



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

THALES LIMA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
COMPUTACIONAL GRÁFICA E DE CÓDIGO ABERTO
PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Uberlândia
2016

THALES LIMA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
COMPUTACIONAL GRÁFICA E DE CÓDIGO ABERTO
PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães

Uberlândia

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

O48d Oliveira, Thales Lima, 1991-
2016 Desenvolvimento de uma plataforma computacional gráfica e de
código aberto para estudos de sistemas de potência / Thales Lima
Oliveira. - 2016.
179 f. : il.

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica -
Teses. 3. Simulação (Computadores) - Teses. I. Guimarães, Geraldo
Caixeta, 1954- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

THALES LIMA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA
COMPUTACIONAL GRÁFICA E DE CÓDIGO ABERTO
PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães
Orientador

Prof. Darizon Alves de Andrade
Coordenador da Pós-Graduação

Dedico este trabalho aos meus pais,
Wilson e Cidinha por todo carinho,
apoio e incentivo aos estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, **Wilson e Cidinha**, e ao meu irmão **Wilson Junior**, pelos sábios conselhos e apoio nas minhas decisões. Sou grato também aos demais familiares que me incentivaram a seguir e buscar a vitória.

Ao meu professor orientador **Geraldo Caixeta Guimarães** pelo incentivo, motivação e orientação deste trabalho.

Ao **Márcio Augusto Tamashiro** pelas ideias geniais e grande ajuda no desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos colegas e amigos do Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos e da Universidade Federal de Uberlândia, de modo especial: **Andréia Crico, Arthur Costa, Daniel Tobias, Fernando Silva, Leandro Lima, Leonardo Rosenthal, Rianne Britto e Wagner Vanço**.

À Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade, especialmente à **Cinara Fagundes**, por toda ajuda e prestabilidade.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL GRÁFICA E DE CÓDIGO ABERTO PARA ESTUDOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

A análise computacional de sistemas potência vem se tornando a cada dia mais complexa e abrangente. Foram desenvolvidos vários simuladores comerciais e gratuitos, capazes de realizar diversos cálculos por meio de modelagens matemáticas dos componentes de uma rede elétrica. O *software* comercial, geralmente não gratuito, impossibilita a inserção e personalização de novas ferramentas por possuir o código fechado, protegidos por licenças proprietárias. Em oposição aos programas privativos, nasceu o conceito de *open-source* (código aberto), que promove o acesso livre à informação, inclusive ao código fonte, de forma gratuita. Algumas aplicações *open-source* foram criadas na área de sistemas elétricos de potência, porém existem algumas carências nesses programas, como a falta de uma interface gráfica de usuário (GUI) amigável, dependência de *software* proprietário e descontinuação no seu desenvolvimento.

Nesse contexto iniciou-se o desenvolvimento do PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia), capaz de realizar o estudo de fluxo de carga, cálculo de curto-circuito e análise dinâmica de qualquer sistema de potência. Essa plataforma possui fonte código aberto e uma interface gráfica amigável, permitindo a construção de qualquer rede elétrica por meio da manipulação de elementos visuais. Utilizou-se o C++, o qual é uma linguagem de programação gratuita, popular e bastante empregada na área acadêmica, além de ser orientada a objetos, que foi o paradigma utilizado na elaboração desse programa. Para criação da GUI utilizou-se o *framework* wxWidgets, que permite o desenvolvimento de programas multiplataforma.

Com o intuito de validar as ferramentas de cálculo desenvolvidas, foram construídos sistemas testes do IEEE de 14 e 118 barras e comparou-se os resultados do PSP-UFU com aqueles originados do ANAREDE e ANAFAS, os quais são programas já bem estabelecidos no setor elétrico brasileiro.

Palavras-chave: Análise dinâmica, código aberto, curto-circuito, fluxo de carga, interface gráfica de usuário, Plataforma de Sistemas de Potência.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A GRAPHICAL OPEN-SOURCE COMPUTER PLATFORM FOR POWER SYSTEM ANALYSIS

The computational analysis of power systems has become each day wider and more complex. It was developed several commercial and free simulators capable of performing various calculations using mathematical models of the electrical network components. The commercial software, usually not free, prevents the insertion and customization of new tools for having the source code closed, protected by proprietary licenses. As opposed to these private programs, it was born the concept of open-source, which promotes free access to information, including the source code, free of charge. Some open-source applications have been developed in the field of electric power systems, but there are some deficiencies in these programs, such as the lack of a friendly Graphical User Interface (GUI), proprietary software dependency and discontinuation in the development.

Within this context, it was begun the development of the PSP-UFU (Power System Platform of the Federal University of Uberlândia), aimed to load flow calculation, short circuit calculations and dynamic analysis of any power system. This platform is open-source and have a friendly GUI, allowing the construction of any power grid through the manipulation of visual elements. It was used the C++, a free popular programming language with widespread application in academia, in addition to being object-oriented, which was the paradigm used in the conception of this program. To create the GUI it was used the wxWidgets framework, which allows the development of multiplatform programs.

Were built the 14 and 118-bus IEEE test systems to validate the developed calculation tools. The results from PSP-UFU were compared to those originated from ANAREDE and ANAFAS, which are programs already well-established in the brazilian electricity sector.

Keywords: Dynamic analysis, graphical user interface, load flow, open-source, Power Systems Platform, short circuit.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	27
1.1 Contextualização	27
1.2 Objetivos	29
1.3 Estrutura da dissertação	30

CAPÍTULO II

MODELAGENS MATEMÁTICAS	33
2.1 Considerações iniciais	33
2.2 Fluxo de carga	34
2.2.1 Formação da matriz admitância de barras (Y_{bus})	35
2.2.2 Equacionamento do fluxo de carga	38
2.2.3 Método de Gauss-Seidel para solução do fluxo de carga	41
2.2.4 Método de Newton-Raphson para solução do fluxo de carga	44
2.3 Curto-circuito	49
2.3.1 Método das componentes simétricas	49
2.3.2 Modelagem dos elementos do sistema para estudo de curto-circuito	51
2.3.3 Equacionamento do curto-circuito	55
2.4 Estudo dinâmico	58
2.4.1 Máquinas síncronas	58
2.4.2 Motor de indução trifásico	63

CAPÍTULO III

PLATAFORMA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (PSP-UFU)	67
3.1 Considerações iniciais	67
3.2 Linguagem de programação e principais bibliotecas utilizadas	67
3.2.1 Linguagem de programação C++	68
3.2.2 <i>Framework</i> wxWidgets	68
3.3 Arquitetura	69
3.3.1 Módulo de interface gráfica (GUI)	70
3.3.2 Módulo de ferramentas	72
3.3.3 Módulo de simulações	74
3.4 Interface gráfica	75
3.4.1 Criação de uma rede elétrica de potência	76
3.4.2 Manipulação e navegação	83
3.4.3 Realização dos cálculos	85
3.4.4 Outros elementos gráficos	86

CAPÍTULO IV

SIMULAÇÕES E ANÁLISES	89
4.1 Considerações iniciais	89
4.2 Sistemas teste e dados gerais	89
4.3 Fluxo de carga	92
4.3.1 Sistema teste de 14 barras	92
4.3.2 Sistema teste de 118 barras	96
4.4 Curto-circuito	97
4.4.1 Sistema teste de 14 barras	97
4.4.2 Sistema teste de 118 barras	105
4.5 Análise dinâmica	106
4.5.1 Curto-circuito trifásico	106

4.5.2 Perda de carga	108
4.5.3 Perda de geração	110

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES	113
-------------------------------	------------

REFERÊNCIAS	117
--------------------	------------

APÊNDICE A

DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES DE CURTOS-CIRCUITOS DESBALANCEADOS	121
--	------------

A.1 Faltas fase-terra	121
------------------------------	------------

A.1.1 Fase A	121
A.1.2 Fase B	122
A.1.3 Fase C	123

A.2 Faltas fase-fase	124
-----------------------------	------------

A.2.1 Fases A e B	124
A.2.2 Fases B e C	125
A.2.3 Fases C e A	126

A.3 Faltas fase-fase-terra	128
-----------------------------------	------------

A.3.1 Fases A e B	128
A.3.2 Fases B e C	129
A.3.3 Fases C e A	130

APÊNDICE B

SISTEMA TESTE DE 118 BARRAS	133
------------------------------------	------------

B.1 Dados de entrada	133
-----------------------------	------------

B.1.1 Dados de barras	133
B.1.2 Dados de ramos	136

B.2 Fluxo de carga	140
B.2.1 Resultados de barras	140
B.2.2 Resultados de ramos	149
B.3 Curto-circuito	163

APÊNDICE C

CARTÕES DO TRANSUFU	173
C.1 Curto-circuito	173
C.2 Chaveamento de carga	174
C.3 Chaveamento de gerador	176

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	– Tipos de licenças e suas intensidades de direitos autorais.	28
Figura 2.1	– Linha modelada como circuito π equivalente.	35
Figura 2.2	– Modelo do transformador.	36
Figura 2.3	– Tensões e correntes no modelo do transformador.	36
Figura 2.4	– Fluxograma do método de Gauss-Seidel no PSP-UFU.	43
Figura 2.5	– Fluxograma do método de Newton Raphson no PSP-UFU.	48
Figura 2.6	– Componentes simétricas: (a) Sequência positiva; (b) Sequência negativa; (c) Sequência zero.	50
Figura 2.7	– Adição dos componentes de sequência da Figura 2.6 para se obter os três fasores desequilibrados.	50
Figura 2.8	– Caminho das correntes e circuito equivalente: (a) sequência positiva; (b) sequência negativa; (c) sequência zero.	52
Figura 2.9	– Circuitos equivalentes de sequência zero dos transformadores.	54
Figura 2.10	– Equivalente Thevenin de um sistema pré-falta (a) e durante a falta (b).	55
Figura 2.11	– Diagrama no ponto da falta.	57
Figura 2.12	– Diagrama da máquina síncrona.	59
Figura 2.13	– Modelo geral do regulador de tensão (AVR).	63
Figura 2.14	– Modelo de regulador de velocidade para composição de turbina térmica/hidráulica.	63
Figura 3.1	– Visualização em diagrama de classes dos módulos do <i>software</i> PSP- UFU.	70
Figura 3.2	– Diagrama de classes do módulo de interface gráfica.	70
Figura 3.3	– Diagrama de classes do módulo ferramentas.	73
Figura 3.4	– Diagrama de classes do módulo de simulações.	74
Figura 3.5	– Tela principal do programa PSP-UFU na plataforma Windows.	75
Figura 3.6	– Elementos elétricos do PSP-UFU.	76
Figura 3.7	– Formulário de entrada de dados dos barramentos.	77
Figura 3.8	– Formulário dos parâmetros de falta dos barramentos.	78
Figura 3.9	– Formulário de entrada de dados das linhas de transmissão.	79
Figura 3.10	– Formulário de dados dos transformadores.	80

Figura 3.11	– Formulário de dados dos geradores e dos compensadores síncronos.	81
Figura 3.12	– Formulário de entrada de dados do motor de indução.	81
Figura 3.13	– Formulário de entrada de dados das cargas.	82
Figura 3.14	– Formulário de entrada de dados dos capacitores e reatores shunt.	83
Figura 3.15	– Opções de projeto.	85
Figura 3.16	– Caixa de informação exibido no PSP-UFU.	87
Figura 4.1	– Sistema teste de 14 barras no PSP-UFU.	92
Figura 4.2	– Sistema teste de 118 barras criado no PSP-UFU.	96
Figura 4.3	– Tensão terminal das máquinas síncronas durante o curto-círcuito.	106
Figura 4.4	– Frequência nos terminais das máquinas síncronas durante o curto-círcuito.	107
Figura 4.5	– Potência ativa das máquinas síncronas durante o curto-círcuito.	107
Figura 4.6	– Potência reativa das máquinas síncronas durante o curto-círcuito.	108
Figura 4.7	– Frequência das máquinas síncronas na perda de carga.	108
Figura 4.8	– Potência ativa das máquinas síncronas na perda de carga.	109
Figura 4.9	– Potência reativa das máquinas síncronas na perda de carga.	109
Figura 4.10	– Tensão das máquinas síncronas na perda de carga.	110
Figura 4.11	– Frequência das máquinas síncronas na perda de geração.	110
Figura 4.12	– Potência ativa das máquinas síncronas na perda de geração.	111
Figura 4.13	– Potência ativa das máquinas síncronas na perda de geração.	111
Figura 4.14	– Potência reativa das máquinas síncronas na perda de geração.	112
Figura A.1	– Ponto da falta F-T na fase A	121
Figura A.2	– Ponto da falta F-T na fase B	122
Figura A.3	– Ponto da falta F-T na fase C	123
Figura A.4	– Ponto da falta F-F nas fases A e B	124
Figura A.5	– Ponto da falta F-F nas fases B e C	125
Figura A.6	– Ponto da falta F-F nas fases C e A	126
Figura A.7	– Ponto da falta F-F-T nas fases A e B	128
Figura A.8	– Ponto da falta F-F-T nas fases B e C	129
Figura A.9	– Ponto de falta F-F-T nas fases C e A	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Correntes de falta.	57
Tabela 4.1	– Constantes típicas de máquinas síncronas trifásicas.	90
Tabela 4.2	– Dados de barras do sistema teste de 14 barras.	90
Tabela 4.3	– Dados de ramos do sistema teste de 14 barras.	91
Tabela 4.4	– Dados dos geradores do sistema teste de 14 barras.	92
Tabela 4.5	– Resultados de barras do cálculo de fluxo de carga realizado pelo PSP-UFU.	93
Tabela 4.6	– Resultados de barras do cálculo de fluxo de carga realizado pelo ANAREDE.	93
Tabela 4.7	– Divergência dos resultados de barras dos programas PSP-UFU e ANAREDE.	94
Tabela 4.8	– Resultados de ramos do cálculo de fluxo de carga realizado pelo PSP-UFU.	94
Tabela 4.9	– Resultados de ramos do cálculo de fluxo de carga realizado pelo ANAREDE.	95
Tabela 4.10	– Resultados de ramos do cálculo de fluxo de carga realizado pelo ANAREDE.	95
Tabela 4.11	– Correntes de curto-círcuito trifásico do sistema de 14 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.	97
Tabela 4.12	– Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo PSP-UFU.	98
Tabela 4.13	– Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo ANAFAS.	98
Tabela 4.14	– Divergência no cálculo do curto-círcuito trifásico entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.	99
Tabela 4.15	– Correntes de curto-círcuito fase-fase do sistema de 14 barras calculada pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.	99
Tabela 4.16	– Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase calculado pelo PSP-UFU.	100

Tabela 4.17 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase calculado pelo ANAFAS.	100
Tabela 4.18 – Divergência no cálculo do curto-círcuito fase-fase entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.	101
Tabela 4.19 – Correntes de curto-círcuito fase-fase-terra do sistema de 14 barras calculada pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.	101
Tabela 4.20 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase-terra calculado pelo PSP-UFU.	102
Tabela 4.21 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase calculado pelo ANAFAS.	102
Tabela 4.22 – Divergência no cálculo do curto-círcuito fase-fase entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.	103
Tabela 4.23 – Correntes de curto-círcuito fase-terra no sistema de 14 barras calculada pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.	103
Tabela 4.24 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-terra calculado pelo PSP-UFU.	104
Tabela 4.25 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-terra calculado pelo ANAFAS.	104
Tabela 4.26 – Divergência no cálculo do curto-círcuito fase-terra entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.	105
Tabela 4.27 – Correntes de curto-círcuito trifásico do sistema de 118 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.	105
Tabela B.1 – Dados de barras do sistema teste de 118 barras.	133
Tabela B.2 – Dados de ramos do sistema teste de 118 barras.	136
Tabela B.3 – Resultados de barras do sistema teste de 118 barras calculados pelo PSP-UFU.	140
Tabela B.4 – Resultados de barras do sistema teste de 118 barras calculados pelo ANAREDE.	143
Tabela B.5 – Divergência dos resultados de barras do sistema de 118 barras calculados pelos programas PSP-UFU e ANAREDE	146
Tabela B.6 – Resultados de ramos do sistema teste de 118 barras calculados pelo PSP-UFU	149

Tabela B.7 – Resultados de ramos do sistema teste de 118 barras calculados pelo ANAREDE	154
Tabela B.8 – Divergência dos resultados de ramos do sistema de 118 barras calculados pelos programas PSP-UFU e ANAREDE	159
Tabela B.9 – Tensões do sistema de 118 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo PSP-UFU.	163
Tabela B.10 – Tensões do sistema de 118 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo ANAFAS.	166
Tabela B.11 – Divergências do cálculo de curto-círcuito trifásico do sistema de 118 barras realizados pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.	169

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3F-T	Falta trifásica para a terra
ANAFAS	Programa de Análise de Faltas Simultâneas
ANAREDE	Programa de Análise de Redes Elétricas
API	<i>Application Programming Interface</i>
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
CA	Corrente Alternada
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CS	Compensador Síncrono
CSC	Compensador Série Controlado
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
EEFC	Equações Estáticas do Fluxo de Carga
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
FEELT	Faculdade de Engenharia Elétrica
F-F	Falta fase-fase
F-F-T	Falta fase-fase-terra
F-T	Falta fase-terra
GPL	<i>General Public License</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
OpenDSS	<i>Open Distribution System Simulator</i>
p.u.	Por Unidade
PDF	<i>Portable Document Format</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PSAT	<i>Power System Analysis Toolbox</i>
PSP-UFU	Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia
RTF	<i>Rich Text Format</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SVC	<i>Static VAr Compensator</i>
TNA	<i>Transient Network Analyzer</i>
TransUFU	Programa de Análise de Estabilidade Transitória da Universidade Federal de Uberlândia

UFU	Universidade Federal de Uberlândia
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>
Y_{bus}	Matriz admitância de barras
Z^0_{bus}	Matriz impedância de barras de sequência zero
Z^1_{bus}	Matriz impedância de barras de sequência positiva
Z^2_{bus}	Matriz impedância de barras de sequência negativa

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com o advento e considerável desenvolvimento dos computadores tornou-se possível a simulação e análise de eventos por intermédio de modelagens matemáticas, permitindo uma grande economia de recursos. No âmbito de sistemas elétricos de potência, pode-se, então, simular o comportamento de um circuito elétrico de grande porte e verificar seu desempenho nominal, além de aplicar distúrbios na rede e examinar suas consequências.

Um estudo fundamental no planejamento da expansão de um sistema elétrico é o fluxo de carga, uma vez que a operação satisfatória desse sistema depende do conhecimento dos efeitos da interligação, de novas cargas, de novas centrais geradoras e de novas linhas antes que elas sejam instaladas.

Até o surgimento dos computadores digitais, ocorrido durante a década de 50, o fluxo de carga e demais tipos de estudos eram realizados com o auxílio dos analisadores de redes ou TNA (*Transient Network Analyzer*) [1]. Esses dispositivos eram computadores analógicos especiais desenvolvidos especificamente para a análise de sistemas elétricos em escala reduzida [2]. Atualmente a análise de fluxo de carga é realizada por computadores digitais e as equações que formulam o problema são resolvidas por meio de técnicas numéricas, desenvolvidas para se adequar ao problema [3].

Os primeiros métodos numéricos desenvolvidos para o cálculo computacional do fluxo de carga foram o de Gauss-Seidel (década de 50), Newton-Raphson (década de 60) e os Métodos Desacoplados (década de 70) [4]. Esses são métodos iterativos e foram desenvolvidos inicialmente para redes malhadas.

