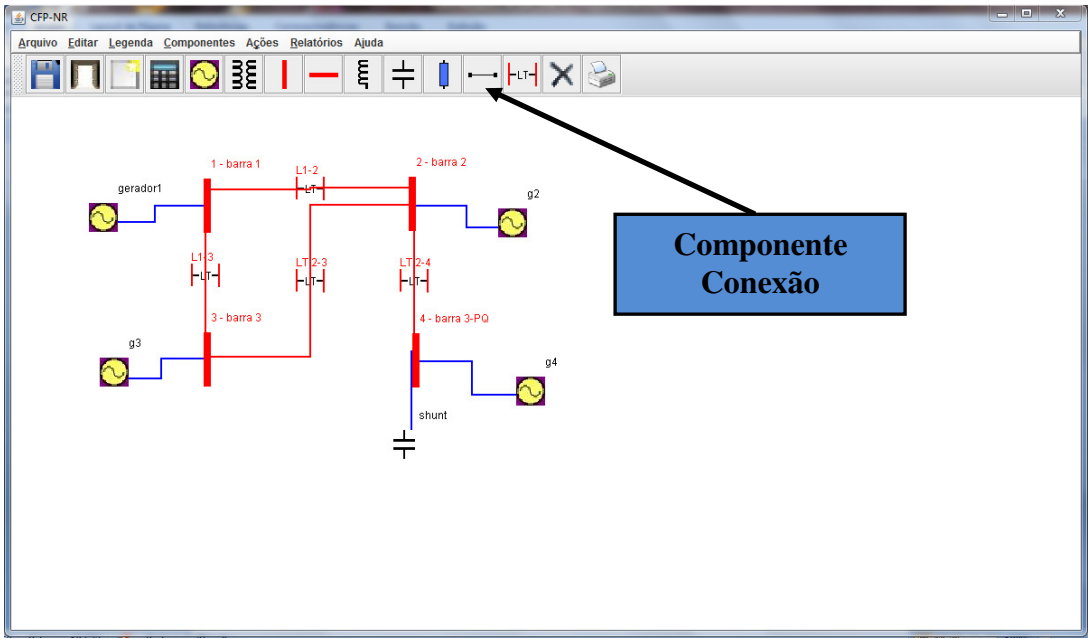

Figura A.16 – Montagem do Circuito com 4 barras no programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Com isso, é possível clicar no Botão Calcular na barra de atalhos, conforme ilustra a Figura A.17.

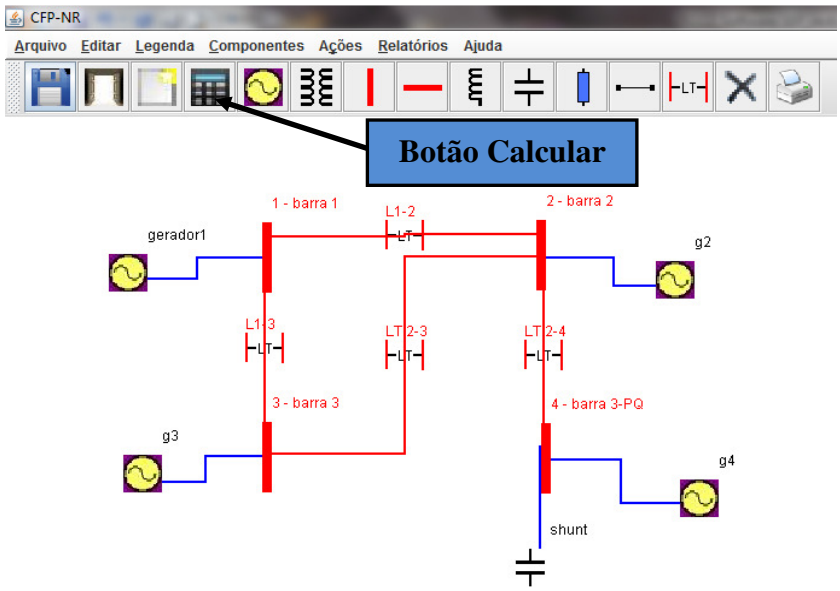

Figura A.17 – Indicação do Botão Calcular do Programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

Ao acionar o botão calcular será solicitado ao usuário duas informações, a primeira é o erro máximo e a segunda é o número de iterações para o cálculo do fluxo de carga, conforme mostram as figuras A.18 e A.19.

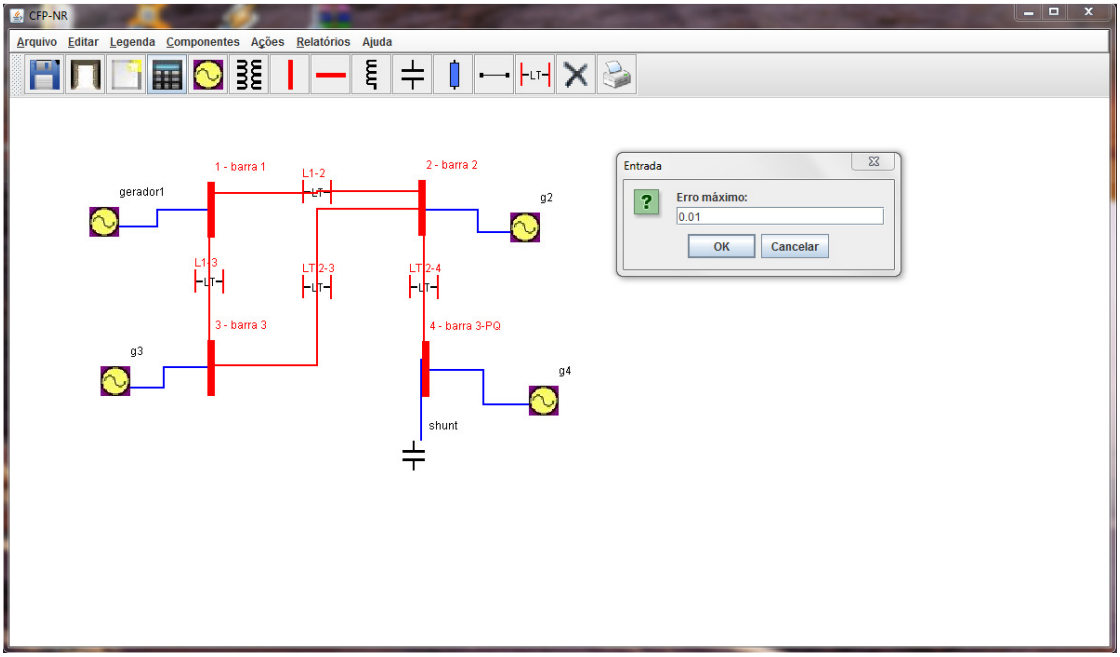

Figura A.18 – Entrada do Erro Máximo no Programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

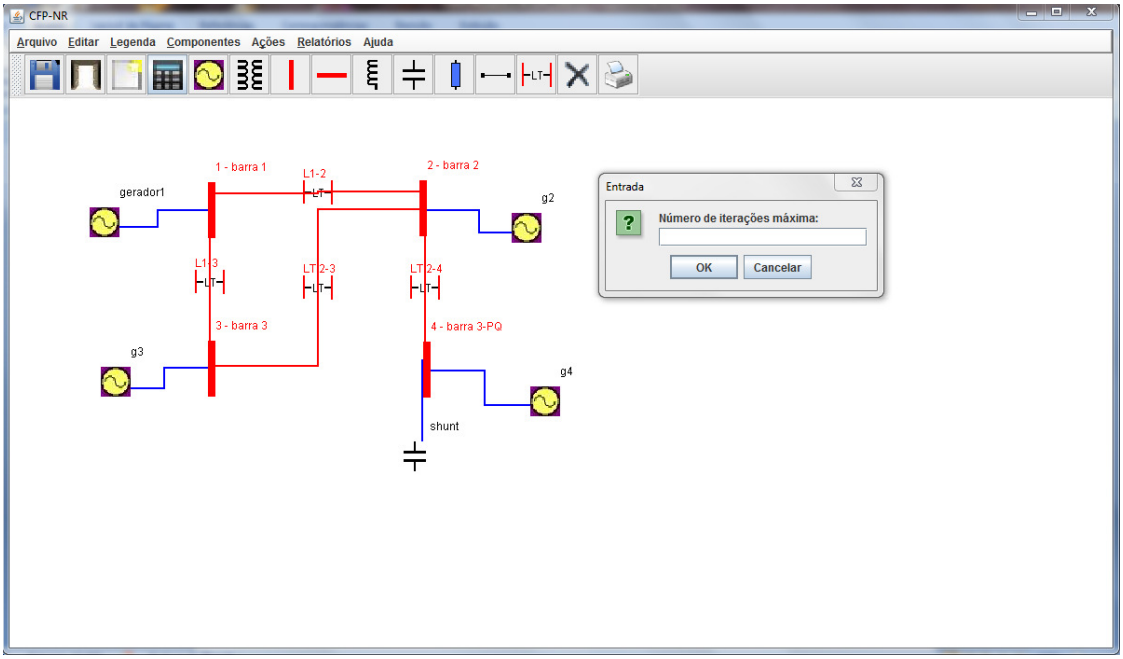

Figura A.19 – Entrada do Número de Iterações Máxima no Programa Simpot
Fonte: Autoria própria.

A.3. Saída de Dados no Simpot

Após a conclusão do cálculo, o programa Simpot gerará automaticamente um relatório no formato de arquivo com extensão pdf. Através deste relatório verifica-se os dados de entrada e também os dados de saída que expressam os resultados dos cálculos. O relatório de saída mostra as seguintes informações ao usuário:

- número de iterações;
- erro máximo,
- dados das barras;
- dados das linhas;
- admitância das linhas;
- valores calculados da matriz Y_{BARRA} ;
- mismatches de potências;
- iteração atual;
- maior erro;
- Jacobiana;
- deltas de módulos e ângulos das tensões;
- módulo e ângulo das tensões nas barras;
- potência nas barras;
- fluxo de potência entre barras.