Esses métodos aplicados às redes de distribuição apresentam problemas de convergência, causados pelo mal condicionamento da matriz admitância de barras (matriz que caracteriza o sistema). Isso ocorre devido às peculiaridades das redes de distribuição, tais como: configuração predominantemente radial, alta relação R/X (relação Resistência/Reatância da rede elétrica), sistema desbalanceado e presença de geração distribuída [5]. Nesse contexto, desde a década de 60, métodos computacionais específicos para as redes de distribuição estão

sendo desenvolvidos. Entre eles, o método de varredura forward and backward, de compensação, Z barra implícito, Newton modificado ou baseados em Newton [6].

O avanço tecnológico de *hardware* de computadores possibilitou uma integração maior com o utilizador dos programas computacionais de sistemas de potência através da interface gráfica do usuário (GUI, do inglês *Graphical User Interface*), permitindo a interação do usuário por meio de elementos gráficos como ícones e outros indicadores visuais, proporcionando assim, uma maior agilidade na criação dos circuitos e análise dos mesmos. Vários programas foram desenvolvidos com essa nova funcionalidade, os quais são, em grande parte, privativos. Esses programas proprietários possuem licenças com direitos exclusivos para o produtor e seu uso, redistribuição ou modificação são proibidos sem a permissão do desenvolvedor. Essa permissão geralmente pode ser adquirida, porém não é gratuita.

Em oposição ao *software* proprietário, surgiu o conceito de código aberto (*open-source*) no início da década de 70 com o predecessor do que se tornaria atualmente a internet. As principais características da “cultura *open-source*” são: acesso livre à informação, decisões realizadas em domínio público, descentralização, simultaneidade (projetos, ideias e prazos são realizados paralelamente) e colaboração [7].

A Figura 1.1 ilustra os tipos de licenças (com alguns exemplos) e suas intensidades de direitos autorais (*copyrights*).

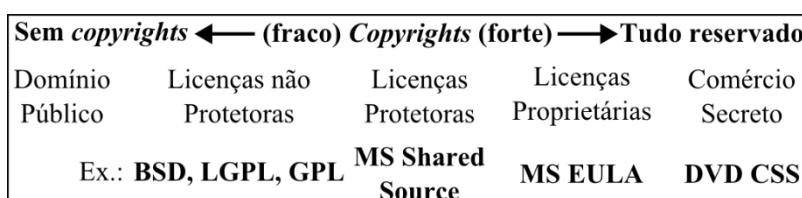


Figura 1.1 – Tipos de licenças e suas intensidades de direitos autorais.
Fonte: Adaptado de SARKINEN, J. [7].

Também foram criadas algumas ferramentas gratuitas que são amplamente utilizadas tanto no meio acadêmico científico quanto pelos profissionais do setor elétrico, dentre os quais pode-se destacar os mais importantes: ATP (*Alternative Transient Program*) [8], PSAT (*Power System Analysis Toolbox*) [9], MATPOWER [10] e OpenDSS (*Distribution System Simulator*) [11].

Os programas supracitados permitem ao usuário a realização dos seguintes estudos:

- **ATP:** Surtos de chaveamento, surtos atmosféricos, coordenação de isolamento, ressonância subsíncrona, HVDC, SVC, propagação de ondas, harmônicos, ferro-

ressonância, ressonância série e paralela, partida de motor, ilhamento, sistemas de controle em geral, aterramento, estimativa de correntes de faltas assimétricas, perdas em aterramentos, análises de sistemas desbalanceados no regime permanente, chaveamento de banco de capacitores e proteção de capacitores em série. Essa é apenas uma lista parcial, pois uma de suas maiores vantagens está na flexibilidade de modelagem no *software* utilizando suas ferramentas [12];

- **PSAT:** Fluxo de carga continuado, fluxo de carga ótimo, análise de estabilidade, simulações no domínio do tempo e alocação de PMU (*Phasor Measurement Unit*) [13];
- **MATPOWER:** Fluxo de carga e fluxo de carga ótimo [14];
- **OpenDSS:** Planejamento e análises para sistemas de distribuição, análise de circuitos CA polifásicos, análise de conexão de geração distribuída, simulação de carga/geração sazonal, estudos de planejamento probabilístico, simulação de sistemas fotovoltaicos, simulação de plantas eólicas, proteção do sistema, estimativa de estado, análise harmônica e inter-harmônica, análise de transformadores com conexões não convencionais, simulação de defasadores, simulação de fornos a arco, etc. [15].

As maiores limitações dos atuais programas gratuitos, inclusive aqueles destacados, são a falta de uma interface gráfica de usuário amigável, dependência de *software* proprietário e descontinuação no seu desenvolvimento.

1.2 Objetivos

Dentro do atual contexto observou-se a importância do desenvolvimento de uma plataforma gratuita e de código aberto para estudos de sistemas elétricos de potência, capaz de realizar, no mínimo, as seguintes funções: estudo de fluxo de carga, cálculo de curto-circuito (balanceado e desbalanceado) e análise dinâmica. Também é imprescindível a criação de uma GUI amigável.

Para tal é exigido, primeiramente, um estudo teórico das modelagens matemáticas a serem utilizadas no simulador, assim como as ferramentas computacionais necessárias para a implementação computacional das mesmas.

Objetiva-se, também, a criação de uma aplicação multiplataforma, ou seja, que seja possível a execução em vários sistemas operacionais. Para isso foi escolhido o C++, que

consiste em uma linguagem de programação multi-paradigma, na qual se destaca a orientação a objetos, sendo popular e utilizada no meio acadêmico. Para o desenvolvimento da interface gráfica foi empregado o wxWidgets, um *framework* para criação de GUI multiplataforma [16].

Por meio de uma GUI será possível criar uma rede de potência genérica, na qual estão presentes os principais elementos elétricos que podem ser inseridos, manipulados e visualizados por meio das várias ferramentas gráficas.

Uma vez definidas as estruturas para o desenvolvimento do programa, cria-se uma arquitetura de *software* e implementam-se a GUI, as ferramentas gráficas e os cálculos de fluxo de carga e curto-círcito.

O papel do programa proposto nos estudos dinâmicos é gerar, por intermédio do circuito elétrico criado na GUI, o arquivo de dados de entrada do programa TransUFU [17], executá-lo e capturar seus resultados que são apresentados em forma de gráficos.

Com o intuito de atestar a correta operação das ferramentas desenvolvidas, serão comparados os resultados de sistemas teste criados no novo programa com outros já bem estabelecidos no setor elétrico.

A plataforma a ser desenvolvida poderá ser utilizada tanto como instrumento didático para alunos dos cursos de Engenharia Elétrica, quanto para profissionais do setor elétrico. Além disso, o projeto do *software* iniciou-se com o nome de Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia (PSP-UFU), sob licença GPL em sua versão 2 [18].

1.3 Estrutura da dissertação

Esse trabalho está dividido, além das partes pré e pós textuais, em capítulos, seções, subseções e itens. Os capítulos serão apresentados como a grande divisão da dissertação, com cinco principais assuntos.

Nesse capítulo é contextualizado o assunto apresentado, mostrando os mais significativos programas de computador gratuitos para simulações de sistemas elétricos de potência. No cenário apresentado são evidenciadas as carências dos atuais programas e observadas as principais motivações para essa pesquisa. São expostos, então, os objetivos a serem buscados com essa dissertação.

No segundo capítulo são apresentadas as modelagens matemáticas a serem utilizadas no desenvolvimento do *software*: estudo de fluxo de carga, cálculo de curto-círcito e estudo dinâmico de um sistema elétrico de potência. Para o fluxo de carga mostra-se a formação da matriz admitância de barras por meio dos circuitos equivalentes dos elementos elétricos, as

equações envolvidas nesse cálculo e desenvolvem-se os métodos numéricos de solução de Gauss-Seidel e Newton-Raphson. Também são evidenciados os fluxogramas dos algoritmos desses métodos numéricos. Assim como no fluxo de carga, na modelagem do curto-círcuito mostra-se a formação da matriz admitância e as equações necessárias para realização do cálculo, além da teoria de componentes simétricas necessária para solução de faltas desbalanceadas. Finalmente, nesse capítulo, são apresentadas as equações dinâmicas das máquinas síncronas e dos motores de indução presentes no TransUFU.

No capítulo três é apresentado o PSP-UFU, destacando a linguagem de programação, arquitetura de *software* utilizada e a interface gráfica. São evidenciados, em um primeiro momento, os motivos para utilização do C++ como linguagem de programação e do wxWidgets como *framework* de criação da GUI. Na seção da arquitetura, evidenciam-se os módulos do programa e a funcionalidade das principais classes criadas. A interface gráfica é explicada mostrando-se as ferramentas de criação e manipulação da rede elétrica, assim como a realização dos cálculos e acesso aos resultados.

No quarto capítulo são mostrados os resultados das simulações computacionais de sistemas testes, os quais, para os estudos de fluxo de carga e curto-círcuito, são comparados com resultados de programas já bem estabelecidos no setor elétrico. Para a análise dinâmica é observado o comportamento dos resultados de saída para diferentes tipos de distúrbios e verificado a correta integração do PSP-UFU com o TransUFU.

Finalmente, no capítulo 5, serão apresentadas as conclusões do trabalho. Para tal, é feita a consolidação das análises parciais expostas em cada capítulo, dando assim, uma visão geral dos estudos realizados na dissertação, bem como as suas contribuições. Também são evidenciadas algumas sugestões para trabalhos futuros utilizando a pesquisa e o *software* desenvolvidos.

CAPÍTULO II

MODELAGENS MATEMÁTICAS

2.1 Considerações iniciais

Para representar matematicamente um sistema elétrico de potência é necessário modelar cada elemento do sistema, de forma que seja possível inseri-lo nas equações elétricas de cada tipo de estudo. Esse capítulo lida com a modelagem desses elementos e com a formação da matriz admitância de barras (Y_{bus}), que relaciona a corrente e a tensão de cada nó do sistema.

Entre as várias formas de descrever o comportamento de um sistema de transmissão que obedecem as leis de Kirchhoff, destaca-se a análise nodal, a qual é particularmente adequada para implementação computacional, uma vez que é feita de forma sistemática [19].

“A abordagem nodal têm as seguintes vantagens: o número de nós é obtido diretamente do diagrama do sistema; a elaboração dos dados é fácil; o número de variáveis e equações é geralmente menor que o método das malhas; circuitos malhados são facilmente representados; ramos paralelos não aumentam o número de variáveis e equações; as tensões nodais são obtidas diretamente da solução do sistema e as correntes de ramo são facilmente calculadas; transformadores com TAPs fora do nominal são facilmente representados.” (ARRILLAGA; WATSON, 2001, p.5, traduzido) [19]

A primeira ferramenta de cálculo desenvolvida no PSP-UFU foi o fluxo de carga, que consiste na determinação da tensão das barras e fluxo de potência nos ramos sob condições reais ou ideais de operação normal do sistema elétrico. Esses estudos são fundamentais para planejar a expansão do sistema, uma vez que sua operação satisfatória depende do conhecimento dos efeitos da interligação com outros sistemas, de novas cargas, de novas centrais geradoras e de novas linhas antes que elas sejam instaladas [20]. Como é necessário um método de solução numérica para resolver o sistema, desenvolveu-se dois deles: Gauss-Seidel e Newton-Raphson, e cabe ao usuário a escolha da técnica a ser utilizada nos cálculos, sendo esta, o ponto de partida para os cálculos de curto-círcuito e dinâmicos.

As faltas podem ser muito prejudiciais a um sistema de potência. O objetivo principal da análise de curto-círcuito é o cálculo das correntes e tensões de falta para especificação de

disjuntores e relés de proteção [19]. Com o cálculo de curto-circuito do PSP-UFU também é possível determinar o nível de curto-circuito em todos os barramentos do sistema sob análise.

Apesar dos cálculos necessários para a análise dinâmica do sistema no PSP-UFU serem realizados pelo TransUFU [17], são apresentadas aqui as principais modelagens computacionais presentes nesse *software*, uma vez que foi necessário esse conhecimento para integração dos programas.

Para o PSP-UFU a rede é simétrica em relação às três fases, e portanto ele é representado segundo seu equivalente monofásico. Para desequilíbrios, como o que ocorre em alguns tipos de faltas, utiliza-se o método das componentes simétricas (teorema de Fortescue) [21].

2.2 Fluxo de carga

O problema de fluxo de carga pode ser representado por um sistema de equações e inequações algébricas não-lineares que correspondem às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições de operação impostos pelos componentes de uma rede elétrica.

Na formulação do problema a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, sendo que duas delas surgem como dados e duas como incógnitas [22]:

- V_i – magnitude da tensão na barra i ;
- θ_i – Ângulo da tensão na barra i ;
- P_i – Injeção líquida de potência ativa na barra i ;
- Q_i – Injeção líquida de potência reativa na barra i .

Relativo às variáveis que são incógnitas e os dados do sistema, podem ser definidas três tipos de barras:

- PQ – P_i e Q_i são dados, V_i e θ_i são calculados;
- PV – P_i e V_i são dados, Q_i e θ_i são calculados;
- Referência – V_i e θ_i são dados, P_i e Q_i são calculados.

As barras PQ geralmente são representadas pelos barramentos de carga, os quais não há geração e controle de tensão. As barras PV se caracterizam pelo controle de tensão mediante a injeção ou absorção de potência reativa por meio do controle da excitação de uma máquina síncrona. A barra de Referência (ou de folga) tem como função, assim como o próprio nome diz, servir de referência de tensão e ângulo do sistema. Essa barra é necessariamente geradora, uma vez que ela é responsável pelo equilíbrio do balanço de potência do sistema [22].

2.2.1 Formação da matriz admitância de barras (\mathbf{Y}_{bus})

A construção da matriz admitância para o estudo de fluxo de carga é realizada de forma sistemática por meio das equações (2.1) e (2.2) [19][20]:

$$\dot{Y}_{ij} = -\dot{y}_{ij} \quad (2.1)$$

$$\dot{Y}_{ii} = \dot{y}_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \dot{y}_{ij} \quad (2.2)$$

Em que:

\dot{Y}_{ii} Elementos da diagonal principal da matriz admitância

\dot{Y}_{ij} Elementos fora da diagonal principal da matriz admitância

\dot{y}_{ij} Admitância dos parâmetros em série da linha ou transformador

\dot{y}_{ii} Admitância shunt

A) Linha de transmissão

Um sistema de potência é uma complexa rede de elementos passivos, o qual sua maioria consiste em linhas de transmissão e transformadores. As linhas de transmissão são modeladas de acordo com seu equivalente π (pi), que consiste em uma impedância ($R_l + jX_l$) em série e duas susceptâncias capacitivas shunt (B_l^{sh}) nos extremos da linha. Na linha de transmissão, assim como nos transformadores, a admitância que será inserida nas equações (2.1) e (2.2) são obtidas pelo inverso da impedância. O modelo é representado na Figura 2.1:

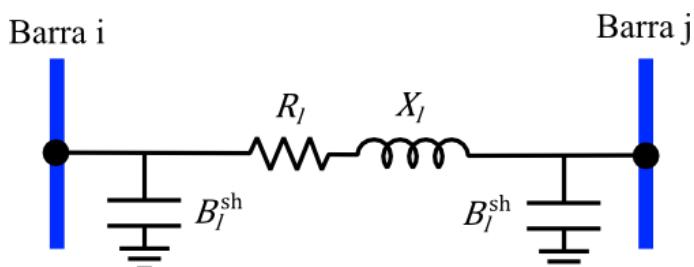


Figura 2.1 – Linha modelada como circuito π equivalente.
Fonte: Autor

B) Transformadores

Os transformadores devem ser modelados representando seu TAP (t) e defasagem (φ).

Para isso utiliza-se um transformador ideal de relação de transformação $t:1$ e a impedância em

série com, em que t é um número complexo ($t\angle\varphi$). A Figura 2.2 apresenta a modelagem utilizada:

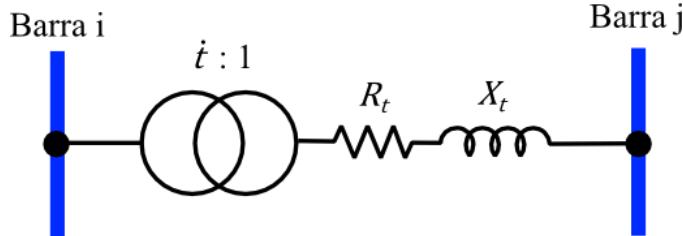


Figura 2.2 – Modelo do transformador.
Fonte: Autor

Para transformadores com TAP nominal e defasagem zero, ou seja, $t = 1\angle 0^\circ$ empregase as equações (2.1) e (2.2), caso contrário deve-se considerar o efeito do TAP na matriz admitância e para isso é necessário desenvolver outro equacionamento.

A Figura 2.3 evidencia as tensões e correntes do modelo apresentado:

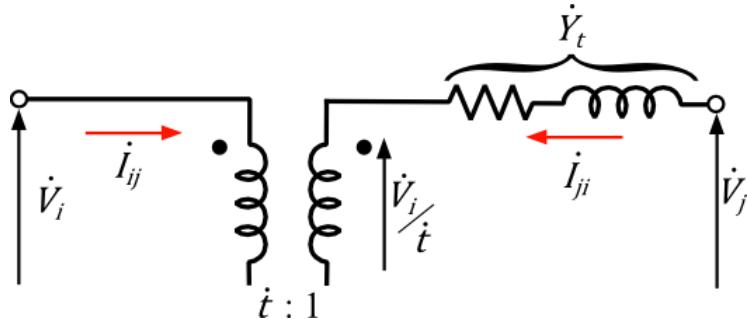


Figura 2.3 – Tensões e correntes no modelo do transformador.
Fonte: Autor

Como foi considerado um transformador ideal, pode-se afirmar a igualdade de potência do primário (\dot{S}_{ij}) e do secundário (\dot{S}_{ji}), portanto:

$$\begin{aligned}\dot{S}_{ij} &= -\dot{S}_{ji} \\ \dot{V}_i \dot{I}_{ij}^* &= -\frac{\dot{V}_i \dot{I}_{ji}^*}{t}\end{aligned}\tag{2.3}$$

Em que:

\dot{V}_j Tensão complexa da barra j

\dot{I}_{ij}^* Conjugado da corrente complexa que flui da barra i para a barra j

\dot{I}_{ji}^* Conjugado da corrente complexa que flui da barra j para a barra i

Desenvolvendo, tem-se:

$$\dot{t} \dot{I}_{ij}^* = -\dot{I}_{ji}^* \quad (2.4)$$

Encontrando a corrente complexa originada da barra j (\dot{I}_{ji}) por (2.5):

$$\dot{I}_{ji} = -\frac{\dot{Y}_t}{\dot{t}} \dot{V}_i + \dot{Y}_t \dot{V}_j \quad (2.5)$$

Em que:

\dot{Y}_t Admitância do transformador

Substituindo (2.4) em (2.5), pode-se encontrar a corrente complexa originada da barra i (\dot{I}_{ij}):

$$\dot{I}_{ij} = \frac{\dot{Y}_t}{\dot{t}^2} \dot{V}_i - \frac{\dot{Y}_t}{\dot{t}^*} \dot{V}_j \quad (2.6)$$

Unindo as equações (2.5) e (2.6) em uma forma matricial, temos:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ij} \\ \dot{I}_{ji} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{Y}_t}{\dot{t}^2} & -\frac{\dot{Y}_t}{\dot{t}^*} \\ -\frac{\dot{Y}_t}{\dot{t}} & \dot{Y}_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_i \\ \dot{V}_j \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Os elementos presentes na matriz das admitâncias do transformador da equação (2.7) são inseridos na Y_{bus} do sistema.