APÊNDICE B – Exemplo de Relatório de Saída do Programa Simpot

Relatório do cálculo do Fluxo de Potência pelo método de Newton Rapshon

Número máximo de iterações especificado: 200
Erro máximo especificado: 0.0010

Número de barras PQ: 2
Número de barras PV: 1
Número de barras Vteta: 1

Dados das Barras						
Barra	**Tipo Barra**	**V**	**Teta (rad)**	**P**	**Q**	**b**
1.0000	Vteta	1.0500	0.0000	-0.2000	0.0000	0.0000
2.0000	PV	0.9500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0000	PQ	0.0000	0.0000	-0.3000	-0.1000	0.0000
4.0000	PQ	0.0000	0.0000	-0.3000	-0.4000	0.2000

Dados das Linhas						
Barra DE	**Barra PARA**	**R**	**X**	**Bsh**	**a**	**Fi**
1.0000	2.0000	0.0200	0.1000	0.3600	1.0000	0.0000
1.0000	3.0000	0.0100	0.0500	0.0000	1.0000	0.0000
2.0000	3.0000	0.0400	0.2000	0.1800	1.0000	0.0000
2.0000	4.0000	0.0000	0.0500	0.0000	1.0000	0.0000

Admitâncias das Linhas						
Barra DE	**Barra PARA**	**R**	**X**	**Bsh**	**a**	**Fi**
1.0000	2.0000	1.9231	-9.6154	0.1800	1.0000	0.0000
1.0000	3.0000	3.8462	-19.2308	0.0000	1.0000	0.0000
2.0000	3.0000	0.9615	-4.8077	0.0900	1.0000	0.0000
2.0000	4.0000	0.0000	-20.0000	0.0000	1.0000	0.0000

Ybarra							
G + jB							
5.7692	-28.6662	-1.9231	9.6154	-3.8462	19.2308	0.0000	0.0000
-1.9231	9.6154	2.8846	-34.1531	-0.9615	4.8077	-0.0000	20.0000
-3.8462	19.2308	-0.9615	4.8077	4.8077	-23.9485	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-0.0000	20.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-19.8000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	-0.6038	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	-0.1558	0.7112
4.0000	-0.3000	-1.2000

Jacobiana				
29.7837	-20.1923	0.0000	-4.0385	0.0000
-20.1923	24.7596	0.0000	4.6635	0.0000
0.0000	0.0000	19.0000	0.0000	0.0000
4.0385	-4.9519	0.0000	23.1373	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.6000

Módulo e Ângulo das Tensões nas Barras						
Iteração atual: 0				Maior Erro: 1.2000000000000006		
Barra	Tipo Barra	V	Teta (graus)	P	Q	b
1.0000	2.0000	1.0500	-3.1162	-0.2000	0.0000	0.0000
2.0000	3.0000	0.9500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0000	1.0000	1.0283	-3.2067	-0.3000	-0.1000	0.0000
4.0000	1.0000	0.9417	-0.9047	-0.3000	-0.4000	0.2000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	-0.0040	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	0.0027	-0.0281
4.0000	-0.0175	-0.0694

Jacobiana				
30.2422	-20.7693	0.0000	-4.0704	0.0000
-20.7693	25.5108	0.0000	4.6492	0.0000
0.0000	0.0000	17.8910	0.0000	-0.3000
4.1197	-4.7948	0.0000	24.5551	0.0000
0.0000	0.0000	0.2825	0.0000	18.2956

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta:
1.0000	-0.0002	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	0.0002	-0.0011
4.0000	-0.0010	-0.0038

Módulo e Ângulo das Tensões nas Barras						
Iteração atual: 1				Maior Erro: 0.06941864484207144		
Barra	Tipo Barra	V	Teta (graus)	P	Q	b
1.0000	2.0000	1.0500	-3.1254	-0.2000	0.0000	0.0000
2.0000	3.0000	0.9500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0000	1.0000	1.0272	-3.1968	-0.3000	-0.1000	0.0000
4.0000	1.0000	0.9380	-0.9643	-0.3000	-0.4000	0.2000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0001	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	0.0000	0.0001
4.0000	-0.0001	-0.0009

Poências nas Barras		
Barra	**P**	**Q**
1.0000	-0.2000	1.3859
2.0000	0.8356	-1.4138
3.0000	-0.3000	-0.1000
4.0000	-0.3000	-0.4000

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra DE	**Barra PARA**	**P**	**Q**
1.0000	2.0000	0.3182	-1.5254
1.0000	3.0000	-0.1181	-0.4559
2.0000	3.0000	-0.1926	0.2350
2.0000	4.0000	-0.2999	-0.4116

APÊNDICE C – Relatório de Saída do Programa Anarede para o sistema de 2 barras

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 2 Barras
RELATORIO DE BARRAS CA * AREA  1 *

X------------X------X-------X-------X-----X-------X-------X-------X-------X
BARRA     TENSAO GERACAO INJ EQV FATOR  CARGA   ELO CC  SHUNT   MOTOR
NUM.    TIPO  MOD/    MW/     MW/   GER %   MW/      MW/   Mvar/    MW/
NOME      ANG    Mvar/   Mvar   EQV %  Mvar     Mvar   EQUIV   Mvar
CE Mvar
X------------X------X-------X-------X-----X-------X-------X-------X-------X

1       2  1.000    43.8      .0    .0      .0      .0      .0      .0
Barra_1          .0      .2      .0    .0      .0      .0      .0      .0
2       1  1.000      .0      .0    .0    40.0      .0      .0      .0
Barra_2       -25.8    17.0      .0    .0      .0      .0      .0      .0



CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 2 Barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     1       2   1.000                             >       43.8MW     .2MVAR
  Barra_1           .0
                           2 Barra_2       1    43.8      .2

     2       1   1.000     >   40.0MW              >                17.0MVAR
  Barra_2        -25.8
                           1 Barra_1       1   -40.0    17.0
```

APÊNDICE D – Relatório de Saída do Programa Simpot para o sistema de 2 barras

Relatório do cálculo do Fluxo de Potência pelo método de Newton Rapshon

Número máximo de iterações especificado: 20

Erro máximo especificado: 0.0030

Número de barras PQ: 0

Número de barras PV: 1

Número de barras Vteta: 1

Dados das Barras						
Barra	**Tipo Barra**	**V (pu)**	**Teta (rad)**	**P (pu)**	**Q (pu)**	**b (pu)**
1.0000	Vteta	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	PV	1.0000	0.0000	-0.4000	0.0000	0.0000

Dados das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**R (pu)**	**X (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	2.0000	0.2000	1.0000	0.0400	1.0000

Admitâncias das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**G (pu)**	**B (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	2.0000	0.1923	-0.9615	0.0200	1.0000

Ybarra			
G + jB (pu)			
0.1923	-0.9415	-0.1923	0.9615
-0.1923	0.9615	0.1923	-0.9415

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.4000	0.0000

Jacobiana
0.9615

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.4160	0.0000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000

2.0000	-0.0278	0.0000

Jacobiana
0.9572

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0291	0.0000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0048	0.0000

Jacobiana
0.9507

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0050	0.0000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0008	0.0000

Módulo e Ângulo das Tensões nas Barras						
Iteração atual: 2				Maior Erro: 8.368769916540231E-4		
Barra	Tipo Barra	V (pu)	Teta (graus)	P (pu)	Q (pu)	b (pu)
1.0000	3.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	2.0000	1.0000	-25.7884	-0.4000	0.0000	0.0000

Potências nas Barras		
Barra	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	0.4375	-0.0079
2.0000	-0.4000	0.1594

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra DE	**Barra PARA**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	2.0000	-0.4375	-0.0521

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra PARA	**Barra DE**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	2.0000	0.3992	-0.0521

APÊNDICE E – Relatório de Saída do Programa Anarede para o sistema de 3 barras

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 3 Barras
 RELATORIO DE BARRAS CA * AREA  1 *

 X------------X------X-------X-------X-----X-------X-------X-------X-------X
     BARRA     TENSAO GERACAO INJ EQV FATOR  CARGA    ELO CC  SHUNT   MOTOR
  NUM.    TIPO  MOD/    MW/     MW/   GER %   MW/      MW/   Mvar/    MW/
      NOME      ANG    Mvar/   Mvar   EQV %  Mvar     Mvar   EQUIV   Mvar
                     CE Mvar
 X------------X------X-------X-------X-----X-------X-------X-------X-------X

     1       0  1.031      .0      .0    .0    15.0      .0     5.3      .0
  Barra_1        -2.7     5.0      .0    .0      .0      .0      .0      .0
     2       2  1.000    -4.7      .0    .0      .0      .0      .0      .0
  Barra_2           .0   -11.5      .0    .0      .0      .0      .0      .0
     3       1  1.000    20.0      .0    .0      .0      .0      .0      .0
  Barra_3          9.2     -.6      .0    .0      .0      .0      .0      .0



CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 3 Barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     1       0   1.031     >   15.0MW              >                 5.0MVAR
  Barra_1         -2.7
                          2 Barra_2       1   -15.0    10.3

     2       2   1.000                             >       -4.7MW  -11.5MVAR
  Barra_2           .0
                          1 Barra_1       1    15.1   -13.4
                          3 Barra_3       1   -19.8     1.8

     3       1   1.000                             >       20.0MW    -.6MVAR
  Barra_3          9.2
                             2 Barra_2       1    20.0     -.6
```

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 3 Barras

TOTAIS DA AREA 1

GERACAO MW/ Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	EXPORT MW/ Mvar	IMPORT MW/ Mvar	PERDAS MW/ Mvar
15.3	.0	15.0	.0	5.3	.0	.0	.3
-7.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-1.9

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 3 Barras

RELATORIO DE DADOS DE BARRA CA

NUM.	NOME	TP	AR	GRP B	L	BARRA CONT.	TENSAO MOD/ ANG	ESPEC	CONTR	GERACAO MW/Mvar MIN	ATUAL	MAX	CARGA MW/ Mvar	SHUNT Mvar
1	Barra_1	0	1	0 0		0	1.031 -2.7			.0	5.0	.0	15.0 .0	5.0
2	Barra_2	2	1	0 0		2	1.000 .0	1.000	LOC	-9999.0	-4.7 -11.5	99999.0	.0 .0	.0
3	Barra_3	1	1	0 0		3	1.000 9.2	1.000	LOC	.0	20.0 -.6	.0	.0 .0	.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 3 Barras

TOTAIS DA AREA 1

GERACAO MW/ Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	EXPORT MW/ Mvar	IMPORT MW/ Mvar	PERDAS MW/ Mvar
15.3	.0	15.0	.0	5.3	.0	.0	.3
-7.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	-1.9

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 3 Barras
RELATORIO DE DADOS DE CIRCUITO CA

BARRAS DE	BARRAS PARA	CIRCUITO NUM.	E	P	RESIST REATAN (%)	SUSCEP (Mvar)	T A P ESPEC	MIN	MAX	ANG DEFAS	BARRA CONT.	(MVA) NORMAL	(MVA) EMERG.	IDENTIF DA BARRA PARA BARRA
1	2	1	L	F	3.00	4.000						9999.0		Barra_1
					30.00							9999.0		Barra_2
2	3	1	L	F	5.00	2.000						9999.0		Barra_2
					80.00							9999.0		Barra_3

APÊNDICE F – Relatório de Saída do Programa Simpot para o sistema de 3 barras

Relatório do cálculo do Fluxo de Potência pelo método de Newton Rapshon

Número máximo de iterações especificado: 20

Erro máximo especificado: 0.0030

Número de barras PQ: 0

Número de barras PV: 1

Número de barras Vteta: 1

Dados das Barras						
Barra	**Tipo Barra**	**V (pu)**	**Teta (rad)**	**P (pu)**	**Q (pu)**	**b (pu)**
1.0000	Vteta	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	PV	1.0000	0.0000	-0.4000	0.0000	0.0000

Dados das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**R (pu)**	**X (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	2.0000	0.2000	1.0000	0.0400	1.0000

Admitâncias das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**G (pu)**	**B (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	2.0000	0.1923	-0.9615	0.0200	1.0000

Ybarra			
G + jB (pu)			
0.1923	-0.9415	-0.1923	0.9615
-0.1923	0.9615	0.1923	-0.9415

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.4000	0.0000

Jacobiana
0.9615

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.4160	0.0000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000

2.0000	-0.0278	0.0000

Jacobiana
0.9572

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0291	0.0000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0048	0.0000

Jacobiana
0.9507

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0050	0.0000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0008	0.0000

Módulo e Ângulo das Tensões nas Barras						
Iteração atual: 2				Maior Erro: 8.368769916540231E-4		
Barra	Tipo Barra	V (pu)	Teta (graus)	P (pu)	Q (pu)	b (pu)
1.0000	3.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	2.0000	1.0000	-25.7884	-0.4000	0.0000	0.0000

Potências nas Barras		
Barra	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	0.4375	-0.0079
2.0000	-0.4000	0.1594

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra DE	**Barra PARA**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	2.0000	-0.4375	-0.0521

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra PARA	**Barra DE**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	2.0000	0.3992	-0.0521

APÊNDICE G – Relatório de Saída do Programa Anarede para o sistema de 4 barras

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 4 Barras
 RELATORIO DE BARRAS CA * AREA  1 *