C) Elementos shunt

Os elementos shunt, como indutores, capacitores e cargas de impedância constante, são representados simplesmente por suas admitâncias. Como seus parâmetros de entrada normalmente se constituem de suas potências nominais, deve-se encontrar suas admitâncias com as seguinte equação:

$$\dot{Y} = \frac{P - jQ}{\dot{V}^2} \quad (2.8)$$

2.2.2 Equacionamento do fluxo de carga

O conjunto de equações do problema do fluxo de carga é formado por duas equações para cada barra, as quais representam o fato das potências ativas e reativas injetadas em uma barra serem igual à soma dos fluxos correspondentes que deixam a barra através das linhas de transmissão, transformadores, etc. [22], ou seja:

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (2.9)$$

$$Q_i + Q_i^{sh} = \sum_{j=1}^n Q_{ij} \quad (2.10)$$

Em que:

n Número de barras (nós) do sistema

P_i Potência ativa injetada na barra i

Q_i Potência reativa injetada na barra i

Q_i^{sh} Componente da injeção de potência reativa devido aos elementos shunts da barra i

P_{ij} Fluxo de potência ativa da barra i para a barra j

Q_{ij} Fluxo de potência reativa da barra i para a barra j

Para encontrar a expressão das potências ativa e reativa injetadas na barra deve-se aplicar primeiramente a Lei de Kirchhoff sobre a corrente na sua forma matricial, obtendo a expressão (2.11):

$$[\dot{I}_{bus}] = [\dot{Y}_{bus}][\dot{V}_{bus}] \quad (2.11)$$

Em que:

$[\dot{I}_{bus}]$ Vetor das correntes de barra

$[\dot{Y}_{bus}]$ Matriz admitância de barras

$[\dot{V}_{bus}]$ Vetor das tensões de barra

Pode-se reescrever a equação (2.11), para um sistema de n barras, da seguinte forma:

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (2.12)$$

Em que:

\dot{I}_i Corrente complexa injetada na barra i

\dot{Y}_{ij} Elemento da matriz admitância

\dot{V}_j Tensão complexa da barra j

A injeção de potência complexa (\dot{S}_i) é obtida pela expressão (2.13):

$$\dot{S}_i^* = P_i - jQ_i = \dot{V}_i^* \dot{I}_i = \dot{V}_i^* \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (2.13)$$

Em que:

\dot{V}_i Tensão complexa na barra i

Extraindo a potência ativa e reativa de (2.13), obtem-se:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |\dot{Y}_{ij} \dot{V}_i \dot{V}_j| \cos(\delta_{ij} + \theta_j - \theta_i) \quad (2.14)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |\dot{Y}_{ij} \dot{V}_i \dot{V}_j| \sin(\delta_{ij} + \theta_j - \theta_i) \quad (2.15)$$

Em que:

θ_i Ângulo da tensão da barra i

θ_j Ângulo da tensão da barra j

δ_{ij} Ângulo do elemento da matriz admitância

O conjunto das n equações (2.14) e (2.15) são chamadas de Equações Estáticas do Fluxo de Carga (EEFC) e são as equações básicas de um problema de fluxo de carga.

Para obter as expressões dos fluxos de potência entre duas barras (P_{ij} e Q_{ij}) em uma linha de transmissão primeiramente deve-se encontrar a corrente que flui entre as barras conforme a equação (2.16):

$$\dot{I}_{ij} = \dot{Y}_l (\dot{V}_i - \dot{V}_j) + jB_l^{sh} \dot{V}_i \quad (2.16)$$

Em que:

\dot{I}_{ij} Corrente que flui da barra i para a barra j

\dot{Y}_l Admitância formada pela inversão da impedância série ($R_l + jX_l$) da linha de transmissão
 B_l^{sh} Susceptânciça capacitativa shunt de um dos extremos da linha de transmissão

O fluxo de potência complexo correspondente é obtido por (2.17):

$$S_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = \dot{V}_i^* \dot{I}_{ij} = \dot{Y}_l \dot{V}_i^* (\dot{V}_i - \dot{V}_j) + jB_l^{sh} \dot{V}_i^* \dot{V}_i \quad (2.17)$$

Os fluxos P_{ij} e Q_{ij} são obtidos identificando-se as partes reais e imaginárias de (2.17), resultando em:

$$P_{ij} = V_i^2 G_l - V_i V_j G_l \cos \theta_{ij} - V_i V_j B_l \sin \theta_{ij} \quad (2.18)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (B_l + B_l^{sh}) + V_i V_j B_l \cos \theta_{ij} - V_i V_j G_l \sin \theta_{ij} \quad (2.19)$$

Em que:

V_i Módulo da tensão da barra i

V_j Módulo da tensão da barra j

θ_{ij} Diferença dos ângulos das tensões da barra i e j ($\theta_i - \theta_j$)

G_l Condutância série da linha de transmissão

B_l Susceptânciça série da linha de transmissão

Os fluxos contrários (P_{ji} e Q_{ji}) são obtidos de forma análoga:

$$P_{ji} = V_j^2 G_l - V_j V_i G_l \cos \theta_{ij} + V_j V_i B_l \sin \theta_{ij} \quad (2.20)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 (B_l + B_l^{sh}) + V_j V_i B_l \cos \theta_{ij} + V_j V_i G_l \sin \theta_{ij} \quad (2.21)$$

Nos transformadores com TAP nominal e defasagem zero, os fluxos de potência são obtidos por meio de (2.18) a (2.21) (substituindo G_l e B_l por G_t e B_t e fazendo $B_l^{sh} = 0$), caso contrário o efeito do TAP e defasagem devem ser considerados nesses cálculos e outra expressão deve ser aplicada. O desenvolvimento desse equacionamento inicia-se encontrando os fluxos de potência complexos utilizando (2.5) e (2.6):

$$S_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = \dot{V}_i^* \dot{I}_{ij} = \dot{V}_i^* \dot{V}_i \dot{Y}_t - t \dot{V}_i^* \dot{V}_j \dot{Y}_t \quad (2.22)$$

$$S_{ji}^* = P_{ji} - jQ_{ji} = \dot{V}_j^* \dot{I}_{ji} = -t \dot{V}_j^* \dot{V}_i \dot{Y}_t + t^2 \dot{V}_j^* \dot{V}_j \dot{Y}_t \quad (2.23)$$

Extraindo a potência ativa e reativa das expressões acima, temos:

$$P_{ij} = V_i^2 G_t - tV_i V_j G_t \cos(\theta_{ij} - \varphi) - tV_i V_j B_t \sin(\theta_{ij} - \varphi) \quad (2.24)$$

$$Q_{ji} = -V_i^2 B_t + tV_i V_j B_t \cos(\theta_{ij} - \varphi) - tV_i V_j G_t \sin(\theta_{ij} - \varphi) \quad (2.25)$$

$$P_{ji} = t^2 V_j^2 G_t - tV_j V_i G_t \cos(\theta_{ij} + \varphi) + tV_j V_i B_t \sin(\theta_{ij} + \varphi) \quad (2.26)$$

$$Q_{ji} = -t^2 V_j^2 B_t + tV_j V_i B_t \cos(\theta_{ij} + \varphi) + tV_j V_i G_t \sin(\theta_{ij} + \varphi) \quad (2.27)$$

Em que:

G_t Condutância do transformador

B_t Susceptânciā do transformador

t TAP do transformador

φ Defasagem do transformador

Como pode-se observar, as equações apresentadas são não-lineares e a forma de solução algébrica não é prática. A solução dessas equações segue processos iterativos, atribuindo valores estimados para as tensões de barra desconhecidas e calculando um novo valor para cada tensão a partir dos valores estimados nas outras barras, da potência ativa e reativa ou do módulo de tensão especificado. É obtido, então, um novo conjunto de valores para as tensões em cada barra, o qual é utilizado para calcular outro conjunto de tensões de barra. Cada cálculo de um novo conjunto de tensões é chamado iteração. O processo iterativo é repetido até que as mudanças em todas as barras sejam menores do que um valor pré-estipulado, obtendo assim a convergência [20].

Como foi dito anteriormente, foram utilizados no PSP-UFU os métodos de solução numéricos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson.

2.2.3 Método de Gauss-Seidel para solução do fluxo de carga

Após o cálculo da matriz das admitâncias, é necessário calcular as tensões e ângulos de cada barramento por meio de um método numérico.

O ponto de partida para a aplicação do método de Gauss nos estudos de fluxo de potência é a equação (2.13), que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{P_i - jQ_i}{\dot{V}_i^*} = \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (2.28)$$

Explicitando a tensão em um barramento genérico em um sistema de n barras, tem-se:

$$\dot{V}_i^{(v+1)} = \frac{1}{\dot{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{\dot{V}_i^{(v)*}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j^{(v)} \right) \quad (2.29)$$

O índice $(v + 1)$ da equação (2.29) representa a tensão que será obtida na iteração atual e os índices (v) indicam tensões que foram calculadas na iteração anterior.

À medida que a tensão corrigida for encontrada para cada barra, ela será usada no cálculo da tensão corrigida da barra seguinte. O procedimento é reproduzido para cada barra do sistema (exceto para a barra de oscilação), completando a primeira iteração. Então o processo inteiro é repetido várias vezes até que a magnitude da tensão em cada barra seja menor do que uma precisão previamente determinada. Esse processo é conhecido como método iterativo de Gauss-Seidel. Se o conjunto de valores de tensão da mesma iteração for usado durante uma iteração completa, o processo é chamado de Método iterativo de Gauss [20].

Nas barras do tipo PV os módulos das tensões são conhecidos, porém as potências reativas não, e para que seja aplicada a equação (2.29) é necessário calcular Q_i anteriormente. Para isso calcula-se a componente imaginária da equação (2.13):

$$Q_i = -Im \left\{ \dot{V}_i^* \sum_{j=1}^n \dot{Y}_{ij} \dot{V}_j \right\} \quad (2.30)$$

Utilizando as equações (2.30) e em seguida (2.29), obtém-se a tensão complexa da qual será aproveitado somente o seu ângulo, uma vez que o módulo da tensão em barras PV é fixo. A junção do ângulo de \dot{V}_i e o módulo da tensão especificada (V_i^{esp}) resulta em uma nova tensão de barra PV (\dot{V}'_i).

Para iniciar as iterações são necessários valores iniciais para as tensões (V_i^0) que devem ser calculadas e também para os ângulos das barras. Normalmente para barras do tipo PQ tem-se $\dot{V}_i^0 = 1,0 + j0,0$ [p.u.] e para barras do tipo PV $\dot{V}_i^0 = V_i^{esp} + j0,0$ [p.u.], onde V_i^{esp} é o módulo da tensão especificada para a barra PV. A barra de referência tem o módulo e ângulo de tensão fixados e não entram no processo iterativo.

O método de Gauss-Seidel mostra um número excessivo de iterações e com o intuito reduzi-los, multiplicam-se as correções de tensões por uma constante que incrementa sua quantidade, trazendo a tensão para mais perto do valor final. Os multiplicadores que

realizam essa convergência melhorada são chamados de fatores de aceleração. Para qualquer sistema existem valores ótimos para os fatores de aceleração e uma escolha mal feita desses pode resultar em uma convergência mais lenta ou torná-la impossível. Normalmente se usa um fator de aceleração igual a 1,6 [20]. A utilização do fator de aceleração é realizada por meio da equação (2.31):

$$\dot{V}_{iAC}^{(v+1)} = \alpha (\dot{V}_i^{(v+1)} - \dot{V}_{iAC}^{(v)}) + \dot{V}_{iAC}^{(v)} \quad (2.31)$$

Em que:

$\dot{V}_{iAC}^{(v+1)}$ Tensão complexa da iteração atual com fator de aceleração aplicado

$\dot{V}_i^{(v+1)}$ Tensão complexa da iteração atual

$\dot{V}_{iAC}^{(v)}$ Tensão complexa da iteração anterior com fator de aceleração aplicado

α Fator de aceleração

A Figura 2.4 mostra o fluxograma simplificado do método de Gauss-Seidel implementado no programa PSP-UFU.

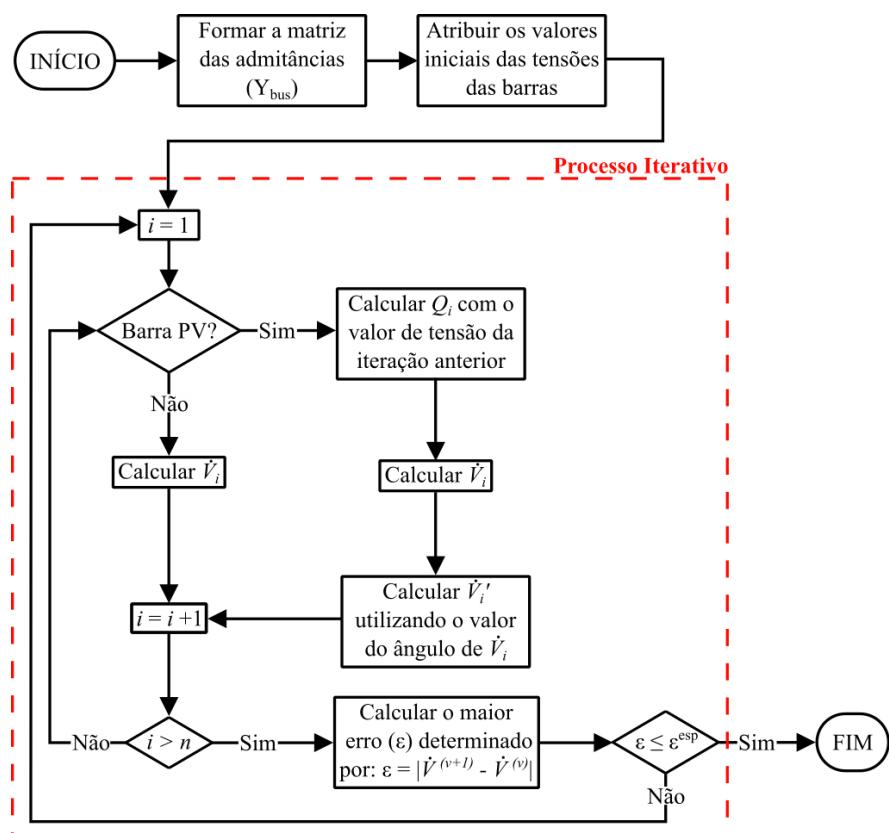


Figura 2.4 – Fluxograma do método de Gauss-Seidel no PSP-UFU.
Fonte: Autor

2.2.4 Método de Newton-Raphson para solução do fluxo de carga

A expansão da série de Taylor para uma função de duas ou mais variáveis é a base do método de Newton-Raphson para resolver o problema do fluxo de carga [20]. A série de Taylor fornece um método simples de aproximação de uma função ($f(x)$) em um polinômio e pode ser definida como (2.32) conforme [23]:

$$f(x) = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x - x^{(0)}) + \frac{f''(x^{(0)})}{2!}(x - x^{(0)})^2 + \frac{f^{(3)}(x^{(0)})}{3!}(x - x^{(0)})^3 + \dots + \frac{f^{(n)}(x^{(0)})}{n!}(x - x^{(0)})^n \quad (2.32)$$

Em que:

$x^{(0)}$ Constante que representa o centro da série

Considerando duas funções de duas variáveis (x_1 e x_2) iguais às constantes (K_1 e K_2), tem-se [20]:

$$f_1(x_1, x_2) = K_1 \quad (2.33)$$

$$f_2(x_1, x_2) = K_2 \quad (2.34)$$

Estimando inicialmente as soluções dessas equações como sendo $x_1^{(0)}$ e $x_2^{(0)}$ e designando $\Delta x_1^{(0)}$ e $\Delta x_2^{(0)}$ como sendo os valores a serem somados a eles, resulta nas soluções corretas, dados por (2.35) e (2.36):

$$K_1 = f_1(x_1, x_2) = f_1\left(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}\right) \quad (2.35)$$

$$K_2 = f_2(x_1, x_2) = f_2\left(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}\right) \quad (2.36)$$

Fazendo a expansão em série de Taylor, utilizando (2.32) nas equações (2.35) e (2.36), sem listar as derivadas parciais maiores que 1, obtém-se:

$$K_1 = f_1\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) + \Delta x_1^{(0)} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}\Big|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \frac{\partial f_1}{\partial x_2}\Big|_{(0)} \quad (2.37)$$

$$K_2 = f_2\left(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}\right) + \Delta x_1^{(0)} \frac{\partial f_2}{\partial x_1}\Big|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \frac{\partial f_2}{\partial x_2}\Big|_{(0)} \quad (2.38)$$

Em que:

$\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(0)}$ Derivada parcial calculada para $x_1^{(0)}$ e $x_2^{(0)}$. Os demais valores são obtidos de forma semelhante

Reescrevendo as equações (2.37) e (2.38) em uma forma matricial:

$$\begin{bmatrix} K_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \\ K_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

A matriz quadrada da equação (2.39) é chamada jacobiano J , ou nesse caso $J^{(0)}$ para indicar que as estimativas iniciais foram usadas para calcular o valor numérico das derivadas parciais. Designando $\Delta K_1^{(0)}$ como o valor especificado de K_1 menos o valor calculado de K_1 e $\Delta K_2^{(0)}$ definido de forma semelhante, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1^{(0)} \\ \Delta K_2^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Com a equação (2.40) é possível calcular os valores de $\Delta x_1^{(0)}$ e $\Delta x_2^{(0)}$. Entretanto, esses valores somados às estimativas iniciais não determinam a solução correta, sendo necessário repetir o processo de determinação das constantes, formação da matriz jacobiana e solução da equação (2.40), o qual será refeito determinando novas estimativas $x_1^{(1)}$ e $x_2^{(1)}$, em que:

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \quad (2.41)$$

$$x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \quad (2.42)$$

Esse processo é repetido até que as correções se tornem tão pequenas que satisfaçam uma precisão escolhida.

Para aplicar o método de Newton-Raphson à solução das equações do fluxo de carga, utiliza-se as equações (2.14) e (2.15) que representam, respectivamente, as potências ativa e reativa injetadas em uma barra.

Como no método de Gauss-Seidel, a barra de referência é omitida da solução iterativa para determinar as tensões, pois a tensão complexa dessa barra é especificada. Como é

conhecido o valor da potência ativa injetada (P_i^{esp}) nas barras do tipo PQ e PV, além da potência reativa injetada (Q_i^{esp}) nas barras PQ pode-se definir P_i^{esp} e Q_i^{esp} como os valores de K da equação (2.39). Os valores estimados do módulo e ângulo da tensão correspondem aos valores estimados para x_1 e x_2 na equação (2.39). Usando esses valores estimados para calcular P_i^{calc} e Q_i^{calc} por meio das equações (2.14) e (2.15), pode-se definir:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i^{calc} \quad (2.43)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i^{calc} \quad (2.44)$$

Os valores de ΔP_i e ΔQ_i calculados pelas equações (2.43) e (2.44) correspondem ao ΔK da equação (2.40), os quais formam duas matrizes coluna: $[\Delta P]$ com a dimensão igual à soma do número de barras PQ e PV; $[\Delta Q]$ com a dimensão igual à soma do número de barras PQ.

O jacobiano consiste nas derivadas parciais de P_i e Q_i em relação a cada uma das variáveis das equações (2.14) e (2.15). A matriz coluna formada por $\Delta x_1^{(0)}$ e $\Delta x_2^{(0)}$ da equação (2.40) corresponde às correções de ângulo ($\Delta\theta_i$) e módulo (ΔV_i) das tensões de barra.

Com isso pode-se escrever a equação matricial de um sistema de n barras, em que a barra número 1 corresponde à barra de referência e as barras de número 2 a n são barras do tipo PQ:

$$NPQ + NPV \begin{Bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \vdots \\ \Delta\theta_n \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{Bmatrix} \quad (2.45)$$

Em que:

NPQ Número de barras do tipo PQ do sistema

NPV Número de barras do tipo PV do sistema

Para tornar mais simples o cálculo da matriz jacobiana, pode-se separá-la em quatro submatrizes ($[H]$, $[N]$, $[M]$ e $[L]$), as quais são definidas pelas seguintes equações, conforme [22]:

$$[H] \begin{cases} H_{ij} = \partial P_i / \partial \theta_j = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ H_{ii} = \partial P_i / \partial \theta_i = -V_i^2 B_{ii} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.46)$$

$$[N] \begin{cases} N_{ij} = \partial P_i / \partial V_j = V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ N_{ii} = \partial P_i / \partial V_i = V_k G_{ii} + \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.47)$$

$$[M] \begin{cases} M_{ij} = \partial Q_i / \partial \theta_j = -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ M_{ii} = \partial Q_i / \partial \theta_i = -V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.48)$$

$$[L] \begin{cases} L_{ij} = \partial Q_i / \partial V_j = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ L_{ii} = \partial Q_i / \partial V_i = -V_i B_{ii} + \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.49)$$

Em que:

G_{ij} Condutância de elementos fora da diagonal principal da matriz das admitâncias

G_{ii} Condutância de elementos da diagonal principal da matriz das admitâncias

B_{ij} Susceptânciade elementos fora da diagonal principal da matriz das admitâncias

B_{ii} Susceptânciade elementos da diagonal principal da matriz das admitâncias

Com isso pode-se definir a forma matricial do método de Newton-Raphson para o problema do fluxo de potência:

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H] & [N] \\ [M] & [L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \theta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

O processo iterativo se inicia calculando as potências ativas (P_i^{calc}) para as barras PQ e PV por meio da equação (2.14) e as potências reativas (Q_i^{calc}) para as barras PQ empregando (2.15), ambas as equações utilizando as estimativas iniciais das tensões complexas. Calcula-se, então, as correções de potência por meio de (2.43) e (2.44), as quais são inseridas na equação (2.50).

O passo seguinte é a formação da matriz jacobiana por meio das submatrizes calculadas com as equações (2.46) a (2.49). Com isso é possível calcular as correções de módulo e ângulo das tensões de todas as barras (com exceção da barra de referência) por meio de (2.50). Para tanto utilizou-se o método de eliminação Gaussiana e substituição retroativa [23] com o intuito de diminuir o esforço computacional, uma vez que a inversão da matriz jacobiana é evitada.

Com as correções de módulo e ângulo das tensões das barras calculados, aplicam-se as seguintes equações (semelhantes às equações (2.41) e (2.42)):

$$\theta_i^{(v+1)} = \theta_i^{(v)} + \Delta\theta_i^{(v)} \quad (2.51)$$

$$V_i^{(v+1)} = V_i^{(v)} + \Delta V_i^{(v)} \quad (2.52)$$

O processo é então reiniciado e será repetido até que se obtenha a convergência, quando as correções se tornam tão pequenas que satisfaçam um erro pré-estipulado.

A Figura 2.5 mostra o fluxograma do método de Newton-Raphson para solução do fluxo de carga no PSP-UFU.

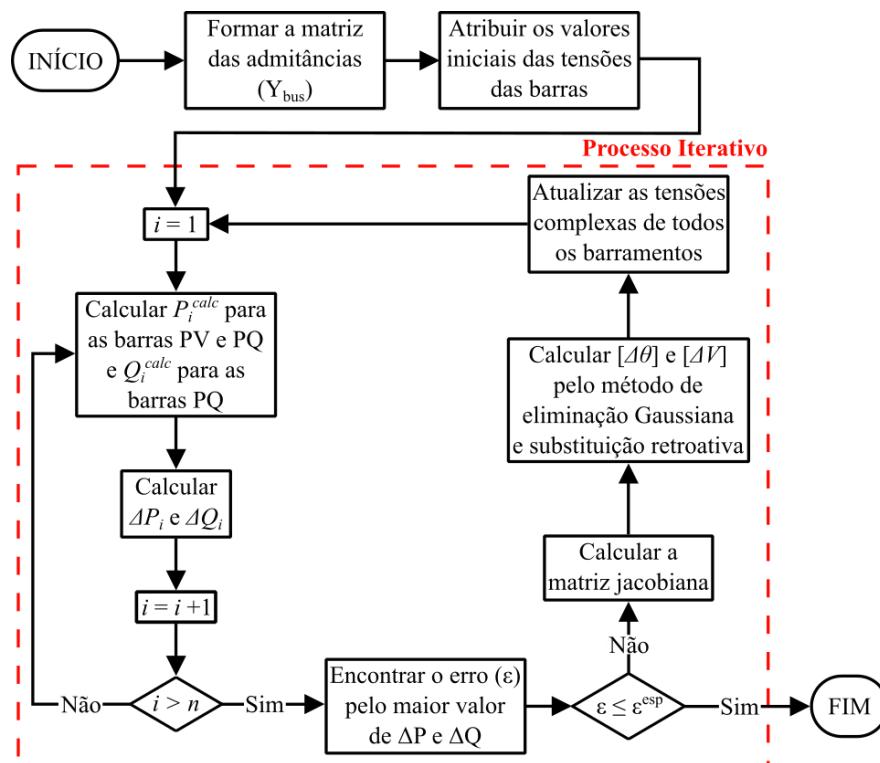


Figura 2.5 – Fluxograma do método de Newton Raphson no PSP-UFU.
Fonte: Autor

2.3 Curto-circuito

O primeiro estágio do cálculo de curto-circuito é a determinação das tensões pré-falta, das potências de geração e cargas do sistema. Esses dados são obtidos por meio do estudo de fluxo de carga, explanados no tópico anterior.

O PSP-UFU fornece resultado para os seguintes tipos de falta:

- Falta Trifásica (3F-T);
- Falta Fase-Terra (F-T);
- Falta Fase-Fase (F-F);
- Falta Fase-Fase-Terra (F-F-T).

Os modelos dos elementos elétricos que constituem um sistema de potência para o estudo de curto-circuito são semelhantes aos do fluxo de carga, apresentando algumas divergências para as faltas desbalanceadas (F-T, F-F e F-F-T).

As faltas que ocorrem com maior frequência em sistemas de potência são assimétricas [20]. Como qualquer falta assimétrica provoca fluxo de corrente desequilibrada é necessário empregar o método das componentes simétricas. Esse método permite o estudo de sistemas balanceados com cargas desbalanceadas [21].

2.3.1 Método das componentes simétricas

Esse método proposto por C. L. Fortescue [24], permite definir um sistema de n fasores desbalanceados em $n - 1$ sistemas de n fases平衡ados e um sistema de fase zero. O sistema de fase zero é definido por todas as fases de mesmo módulo e ângulo .

Para um sistema trifásico pode-se definir três componentes de sequência [20]:

1. Componentes de sequência positiva, constituindo em três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si, e tendo a mesma sequência de fase que os fasores originais;
2. Componentes de sequência negativa, constituindo em três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si, e tendo a sequência de fase oposta à dos fasores originais.
3. Componentes de sequência zero, constituindo em três fasores iguais em módulo e com defasagem nula entre si.

Com isso pode-se decompor as tensões de fase em componentes simétricas pelas seguintes equações:

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \quad (2.53)$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2} + \dot{V}_{b0} \quad (2.54)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2} + \dot{V}_{c0} \quad (2.55)$$

Em que:

\dot{V}_a , \dot{V}_b e \dot{V}_c Tensões de fase desequilibradas

\dot{V}_{a1} , \dot{V}_{b1} e \dot{V}_{c1} Tensões de sequência positiva

\dot{V}_{a2} , \dot{V}_{b2} e \dot{V}_{c2} Tensões de sequência negativa

\dot{V}_{a0} , \dot{V}_{b0} e \dot{V}_{c0} Tensões de sequência zero

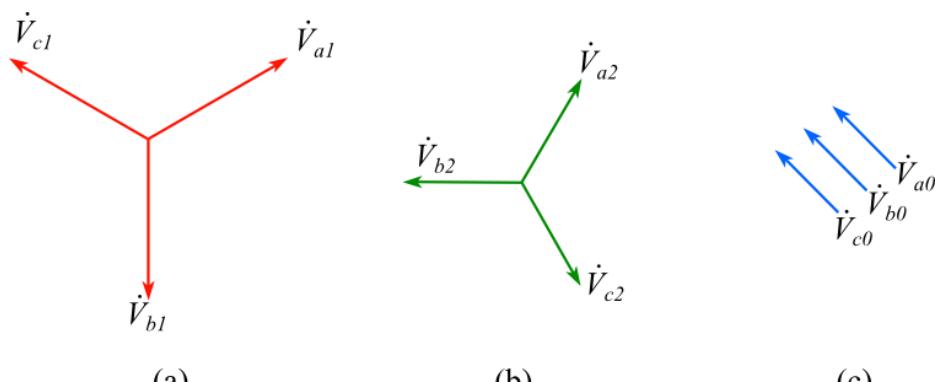


Figura 2.6 – Componentes simétricas: (a) Sequência positiva; (b) Sequência negativa; (c) Sequência zero.
Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN D. [20]

A Figura 2.6 mostra três conjuntos de fasores equilibrados que são componentes de três fasores desequilibrados. A soma dos componentes de sequência são apresentados na Figura 2.7:

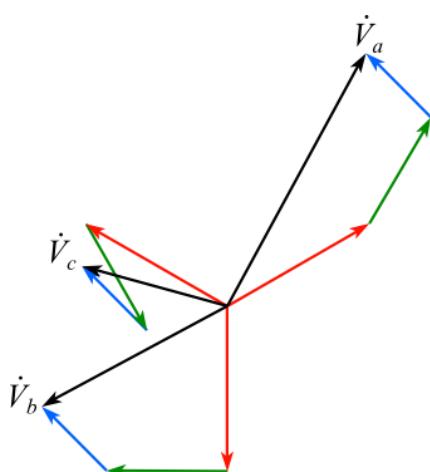


Figura 2.7 – Adição dos componentes de sequência da Figura 2.6 para se obter os três fasores desequilibrados.

Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN D. [20]

Para simplificar os cálculos adota-se um operador “ \dot{a} ” com o intuito de indicar a rotação de um fasor. Tal operador é um número complexo de módulo unitário e ângulo de 120° , definido por [20][21]:

$$\dot{a} = 1\angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0,5 + j0,866 \quad (2.56)$$

Se o operador “ \dot{a} ” for aplicado a um fasor duas vezes fará o fasor girar 240° . Três aplicações resultará em um giro de 360° [20].

Com isso pode-se utilizar as equações (2.53) a (2.55) em conjunto com o operador “ \dot{a} ” para construir a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Considerando a matriz quadrada da equação (2.57) sendo $[A]$, pode-se encontrar as componentes simétricas pré-multiplicando ambos os lados dessa mesma equação por $[A]^{-1}$:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

2.3.2 Modelagem dos elementos do sistema para estudo de curto-circuito

Da mesma forma que no estudo de fluxo de carga, a representação dos elementos do sistema para o estudo de curto-circuito é realizada primeiramente por meio da matriz admitância de barras (Y_{bus}). Nas faltas assimétricas (F-T, F-F e F-F-T) é necessário formar três matrizes admitância de sequência: positiva, negativa e zero.

A) Geradores

As tensões geradas são somente de sequência positiva, uma vez que o gerador fornece sempre tensões trifásicas equilibradas. Portanto a rede de sequência positiva é composta de uma tensão pré-falta em série com uma impedância de sequência positiva. As redes de sequência negativa e zero não contêm forças eletromotrices, porém incluem as impedâncias do gerador

de sequência negativa e zero [20]. A Figura 2.8 mostra o caminho da corrente e o circuito equivalente de cada sequência nos geradores.

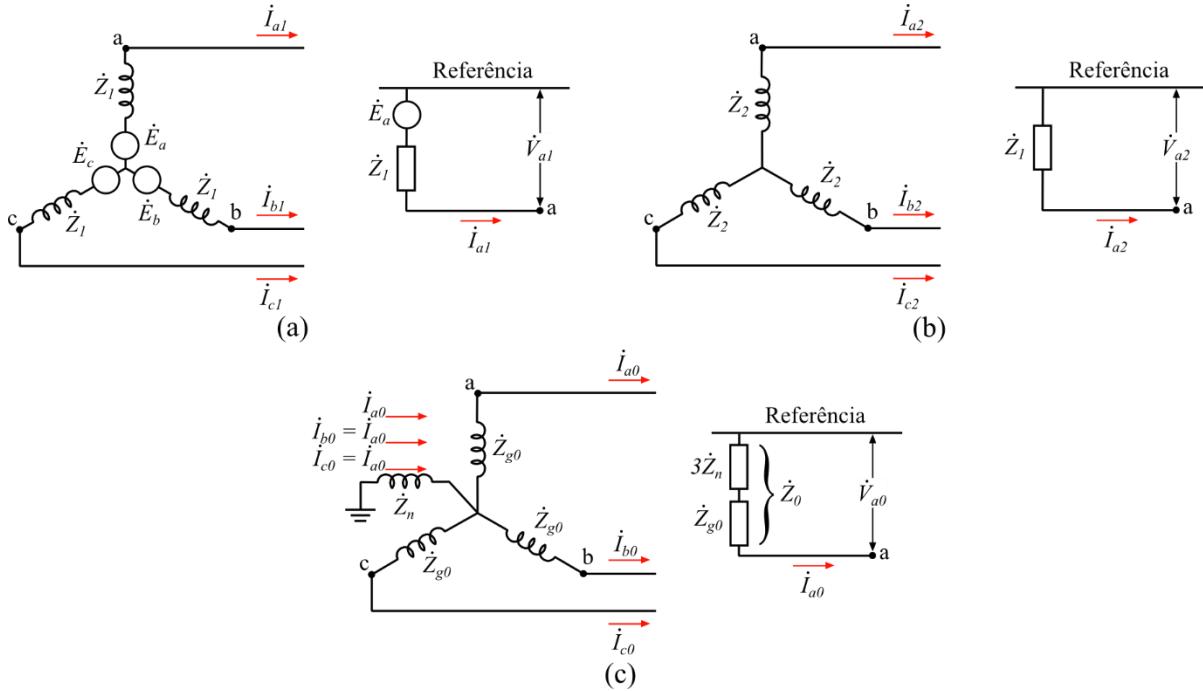


Figura 2.8 – Caminho das correntes e circuito equivalente: (a) sequência positiva; (b) sequência negativa; (c) sequência zero.

Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN D. [20]

A corrente que circula na impedância \dot{Z}_n entre o neutro e a terra é $3\dot{I}_{a0}$. Pela Figura 2.8c, observa-se que a queda de tensão de sequência zero do ponto a para terra (\dot{V}_{a0}) é:

$$\dot{V}_{a0} = -3\dot{I}_{a0}\dot{Z}_n - \dot{I}_{a0}\dot{Z}_{g0} \quad (2.59)$$

A rede de sequência zero, que é um circuito monofásico pelo qual se supõe que circule apenas corrente de sequência zero, deve portanto ter uma impedância definida pela seguinte equação:

$$\dot{Z}_0 = 3\dot{Z}_n + \dot{Z}_{g0} \quad (2.60)$$

As equações para os componentes da queda de tensão do ponto “a” para a referência são (como pode ser deduzido da Figura 2.8) [20]:

$$\dot{V}_{a1} = \dot{E}_a - \dot{I}_{a1}\dot{Z}_1 \quad (2.61)$$

$$\dot{V}_{a2} = -\dot{I}_{a2}\dot{Z}_2 \quad (2.62)$$

$$\dot{V}_{a0} = -\dot{I}_{a0}\dot{Z}_0 \quad (2.63)$$

B) Linha de Transmissão

A linha de transmissão é modelada da mesma maneira que apresentada na seção 2.2.1 para todas as sequências, a qual deve-se utilizar os parâmetros correspondentes de cada uma.

C) Transformadores

A matriz admitância de sequência positiva é construída da mesma forma que os estudos de fluxo de carga. Na sequência negativa o ângulo de defasagem (φ) deve ser invertido, uma vez que os fasores da sequência negativa são deslocados na direção oposta [25]. Com isso a matriz quadrada que representa as admitâncias do transformador da equação (2.7) deve ser substituída pela seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{ii} & \dot{Y}_{ij} \\ \dot{Y}_{ji} & \dot{Y}_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{Y}_t}{t^2} & -\frac{\dot{Y}_t}{t^*} \\ -\frac{\dot{Y}_t}{t} & \dot{Y}_t \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

A impedância de sequência negativa nos transformadores deve ser tratada de maneira específica devido aos diferentes tipos de conexão.

“Os circuitos equivalentes de sequência zero de transformadores trifásicos merecem atenção especial. As várias combinações possíveis do primário e secundário, em conexões Y e Δ, alteram a rede de sequência zero. A teoria dos transformadores nos possibilita construir um circuito equivalente para a rede se sequência zero. Lembamos que, desprezando-se a pequena corrente de magnetização, não circulará corrente no primário do transformador, a menos que circule corrente no secundário. Sabemos, também, que a corrente do primário é determinada pela corrente do secundário e pela relação de espiras dos enrolamentos, novamente desprezando-se a corrente de magnetização. Estes princípios nos guiam na análise dos casos individuais.” (STENVENSON, 1986, p.319) [20]

Na Figura 2.9 são mostrados os circuitos equivalentes para cada tipo de conexão de transformadores de dois enrolamentos. As setas indicam os caminhos possíveis para circulação da corrente de sequência zero.

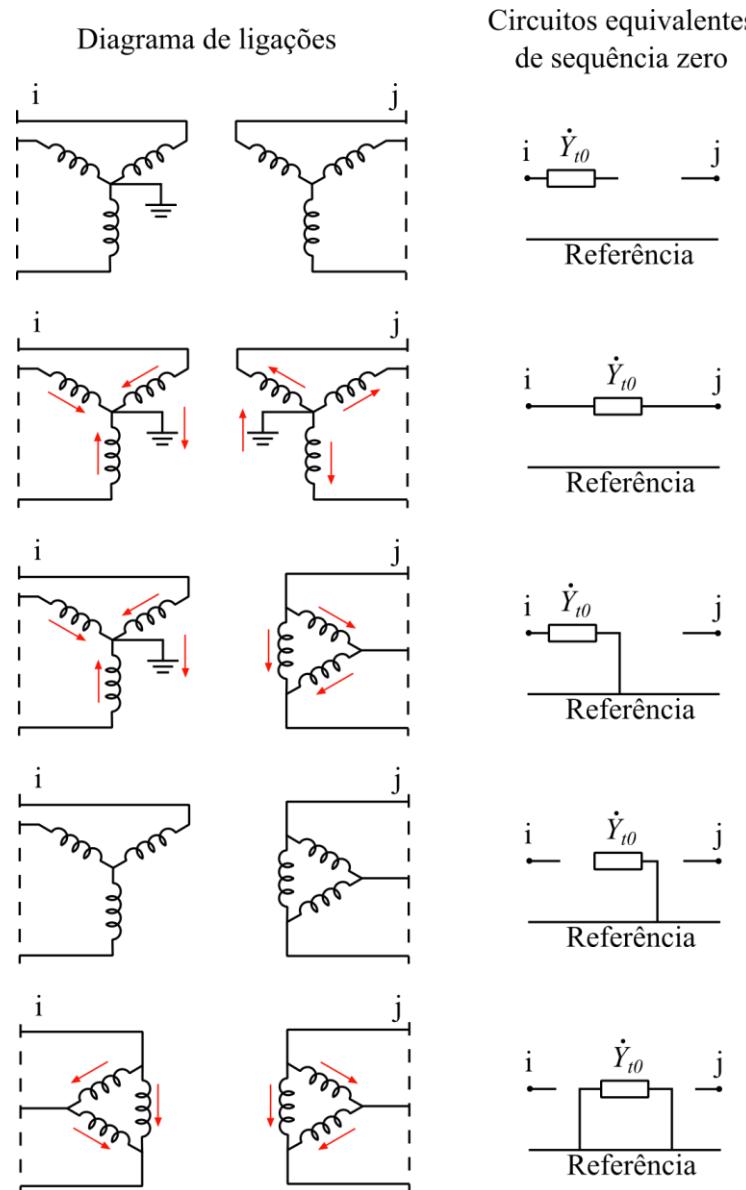


Figura 2.9 – Circuitos equivalentes de sequência zero dos transformadores.

Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN D. [20]

Com isso pode-se formar as três matrizes admitância de sequência e invertê-las para obter as matrizes impedância de sequência positiva ($[Z_{bus}^1]$), negativa ($[Z_{bus}^2]$) e zero ($[Z_{bus}^0]$). Não é necessário aplicar o método de eliminação Gaussiana e substituição retroativa, como é realizado no método de Newton-Raphson, pois o cálculo de curto-círcuito não possui processos iterativos e a inversão é realizada somente uma vez.

2.3.3 Equacionamento do curto-circuito

Primeiramente será tratado o equacionamento para faltas balanceadas e então os estudos serão estendidos para as faltas desbalanceadas por meio da utilização do método das componentes simétricas.

A) Faltas balanceadas

Como foi dito anteriormente, utiliza-se da matriz impedância de barras para o cálculo de curto-circuito, definida pela seguinte equação matricial:

$$[\dot{V}] = [\dot{Z}_{bus}][\dot{I}] \quad (2.65)$$

Essa equação permite a utilização do equivalente Thevenin do circuito, como é ilustrado na Figura 2.10a, em que são destacadas duas barras genéricas i e j .

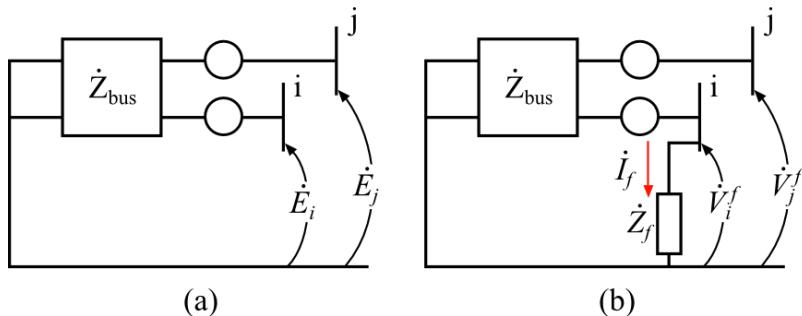


Figura 2.10 – Equivalente Thevenin de um sistema pré-falta (a) e durante a falta (b).
Fonte: Adaptado de ARRILLAGA, J.; WATSON N. R. [19]

A tensão durante a falta na barra i da Figura 2.10b, é:

$$\dot{V}_i^f = \dot{Z}_f \dot{I}_f \quad (2.66)$$

Em que:

\dot{Z}_f Impedância de falta

\dot{I}_f Corrente de falta

A tensão pré-falta na barra i para um sistema de n barra, pode ser obtido por meio da expansão da equação (2.65):

$$\dot{E}_i = \dot{Z}_{i1}\dot{I}_1 + \dot{Z}_{i2}\dot{I}_2 + \cdots + \dot{Z}_{ii}\dot{I}_i + \cdots + \dot{Z}_{in}\dot{I}_n \quad (2.67)$$

Durante a falta a corrente \dot{I}_f sai da barra i . Inserindo essa corrente na equação (2.67) e utilizando a equação (2.66), tem-se:

$$\dot{V}_i^f = \dot{Z}_f \dot{I}_f = \dot{Z}_{i1} \dot{I}_1 + \dot{Z}_{i2} \dot{I}_2 + \cdots + \dot{Z}_{ii} \dot{I}_i + \cdots + \dot{Z}_{in} \dot{I}_n - \dot{Z}_{ii} \dot{I}_f \quad (2.68)$$

Ou

$$\dot{Z}_f \dot{I}_f = \dot{E}_i - \dot{Z}_{ii} \dot{I}_f \quad (2.69)$$

Portanto a corrente de falta balanceada pode ser definida como:

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_i}{\dot{Z}_{ii} + \dot{Z}_f} \quad (2.70)$$

B) Faltas desbalanceadas

Para deduzir as equações das faltas desbalanceadas é necessário seguir o seguinte procedimento [21]:

1. Desenhar o diagrama no ponto da falta, mostrando as conexões de todas fases para a falta; o diagrama é mostrado na Figura 2.11. Assume-se que apenas impedâncias balanceadas estão presentes em ambos os lados do ponto da falta e o equivalente Thevenin até esse ponto é conhecido;
2. Escrever as condições de contorno relacionando as tensões e corrente conhecidas para o tipo de falta estudada;
3. Transformar as correntes e tensões do item 2 de a-b-c para o sistema de coordenadas 0-1-2 por meio das equações (2.57) ou (2.58);
4. Encontrar a corrente do curto-círcuito em estudo utilizando as equações (2.61), (2.62) e (2.63) na seção 2.3.2.

Esse procedimento é realizado no Apêndice A e são desenvolvidas todas as equações presentes no PSP-UFU para faltas desbalanceadas.

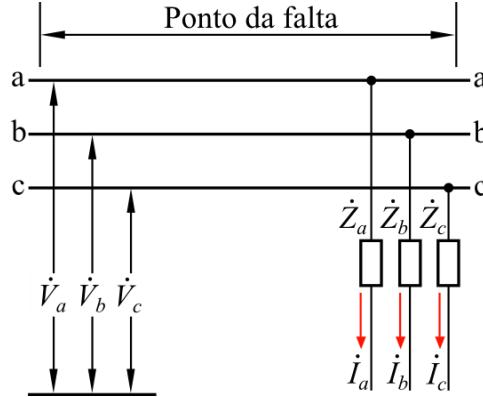


Figura 2.11 – Diagrama no ponto da falta.
Fonte: Adaptado de ANDERSON P. M. [21]

A Tabela 2.1 mostra as principais equações para cálculo de curto-circuito:

Tabela 2.1 – Correntes de falta.

Fonte: ARRILLAGA, J.; WATSON N. R. [19]

Falta	Corrente de sequência positiva (\dot{I}_f^1)	Corrente de sequência negativa (\dot{I}_f^2)	Corrente de sequência zero (\dot{I}_f^0)
F-T	$\frac{\dot{E}_i}{\dot{Z}_{ii}^1 + \dot{Z}_{ii}^2 + \dot{Z}_{ii}^0 + 3Z_f}$	\dot{I}_f^1	\dot{I}_f^1
F-F	$\frac{\dot{E}_i}{\dot{Z}_{ii}^1 + \dot{Z}_{ii}^2 + Z_f}$	$-\dot{I}_f^1$	0,0
F-F-T	$\frac{\dot{E}_i}{(\dot{Z}_{ii}^{2'} \dot{Z}_{ii}^{0'}) / (\dot{Z}_{ii}^{2'} + \dot{Z}_{ii}^{0'}) + \dot{Z}_{ii}^1}$	$\frac{\dot{Z}_{ii}^{0'} \dot{I}_f^1}{\dot{Z}_{ii}^{2'} + \dot{Z}_{ii}^{0'}}$	$\frac{\dot{Z}_{ii}^{2'} \dot{I}_f^1}{\dot{Z}_{ii}^{2'} + \dot{Z}_{ii}^{0'}}$
3F-T	$\frac{\dot{E}_i}{\dot{Z}_{ii}^1 + Z_f}$	0,0	0,0

Em que:

$$\dot{Z}_{ii}^1 = \dot{Z}_{ii}^1 + 0,5Z_f \quad (2.71)$$

$$\dot{Z}_{ii}^2 = \dot{Z}_{ii}^2 + 0,5Z_f \quad (2.72)$$

$$\dot{Z}_{ii}^0 = \dot{Z}_{ii}^0 + 0,5Z_f \quad (2.73)$$

\dot{Z}_{ii}^1 , \dot{Z}_{ii}^2 e \dot{Z}_{ii}^0 Elementos correspondentes ao barramento i da diagonal da matriz das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente

Z_f Impedância de falta

\dot{E}_i Tensão pré-falta do barramento i

Após o cálculo das correntes de sequência calculam-se as tensões de falta em todos os barramentos do sistema por meio da forma matricial das equações (2.61), (2.62) e (2.63):

$$[\dot{V}_f^1] = [\dot{E}] - [\dot{Z}_1][\dot{I}_f^1] \quad (2.74)$$

$$[\dot{V}_f^2] = -[\dot{Z}_2][\dot{i}_f^2] \quad (2.75)$$

$$[\dot{V}_f^0] = -[\dot{Z}_0][\dot{i}_f^0] \quad (2.76)$$

Em que:

$[\dot{V}_f^1]$, $[\dot{V}_f^2]$ e $[\dot{V}_f^0]$ Matrizes coluna de tensões durante a falta de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente

$[\dot{E}]$ Matriz coluna de tensões antes da falta

$[\dot{i}_f^1]$, $[\dot{i}_f^2]$ e $[\dot{i}_f^0]$ Matrizes coluna de correntes de falta de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente

Finalmente utiliza-se a equação (2.57) para converter as tensões e correntes de 0-1-2 para a-b-c.

2.4 Estudo dinâmico

O ponto de partida do estudo dinâmico é a rede na condição equilibrada, resultado do cálculo do fluxo de carga apresentado na seção 2.2. O *software* fornece a resposta dinâmica de um sistema elétrico de potência face a distúrbios devido a: chaveamentos e faltas [17]. Para isso é necessário representar as equações dinâmicas das máquinas síncronas e dos motores de indução.

Também estão inclusos no programa reguladores de tensão e velocidade, os quais serão contemplados nessa seção.

2.4.1 Máquinas síncronas

Geradores síncronos são as principais fontes de energia em um sistema de potência, e sua modelagem e análise sempre foi um desafio [26]. Esta máquina possui três enrolamentos do estator, um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores, acoplados magneticamente e estão em função da posição do rotor, tornando as expressões das tensões de enrolamento bastante complexas.

Uma grande simplificação na modelagem matemática da máquina síncrona é obtida por meio da Transformada de Park [26][27]. As variáveis dessa transformação são obtidas com a projeção das variáveis verdadeiras em três eixos: o eixo direto (d), que está no mesmo eixo do enrolamento de campo; o eixo em quadratura (q), que está perpendicular ao eixo do enrolamento de campo; e o eixo estacionário (0). A Figura 2.12 mostra os eixos citados juntamente com os enrolamentos da máquina.

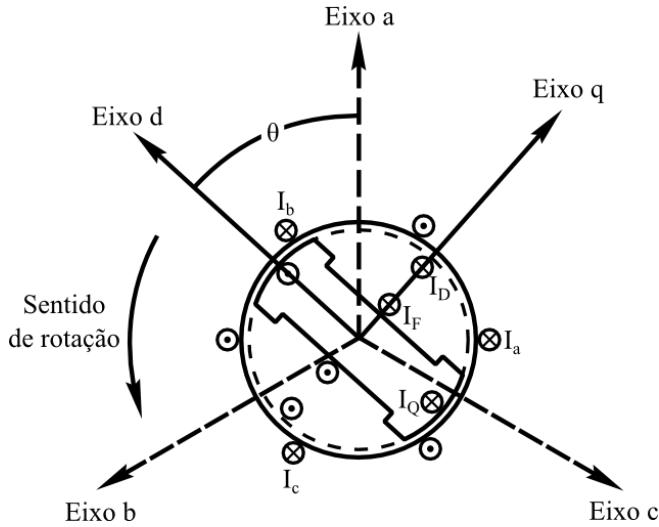


Figura 2.12 – Diagrama da máquina síncrona.

Fonte: Adaptado de ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. [27]

O efeito da Transformação de Park é colocar os dados relativos às fases a b e c em uma nova referência que acompanha o movimento do rotor.

As equações das máquinas síncronas podem ser divididas em equações mecânicas e elétricas.

A) Equações mecânicas

As equações mecânicas das máquinas síncronas são bastante consolidadas [2][28]. Elas são originadas de três suposições básicas [19]:

- A velocidade do rotor da máquina é próxima da velocidade síncrona;
- Perdas por atrito e ventilação são ignoradas;
- A variação da potência no eixo é pequena.

Com a primeira suposição pode-se afirmar que a potência (em p.u.) é igual ao torque (em p.u.). Com a segunda suposição pode-se afirmar que a aceleração da máquina (P_a) é consequência da diferença entre a potência mecânica (P_m) e a potência elétrica (P_e). Portanto a aceleração (α) é:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{M_g} \quad (2.77)$$

Em que:

ω Velocidade angular

δ Ângulo do rotor

M_g Momento angular

O momento angular pode ser definido em função da constante de inércia (H_g), a qual é mais utilizada como dado de máquina:

$$M_g = \frac{H_g}{\pi f_0} \quad (2.78)$$

Em que:

f_0 Frequência base do sistema

Correntes parasitas no rotor e nos enrolamentos de amortecimento produzem torques opostos ao sentido de giro do rotor. Essa desaceleração de potência é representado por um fator de amortecimento (D_a).

Portanto, duas equações diferenciais ordinárias de primeira ordem descrevem o movimento mecânico de uma máquina síncrona:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M_g} [P_m - P_e - D_a(\omega - 2\pi f_0)] \quad (2.79)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi f_0 \quad (2.80)$$

B) Equações elétricas

As equações elétricas das máquinas síncronas, utilizando os eixos de referência direto e em quadratura, que leva em consideração as mudanças nos seus fluxos é realizada por Concordia [29] e Kimbark [30]. As seguintes aproximações são realizadas para obtenção de tais equações [19]:

- A velocidade do rotor é sempre próxima de 1,0 p.u., sendo considerada constante;
- Todas as indutâncias são independentes das correntes;
- As indutâncias dos enrolamentos da máquina são representados por um valor constante acrescido de uma senoide harmônica do ângulo do rotor;
- Enrolamentos distribuídos são representados por parâmetros concentrados;
- A máquina é representada por uma tensão atrás de uma impedância;
- Não há perda por histerese no rotor e as correntes parasitas são somente consideradas per meio de enrolamentos equivalentes no rotor;

- Reatância de dispersão existe somente no estator.

Utilizando essas aproximações pode-se empregar um modelo de máquina síncrona para os regimes transitório e subtransitório.

As equações abaixo representam o regime transitório [19]:

$$\frac{d\dot{E}'_q}{dt} = \frac{\dot{E}_{fd} - (X_d - X'_d)\dot{I}_d - \dot{E}'_q}{T'_{d0}} \quad (2.81)$$

$$\frac{d\dot{E}'_d}{dt} = \frac{(X_q - X'_q)\dot{I}_d - \dot{E}'_d}{T'_{q0}} \quad (2.82)$$

$$\dot{E}'_d - \dot{V}_d = R_a \dot{I}_d - X'_q \dot{I}_q \quad (2.83)$$

$$\dot{E}'_q - \dot{V}_q = X'_d \dot{I}_d + R_a \dot{I}_q \quad (2.84)$$

Em que:

\dot{E}'_d e \dot{E}'_q Tensões internas transitórias de eixo direto e em quadratura, respectivamente

X_d e X_q Reatâncias síncronas de eixo direto e em quadratura, respectivamente

X'_d e X'_q Reatâncias transitórias de eixo direto e em quadratura, respectivamente

\dot{I}_d e \dot{I}_q Correntes terminais de eixo direto e em quadratura, respectivamente

\dot{V}_d e \dot{V}_q Tensões terminais de eixo direto e em quadratura, respectivamente

T'_{d0} e T'_{q0} Constantes de tempo transitórias de circuito aberto de eixo direto e em quadratura, respectivamente

R_a Resistência de armadura

\dot{E}_{fd} Tensão do enrolamento de campo

E as equações do regime subtransitório são [19]:

$$\frac{d\dot{E}''_q}{dt} = \frac{\dot{E}'_q - (X'_d - X''_d)\dot{I}_d - \dot{E}''_q}{T''_{d0}} \quad (2.85)$$

$$\frac{d\dot{E}''_d}{dt} = \frac{(X'_q - X''_q)\dot{I}_q - \dot{E}''_d}{T''_{q0}} \quad (2.86)$$

$$\dot{E}''_d - \dot{V}_d = R_a \dot{I}_d - X''_q \dot{I}_q \quad (2.87)$$

$$\dot{E}''_q - \dot{V}_q = X''_d \dot{I}_d + R_a \dot{I}_q \quad (2.88)$$

Em que:

\dot{E}''_d e \dot{E}''_q Tensões internas subtransitórias de eixo direto e em quadratura, respectivamente

X''_d e X''_q Reatâncias subtransitórias de eixo direto e em quadratura, respectivamente

T''_{d0} e T''_{q0} Constantes de tempo subtransitórias de circuito aberto de eixo direto e em quadratura, respectivamente

Por meio das equações supracitadas pode-se definir alguns modelos de máquinas síncronas, que são selecionados de acordo com os dados fornecidos para sua representação [17][19].

O **Modelo 1** é a representação por uma tensão constante atrás de uma reatância transitória de eixo direto. Esse modelo é selecionado caso o usuário não forneça X_d ou T'_{d0} , utilizando as equações (2.83) e (2.84) para realizar os cálculos, fazendo $X'_d = X'_q$.

O **Modelo 2** leva em conta o efeito transitório de eixo direto e é escolhido caso o usuário não forneça os dados subtransitórios e T'_{q0} . São utilizadas as equações (2.81), (2.83) e (2.84) para realização dos cálculos, fazendo $X'_q = X_q$.

O **Modelo 3** considera os efeitos transitórios dos eixos direto e em quadratura e é selecionado se os dados subtransitórios não são fornecidos, porém, tem-se como dado T'_{q0} . São utilizadas as equações (2.81) a (2.84) caso não seja fornecido X'_q é adotado X'_d .

No **Modelo 4** é representado o efeito subtransitório e, é selecionado caso sejam fornecidas as reatâncias subtransitórias e uma constante de tempo. Caso não seja fornecido X''_d seu valor é automaticamente adotado como sendo X''_q ou vice-versa e o mesmo ocorre com T''_{d0} e T''_{q0} . Para esse modelo as equações (2.81) a (2.88) são usadas.

A representação da saturação da máquina síncrona é obtida por meio da curva de magnetização, formada pela tensão nominal em relação à corrente de campo. Todas as reatâncias usadas nas equações (2.81) a (2.88) são modificadas continuamente durante a simulação pelos fatores de saturação de eixos d e q obtidos dessa curva.

C) Reguladores de tensão (AVR)

O programa utiliza um modelo de regulador de tensão ilustrado na Figura 2.13. De acordo com os dados inseridos, o programa escolherá o modelo adequado, da mesma maneira que ocorre com os modelos de máquinas síncronas.

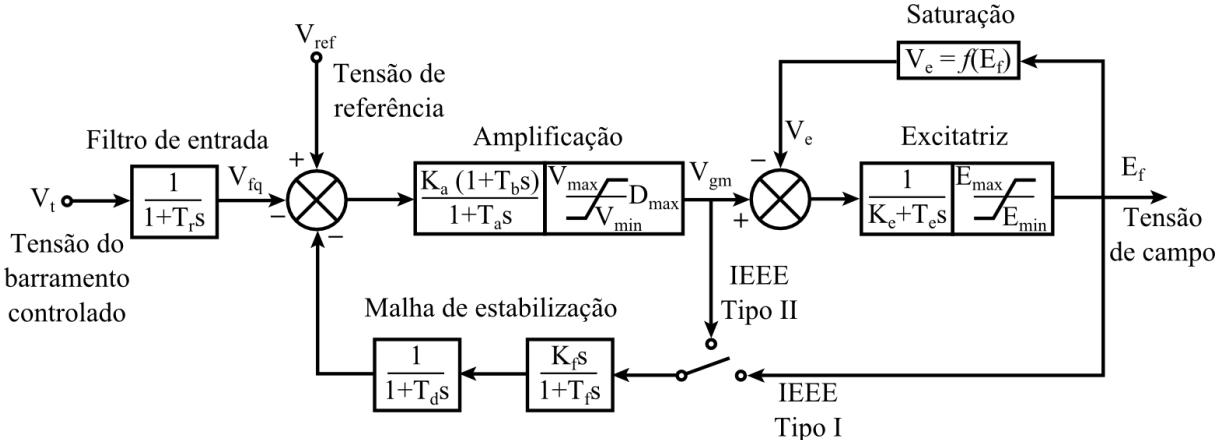


Figura 2.13 – Modelo geral do regulador de tensão (AVR).