 X------------X------X-------X-------X-----X-------X-------X-------X-------X
     BARRA     TENSAO GERACAO INJ EQV FATOR  CARGA    ELO CC  SHUNT   MOTOR
  NUM.    TIPO  MOD/    MW/     MW/   GER %   MW/      MW/   Mvar/    MW/
      NOME      ANG    Mvar/   Mvar   EQV %  Mvar     Mvar   EQUIV   Mvar
                      CE Mvar
 X------------X------X-------X-------X-----X-------X-------X-------X-------X

     1       1  1.050      .0      .0    .0    20.0      .0      .0      .0
  Barra_1         -3.1   138.6      .0    .0      .0      .0      .0      .0
     2       2   .950    83.6      .0    .0      .0      .0      .0      .0
  Barra_2           .0  -141.3      .0    .0      .0      .0      .0      .0
     3       0  1.027      .0      .0    .0    30.0      .0      .0      .0
  Barra_3         -3.2      .0      .0    .0    10.0      .0      .0      .0
     4       0   .938      .0      .0    .0    30.0      .0    17.6      .0
  Barra_4         -1.0      .0      .0    .0    40.0      .0      .0      .0



CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 4 Barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     1       1   1.050     >   20.0MW              >               138.6MVAR
  Barra_1         -3.1
                          2 Barra_2       1   -31.8    93.0
                          3 Barra_3       1    11.8    45.6

     2       2    .950                             >       83.6MW -141.3MVAR
  Barra_2           .0
                          1 Barra_1       1    34.3  -116.6
                          3 Barra_3       1    19.3   -47.9
                          4 Barra_4       1    30.0    23.2
```

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 4 Barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     3       0   1.027     >   30.0MW   10.0MVAR
  Barra_3         -3.2
                           1 Barra_1       1   -11.6   -44.6
                           2 Barra_2       1   -18.4    34.6

     4       0    .938     >   30.0MW   40.0MVAR
  Barra_4         -1.0
                           2 Barra_2       1   -30.0   -22.4



CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02


Sistema de 4 Barras
 TOTAIS DA AREA  1


 X--------X--------X--------X--------X--------X--------X--------X--------X
   GERACAO  INJ EQV   CARGA   ELO CC    SHUNT   EXPORT   IMPORT   PERDAS
     MW/      MW/      MW/      MW/     Mvar/     MW/      MW/      MW/
    Mvar     Mvar     Mvar     Mvar     EQUIV    Mvar     Mvar     Mvar
 X--------X--------X--------X--------X--------X--------X--------X--------X

      83.6       .0     80.0       .0     17.6       .0       .0      3.6
      -2.7       .0     50.0       .0       .0       .0       .0    -35.1



CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 4 Barras
 RELATORIO DE DADOS DE BARRA CA

 X--------------X-----X-----------X----------------------X-------X-------X
      BARRA  GRP          TENSAO           GERACAO          CARGA
  NUM. TP AR B L BARRA  MOD/ ESPEC         MW/Mvar           MW/    SHUNT
      NOME       CONT.  ANG  CONTR    MIN   ATUAL     MAX   Mvar     Mvar
 X----X--X--X-X-X-----X-----X-----X-------X-------X-------X-------X-------X

     1  1  1 0 0     1 1.050 1.050              .0            20.0      .0
  Barra_1              -3.1   LOC       .0   138.6       .0      .0
     2  2  1 0 0     2  .950  .950             83.6              .0      .0
  Barra_2                .0   LOC -9999.0  -141.3 99999.0      .0
     3  0  1 0 0     0 1.027                    .0            30.0      .0
  Barra_3              -3.2            .0      .0       .0    10.0
     4  0  1 0 0     0  .938                    .0            30.0    20.0
  Barra_4              -1.0            .0      .0       .0    40.0
```

APÊNDICE H – Relatório de Saída do Programa Simpot para o sistema de 4 barras

Relatório do cálculo do Fluxo de Potência pelo método de Newton Rapshon

Número máximo de iterações especificado: 500

Erro máximo especificado: 0.0010

Número de barras PQ: 2
Número de barras PV: 1
Número de barras Vteta: 1

Dados das Barras						
Barra	**Tipo Barra**	**V (pu)**	**Teta (rad)**	**P (pu)**	**Q (pu)**	**b (pu)**
1.0000	PV	1.0500	0.0000	-0.2000	0.0000	0.0000
2.0000	Vteta	0.9500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0000	PQ	0.0000	0.0000	-0.3000	-0.1000	0.0000
4.0000	PQ	0.0000	0.0000	-0.3000	-0.4000	0.2000

Dados das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**R (pu)**	**X (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	2.0000	0.0200	0.1000	0.3600	1.0000
1.0000	3.0000	0.0100	0.0500	0.0000	1.0000
2.0000	3.0000	0.0400	0.2000	0.1800	1.0000
2.0000	4.0000	0.0000	0.0500	0.0000	1.0000

Admitâncias das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**G (pu)**	**B (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	2.0000	1.9231	-9.6154	0.1800	1.0000
1.0000	3.0000	3.8462	-19.2308	0.0000	1.0000
2.0000	3.0000	0.9615	-4.8077	0.0900	1.0000
2.0000	4.0000	0.0000	-20.0000	0.0000	1.0000

Ybarra							
G + jB (pu)							
5.7692	-28.6662	-1.9231	9.6154	-3.8462	19.2308	0.0000	0.0000
-1.9231	9.6154	2.8846	-34.1531	-0.9615	4.8077	-0.0000	20.0000
-3.8462	19.2308	-0.9615	4.8077	4.8077	-23.9485	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-0.0000	20.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-19.8000

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	-0.6038	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	-0.1558	0.7112
4.0000	-0.3000	-1.2000

Jacobiana				
29.7837	-20.1923	0.0000	-4.0385	0.0000

-20.1923	24.7596	0.0000	4.6635	0.0000
0.0000	0.0000	19.0000	0.0000	0.0000
4.0385	-4.9519	0.0000	23.1373	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	20.6000

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	-0.0544	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	-0.0560	0.0283
4.0000	-0.0158	-0.0583

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	-0.0040	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	0.0027	-0.0281
4.0000	-0.0175	-0.0694

Jacobiana				
30.2422	-20.7693	0.0000	-4.0704	0.0000
-20.7693	25.5108	0.0000	4.6492	0.0000
0.0000	0.0000	17.8910	0.0000	-0.3000
4.1197	-4.7948	0.0000	24.5551	0.0000
0.0000	0.0000	0.2825	0.0000	18.2956

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	-0.0002	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	0.0002	-0.0011
4.0000	-0.0010	-0.0038

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0001	0.0000
2.0000	0.0000	0.0000
3.0000	0.0000	0.0001
4.0000	-0.0001	-0.0009

Módulo e Ângulo das Tensões nas Barras						
Iteração atual: 1				Maior Erro: 8.7919170424966E-4		
Barra	Tipo Barra	V (pu)	Teta (graus)	P (pu)	Q (pu)	b (pu)
1.0000	2.0000	1.0500	-3.1254	-0.2000	0.0000	0.0000
2.0000	3.0000	0.9500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3.0000	1.0000	1.0272	-3.1968	-0.3000	-0.1000	0.0000
4.0000	1.0000	0.9380	-0.9643	-0.3000	-0.4000	0.2000

Potências nas Barras		
Barra	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	-0.2000	1.3859
2.0000	0.8356	-1.4138
3.0000	-0.3000	-0.1000

4.0000	-0.3000	-0.4000

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra DE	**Barra PARA**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	2.0000	0.3182	-1.5254
1.0000	3.0000	-0.1181	-0.4559
2.0000	3.0000	-0.1926	0.2350
2.0000	4.0000	-0.2999	-0.4116

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra PARA	**Barra DE**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	2.0000	-0.3431	0.4697
1.0000	3.0000	0.1161	0.4562
2.0000	3.0000	0.1839	-0.5260
2.0000	4.0000	0.2999	0.0472

APÊNDICE I – Relatório de Saída do Programa Anarede para o sistema de 9 barras

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD/ ANG	GERACAO MW/ Mvar/ CE Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	FATOR GER % EQV %	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	MOTOR MW/ Mvar
1	2	1.040	143.2	.0	.0	71.6	.0	.0	.0
Barra 1		.0	54.1	.0	.0	27.1	.0	.0	.0
2	1	1.025	163.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Barra 2		9.3	13.4	.0	.0	6.7	.0	.0	.0
3	1	1.025	85.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Barra 3		4.7	-10.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0
4	0	1.026	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Barra 4		-2.2	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5	0	.996	.0	.0	.0	125.0	.0	.0	.0
Barra 5		-4.0	.0	.0	.0	50.0	.0	.0	.0
6	0	1.013	.0	.0	.0	90.0	.0	.0	.0
Barra 6		-3.7	.0	.0	.0	30.0	.0	.0	.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD/ ANG	GERACAO MW/ Mvar/ CE Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	FATOR GER % EQV %	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	MOTOR MW/ Mvar
7	0	1.026	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Barra 7		3.7	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
8	0	1.016	.0	.0	.0	100.0	.0	.0	.0
Barra 8		.7	.0	.0	.0	35.0	.0	.0	.0
9	0	1.032	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
Barra 9		2.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	NC	FLUXOS - CIRCUITOS MW	Mvar	CARGA > MW	Mvar	GERACAO > MW	Mvar	TAP	DEFAS	TIE
1 Barra 1	2	1.040 .0							71.6MW	27.1MVAR			
			4 Barra 4	1	71.6	27.0					1.000	F	
2 Barra 2	1	1.025 9.3							6.7MVAR		163.0MW	13.4MVAR	
			7 Barra 7	1	163.0	6.7					1.000	F	
3 Barra 3	1	1.025 4.7									85.0MW	-10.9MVAR	
			9 Barra 9	2	85.0	-10.9					1.000	F	

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	NC	FLUXOS - CIRCUITOS MW	Mvar	CARGA > MW	Mvar	GERACAO > MW	Mvar	TAP	DEFAS	TIE
4 Barra 4	0	1.026 -2.2											
			1 Barra 1	1	-71.6	-23.9							
			5 Barra 5	1	40.9	22.9							
			6 Barra 6	1	30.7	1.0							
5 Barra 5	0	.996 -4.0							125.0MW	50.0MVAR			
			4 Barra 4	1	-40.7	-38.7							
			7 Barra 7	1	-84.3	-11.3							

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	NC	FLUXOS - CIRCUITOS MW	Mvar	CARGA MW	Mvar	GERACAO MW	Mvar	TAP	DEFAS	TIE
6 Barra 6	0	1.013 -3.7					90.0MW	30.0MVAR					
			4 Barra 4	1	-30.5	-16.5							
			9 Barra 9	1	-59.5	-13.5							
7 Barra 7	0	1.026 3.7											
			2 Barra 2	1	-163.0	9.2							
			5 Barra 5	1	86.6	-8.4							
			8 Barra 8	1	76.4	-.8							

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	NC	FLUXOS - CIRCUITOS MW	Mvar	CARGA MW	Mvar	GERACAO MW	Mvar	TAP	DEFAS	TIE
8 Barra 8	0	1.016 .7					100.0MW	35.0MVAR					
			7 Barra 7	1	-75.9	-10.7							
			9 Barra 9	1	-24.1	-24.3							
9 Barra 9	0	1.032 2.0											
			3 Barra 3	2	-85.0	15.0							
			6 Barra 6	1	60.8	-18.1							
			8 Barra 8	1	24.2	3.1							