Fonte: Adaptado de GUIMARÃES, G. C. [17].

D) Reguladores de velocidade

O programa usa um modelo simples de regulador de velocidade, como mostra a Figura 2.14.

Turbinas hidráulicas ou térmicas podem ser representadas. Se a constante de tempo T_4 é diferente de zero, então o programa assume que o regulador é para uma turbina hidráulica.

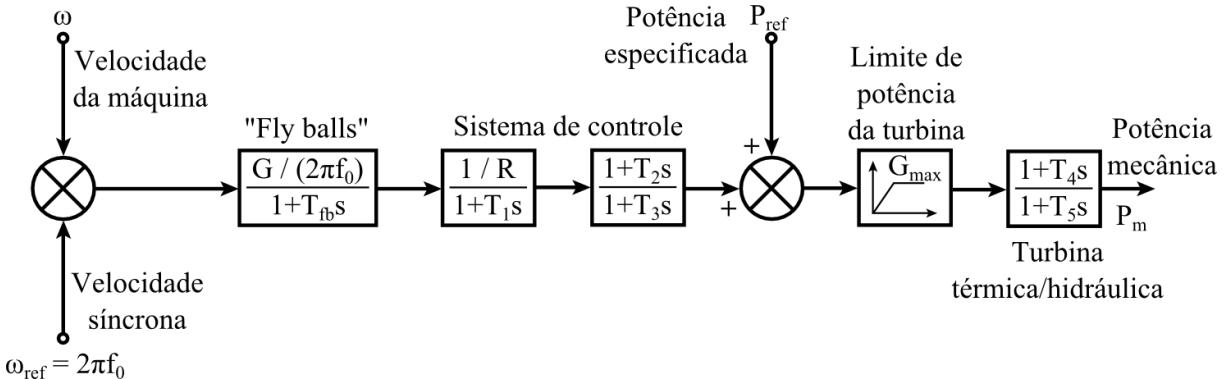


Figura 2.14 – Modelo de regulador de velocidade para composição de turbina térmica/hidráulica.

Fonte: Adaptado de GUIMARÃES, G. C. [17].

2.4.2 Motor de indução trifásico

Aproximações similares àquelas utilizadas para a construção do modelo da máquina síncrona (seção 2.4.1) são necessárias para a modelagem da máquina de indução. Entretanto a velocidade não pode ser considerada como tendo uma pequena variação, o que torna as equações que descrevem o comportamento dos motores de indução diferentes das máquinas síncronas [19].

A) Equações mecânicas

Nessa modelagem é necessário expressar a equação de movimento de uma máquina de indução em relação ao seu torque, não sua potência. A simetria do rotor torna sua posição angular sem importância, além do escorregamento (s) substituir a velocidade angular (ω) [19], em que:

$$s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0 \quad (2.89)$$

Desprezando as perdas por atrito e ventilação e uma variação de potência no eixo suave, a equação de movimento é dada por (2.90):

$$\frac{ds}{dt} = \frac{T_m - T_e}{2H_m} \quad (2.90)$$

Em que:

H_m Constante de inércia (em kW·s/kVA) na velocidade síncrona

T_m e T_e Torques mecânico e elétrico, respectivamente

O torque mecânico normalmente varia com a velocidade em uma relação dependente do tipo da carga. Existem duas formas de representá-lo: a forma exponencial, definido pela equação (2.91) e a forma polinomial quadrática, determinado por (2.92).

$$T_m = \omega^k \quad (2.91)$$

$$T_m = a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2 \quad (2.92)$$

Em que:

k Constante da forma exponencial, pode ser 0, 1 ou 2

a_0 , a_1 e a_2 Constantes da forma polinomial quadrática e a soma deve ser igual a 1,0

B) Equações elétricas

Um motor de indução é representado, dinamicamente, pela tensão subtransitória (\dot{E}'') atrás de uma reatância subtransitória (X''), o qual pode ser simulado como um motor de gaiola dupla ou de gaiola simples. Assim como nos modelos de máquina síncrona, os efeitos dos distúrbios no motor podem ser descritos em função de duas equações diferenciais, indicadas em (2.93) e (2.94), as quais refletem rápidas mudanças (regime subtransitório) e mudanças lentas (regime transitório) da tensão do motor [17][31].

$$\frac{d\dot{E}'}{dt} = -j2\pi f s \dot{E}' - \frac{\dot{E}' - j(X - X')I}{T'_0} \quad (2.93)$$

$$\frac{d\dot{E}''}{dt} = j2\pi f s (\dot{E}' - \dot{E}'') + \frac{d\dot{E}'}{dt} + \frac{\dot{E}' + \dot{E}'' - j(X' - X'')I}{T''_0} \quad (2.94)$$

Em que:

\dot{E}' Tensão interna transitória

X, X' e X'' Reatâncias de regime permanente, transitória e subtransitória, respectivamente

T'_0 e T''_0 Constantes de tempo de circuito aberto transitória e subtransitória, respectivamente

Na representação utilizada, quando somente os parâmetros transitórios (modelo de gaiola simples) são conhecidos ou calculados, todos os parâmetros subtransitórios são feitos iguais aos parâmetros transitórios.

PLATAFORMA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (PSP-UFU)

3.1 Considerações iniciais

O *software* desenvolvido, batizado de Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia (PSP-UFU), proporciona ao usuário uma interface gráfica amigável para criação de redes elétricas de potência genéricas, capaz de realizar os seguintes estudos: **fluxo de carga, cálculo de curto-circuito e análise dinâmica**.

Foi escolhida a linguagem de programação C++ [32], pois além de permitir o desenvolvimento de aplicações multiplataforma, como é o caso do PSP-UFU, possui vários outros aspectos vantajosos.

Para o desenvolvimento da interface gráfica foi utilizado o *framework* (conjunto de bibliotecas com funcionalidades genéricas) wxWidgets [16][33], que disponibiliza ao desenvolvedor um grande número de classes e métodos para utilização e customização. O wxWidgets possui uma API (Interface de Programação de Aplicação, do inglês, *Application Programming Interface*) para criação de GUI idêntica para todas as plataformas suportadas, ou seja, o mesmo código escrito para a plataforma Windows, por exemplo, pode ser recompilado nas plataformas Linux e Mac OS.

A criação de uma rede elétrica por meio da GUI é realizada fazendo uso de várias ferramentas que permitem inserir, editar e excluir elementos elétricos, além daquelas que possibilitam a navegação no circuito. Também foram desenvolvidas ferramentas para armazenamento e recuperação dos projetos criados.

3.2 Linguagem de programação e principais bibliotecas utilizadas

Com o intuito de tornar o programa multiplataforma (o *software* pode ser executado em mais de uma plataforma) necessitou-se da escolha de uma linguagem de programação e bibliotecas gráficas adequadas para tal.

3.2.1 Linguagem de programação C++

O C++, escolhido como linguagem de programação, além de permitir o desenvolvimento de aplicações multiplataforma, possui [32]:

- Grande número de referências tanto em livros quanto *online*;
- Bibliotecas padrões gratuitas;
- Orientação a objetos, paradigma de programação utilizado no desenvolvimento do PSP-UFU;
- Abstração de dados;
- Programação genérica.

Na programação orientada a objetos, implementa-se um conjunto de classes que definem os objetos com características afins. O comportamento dos objetos é definido pelos métodos e as suas características pelos atributos. Nesse paradigma de programação também tem-se o conceito de herança, o que permite a uma classe herdar comportamentos (métodos) e características (atributos) de outra classe.

A orientação a objetos se mostrou uma ótima estratégia no desenvolvimento do PSP-UFU, uma vez que é facilitada a modelagem de elementos do mundo real em componentes de *software*. Por exemplo, existe uma classe “Gerador”, que possui um atributo “Potência ativa” modificada somente pelo método “Definir potência ativa” e também herda atributos e métodos comuns de outros componentes da rede elétrica por meio de uma classe-mãe chamada “Elementos elétricos”.

A abstração de dados e a programação genérica são ferramentas importantes do C++, que permite a utilização de um código genérico para, por exemplo, construir listas de objetos criados pelo programador.

O C++ continua evoluindo de forma a fornecer novas funcionalidades. A especificação atual da linguagem é conhecida informalmente como C++14 (lançada em dezembro de 2014) e publicada como ISO/IEC 14882:2014 [34].

3.2.2 Framework wxWidgets

wxWidgets é um conjunto de ferramentas para o desenvolvimento de aplicações para *desktop* e dispositivos portáteis com interface gráfica (GUI). Essas aplicações tipicamente são exibidas em janelas contendo controles padrões, possibilitando o desenho de imagens e gráficos que respondem à entrada do mouse, teclado e outras fontes [33].

Como foi dito anteriormente, o wxWidgets tem natureza multiplataforma, permitindo ao desenvolvedor publicar aplicações em vários sistemas operacionais escrevendo um único código. Isso traz um grande benefício, pois não é necessário reescrever o código para cada plataforma e o programador não carece da aprendizagem de diferentes APIs.

Outra característica do wxWidgets é que ele fornece aplicações com aparência nativa, ou seja, os elementos da interface gráfica, como abas, barras de rolagem, menus, etc. são iguais ao tema de cada sistema operacional. Isso é devido à utilização de *widgets* nativos sempre que possível durante o desenvolvimento do wxWidgets [33].

Finalmente é importante destacar que o wxWidgets é um projeto de código aberto e gratuito, permitindo que qualquer erro no código fonte seja corrigido e incorporado à sua distribuição pelos programadores que utilizam esse *framework*, fazendo assim, que o código fonte nunca fique obsoleto.

3.3 Arquitetura

Nessa seção é apresentada a arquitetura simplificada do PSP-UFGU. Serão destacadas as funcionalidades das principais classes criadas. Uma documentação completa, contendo a descrição de todas as classes, além de seus métodos e atributos foi criada com o auxílio da ferramenta Doxygen [35].

O Doxygen permite gerar a documentação diretamente nos arquivos fontes, onde as descrições são inseridas em formas de comentários. É possível exportar os arquivos na forma on-line, por meio de páginas HTML, e off-line como manual de referência, em LaTeX, RTF, PDF, ect..

O código fonte do programa foi dividido em módulos que cumprem papéis específicos relativos às simulações, interface gráfica (GUI) e ferramentas gerais, representados em um diagrama de classes na Figura 3.1.

Também foi empregada a biblioteca RapidXML [36] que é uma biblioteca gratuita e de código aberto com o objetivo de ser um rápido analisador XML (*eXtensible Markup Language*). Essa biblioteca é utilizada na gravação e recuperação dos projetos criados no disco, além de outras ferramentas gráficas como copiar e colar. O XML é uma linguagem de marcação que possui uma série de regras que codifica um documento em uma forma que possa ser interpretada tanto pelo computador quanto por humanos.

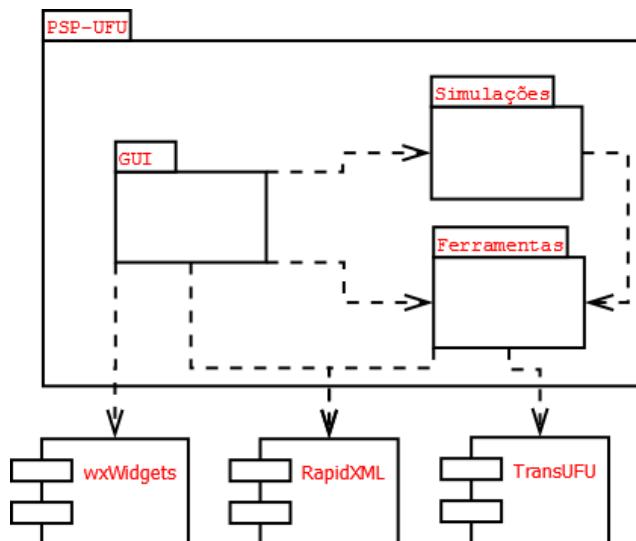


Figura 3.1 – Visualização em diagrama de classes dos módulos do *software* PSP-UFU.
Fonte: Autor.

3.3.1 Módulo de interface gráfica (GUI)

O módulo de interface gráfica lida com todos os elementos gráficos presentes na área de trabalho e as ações do usuário sobre eles, além dos formulário de edição de dados. Esse é o maior módulo do *software* e possui um grande número de classes, as quais as principais são destacadas na Figura 3.2.

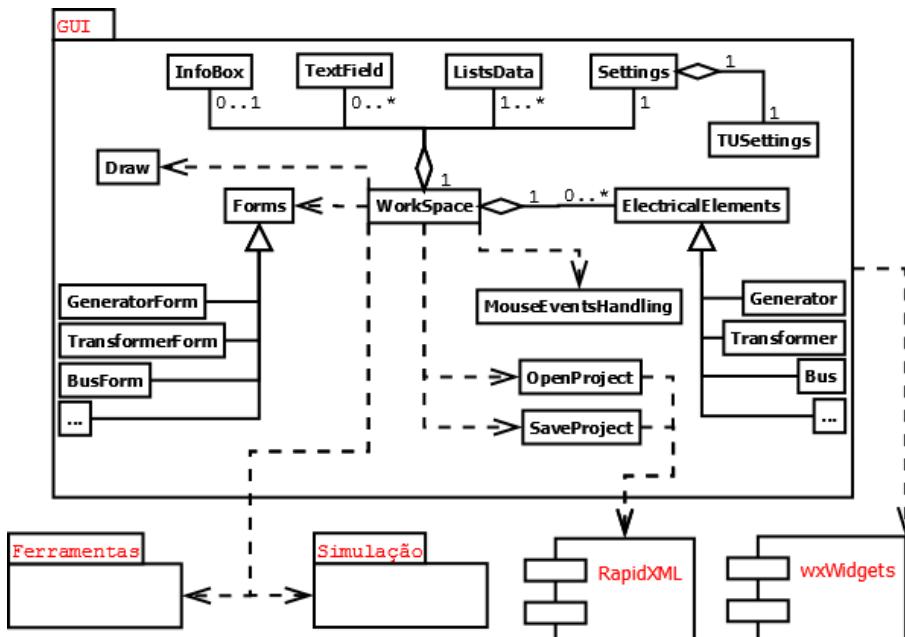


Figura 3.2 – Diagrama de classes do módulo de interface gráfica.
Fonte: Autor.

Praticamente todas as classes criadas utilizam as bibliotecas presentes no *framework* wxWidgets, pois essas classes estão ligadas à GUI.

A) WorkSpace

Essa classe representa a área de trabalho de programa e é nela que são editados os elementos elétricos. Ela recebe as ações do usuário com o mouse e teclado e realiza os procedimentos necessários para concretizá-la, como por exemplo, mover um componente ou abrir o formulário para editá-lo.

Classes que auxiliam o *WorkSpace* foram desenvolvidas, como a *MouseEventsHandling*, que possui os algoritmos de solução de ações do mouse, e a classe *Draw*, que desenha os elementos elétricos na área de trabalho.

O *WorkSpace* possui uma lista de elementos elétricos que pode ser editada de forma a inserir, excluir ou modificar um objeto presente nela. A cada operação do usuário essa lista é memorizada por meio da classe *ListsData*, podendo ser utilizada posteriormente por ferramentas como desfazer e refazer. O *WorkSpace* irá armazenar os dados da lista até um número máximo definido no código do programa, determinando assim a maior quantidade de ações que o usuário pode desfazer.

As configurações do projeto são armazenadas e aplicadas pelas classes *Settings* e *TUSettings* sendo essa última referente às opções do TransUFU. O *WorkSpace* possui somente um objeto dessas classes.

Outra função do *WorkSpace* é a interação com o restante do programa, pois os dados da rede elétrica estão armazenado nele e os outros módulos utilizam essa classe para extração das informações dos componentes do projeto criado.

B) ElectricalElements

Todos os componentes de um sistema elétrico de potência que foram desenvolvidos derivam dessa classe, os quais são: barramentos, linhas de transmissão, transformadores, geradores, compensadores síncronos, motores de indução, cargas, capacitores shunt e reatores shunt. Cada classe derivada possui métodos e atributos próprios, enquanto a classe mãe é genérica.

As classes dos componentes possuem atributos tanto gráficos quanto elétricos e são editados pelo *WorkSpace* e pelos formulários.

C) Forms

Forms é a classe mãe de todos os formulários de edição de dados. Os formulários são elementos gráficos que apresentam campos editáveis de cada componente da rede elétrica relativos à todos os estudos desenvolvidos. São neles que são inseridos e editados todos os parâmetros da rede. Também existem formulários de edição das configurações do projeto e do TransUFU.

D) OpenProject e SaveProject

Essas classes são responsáveis por gravar e abrir os projetos criados no disco. Ambas utilizam a biblioteca RapidXML para converter os dados para o padrão XML e vice-versa.

Quando solicitado a gravação de um projeto, o mesmo será salvo em um único arquivo, denominado *Projects.xml*, que possui todos os circuitos gravados anteriormente. Isso ajuda na organização dos projetos do usuário, uma vez que quando realizada a ação de abertura de arquivo, todos os projetos serão apresentados em uma lista com seu respectivo nome e data da última modificação.

Para compartilhar os projetos com outros usuários utiliza-se as ferramentas exportar e importar, as quais são também de responsabilidade das classes *OpenProject* e *SaveProject*. Com essas ferramentas é possível escolher o diretório de gravação ou abertura de uma única rede criada.

E) TextField e InfoBox

Essas classes são responsáveis por elementos gráficos que contêm informações a respeito dos resultados dos cálculos de fluxo de carga e curto-circuito.

O *WorkSpace* pode conter vários objetos da classe *TextField*, que são elementos permanentes e editáveis, podendo ser movidos, modificados e excluídos. Eles são utilizados para obter informações mais rapidamente ou destaca-los em relatórios.

Já o objeto da classe *InfoBox* na área de trabalho é único, sendo um elemento temporário e não editável. Essa é a maneira mais rápida de se obter os resultados dos cálculos.

3.3.2 Módulo de ferramentas

O módulo de ferramentas auxilia os demais módulos e possuem tanto classes relacionadas à interface gráfica quanto aos estudos implementados. O diagrama de classes simplificado desse módulo é apresentado na Figura 3.3.

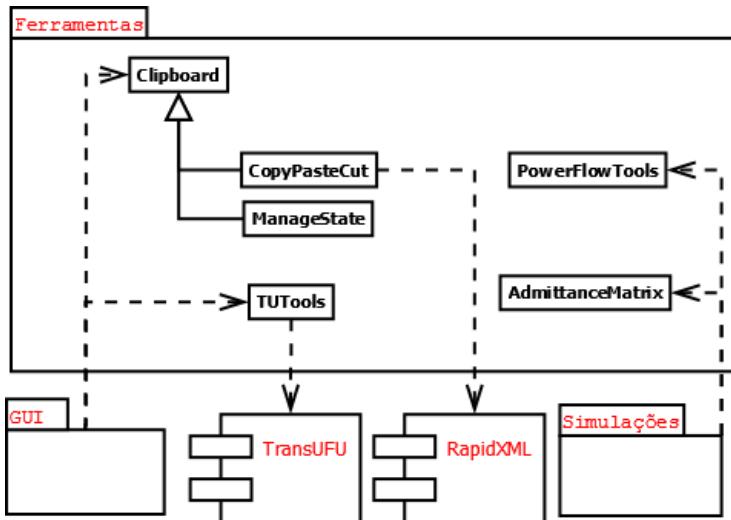


Figura 3.3 – Diagrama de classes do módulo ferramentas.

Fonte: Autor.

O principal motivo para a criação desse módulo foi a organização do código fonte e a criação de classes genéricas que possam ser utilizadas no desenvolvimento de novas ferramentas, principalmente àquelas referentes às simulações.

A) Clipboard

Essa classe é responsável pelo gerenciamento da área de transferência e das ferramentas desfazer e refazer. O *Clipboard* é uma classe mãe de duas outras classes: *CopyPasteCut* e *ManageState*.

A classe *CopyPasteCut*, como o próprio nome sugere, lida com as ferramentas copiar, colar e recortar presentes no programa. Ela utiliza a biblioteca RapidXML para enviar e analisar os dados na área de transferência que estão no formato XML, utilizando o mesmo padrão adotado para gravar projetos no disco.

Apesar de não estar diretamente ligado à área de transferência (*clipboard*), a classe *ManageState* utiliza alguns métodos genéricos herdados de sua classe mãe. Essa classe é responsável pelas ferramentas desfazer e refazer, ela utiliza os objetos da classe *ListsData* presentes no *WorkSpace* organizando-os assim que os comandos de desfazer e refazer são acionados.

B) TUTools

Todos os dados presentes nos objetos elétricos referentes ao TransUFU são utilizados por essa classe para criação dos “cartões” de entrada de dados do TransUFU. Além disso essa classe é responsável pela administração dos arquivos de entrada de dados, saída de dados e temporários.

Espera-se que essa classe seja útil no futuro na integração com programas que utilizem o mesmo padrão de entrada de dados, uma vez que foram desenvolvidos métodos genéricos para criação de “cartões” nos formatos FORTRAN 77.

C) PowerFlowTools e AdmittanceMatrix

Essas classes estão ligadas ao módulo de simulações e auxiliam nos cálculos de fluxo de carga e de faltas.

O *PowerFlowTools* possui basicamente dois métodos: o primeiro que calcula o fluxo de carga e as correntes em elementos de ramo por meio das tensões das barras obtidas após a convergência de um método numérico; e o segundo que preenche esses dados calculados de forma correta nos atributos dos componentes.

A classe *AdmittanceMatrix* constrói a matriz admitância de barras utilizando os dados presentes no *WorkSpace* e é aproveitada por ambos os estudos relacionados.

3.3.3 Módulo de simulações

Apesar de ser o menor módulo em número de classes, o módulo de simulações não possui poucas linhas de código, pois todos os cálculos envolvendo fluxo de carga e curto-circuito estão presentes nele, como é apresentado na Figura 3.4.

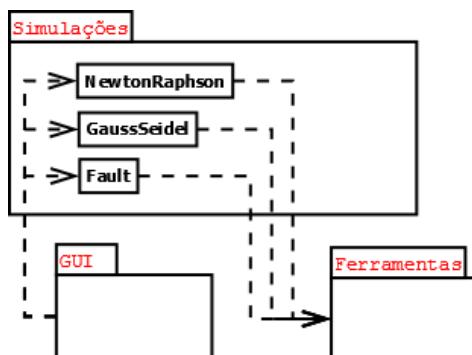


Figura 3.4 – Diagrama de classes do módulo de simulações.
Fonte: Autor.

Esse módulo foi criado para que todos as classes que envolvessem a simulação da rede elétrica de potência sejam organizadas em um único local.

As classes *NewtonRaphson* e *GaussSeidel* são os métodos numéricos de solução do fluxo de carga e a classe *Fault* realiza os cálculos de todos os tipos de curto-circuito.

3.4 Interface gráfica

O PSP-UFU possui uma tela principal composta de um menu *Ribbon* (barra de ferramentas mais larga e com ícones maiores), uma área de trabalho e uma barra de *status*.

O menu *Ribbon* é composto de três submenus: “Arquivo”, “Ferramentas” e “TransUFU”. Em “Arquivo” estão as ferramentas gerais do programa, as quais permitem ao usuário criar e salvar novos projetos, além daquelas que possibilitam carregar os projetos já existentes. Esse submenu também possui opções gerais dos projetos e acesso à informações do programa. Em “Ferramentas” estão presentes os itens específicos, os quais estão relacionados à criação e manipulação da rede elétrica de potência, além dos cálculos realizados pelo *software* e geração de relatórios de saída de dados. Finalmente, o submenu “TransUFU” possui os elementos referentes à interação com esse programa: opções gerais, nas quais seus dados são inseridos em formulários, ferramenta de execução do TransUFU, acesso aos gráficos gerados e aos arquivos de entrada/saída de dados.

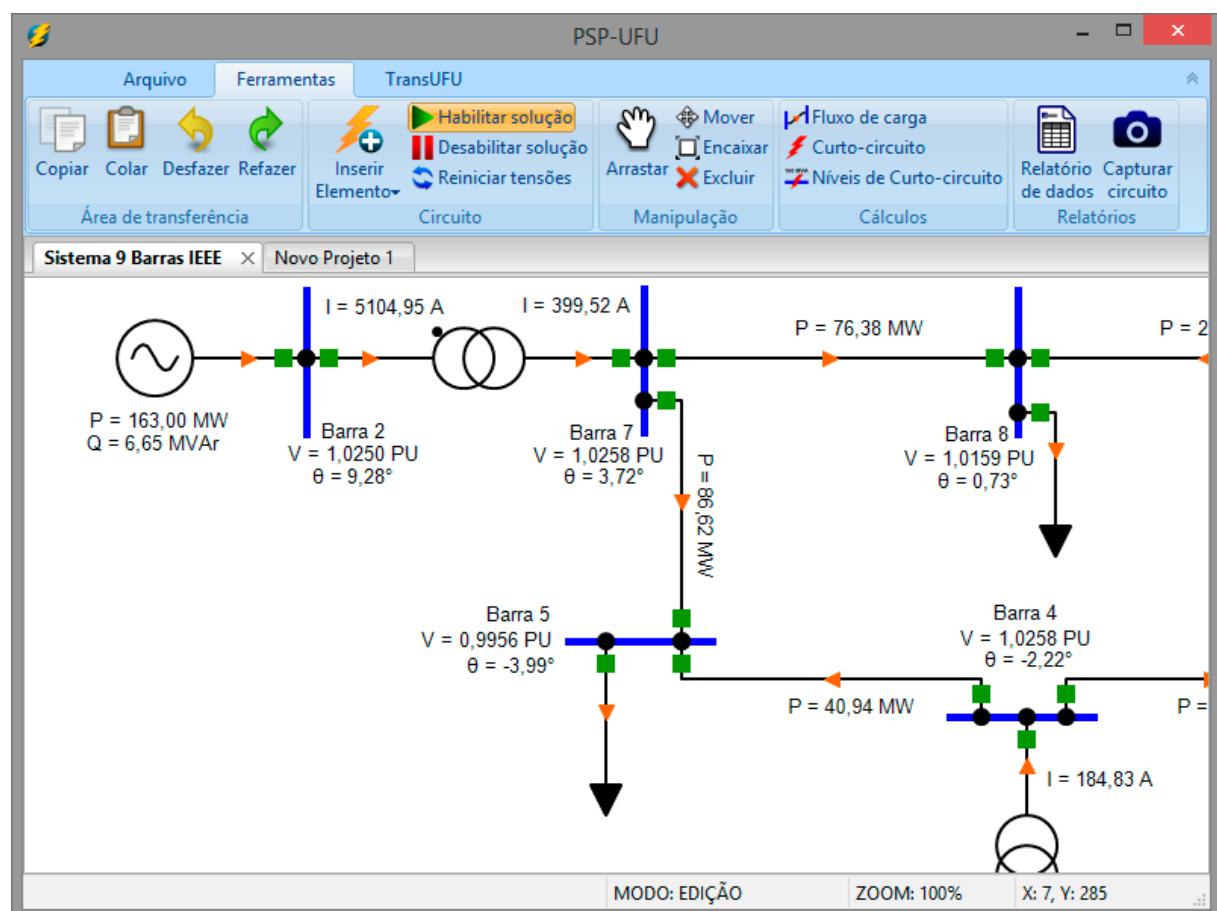


Figura 3.5 – Tela principal do programa PSP-UFU na plataforma Windows.
Fonte: Autor.

Na área de trabalho estão presentes os projetos em execução, os quais são divididos por abas identificadas pelo nome do projeto (caso já esteja gravado no disco). É nessa área que são inseridos e excluídos os elementos elétricos, cujas ferramentas são acessadas por meio do menu *Ribbon* e, um menu de contexto exibido ao clicar com o botão direito sobre ela. A edição gráfica dos elementos, como posição e conexão, são realizadas por meio da ação *drag-and-drop* (arrastar e largar) com o mouse. A edição dos dados elétricos é feita por meio de formulários de dados acessados clicando duas vezes sobre os elementos.

A barra de status é responsável por informações interessantes sobre as circunstâncias atuais do programa: modo de operação do mouse (editar, mover, arrastar), *zoom* aplicado e posição do mouse na área de trabalho, além de dados sobre as ações dos usuários, como: inserção de elementos, informação sobre copiar e colar, etc..

3.4.1 Criação de uma rede elétrica de potência

Como foi descrito anteriormente, a criação de um novo projeto é realizada clicando no item “Novo projeto” no submenu “Arquivo”. Essa ação cria um sistema em branco na área de trabalho, local onde é possível inserir os elementos elétricos. Um elemento elétrico pode ser inserido por meio do submenu “Ferramentas” ou pelo menu de contexto exibido ao clicar com o botão direito do mouse na área de trabalho. Caso esteja sendo adicionado um barramento, o usuário deve apenas clicar na posição desejada, no caso dos outros componentes será solicitado que o usuário clique em uma ou duas barras. Sempre que são inseridos novos elementos, um formulário de dados é exibido e pode-se editar os dados elétricos e acessar formulários adicionais, como dados de curto-círcuito e do TransUFU.

Todos os elementos elétricos disponíveis são apontados na Figura 3.6.

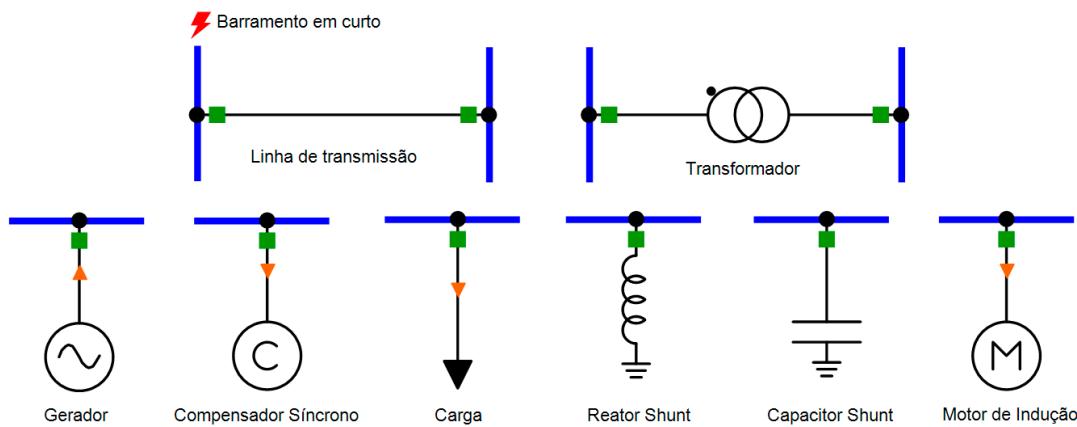


Figura 3.6 – Elementos elétricos do PSP-UFU.
Fonte: Autor.

Os dados relativos ao TransUFU são idênticos àqueles descritos em seu manual [17], porém são editados em formulários similares ao de fluxo de carga e de falta (que serão descritos a seguir) em contraste aos “cartões”, que eram utilizados como entrada de dados.

A) Barramentos

Normalmente esse é o primeiro elemento inserido no projeto, pois os outros componentes são conectados nele.

O formulário de dados dos barramentos é apresentado na Figura 3.7:

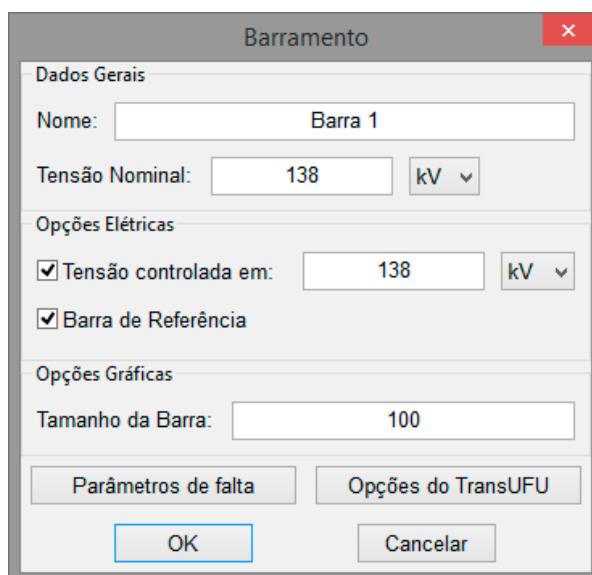


Figura 3.7 – Formulário de entrada de dados dos barramentos.
Fonte: Autor.

Em que:

- **Nome:** Utilizado na identificação do elemento. Esse campo está presente em todos os componentes do PSP-UFU.
- **Tensão Nominal:** Utilizado para cálculo da impedância base de alguns elementos conectados, além do cálculo da relação de transformação dos transformadores conectados entre barras. Sua unidade pode ser selecionada, sendo expressa em V ou em kV;
- **Tensão controlada em:** Caracteriza o barramento como barra de tensão controlada (barra PV). O valor poderá ser inserido em p.u. ou em volts (ou kV caso a tensão nominal esteja nesta unidade). Essa opção é somente habilitada caso esteja conectado um gerador ou um compensador síncrono;

- **Barra de Referência:** Caracteriza o barramento como barra de referência (de oscilação). Essa opção também é somente habilitada caso esteja conectado um gerador ou um compensador síncrono.

Os parâmetros de falta da barra são editados no formulário apresentado na Figura 3.8:

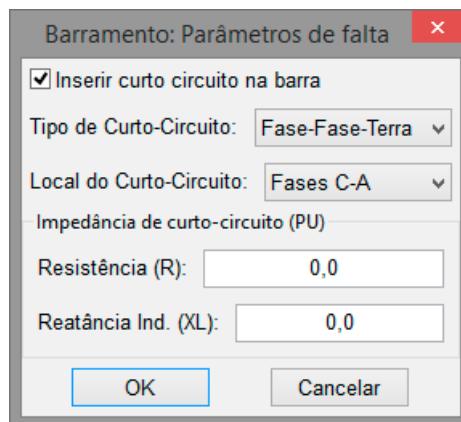


Figura 3.8 – Formulário dos parâmetros de falta dos barramentos.
Fonte: Autor.

Onde:

- **Inserir curto-círcito na barra:** Indica se existe um curto-círcito na barra editada. Caso exista uma falta em outra barra do sistema o programa informará ao usuário se ele deseja trocar o local do curto;
- **Tipo de curto-círcito:** Seleciona o tipo de curto-círcito na barra. São eles: Fase-Terra, Fase-Fase, Fase-Fase-Terra e Trifásico;
- **Local do curto-círcito:** Seleciona em qual fase (ou fases) irá ocorrer o curto-círcito;
- **Resistência e Reatância Indutiva:** Impedância de curto-círcito, em p.u..

B) Linhas de transmissão

A linha de transmissão deve ser adicionada entre dois barramentos, os quais necessitam conter mesmas tensões nominais, caso contrário o programa retornará uma mensagem de erro. O formulário de entrada de dados desse componente são evidenciados na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Formulário de entrada de dados das linhas de transmissão.

Fonte: Autor.

Onde:

- **Comprimento:** Utilizado para o cálculo dos parâmetros da linha por quilometro (não é necessário especificar um valor caso os dados de entrada estejam em p.u. ou em Ω);
- **Resistência, Reatância Indutiva e Susceptânci Capacitativa:** São parâmetros necessários para a modelagem da linha de transmissão em seu equivalente π . Esses parâmetros podem ser inseridos em p.u., Ω (S para a susceptânci capacitativa) ou Ω/km (S/km para a susceptânci capacitativa).

Os parâmetros de falta das linhas de transmissão presentes no seu respectivo formulário são similares aos dados do circuito equivalente, porém são solicitadas as constantes de sequênci negativa e zero.

C) Transformadores

Assim como nas linhas de transmissão, o transformador deve ser inserido entre barras. A primeira barra selecionada será o lado primário, o qual é indicado por um círculo, como pode ser observado na Figura 3.6. Ao adicioná-lo, o formulário de dados representado pela Figura 3.10 será exibido.

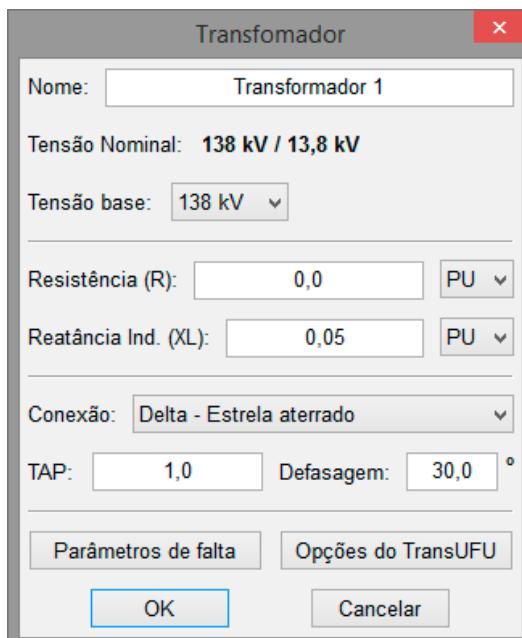


Figura 3.10 – Formulário de dados dos transformadores.
Fonte: Autor.

Onde:

- **Tensão base:** Utilizado para o cálculo da impedância base do transformador (esse dado é relevante caso sejam inseridos dados em Ω);
- **Resistência e Reatância Indutiva:** São parâmetros necessários para a modelagem do transformador. Esses parâmetros podem ser inseridos em p.u. ou Ω .
- **Conexão:** Define o tipo de conexão dos enrolamentos do transformador (esse dado é relevante somente para o cálculo de curto-circuito).
- **TAP:** Altera a relação de transformação nominal das espiras do transformador.
- **Defasagem:** Defasagem da tensão do secundário em relação ao primário.

Da mesma forma que nas linhas de transmissão, o formulário de parâmetros de falta do transformador solicita dados de sequência negativa e zero do circuito equivalente.

D) Geradores e Compensadores síncronos

O formulário de edição de dados dos geradores e dos compensadores síncronos são mostrados na Figura 3.11:

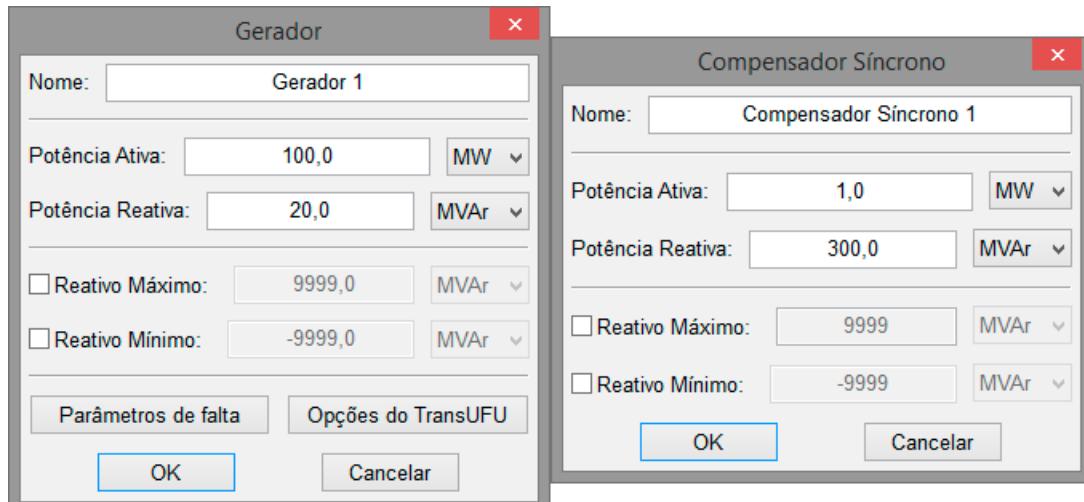


Figura 3.11 – Formulário de dados dos geradores e dos compensadores síncronos.
Fonte: Autor.