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC

TOTAIS DA AREA 1

GERACAO MW/ Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	EXPORT MW/ Mvar	IMPORT MW/ Mvar	PERDAS MW/ Mvar
391.2	.0	386.6	.0	.0	.0	.0	4.6
56.6	.0	148.8	.0	.0	.0	.0	-92.2

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE DADOS DE BARRA CA

BARRA NUM.	NOME	TP	AR	GRP B	L	TENSAO BARRA CONT.	MOD/ ANG	ESPEC CONTR	GERACAO MW/Mvar MIN	ATUAL	MAX	CARGA MW/ Mvar	SHUNT Mvar
1		2	1	0 0		1	1.040	1.040		143.2		71.6	.0
Barra 1							.0	LOC	-9999.0	54.1	99999.0	27.1	
2		1	1	0 0		2	1.025	1.025		163.0		.0	.0
Barra 2							9.3	LOC	.0	13.4	.0	6.7	
3		1	1	0 0		3	1.025	1.025		85.0		.0	.0
Barra 3							4.7	LOC	.0	-10.9	.0	.0	
4		0	1	0 0		0	1.026			.0		.0	.0
Barra 4							-2.2		.0	.0	.0	.0	
5		0	1	0 0		0	.996			.0		125.0	.0
Barra 5							-4.0		.0	.0	.0	50.0	
6		0	1	0 0		0	1.013			.0		90.0	.0
Barra 6							-3.7		.0	.0	.0	30.0	
7		0	1	0 0		0	1.026			.0		.0	.0
Barra 7							3.7		.0	.0	.0	.0	

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema 9 Barras COPPETEC
RELATORIO DE DADOS DE BARRA CA

BARRA NUM.	NOME	TP	AR	GRP B	L	TENSAO BARRA CONT.	MOD/ ANG	ESPEC CONTR	GERACAO MW/Mvar MIN	ATUAL	MAX	CARGA MW/ Mvar	SHUNT Mvar
8		0	1	0 0		0	1.016			.0		100.0	.0
Barra 8							.7		.0	.0	.0	35.0	
9		0	1	0 0		0	1.032			.0		.0	.0
Barra 9							2.0		.0	.0	.0	.0	

APÊNDICE J – Relatório de Saída do Programa Simpot para o sistema de 9 barras

Relatório do cálculo do Fluxo de Potência pelo método de Newton Rapshon

Número máximo de iterações especificado: 500

Erro máximo especificado: 0.01

Número de barras PQ: 6
Número de barras PV: 2
Número de barras Vteta: 1

Dados das Barras						
Barra	**Tipo Barra**	**V (pu)**	**Teta (rad)**	**P (pu)**	**Q (pu)**	**b (pu)**
1.0000	Vteta	1.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	PV	1.0250	0.0000	1.6300	0.0000	0.0000
3.0000	PV	1.0250	0.0000	0.8500	0.0000	0.0000
4.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5.0000	PQ	0.0000	0.0000	-1.2500	-0.5000	0.0000
6.0000	PQ	0.0000	0.0000	-0.9000	-0.3000	0.0000
7.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8.0000	PQ	0.0000	0.0000	-1.0000	-0.3500	0.0000
9.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Dados das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**R (pu)**	**X (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
2.0000	7.0000	0.0000	0.0625	0.0000	1.0000
4.0000	1.0000	0.0000	0.0576	0.0000	1.0000
5.0000	4.0000	0.0100	0.0850	0.1760	1.0000
5.0000	7.0000	0.0320	0.1610	0.3060	1.0000
6.0000	4.0000	0.0170	0.0920	0.1580	1.0000
7.0000	8.0000	0.0085	0.0720	0.1490	1.0000
8.0000	9.0000	0.0119	0.1008	0.2090	1.0000
9.0000	3.0000	0.0000	0.0586	0.0000	1.0000
9.0000	6.0000	0.0390	0.1700	0.3580	1.0000

Admitâncias das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**G (pu)**	**B (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
2.0000	7.0000	0.0000	-16.0000	0.0000	1.0000
4.0000	1.0000	0.0000	-17.3611	0.0000	1.0000
5.0000	4.0000	1.3652	-11.6041	0.0880	1.0000
5.0000	7.0000	1.1876	-5.9751	0.1530	1.0000
6.0000	4.0000	1.9422	-10.5107	0.0790	1.0000
7.0000	8.0000	1.6171	-13.6980	0.0745	1.0000
8.0000	9.0000	1.1551	-9.7843	0.1045	1.0000
9.0000	3.0000	0.0000	-17.0648	0.0000	1.0000
9.0000	6.0000	1.2820	-5.5882	0.1790	1.0000

Ybarra
G + jB (pu)

0.0000	-17.3611	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	17.3611	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	-16.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	16.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-17.0648	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	17.0648
-0.0000	17.3611	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.3074	-39.3089	-1.3652	11.6041	-1.9422	10.5107	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.3652	11.6041	2.5528	-17.3382	0.0000	0.0000	-1.1876	5.9751	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.9422	10.5107	0.0000	0.0000	3.2242	-15.8409	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.2820	5.5882
0.0000	0.0000	-0.0000	16.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.1876	5.9751	0.0000	0.0000	2.8047	-35.4456	-1.6171	13.6980	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.6171	13.6980	2.7722	-23.3032	-1.1551	9.7843
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	17.0648	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.2820	5.5882	0.0000	0.0000	-1.1551	9.7843	2.4371	-32.1539

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	1.6300	0.0000
3.0000	0.8500	0.0000
4.0000	0.0000	0.8614
5.0000	-1.2500	-0.2590
6.0000	-0.9000	-0.0420
7.0000	0.0000	0.6275
8.0000	-1.0000	-0.1710
9.0000	0.0000	0.7101

Jacobiana													
16.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-16.4000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	17.4915	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-17.4915	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	40.1703	-11.6041	-10.5107	0.0000	0.0000	0.0000	3.3074	-1.3652	-1.9422	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-11.6041	17.5792	0.0000	-5.9751	0.0000	0.0000	-1.3652	2.5528	0.0000	-1.1876	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-10.5107	0.0000	16.0989	0.0000	0.0000	-5.5882	-1.9422	0.0000	3.2242	0.0000	0.0000	-1.2820
-16.4000	0.0000	0.0000	-5.9751	0.0000	36.0731	-13.6980	0.0000	0.0000	-1.1876	0.0000	2.8047	-1.6171	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-13.6980	23.4822	-9.7843	0.0000	0.0000	0.0000	-1.6171	2.7722	-1.1551
0.0000	-17.4915	0.0000	0.0000	-5.5882	0.0000	-9.7843	32.8640	0.0000	0.0000	-1.2820	0.0000	-1.1551	2.4371
0.0000	0.0000	-3.3074	1.3652	1.9422	0.0000	0.0000	0.0000	38.4474	-11.6041	-10.5107	0.0000	0.0000	0.0000

0.0000	0.0000	1.3652	-2.5528	0.0000	1.1876	0.0000	0.0000	-11.6041	17.0972	0.0000	-5.9751	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	1.9422	0.0000	-3.2242	0.0000	0.0000	1.2820	-10.5107	0.0000	15.5829	0.0000	0.0000	-5.5882
-0.0000	0.0000	0.0000	1.1876	0.0000	-2.8047	1.6171	0.0000	0.0000	-5.9751	0.0000	34.8181	-13.6980	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.6171	-2.7722	1.1551	0.0000	0.0000	0.0000	-13.6980	23.1242	-9.7843
0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	1.2820	0.0000	1.1551	-2.4371	0.0000	0.0000	-5.5882	0.0000	-9.7843	31.4437

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.1726	0.0000
3.0000	0.0908	0.0000
4.0000	-0.0371	0.0334
5.0000	-0.0668	0.0084
6.0000	-0.0628	0.0223
7.0000	0.0732	0.0372
8.0000	0.0191	0.0266
9.0000	0.0422	0.0400

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0579	0.0000
3.0000	-0.0336	0.0000
4.0000	-0.0106	-0.0501
5.0000	0.0379	-0.0714
6.0000	0.0439	-0.0424
7.0000	-0.0421	-0.1875
8.0000	0.0610	-0.0241
9.0000	-0.0269	-0.0828

Jacobiana													
16.9269	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-16.9269	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.6273	0.0000	0.0000
0.0000	18.1691	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-18.1691	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8621
0.0000	0.0000	41.7399	-12.0455	-11.0484	0.0000	0.0000	0.0000	4.7679	-1.0284	-1.7093	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-12.0455	18.0609	0.0000	-6.0154	0.0000	0.0000	-1.0284	3.7403	0.0000	-0.3447	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-11.0484	0.0000	17.0999	0.0000	0.0000	-6.0516	-1.7093	0.0000	2.9301	0.0000	0.0000	-1.9345
-16.9269	0.0000	0.0000	-6.0154	0.0000	37.6007	-14.6585	0.0000	0.0000	-0.3447	0.0000	1.4275	-2.4439	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-14.6585	25.0737	-10.4152	0.0000	0.0000	0.0000	-2.4439	2.2820	-0.9538
0.0000	-18.1691	0.0000	0.0000	-6.0516	0.0000	-10.4152	34.6359	0.0000	0.0000	-1.9345	0.0000	-0.9538	3.0631
0.0000	0.0000	-4.8097	1.7814	2.3361	0.0000	0.0000	0.0000	40.6709	-11.7378	-10.7930	0.0000	0.0000	0.0000

0.0000	0.0000	1.7814	-3.8840	0.0000	2.1026	0.0000	0.0000	-11.7378	16.6319	0.0000	-6.1338	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.3361	0.0000	-3.0694	0.0000	0.0000	0.7333	-10.7930	0.0000	15.8401	0.0000	0.0000	-5.6400
-1.6879	0.0000	0.0000	2.1026	0.0000	-1.3447	0.9300	0.0000	0.0000	-6.1338	0.0000	37.1263	-14.0965	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9300	-2.4039	1.4739	0.0000	0.0000	0.0000	-14.0965	23.5512	-10.0696
0.0000	0.8836	0.0000	0.0000	0.7333	0.0000	1.4739	-3.0908	0.0000	0.0000	-5.6400	0.0000	-10.0696	33.7932

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0217	0.0000
3.0000	-0.0150	0.0000
4.0000	-0.0018	-0.0075
5.0000	-0.0028	-0.0126
6.0000	-0.0032	-0.0104
7.0000	-0.0170	-0.0128
8.0000	-0.0136	-0.0119
9.0000	-0.0135	-0.0079

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.0406	0.0000
3.0000	-0.0003	0.0000
4.0000	-0.0105	-0.0068
5.0000	-0.0558	0.0082
6.0000	-0.0061	0.0143
7.0000	0.0398	0.0303
8.0000	-0.0071	0.0078
9.0000	0.0076	-0.0075

Jacobiana													
16.7261	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-16.7261	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.5514	0.0000	0.0000
0.0000	18.0322	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-18.0322	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8296
0.0000	0.0000	41.1684	-11.8061	-10.8533	0.0000	0.0000	0.0000	4.8082	-1.0036	-1.6767	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-11.8061	17.7016	0.0000	-5.8955	0.0000	0.0000	-1.0036	3.6117	0.0000	-0.4264	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-10.8533	0.0000	16.7903	0.0000	0.0000	-5.9369	-1.6767	0.0000	2.9636	0.0000	0.0000	-1.8624
-16.7261	0.0000	0.0000	-5.8955	0.0000	36.9284	-14.3068	0.0000	0.0000	-0.4264	0.0000	1.4257	-2.3658	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-14.3068	24.5226	-10.2158	0.0000	0.0000	0.0000	-2.3658	2.3025	-0.9417
0.0000	-18.0322	0.0000	0.0000	-5.9369	0.0000	-10.2158	34.1850	0.0000	0.0000	-1.8624	0.0000	-0.9417	3.0865
0.0000	0.0000	-4.7902	1.7584	2.3111	0.0000	0.0000	0.0000	40.3330	-11.5918	-10.6860	0.0000	0.0000	0.0000

0.0000	0.0000	1.7584	-3.7256	0.0000	1.9672	0.0000	0.0000	-11.5918	16.3637	0.0000	-6.0515	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.3111	0.0000	-3.0924	0.0000	0.0000	0.7812	-10.6860	0.0000	15.6123	0.0000	0.0000	-5.6165
-1.5894	0.0000	0.0000	1.9672	0.0000	-1.3351	0.9573	0.0000	0.0000	-6.0515	0.0000	36.4500	-13.9313	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9573	-2.4041	1.4468	0.0000	0.0000	0.0000	-13.9313	23.2385	-9.9528
0.0000	0.8503	0.0000	0.0000	0.7812	0.0000	1.4468	-3.0783	0.0000	0.0000	-5.6165	0.0000	-9.9528	33.4372

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.0141	0.0000
3.0000	0.0076	0.0000
4.0000	0.0009	0.0002
5.0000	0.0012	0.0003
6.0000	0.0028	0.0013
7.0000	0.0114	0.0024
8.0000	0.0097	0.0021
9.0000	0.0077	0.0006

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0075	0.0000
3.0000	0.0000	0.0000
4.0000	0.0005	0.0017
5.0000	0.0045	-0.0012
6.0000	-0.0004	-0.0058
7.0000	-0.0097	-0.0238
8.0000	0.0010	-0.0031
9.0000	-0.0009	0.0017

Jacobiana													
16.7610	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-16.7610	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.5947	0.0000	0.0000
0.0000	18.0435	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-18.0435	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.8293
0.0000	0.0000	41.1977	-11.8122	-10.8732	0.0000	0.0000	0.0000	4.7662	-1.0082	-1.6992	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-11.8122	17.7029	0.0000	-5.8907	0.0000	0.0000	-1.0082	3.6714	0.0000	-0.3647	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-10.8732	0.0000	16.8252	0.0000	0.0000	-5.9520	-1.6992	0.0000	2.9223	0.0000	0.0000	-1.8911
-16.7610	0.0000	0.0000	-5.8907	0.0000	37.0234	-14.3716	0.0000	0.0000	-0.3647	0.0000	1.4280	-2.3963	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-14.3716	24.6178	-10.2462	0.0000	0.0000	0.0000	-2.3963	2.2631	-0.9632
0.0000	-18.0435	0.0000	0.0000	-5.9520	0.0000	-10.2462	34.2417	0.0000	0.0000	-1.8911	0.0000	-0.9632	3.0379
0.0000	0.0000	-4.7531	1.7549	2.2937	0.0000	0.0000	0.0000	40.3307	-11.5951	-10.6963	0.0000	0.0000	0.0000

0.0000	0.0000	1.7549	-3.7875	0.0000	2.0326	0.0000	0.0000	-11.5951	16.3544	0.0000	-6.0574	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.2937	0.0000	-3.0472	0.0000	0.0000	0.7535	-10.6963	0.0000	15.6604	0.0000	0.0000	-5.6108
-1.6375	0.0000	0.0000	2.0326	0.0000	-1.3308	0.9358	0.0000	0.0000	-6.0574	0.0000	36.5940	-13.9597	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9358	-2.3664	1.4306	0.0000	0.0000	0.0000	-13.9597	23.3035	-9.9715
0.0000	0.8500	0.0000	0.0000	0.7535	0.0000	1.4306	-3.0341	0.0000	0.0000	-5.6108	0.0000	-9.9715	33.4621

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0046	0.0000
3.0000	-0.0029	0.0000
4.0000	-0.0009	-0.0002
5.0000	-0.0016	-0.0005
6.0000	-0.0016	-0.0007
7.0000	-0.0040	-0.0013
8.0000	-0.0035	-0.0011
9.0000	-0.0029	-0.0004

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.0043	0.0000
3.0000	-0.0000	0.0000
4.0000	-0.0005	-0.0012
5.0000	-0.0036	0.0006
6.0000	-0.0001	0.0017
7.0000	0.0044	0.0053
8.0000	-0.0005	0.0009
9.0000	0.0006	-0.0007

Módulo e Ângulo das Tensões nas Barras						
Iteração atual: 3				Maior Erro: 0.0052714698963559365		
Barra	Tipo Barra	V (pu)	Teta (graus)	P (pu)	Q (pu)	b (pu)
1.0000	3.0000	1.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	2.0000	1.0250	9.1947	1.6300	0.0000	0.0000
3.0000	2.0000	1.0250	4.6140	0.8500	0.0000	0.0000
4.0000	1.0000	1.0258	-2.2293	0.0000	0.0000	0.0000
5.0000	1.0000	0.9956	-4.0109	-1.2500	-0.5000	0.0000
6.0000	1.0000	1.0126	-3.7121	-0.9000	-0.3000	0.0000
7.0000	1.0000	1.0255	3.6477	0.0000	0.0000	0.0000
8.0000	1.0000	1.0157	0.6650	-1.0000	-0.3500	0.0000
9.0000	1.0000	1.0323	1.9158	0.0000	0.0000	0.0000

Potências nas Barras		
Barra	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	0.7205	0.2705
2.0000	1.6300	0.0699
3.0000	0.8500	-0.1076
4.0000	0.0005	0.0012
5.0000	-1.2500	-0.5000

6.0000	-0.9000	-0.3000
7.0000	-0.0044	-0.0053
8.0000	-1.0000	-0.3500
9.0000	-0.0006	0.0007

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra DE	**Barra PARA**	**P (pu)**	**Q (pu)**
2.0000	7.0000	-1.6257	-0.0699
4.0000	1.0000	0.7205	0.2390
5.0000	4.0000	0.4088	0.1252
5.0000	7.0000	0.8376	-0.3412
6.0000	4.0000	0.3079	-0.0769
7.0000	8.0000	-0.7610	-0.2268
8.0000	9.0000	0.2431	-0.0795
9.0000	3.0000	0.8500	-0.1485
9.0000	6.0000	-0.6054	-0.3921

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra PARA	**Barra DE**	**P (pu)**	**Q (pu)**
2.0000	7.0000	1.6257	-0.0876
4.0000	1.0000	-0.7205	-0.2705
5.0000	4.0000	-0.4114	-0.5936
5.0000	7.0000	-0.8603	-0.7213
6.0000	4.0000	-0.3095	-0.3649
7.0000	8.0000	0.7563	0.0517
8.0000	9.0000	-0.2440	-0.4193
9.0000	3.0000	-0.8500	0.1076
9.0000	6.0000	0.5920	-0.1521

APÊNDICE K – Relatório de Saída do Programa Anarede para o sistema de 20 barras

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

BARRA NUM.	NOME	TIPO	TENSAO MOD/ ANG	GERACAO MW/ Mvar/ CE Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	FATOR GER % EQV %	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	MOTOR MW/ Mvar
1		2	1.050	118.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0
1			.0	18.8	.0	.0	.0	.0	.0	.0
2		0	.945	.0	.0	.0	100.0	.0	.0	.0
2			-25.5	.0	.0	.0	10.0	.0	.0	.0
3		0	.985	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
3			-15.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
4		0	.997	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
4			-6.7	.0	.0	.0	10.0	.0	.0	.0
5		0	.974	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
5			-17.4	.0	.0	.0	10.0	.0	.0	.0
6		0	.967	.0	.0	.0	100.0	.0	.0	.0
6			-19.7	.0	.0	.0	20.0	.0	.0	.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

BARRA NUM.	NOME	TIPO	TENSAO MOD/ ANG	GERACAO MW/ Mvar/ CE Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	FATOR GER % EQV %	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	MOTOR MW/ Mvar
7		0	1.006	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
7			-12.5	.0	.0	.0	10.0	.0	.0	.0
8		0	.991	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
8			-10.1	.0	.0	.0	20.0	.0	.0	.0
9		1	1.045	100.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
9			-.8	18.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0
10		0	1.047	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
10			-.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
11		0	.976	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
11			-20.4	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
12		0	.984	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
12			-18.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

BARRA NUM.	NOME	TIPO	TENSAO MOD/ ANG	GERACAO MW/ Mvar/ CE Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	FATOR GER % EQV %	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	MOTOR MW/ Mvar
13		0	.987	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
13			-9.9	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
14		1	1.040	100.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
14			-7.7	53.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0
15		0	.995	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
15			-13.1	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
16		0	.977	.0	.0	.0	50.0	.0	.0	.0
16			-20.2	.0	.0	.0	-20.0	.0	.0	.0
17		0	.996	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
17			-15.6	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
18		0	1.039	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
18			-5.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras

RELATORIO DE BARRAS CA * AREA 1 *

BARRA NUM.	NOME	TIPO	TENSAO MOD/ ANG	GERACAO MW/ Mvar/ CE Mvar	INJ EQV MW/ Mvar	FATOR GER % EQV %	CARGA MW/ Mvar	ELO CC MW/ Mvar	SHUNT Mvar/ EQUIV	MOTOR MW/ Mvar
19		0	.997	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
19			-11.5	.0	.0	.0	.0	.0	.0	.0
20		0	.965	.0	.0	.0	50.0	.0	.0	.0
20			-22.6	.0	.0	.0	-20.0	.0	.0	.0

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     1       2   1.050                             >      118.8MW   18.8MVAR
  1                 .0
                          10 10            2    13.1     1.0
                          18 18            1   105.7    17.8 1.000F

     2       0    .945     >  100.0MW   10.0MVAR
  2              -25.5
                          11 11            2   -40.9     -.8
                          20 20            2   -59.1    -9.2

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     3       0    .985
  3              -15.6
                          12 12            1    42.6     1.6
                          15 15            2   -42.6    -1.6

     4       0    .997     >            10.0MVAR
  4               -6.7
                           9 9             1  -109.4   -11.0
                          13 13            1   109.4     1.0

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     5       0    .974     >            10.0MVAR
  5              -17.4
                          13 13            1   -84.5    -3.0
                          20 20            1    84.5    -7.0

     6       0    .967     >  100.0MW   20.0MVAR
  6              -19.7
                          16 16            1    13.2   -21.5
                             19 19              1  -113.2     1.5
```

```
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     7       0   1.006     >            10.0MVAR
  7              -12.5
                         14 14            1   -45.0   -10.8
                         17 17            1    45.0      .8

     8       0    .991     >            20.0MVAR
  8              -10.1
                         15 15            1    64.0    -2.7 1.000F
                         18 18            1   -64.0   -17.3

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

     9       1   1.045                              >      100.0MW   18.1MVAR
  9                -.8
                          4 4             1   113.1    20.0
                         10 10            1   -13.1    -1.9

    10       0   1.047
  10               -.5
                          1 1             2   -13.1     -.9
                          9 9             1    13.1      .9

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
 RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA  1 *

 X--- DADOS-BARRA ----X-------- CARGA -----------X--------- GERACAO --------X
  DA BARRA      TENSAO     >       MW       Mvar   >           MW       Mvar
  NUM.    TIPO   MOD   PARA BARRA        F L U X O S  -  C I R C U I T O S
      NOME       ANG   NUM.     NOME     NC     MW    Mvar    TAP  DEFAS TIE
 X------------X-------X----X------------X--X-------X-------X------X-----X---X

    11       0    .976
  11             -20.4
                          2 2             2    42.2      .0
                         12 12            1   -42.2      .0

    12       0    .984
  12             -18.6
                          3 3             1   -42.6      .7 1.000F
                           11 11               1    42.6     -.7
```

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	FLUXOS - CIRCUITOS NC	CARGA MW	CARGA Mvar	GERACAO MW	GERACAO Mvar	TAP	DEFAS	TIE
13	0	.987									
13		-9.9									
			4 4	1	-108.2	4.0					
			5 5	1	84.5	14.3			1.000F		
			19 19	1	23.7	-18.4					
14	1	1.040					> 100.0MW	53.5MVAR			
14		-7.7									
			7 7	1	45.6	9.7					
			18 18	1	-39.9	10.0					
			19 19	1	94.3	33.8					

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	FLUXOS - CIRCUITOS NC	CARGA MW	CARGA Mvar	GERACAO MW	GERACAO Mvar	TAP	DEFAS	TIE
15	0	.995									
15		-13.1									
			3 3	2	43.0	.5					
			8 8	1	-64.0	6.0					
			17 17	1	21.0	-6.6					
16	0	.977	> 50.0MW	-20.0MVAR							
16		-20.2									
			6 6	1	-13.1	19.9					
			17 17	1	-64.1	1.4					
			20 20	1	27.2	-1.3					

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	FLUXOS - CIRCUITOS NC	CARGA MW	CARGA Mvar	GERACAO MW	GERACAO Mvar	TAP	DEFAS	TIE
17	0	.996									
17		-15.6									
			7 7	1	-44.6	-2.4					
			15 15	1	-20.8	2.5					
			16 16	1	65.4	-.1					
18	0	1.039									
18		-5.0									
			1 1	1	-105.7	-8.5					
			8 8	1	65.3	20.8					
			14 14	1	40.4	-12.4					

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE CIRC. CA DO SIST. * AREA 1 *

DA BARRA NUM. NOME	TIPO	TENSAO MOD ANG	PARA BARRA NUM. NOME	FLUXOS - CIRCUITOS NC	CARGA MW	CARGA Mvar	GERACAO MW	GERACAO Mvar	TAP	DEFAS	TIE
19	0	.997									
19		-11.5									
			6 6	1	115.9	12.1					
			13 13	1	-23.5	16.3					
			14 14	1	-92.5	-28.4					
20	0	.965	> 50.0MW -20.0MVAR								
20		-22.6									
			2 2	2	59.9	10.6					
			5 5	1	-83.0	10.8					
			16 16	1	-26.9	-1.3					

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE DADOS DE CIRCUITO CA

BARRAS DE	BARRAS PARA	CIRCUITO NUM.	E	P	RESIST REATAN (%)	SUSCEP (Mvar)	T A P ESPEC	T A P MIN	T A P MAX	T A P ANG DEFAS	BARRA CONT.	(MVA) NORMAL	(MVA) EMERG.	IDENTIF DA BARRA PARA BARRA
1	10	2	L	F	2.00	.000						9999.0		1
					7.00							9999.0		10
1	18	1	L	F	.00	.000	1.000					9999.0		1
					9.00							9999.0		18
2	11	2	L	F	7.02	5.000						9999.0		2
					20.01							9999.0		11
2	20	2	L	F	2.00	2.000						9999.0		2
					8.00							9999.0		20
3	15	2	L	F	2.00	3.000						9999.0		3
					10.00							9999.0		15
4	13	1	L	F	1.00	1.000						9999.0		4
					5.00							9999.0		13

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE DADOS DE CIRCUITO CA

BARRAS DE	BARRAS PARA	CIRCUITO NUM.	E	P	RESIST REATAN (%)	SUSCEP (Mvar)	T A P ESPEC	T A P MIN	T A P MAX	T A P ANG DEFAS	BARRA CONT.	(MVA) NORMAL	(MVA) EMERG.	IDENTIF DA BARRA PARA BARRA
5	20	1	L	F	2.00	4.000						9999.0		5
					10.00							9999.0		20
7	17	1	L	F	2.00	4.000						9999.0		7
					12.00							9999.0		17
8	15	1	L	F	.00	.000	1.000					9999.0		8
					8.00							9999.0		15
9	4	1	L	F	3.00	3.000						9999.0		9
					10.00							9999.0		4
10	9	1	L	F	1.00	1.000						9999.0		10
					5.00							9999.0		9

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE DADOS DE CIRCUITO CA

BARRAS DE	BARRAS PARA	CIRCUITO NUM.	E	P	RESIST REATAN (%)	SUSCEP (Mvar)	T A P ESPEC	T A P MIN	T A P MAX	ANG DEFAS	BARRA CONT.	(MVA) NORMAL	(MVA) EMERG.	IDENTIF DA BARRA PARA BARRA
12	3	1	L	F	.00	.000	1.000					9999.0		12
					12.00							9999.0		3
12	11	1	L	F	2.00	2.000						9999.0		12
					7.00							9999.0		11
13	5	1	L	F	.00	.000	1.000					9999.0		13
					15.00							9999.0		5
13	19	1	L	F	3.00	3.000						9999.0		13
					10.00							9999.0		19
14	7	1	L	F	3.00	5.000						9999.0		14
					20.00							9999.0		7
14	18	1	L	F	3.00	4.000						9999.0		14
					12.00							9999.0		18
14	19	1	L	F	2.00	2.000						9999.0		14
					8.00							9999.0		19

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Eletrica - ANAREDE V08-JAN02

Sistema de 20barras
RELATORIO DE DADOS DE CIRCUITO CA

BARRAS DE	BARRAS PARA	CIRCUITO NUM.	E	P	RESIST REATAN (%)	SUSCEP (Mvar)	T A P ESPEC	T A P MIN	T A P MAX	ANG DEFAS	BARRA CONT.	(MVA) NORMAL	(MVA) EMERG.	IDENTIF DA BARRA PARA BARRA
15	17	1	L	F	4.00	5.000						9999.0		15
					20.00							9999.0		17
16	6	1	L	F	1.00	2.000						9999.0		16
					5.00							9999.0		6
16	20	1	L	F	4.00	4.000						9999.0		16
					15.00							9999.0		20
17	16	1	L	F	3.00	4.000						9999.0		17
					12.00							9999.0		16
18	8	1	L	F	3.00	3.000						9999.0		18
					15.00							9999.0		8
19	6	1	L	F	2.00	3.000						9999.0		19
					12.00							9999.0		6

APÊNDICE L – Relatório de Saída do Programa Simpot para o sistema de 20 barras

Relatório do cálculo do Fluxo de Potência pelo método de Newton Rapshon

Número máximo de iterações especificado: 5000

Erro máximo especificado: 0.0010

Número de barras PQ: 17

Número de barras PV: 2

Número de barras Vteta: 1

Dados das Barras						
Barra	**Tipo Barra**	**V (pu)**	**Teta (rad)**	**P (pu)**	**Q (pu)**	**b (pu)**
1.0000	Vteta	1.0500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	PQ	0.0000	0.0000	-1.0000	-0.1000	0.0000
3.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1000	0.0000
5.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	-0.1000	0.0000
6.0000	PQ	0.0000	0.0000	-1.0000	-0.2000	0.0000
7.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.0000
8.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	-0.2000	0.0000
9.0000	PV	1.0450	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
10.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14.0000	PV	1.0400	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
15.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16.0000	PQ	0.0000	0.0000	-0.5000	0.2000	0.0000
17.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19.0000	PQ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20.0000	PQ	0.0000	0.0000	-0.5000	0.2000	0.0000

Dados das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**R (pu)**	**X (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	10.0000	0.0180	0.0670	0.0000	1.0000
1.0000	18.0000	0.0000	0.0900	0.0000	1.0000
2.0000	11.0000	0.0700	0.2000	0.0500	1.0000
2.0000	20.0000	0.0200	0.0800	0.0200	1.0000
3.0000	15.0000	0.0200	0.1000	0.0300	1.0000
4.0000	13.0000	0.0100	0.0500	0.0100	1.0000
5.0000	20.0000	0.0200	0.1000	0.0400	1.0000
7.0000	17.0000	0.0200	0.1200	0.0400	1.0000
8.0000	15.0000	0.0000	0.0800	0.0000	1.0000
9.0000	4.0000	0.0300	0.1000	0.0300	1.0000
10.0000	9.0000	0.0100	0.0500	0.0100	1.0000
12.0000	3.0000	0.0000	0.1200	0.0000	1.0000
12.0000	11.0000	0.0200	0.0700	0.0200	1.0000
13.0000	5.0000	0.0000	0.1500	0.0000	1.0000
13.0000	19.0000	0.0300	0.1000	0.0300	1.0000
14.0000	7.0000	0.0300	0.2000	0.0500	1.0000
14.0000	18.0000	0.0300	0.1200	0.0400	1.0000
14.0000	19.0000	0.0200	0.0800	0.0200	1.0000
15.0000	17.0000	0.0400	0.2000	0.0500	1.0000

16.0000	6.0000	0.0100	0.0500	0.0200	1.0000
16.0000	20.0000	0.0400	0.1500	0.0400	1.0000
17.0000	16.0000	0.0300	0.1200	0.0400	1.0000
18.0000	8.0000	0.0300	0.1500	0.0300	1.0000
19.0000	6.0000	0.0200	0.1200	0.0300	1.0000

Admitâncias das Linhas					
Barra DE	**Barra PARA**	**G (pu)**	**B (pu)**	**Bsh (pu)**	**a**
1.0000	10.0000	3.7399	-13.9206	0.0000	1.0000
1.0000	18.0000	0.0000	-11.1111	0.0000	1.0000
2.0000	11.0000	1.5590	-4.4543	0.0250	1.0000
2.0000	20.0000	2.9412	-11.7647	0.0100	1.0000
3.0000	15.0000	1.9231	-9.6154	0.0150	1.0000
4.0000	13.0000	3.8462	-19.2308	0.0050	1.0000
5.0000	20.0000	1.9231	-9.6154	0.0200	1.0000
7.0000	17.0000	1.3514	-8.1081	0.0200	1.0000
8.0000	15.0000	0.0000	-12.5000	0.0000	1.0000
9.0000	4.0000	2.7523	-9.1743	0.0150	1.0000
10.0000	9.0000	3.8462	-19.2308	0.0050	1.0000
12.0000	3.0000	0.0000	-8.3333	0.0000	1.0000
12.0000	11.0000	3.7736	-13.2075	0.0100	1.0000
13.0000	5.0000	0.0000	-6.6667	0.0000	1.0000
13.0000	19.0000	2.7523	-9.1743	0.0150	1.0000
14.0000	7.0000	0.7335	-4.8900	0.0250	1.0000
14.0000	18.0000	1.9608	-7.8431	0.0200	1.0000
14.0000	19.0000	2.9412	-11.7647	0.0100	1.0000
15.0000	17.0000	0.9615	-4.8077	0.0250	1.0000
16.0000	6.0000	3.8462	-19.2308	0.0100	1.0000
16.0000	20.0000	1.6598	-6.2241	0.0200	1.0000
17.0000	16.0000	1.9608	-7.8431	0.0200	1.0000
18.0000	8.0000	1.2821	-6.4103	0.0150	1.0000
19.0000	6.0000	1.3514	-8.1081	0.0150	1.0000

| Ybarra | | | | |

| | | |

| | | |

| | | |

| | | |

| | | |

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.4215	0.0154
3.0000	-0.2609	0.0455
4.0000	-0.1092	0.0256
5.0000	-0.2891	0.0343
6.0000	-0.3263	0.0209
7.0000	-0.2070	0.0610
8.0000	-0.1703	0.0339
9.0000	-0.0051	0.0000
10.0000	-0.0029	0.0495
11.0000	-0.3396	0.0451
12.0000	-0.3102	0.0509
13.0000	-0.1639	0.0245
14.0000	-0.1181	0.0000
15.0000	-0.2186	0.0476
16.0000	-0.3354	0.0347
17.0000	-0.2597	0.0533
18.0000	-0.0802	0.0538
19.0000	-0.1889	0.0283
20.0000	-0.3755	0.0320

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.0403	-0.0379
3.0000	-0.0034	-0.0253
4.0000	-0.0530	-0.0865
5.0000	-0.0152	-0.0856
6.0000	0.0296	-0.0809
7.0000	-0.0318	-0.0515
8.0000	-0.0038	-0.0441
9.0000	-0.0289	0.0000
10.0000	-0.0187	-0.0815
11.0000	0.0078	-0.0277
12.0000	-0.0007	-0.0127
13.0000	-0.0136	-0.0925
14.0000	-0.0467	0.0000
15.0000	-0.0119	-0.0256
16.0000	0.0374	-0.0460
17.0000	0.0069	-0.0465
18.0000	-0.0324	-0.1214
19.0000	-0.0408	-0.1277
20.0000	0.0324	-0.0706

| Jacobiana | | |

| | | |

| | | |

| | | |

2.0000	-0.0661	-0.0528
3.0000	-0.0605	-0.0401
4.0000	-0.0753	-0.0253
5.0000	-0.0914	-0.0474
6.0000	-0.0865	-0.0416
7.0000	-0.0879	-0.0260
8.0000	-0.0597	-0.0280
9.0000	-0.0472	0.0000
10.0000	-0.0271	-0.0031
11.0000	-0.0624	-0.0476
12.0000	-0.0622	-0.0445
13.0000	-0.0843	-0.0325
14.0000	-0.0800	0.0000
15.0000	-0.0663	-0.0342
16.0000	-0.0853	-0.0432
17.0000	-0.0854	-0.0362
18.0000	-0.0423	-0.0058
19.0000	-0.0868	-0.0260
20.0000	-0.0794	-0.0512

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.1748	0.0472
3.0000	-0.0586	0.0110
4.0000	0.1074	-0.0877
5.0000	0.1529	-0.0502
6.0000	0.0014	0.0102
7.0000	0.0522	-0.0178
8.0000	0.0736	-0.0229
9.0000	0.0542	0.0000
10.0000	-0.0028	-0.0125
11.0000	-0.0006	-0.0079
12.0000	0.0017	-0.0211
13.0000	0.1534	-0.0295
14.0000	0.0644	0.0000
15.0000	0.0272	-0.0166
16.0000	0.0185	-0.0028
17.0000	0.0912	-0.0307
18.0000	0.0354	-0.1345
19.0000	0.1445	-0.0424
20.0000	0.0054	0.0243

| Jacobiana | | |

| | | |

| | | |

| | | |

8.0000	0.0353	-0.0139
9.0000	0.0277	0.0000
10.0000	0.0159	0.0000
11.0000	0.0331	-0.0128
12.0000	0.0339	-0.0138
13.0000	0.0563	-0.0065
14.0000	0.0453	0.0000
15.0000	0.0386	-0.0134
16.0000	0.0503	-0.0063
17.0000	0.0519	-0.0087
18.0000	0.0238	-0.0122
19.0000	0.0548	-0.0043
20.0000	0.0442	-0.0063

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0300	0.0080
3.0000	-0.0202	0.0037
4.0000	0.0477	0.0467
5.0000	0.0227	-0.0032
6.0000	-0.0008	-0.0056
7.0000	0.0141	0.0050
8.0000	0.0428	0.0184
9.0000	0.0168	0.0000
10.0000	0.0031	0.0112
11.0000	-0.0007	-0.0024
12.0000	-0.0025	-0.0062
13.0000	0.0363	0.0137
14.0000	0.0001	0.0000
15.0000	0.0129	-0.0042
16.0000	0.0020	-0.0010
17.0000	0.0208	0.0026
18.0000	0.0418	0.0831
19.0000	0.0254	0.0124
20.0000	-0.0073	-0.0334

| Jacobiana | | |

| | | |

| | | |

| | | |

12.0000	0.0204	-0.0003
13.0000	0.0260	0.0037
14.0000	0.0223	0.0000
15.0000	0.0229	0.0023
16.0000	0.0254	0.0007
17.0000	0.0260	0.0016
18.0000	0.0140	0.0024
19.0000	0.0253	0.0020
20.0000	0.0239	-0.0010

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0035	0.0009
3.0000	0.0026	-0.0008
4.0000	-0.0124	0.0225
5.0000	0.0003	0.0002
6.0000	-0.0001	-0.0001
7.0000	-0.0020	0.0036
8.0000	-0.0061	0.0097
9.0000	-0.0087	0.0000
10.0000	0.0005	0.0027
11.0000	0.0002	0.0004
12.0000	0.0014	-0.0002
13.0000	-0.0104	0.0052
14.0000	-0.0026	0.0000
15.0000	-0.0021	-0.0003
16.0000	0.0004	-0.0012
17.0000	-0.0025	0.0022
18.0000	-0.0058	0.0406
19.0000	-0.0051	0.0060
20.0000	-0.0017	-0.0076

| Jacobiana | | |

0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	13.781313	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-5.528664	0.000000	0.000000	-8.494948	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.320500	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.812129	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	19.117447	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-12.245722	0.000000	0.000000	0.000000	-6.711711	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000058	0.000000	0.000000	0.000000	-0.063433	0.000000	-1.909808	0.000000	0.000000
0.000000	-9.808087	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	30.867878	-21.059191	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-3.823234	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-4.115515	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-21.059191	36.386707	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	7.765252	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
-4.032326	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	17.033232	-13.000006	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.110800	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	5.524669	-4.139232	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	-8.197977	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-13.000006	21.119833	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.427474	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-4.139232	3.811717	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	-19.116730	-6.440300	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	34.721219	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-9.115517	0.000000	0.000000	0.000000	-4.891912	-0.867607	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.286787	0.000000	0.000000	0.000000	-2.991917	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-5.286464	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	26.005565	0.000000	0.000000	0.000000	-8.362247	-12.407777	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.119699	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.662485	-3.848485	0.000000
0.000000	-9.475756	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-12.457272	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	26.837000	0.000000	-4.904942	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.449766	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.634343	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	2.466767	0.000000	-1.174343	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	-18.450707	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	32.423434	-7.937939	0.000000	0.000000	-6.003447	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-3.626209	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	6.668663	-2.558988	0.000000	-1.891914
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-8.494948	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-4.904942	-7.937939	21.336900	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.812129	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.174343	-2.558988	3.116167	0.000000	0.000000

| | | |

0.0000	0.4243	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.2924	-3.7167	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-8.2577	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-12.9859	21.5890	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	2.7449	-0.8429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-4.3528	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4508	0.0000	0.0000	0.0000	-18.9535	-6.5382	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	34.8315	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-8.9900	0.0000
0.0000	2.3222	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6356	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-2.4451	0.0000	0.7586	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-9.6187	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-12.4299	0.0000	0.0000	0.0000	27.0278	0.0000	-4.7713	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.8636	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.5452	1.3396	0.0000	0.0000	1.3419	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-18.9943	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.0527	-7.7432	0.0000	0.0000	0.0000	-6.0630
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9770	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7586	1.3396	-30.0753	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-8.2704	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-47.7713	-72.7432	211.1977	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7398	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.5039	0.0000	0.0000	0.0000	-2.2199	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.5131	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.4821	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4508	2.2560	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-4.9059	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-7.8390	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-8.9900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.3678	0.0000
3.2611	0.0000	0.0000	1.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.3419	0.0000	0.0000	-5.6047	-11.3355	0.0000	0.0000	-9.2091	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.0630	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0342

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0019	0.0009
3.0000	-0.0013	0.0019
4.0000	-0.0022	0.0017
5.0000	-0.0015	0.0010
6.0000	-0.0012	0.0010
7.0000	-0.0011	0.0011
8.0000	-0.0011	0.0028
9.0000	-0.0013	0.0000
10.0000	-0.0007	0.0001
11.0000	-0.0015	0.0015
12.0000	-0.0014	0.0016
13.0000	-0.0020	0.0015
14.0000	-0.0009	0.0000
15.0000	-0.0012	0.0022
16.0000	-0.0012	0.0010
17.0000	-0.0012	0.0014

18.0000	-0.0008	0.0023
19.0000	-0.0014	0.0009
20.0000	-0.0016	0.0007

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	0.0035	-0.0011
3.0000	0.0034	-0.0008
4.0000	-0.0071	-0.0005
5.0000	-0.0028	0.0012
6.0000	-0.0000	0.0001
7.0000	-0.0021	0.0001
8.0000	-0.0066	-0.0010
9.0000	-0.0033	0.0000
10.0000	-0.0000	-0.0001
11.0000	-0.0001	-0.0004
12.0000	0.0006	0.0007
13.0000	-0.0054	0.0005
14.0000	-0.0008	0.0000
15.0000	-0.0015	0.0004
16.0000	-0.0003	-0.0002
17.0000	-0.0029	0.0006
18.0000	-0.0058	-0.0006
19.0000	-0.0044	0.0004
20.0000	-0.0001	-0.0005

Jacobiana																														
14.8240	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-4.0418	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-10.7822	5.1463	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.1075	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-2.2471
0.0000	17.7412	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-8.2269	0.0000	0.0000	-9.5144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.7402	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4290	0.0000	-1.4996	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	29.0543	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-9.8269	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-19.2274	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.5107	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-4.8958	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	15.7283	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.4192	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-9.3091	0.0000	0.0000	0.0000	0.2036	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.8589	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-2.7251
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.5145	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-18.4883	0.0000	0.0000	0.0000	-8.0262	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	4.0475	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-3.6247	0.0000	0.0000	-2.4722	0.0000	
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	13.8081	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-5.2922	0.0000	0.0000	-8.5159	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.3214	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-1.8150	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

| | | |

| | | |

| | | |

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0005	0.0001
3.0000	-0.0001	0.0000
4.0000	-0.0001	-0.0026
5.0000	0.0004	-0.0001
6.0000	0.0000	0.0001
7.0000	0.0000	-0.0004
8.0000	-0.0001	-0.0012
9.0000	0.0003	0.0000
10.0000	-0.0001	-0.0002
11.0000	-0.0000	-0.0001
12.0000	0.0000	-0.0000
13.0000	0.0004	-0.0006
14.0000	0.0003	0.0000
15.0000	0.0001	0.0002
16.0000	0.0001	0.0001
17.0000	0.0002	-0.0003
18.0000	-0.0003	-0.0046
19.0000	0.0003	-0.0007
20.0000	0.0002	0.0011

Jacobiana																														
14.82009	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-4.00407	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-10.7801	5.51414	0.00000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.10168	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-2.25113
0.00000	17.74046	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-8.22664	0.000000	0.000000	-9.51442	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	2.73699	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.42911	0.000000	-1.50229	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00000
0.00000	0.000000	29.04955	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-9.82766	0.000000	0.000000	0.000000	-19.22199	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.49222	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-4.90003	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00000
0.00000	0.000000	0.000000	15.72391	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-6.41175	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-9.30664	0.000000	0.000000	0.000000	0.20666	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.85890	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-2.72188
0.00000	0.000000	0.000000	0.000000	26.50589	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-18.48433	0.000000	0.000000	-8.00247	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.04648	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-3.62445	0.000000	-2.47220	0.000000	0.00000
0.00000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	13.80873	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-5.29222	0.000000	0.000000	-8.55151	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.31888	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-1.81552	0.000000	0.000000	0.00000
0.00000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	19.26992	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-12.51172	0.000000	0.000000	-6.75119	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.00043	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-0.63884	0.000000	-1.92211	0.000000	0.00000

| | | |

| | | |

0.0000	2.3291	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6411	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-2.4472	0.0000	0.7592	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-9.6364	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-12.4632	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	27.0856	0.0000	-4.7810	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.8703	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.5560	1.3430	0.0000	0.0000	1.3427	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-19.0113	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	33.0815	-7.7536	0.0000	0.0000	-6.0681
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9789	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7592	1.3430	-3.0812	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-8.2790	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-4.7810	-7.7536	21.2280	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7345	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.5199	0.0000	0.0000	0.0000	-2.1969	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.5257	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	26.5910	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2014	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4624	2.2462	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-4.9100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-7.8462	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-9.0040	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	29.3987	0.0000
3.2646	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.3427	0.0000	0.0000	0.0000	-5.6133	-11.3443	0.0000	0.0000	-9.2181	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-6.0681	0.0000	0.0000	0.0000	27.0391

Deltas de Módulo e Ângulo das Tensões		
Barra	Delta V	Delta Teta
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0003	-0.0001
3.0000	-0.0003	-0.0002
4.0000	-0.0002	-0.0002
5.0000	-0.0003	-0.0001
6.0000	-0.0003	-0.0001
7.0000	-0.0003	-0.0001
8.0000	-0.0003	-0.0003
9.0000	-0.0001	0.0000
10.0000	-0.0001	-0.0000
11.0000	-0.0003	-0.0002
12.0000	-0.0003	-0.0002
13.0000	-0.0002	-0.0002
14.0000	-0.0003	0.0000
15.0000	-0.0003	-0.0002
16.0000	-0.0003	-0.0001
17.0000	-0.0003	-0.0002
18.0000	-0.0002	-0.0002
19.0000	-0.0003	-0.0001
20.0000	-0.0003	-0.0001

Mismatches de Potências		
Barra	Delta P	Delta Q
1.0000	0.0000	0.0000
2.0000	-0.0004	0.0001
3.0000	-0.0004	0.0001

4.0000	0.0008	-0.0003
5.0000	0.0003	-0.0001
6.0000	-0.0000	-0.0000
7.0000	0.0002	-0.0001
8.0000	0.0007	-0.0001
9.0000	0.0004	0.0000
10.0000	-0.0000	-0.0000
11.0000	-0.0000	-0.0000
12.0000	-0.0001	-0.0001
13.0000	0.0007	-0.0001
14.0000	0.0001	0.0000
15.0000	0.0002	-0.0001
16.0000	0.0000	0.0000
17.0000	0.0003	-0.0001
18.0000	0.0006	-0.0006
19.0000	0.0005	-0.0001
20.0000	-0.0000	-0.0001

Módulo e Ângulo das Tensões nas Barras						
Iteração atual: 6				Maior Erro: 8.19436200368609E-4		
Barra	Tipo Barra	V (pu)	Teta (graus)	P (pu)	Q (pu)	b (pu)
1.0000	3.0000	1.0500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2.0000	1.0000	0.9536	-25.2604	-1.0000	-0.1000	0.0000
3.0000	1.0000	0.9944	-15.4906	0.0000	0.0000	0.0000
4.0000	1.0000	0.9994	-6.6621	0.0000	-0.1000	0.0000
5.0000	1.0000	0.9801	-17.3060	0.0000	-0.1000	0.0000
6.0000	1.0000	0.9757	-19.5259	-1.0000	-0.2000	0.0000
7.0000	1.0000	1.0310	-12.6830	0.0000	0.1000	0.0000
8.0000	1.0000	0.9981	-10.1136	0.0000	-0.2000	0.0000
9.0000	2.0000	1.0450	-0.7740	1.0000	0.0000	0.0000
10.0000	1.0000	1.0470	-0.4428	0.0000	0.0000	0.0000
11.0000	1.0000	0.9852	-20.2040	0.0000	0.0000	0.0000
12.0000	1.0000	0.9937	-18.4609	0.0000	0.0000	0.0000
13.0000	1.0000	0.9903	-9.8297	0.0000	0.0000	0.0000
14.0000	2.0000	1.0400	-7.7138	1.0000	0.0000	0.0000
15.0000	1.0000	1.0041	-13.0459	0.0000	0.0000	0.0000
16.0000	1.0000	0.9867	-20.0421	-0.5000	0.2000	0.0000
17.0000	1.0000	1.0111	-15.5876	0.0000	0.0000	0.0000
18.0000	1.0000	1.0404	-5.0059	0.0000	0.0000	0.0000
19.0000	1.0000	1.0007	-11.4992	0.0000	0.0000	0.0000
20.0000	1.0000	0.9738	-22.4477	-0.5000	0.2000	0.0000

Potências nas Barras		
Barra	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	1.1893	0.1704
2.0000	-1.0000	-0.1000
3.0000	0.0004	-0.0001
4.0000	-0.0008	-0.1000
5.0000	-0.0003	-0.1000
6.0000	-1.0000	-0.2000
7.0000	-0.0002	0.1000
8.0000	-0.0007	-0.2000
9.0000	1.0000	0.1552
10.0000	0.0000	0.0000
11.0000	0.0000	0.0000
12.0000	0.0001	0.0001
13.0000	-0.0007	0.0001
14.0000	1.0000	0.3503
15.0000	-0.0002	0.0001
16.0000	-0.5000	0.2000

17.0000	-0.0003	0.0001
18.0000	-0.0006	0.0006
19.0000	-0.0005	0.0001
20.0000	-0.5000	0.2000

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra DE	**Barra PARA**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	10.0000	-0.1301	-0.0122
1.0000	18.0000	-1.0591	-0.1582
2.0000	11.0000	0.4101	-0.0566
2.0000	20.0000	0.5895	0.0613
3.0000	15.0000	0.4263	-0.0275
4.0000	13.0000	-1.0924	-0.0031
5.0000	20.0000	-0.8416	0.0303
7.0000	17.0000	-0.4578	-0.1481
8.0000	15.0000	-0.6408	0.0590
9.0000	4.0000	-1.1293	-0.2257
10.0000	9.0000	-0.1298	-0.0277
12.0000	3.0000	0.4267	-0.0052
12.0000	11.0000	-0.4268	-0.0245
13.0000	5.0000	-0.8419	-0.1227
13.0000	19.0000	-0.2378	0.1402
14.0000	7.0000	-0.4640	-0.0516
14.0000	18.0000	0.3994	-0.1496
14.0000	19.0000	-0.9353	-0.3275
15.0000	17.0000	-0.2106	0.0219
16.0000	6.0000	0.1246	-0.2636
16.0000	20.0000	-0.2736	-0.0566
17.0000	16.0000	-0.6620	-0.1059
18.0000	8.0000	-0.6544	-0.2229
19.0000	6.0000	-1.1521	-0.1262

Fluxo de Potência entre Barras			
Barra PARA	**Barra DE**	**P (pu)**	**Q (pu)**
1.0000	10.0000	0.1298	0.0748
1.0000	18.0000	1.0591	0.0646
2.0000	11.0000	-0.4231	-0.3326
2.0000	20.0000	-0.5973	-0.3976
3.0000	15.0000	-0.4300	-0.2146
4.0000	13.0000	1.0804	0.3442
5.0000	20.0000	0.8267	0.1481
7.0000	17.0000	0.4536	0.1825
8.0000	15.0000	0.6408	-0.0922
9.0000	4.0000	1.0932	0.6326
10.0000	9.0000	0.1297	0.0536
12.0000	3.0000	-0.4267	-0.0169
12.0000	11.0000	0.4231	0.1972
13.0000	5.0000	0.8419	0.0120
13.0000	19.0000	0.2352	-0.0495
14.0000	7.0000	0.4580	0.0408
14.0000	18.0000	-0.4042	-0.1564
14.0000	19.0000	0.9174	0.6184
15.0000	17.0000	0.2087	-0.0467
16.0000	6.0000	-0.1254	0.1545
16.0000	20.0000	0.2705	0.1020
17.0000	16.0000	0.6490	0.2780
18.0000	8.0000	0.6415	0.3332
19.0000	6.0000	1.1254	0.2758

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAPTADO DE GNU. The GNU Operating System. Disponivel em: <http://www.gnu.org/>. Acesso em: 19 set. 2010.

ANAREDE: Análise de Redes Elétricas, Licença Acadêmica. Brasil: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

ANAREDE – Analise de Redes Elétricas. Disponível em: <http://www.anarede.cepel.br/>. Acesso em: 24 de novembro de 2011.

ANJOS, Lucio André Mendonça dos; MOURA, Hermano Perrelli de. **Um modelo para avaliação de produtos de software.** Centro de Informática. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR /ISSO IEC 12119**: tecnologia de informação-teste e requisitos de qualidade. Rio de Janeiro, 1998.

BARBOZA, Luciano V. **Sistemas de potência I:** Apostila da disciplina de sistemas de potência. Pelótas: Universidade Católica de Pelotas, 2007. 81 p.

BORGES, Carmem Lúcia T. **Análise de sistemas de potência:** Apostila da disciplina de sistemas de potência. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010. 143 p.

CANOSSA, Jâine Henrique. **Um programa interativo para estudos do fluxo de potência**. 2007. 166 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

CASTRO, C. A. Disponível em: www.see.fee.unicamp.br. Acesso em: 10 março 2005.

COSTA, A. J. A. S. **Análise de segurança em sistemas de potência-EEL6302.** 2000. Notas de aula. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

COSTA, Andrea L. **Alocação ótima conjunta de energia e reservas operativas baseada em fluxo de potência ótimo dinâmico**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, 2004.

COSTA, Andrea L. **Sistemas elétricos de potência I:** Notas de Aula. 2010. DAELT. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

DEITEL, Paul; DEITEL, Harvey. **Java como programar**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

ECLIPSE IDE for Java Developers, Version 3.6. Canada: The Eclipse Foundation, 2010.

EDMINISTER, Joseph A. **Circuitos elétricos**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 442 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL., 2010. Disponivel em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em: 8 set. 2010.

ESCALANTE, Sergio. **Manual do usuário do software Simulight**, versão 2.23, Microsoft Word manual_v3p0_110504. Doc. Fundação COPPETEC.

FITZGERALD, A. E. et al. **Máquinas elétricas**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

HAFFNER, Sergio. **Modelagem e análise de sistemas elétricos em regime** p**ermanente:** Apostila da disciplina de Sistemas de Energia I. Santa Catarina: EDESC, 2007.

IRWIN, J. David. **Análise de circuitos em engenharia**. 4. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000.

KUNDUR, Prabha. **Power system stability and control:** The EPRI Power System Engineering Series. New York: McGraw-Hill, 1994.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.

NETBEANS Plataform, Version 7.0. United States: Oracle Corporation, 1997.

RUGGIERO, Márcia A. Gomes; LOPES, Vera Lúcia da Rocha. **Cálculo numérico:** Aspectos Teóricos e Computacionais. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

SALGADO, Roberto. **Fluxo de potência**. [S.l.]: [s.n.].

STEVENSON JR., Willian D. **Elements of power system analysis**. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1962.

STEVENSON JR., Willian D. **Elementos de análise de sistemas de potência**. 1.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1972.

WEEDY, Birron Mathew; CORY, Brian John. **Eletric power systems**. Chichester: J. Wiley, 1998. 545 p.

ZANETTA JÚNIOR, Luiz Cera. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Livraria da Física, 2005. 312 p.

ZOCOLOTTI, D. et al. **Desenvolvimento de software didático para cálculo de fluxo de potência**. 2002. 191 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2002.