Onde:

- **Potência Ativa:** Representa a potência ativa do gerador (caso o gerador esteja conectado a uma barra de referência esse dado é ignorado);
- **Potência Reativa:** Representa a potência reativa do gerador (caso o gerador esteja conectado a uma barra PV ou de referência esse dado é ignorado);
- **Reativo Máximo:** Limite superior de potência reativa do gerador conectado a um barramento de tensão controlada (barra PV);
- **Reativo Mínimo:** Limite inferior de potência reativa do gerador conectado a um barramento de tensão controlada (barra PV).

Os dados podem ser inseridos em p.u., W/VAr, kW/kVAr ou MW/MVAr.

E) Motores de Indução

Os motores de indução são editados pelo formulário apresentado na Figura 3.12:



Figura 3.12 – Formulário de entrada de dados do motor de indução.
Fonte: Autor.

Onde:

- **Potência Ativa:** Representa a potência ativa do motor e pode ser inserida em p.u., W, kW ou MW;
- **Potência Reativa:** Representa a potência reativa do motor e pode ser inserida em p.u., Var, kVAr ou MVAr.

F) Cargas

O formulário de edição de dados da carga é mostrada na Figura 3.13:

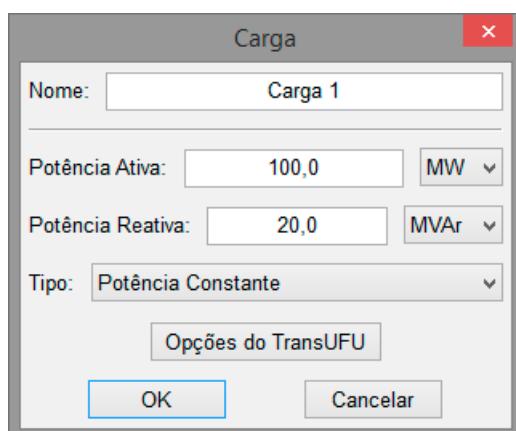


Figura 3.13 – Formulário de entrada de dados das cargas.
Fonte: Autor.

Onde:

- **Potência Ativa:** Representa a potência ativa da carga e pode ser inserida em p.u., W, kW ou MW;
- **Potência Reativa:** representa a potência reativa da carga e pode ser inserida em p.u., VAr, kVAr ou MVAr;
- **Tipo:** seleciona o tipo de carga, podendo ser potência constante ou impedância constante.

Uma carga do tipo potência constante, como o próprio nome sugere, permanece com o valor de sua potência sem alteração independentemente da magnitude da tensão do barramento em que está conectada. Já para carga de impedância constante calcula-se a impedância shunt necessária para solicitar da rede os valores estipulados nos campos de potência ativa e reativa em condições nominais. A partir disso a impedância calculada permanece com o mesmo valor e será considerada na matriz admitância durante os cálculos.

G) Capacitores e Reatores Shunt

O formulário de edição de dados dos geradores e dos compensadores síncronos são mostrados na Figura 3.14:

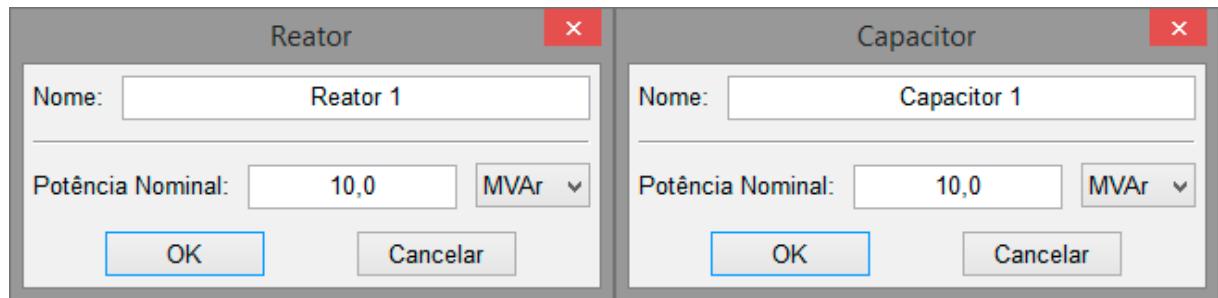


Figura 3.14 – Formulário de entrada de dados dos capacitores e reatores shunt.

Fonte: Autor.

Onde:

- **Potência Nominal:** Potência reativa obtida na tensão nominal e pode ser inserido em p.u., VAr, kVAr ou MVAr.

Elementos shunt são modelados da mesma forma que as cargas de impedância constante por meio do cálculo de sua impedância e adição na matriz admitância.

3.4.2 Manipulação e navegação

Todos os objetos criados contêm vários atributos gráficos, como: posição, orientação, cor, tamanho, etc.. Para modificá-los foram inseridas algumas ferramentas intuitivas e de fácil utilização, as quais são: selecionar, mover, girar, arrastar, zoom, encaixar, desfazer, refazer, copiar, colar e deletar. Tais ferramentas permitem a personalização, navegação e auxiliam a criação de redes elétricas de potência na plataforma desenvolvida.

A seleção de um único objeto é realizada clicando com o botão esquerdo do mouse sobre o elemento, que será identificado pela cor vermelha. Para a seleção de vários objetos simultaneamente é necessário clicar com o botão esquerdo do mouse em um local vazio da tela e arrastá-lo, criando assim um retângulo que irá acompanhar o ponteiro do mouse enquanto o botão esquerdo estiver pressionado. Ao soltá-lo todos os objetos que intercederem o retângulo serão selecionados. Para desmarcar todos os objetos basta apertar a tecla Escape do teclado ou clicar em uma área sem objetos.

Um elemento poderá ser movido para qualquer local por meio da ação *drag-and-drop* ou pela ferramenta mover. Ao habilitar o “modo mover”, uma mensagem será exibida na barra

de status solicitando clicar e arrastar, movendo todos os componentes selecionados. Para desabilitar esse modo basta pressionar a tecla Escape do teclado.

Alguns objetos poderão ser rotacionados através da ferramenta girar, acessado pela tecla de atalho “R” (essa opção irá girar todos os objetos selecionados). Ao utilizar essa ferramenta os objetos irão girar 90º a partir do seu ponto de origem com exceção dos campos de texto que giram 15º. Para atingir a angulação pretendida basta repetir o processo de rotação.

Três ferramentas muito úteis na navegação do circuito, principalmente em grandes redes, são: arrastar, zoom e encaixar.

A ferramenta arrastar possibilita mover todo o circuito preservando as posições relativas dos elementos. Esta ferramenta pode ser acessada pelo submenu “Ferramentas” ou pela tecla de atalho “P”, ativando assim o “modo arrastar”. Ao ativá-lo todo o circuito será movido clicando e arrastando na direção desejada. Para sair do “modo arrastar” basta pressionar a tecla Escape do teclado.

O zoom será aplicado ao clicar nas opções *Zoom In* ou *Zoom Out* no menu exibido ao clicar com o botão direito ou utilizar o scroll do mouse para mais ou menos zoom. A ferramenta zoom irá aproximar ou distanciar o circuito a partir da posição do ponteiro do mouse na tela para encontrar objetos ou destaca-los.

A ferramenta encaixar irá mover o circuito e aplicar o zoom necessário para que todos os componentes da rede sejam exibidos na tela. Esta ferramenta pode ser acessada através do submenu “Ferramentas”, pelo menu exibido ao clicar com o botão direito ou pela combinação de teclas Shift + F.

As ações não desejadas e realizadas pelo usuário no programa, poderão ser desfeitas através da ferramenta desfazer. Ao desfazer, o estado anterior será recuperado, porém isso não poderá ser aplicado logo após abrir um projeto, já que os estados anteriores não serão gravados na memória permanente. Caso o usuário deseje refazer o estado desfeito basta utilizar a ferramenta refazer.

Duas ferramentas importantes durante o processo de criação da rede elétrica de potência no *software* são copiar e colar. Qualquer circuito criado no PSP-UFU, poderá ser duplicado completamente ou parcialmente no mesmo projeto ou em múltiplos através dessas ferramentas. Para copiar basta selecionar os elementos que se deseja duplicar e acessar a ferramenta no submenu “Ferramentas” ou pressionando a combinação das teclas Ctrl + C, então os dados do circuito serão copiados para a área de transferência. Ao copiar um circuito ele poderá ser colado utilizando o mesmo submenu ou pressionando a combinação das teclas Ctrl + V.

Qualquer objeto poderá ser excluído do projeto através da ferramenta deletar ou pela tecla de atalho Delete.

3.4.3 Realização dos cálculos

Após a criação da rede elétrica de potência e a parametrização de seus componentes, é possível realizar os estudos implementados. Ressalta-se que antes da realização dos cálculos é importante a edição das opções genéricas para os cálculos de fluxo de carga e curto-círcito, as quais podem ser encontradas no submenu “Arquivo” no item “Opções de projeto”, como é mostrado na Figura 3.15:

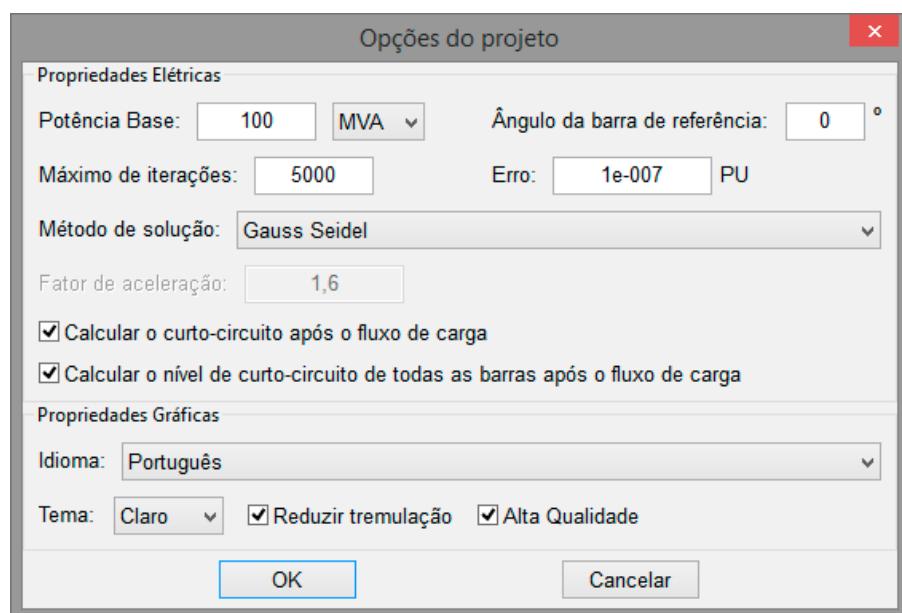


Figura 3.15 – Opções de projeto.

Fonte: Autor.

Nesse formulário são editados: a potência base de todo o sistema, que irão converter os dados reais em p.u., além do ângulo da barra de referência. Em relação ao método numérico, pode ser selecionado os métodos de Gauss-Seidel (com e sem fator de aceleração) e Newton-Raphson, além da sua tolerância (erro) para convergência e o número máximo de iterações.

É aconselhável realizar o cálculo de curto-círcito a partir das tensões anteriores à falta calculadas no fluxo de carga. Para tal foi criada uma caixa de seleção nas opções do projeto que permite a realização do cálculo de curto-círcito logo após o fluxo de carga, simplificando as ações do usuário. Também é possível calcular o nível de curto-círcito de todas as barras do sistema caso essa opção esteja selecionada, uma vez que é aplicado o algoritmo de solução de faltas trifásicas já implementadas no programa.

Com as opções gerais de falta e curto-círcuito definidas, pode-se realizar os cálculos individualmente por meio de seus respectivos itens em “Ferramentas” ou ativar a opção “Habilitar solução” no mesmo submenu. Essa última opção realiza todos os estudos a cada modificação do circuito (edição dos parâmetros ou pelo chaveamento dos elementos elétricos). O chaveamento é realizado clicando nos disjuntores próximos aos componentes, representados por quadrados verdes (fechados) ou vermelhos (abertos).

O PSP-UFU também gera um relatório com todos os dados calculados acessado no item “Relatório de dados”. O formulário contém todos os dados em forma de tabelas, possibilitando a transferência para outros programas de edição desse formato.

Diferentemente dos cálculos supracitados, as opções gerais do estudo dinâmico estão no submenu “TransUFU”, no item “Opções”. Nesse formulário estão presentes todos os dados referentes aos “cartões” de “Seleção de curvas de saída”, “Parâmetros do sistema”, “Composição de carga” e “Parâmetros de chaveamento”.

Assim que realizadas a parametrização do estudo dinâmico, o usuário deve selecionar a ferramenta “Executar” para que sejam realizados os cálculos e, ao fim deles, será questionado se o usuário deseja abrir todos os gráficos. Os outros itens do submenu “TransUFU” são de acessar as curvas de saída, os arquivos de entrada de dados gerados automaticamente e os arquivos de saída de dados.

3.4.4 Outros elementos gráficos

Durante o desenvolvimento do programa notou-se a necessidade de criação de algumas opções gráficas para melhorar a visualização da rede elétrica e desempenho do *software*. Na seção “Propriedades gráficas” do formulário apresentado na Figura 3.15 pode-se acessar algumas opções gráficas como a possibilidade de mudar o “tema” de claro para escuro ou vice versa, tornando o fundo da tela de trabalho escura e os objetos claros para um melhor conforto visual. Também é possível marcar e desmarcar as opções “Reducir Tremulação” e “Alta Qualidade”, que após serem desmarcadas poderão aumentar o desempenho do programa ao utilizar as ferramentas gráficas (como mover, arrastar, etc.), porém irá reduzir a qualidade da imagem exibida. A opção de redução de tremulação é imprescindível para edição e navegação de grandes circuitos, visto que várias ferramentas serão seriamente afetadas (como as ferramentas de mover, zoom e arrastar) pelo efeito de “piscar” a tela. Nessa mesma seção de opções gráficas é possível alterar o idioma do programa para inglês.

É possível, também, exibir resultados em forma de texto, com o intuito de se obter uma rápida visualização dos dados ou destaca-los em relatórios. Para isso desenvolveu-se os campos de texto, que mostram os dados dos elementos desejados permanentemente até que sejam excluídos da área de trabalho. Esses itens são modificados da mesma forma que os elementos elétricos, portanto podem ser movidos, rotacionados, excluídos, ter seus dados alterados, etc..

Uma interessante ferramenta desenvolvida são os resultados instantâneos apresentados na área de trabalho ao permanecer com o ponteiro do mouse sobre um elemento durante alguns segundos. Com isso será exibido uma caixa de informação destacando os principais resultados do componente, como é exemplificado na Figura 3.16.

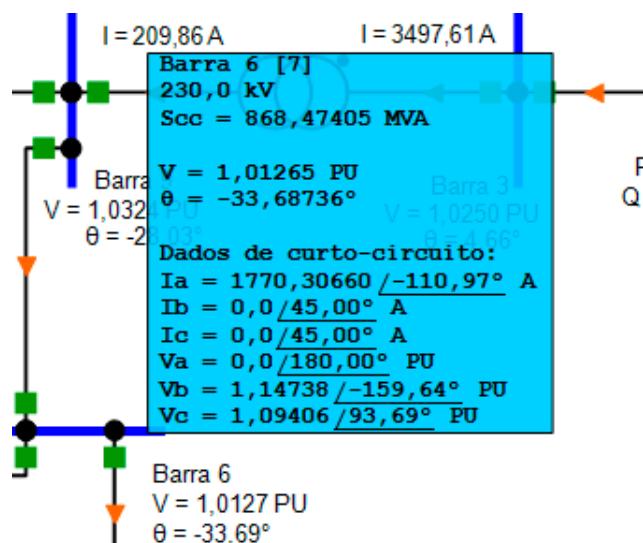


Figura 3.16 – Caixa de informação exibido no PSP-UFU.
Fonte: Autor.

SIMULAÇÕES E ANÁLISES

4.1 Considerações iniciais

Com o intuito de validar as ferramentas de cálculo criadas, foram realizadas simulações de alguns sistemas testes no PSP-UFU e os resultados comparados com os programas ANAREDE [37], para os casos de fluxo de carga, e ANAFAS [38], para curto-círcuito. Para a análise dinâmica são apresentados seus resultados sem uma análise comparativa, pois a solução para esse tipo de estudo é obtida por meio do TransUFU que é um *software* já consolidado [39].

O ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) é o programa computacional mais utilizado no Brasil na área de Sistemas Elétricos de Potência [40]. É um software desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e consiste na união de uma série de aplicações com várias funções e dentre elas está presente o fluxo de carga [40][41]. Na última versão do programa é possível construir a rede elétrica de potência por meio de uma interface gráfica.

Assim como o ANAREDE, o ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) foi desenvolvido pelo CEPEL e tem como função a análise de faltas em sistemas elétricos de qualquer porte, permitindo a modelagem fiel do sistema e a simulação de diversos tipos de defeito, dentre eles o curto-círcuito [42].

Para a análise das ferramentas de fluxo de carga e curto-círcuito foram realizadas simulações nos sistemas teste do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) de 14 e 118 barras [43]. No sistema de 14 barras serão realizados estudos mais detalhados, inclusive a análise dinâmica, enquanto no sistema de 118 barras são apresentadas análises mais simplificadas com a intenção de atestar a eficácia do PSP-UFU mesmo em redes com números maiores de barras.

4.2 Sistemas teste e dados gerais

Todos os dados referentes ao estudo de fluxo de carga estão presentes em [43]. Para as constantes das máquinas síncronas e compensadores síncronos utilizou-se a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Constantes típicas de máquinas síncronas trifásicas.
Fonte: KIMBARK E. W. [30].

	Turbo-Geradores			Geradores Hidráulicos			Compensadores Síncronos		
	Min.	Médio	Máx.	Min.	Médio	Máx.	Min.	Médio	Máx.
Reatâncias (p.u.)									
x_d	0,95	1,10	1,45	0,60	1,15	1,45	1,50	1,80	2,20
x_q	0,92	1,08	1,42	0,40	0,75	1,00	0,95	1,15	1,40
x'_d	0,12	0,23	0,28	0,20	0,37	0,50	0,30	0,40	0,60
x'_q	0,12	0,23	0,28	0,40	0,75	1,00	0,95	1,15	1,40
x''_d	0,07	0,12	0,17	0,13	0,24	0,35	0,18	0,30	0,43
x''_q	0,10	0,15	0,20	0,23	0,34	0,45	0,23	0,30	0,43
x_p	0,07	0,14	0,21	0,17	0,32	0,40	0,23	0,34	0,45
x_2	0,07	0,12	0,17	0,13	0,24	0,35	0,17	0,24	0,37
x_0	0,01		0,10	0,02		0,21	0,03		0,15
Resistências (p.u.)									
r_a	0,0015			0,005	0,003		0,20	0,002	0,015
r_2	0,025			0,045	0,012		0,20	0,025	0,07
Constantes de tempo (s)									
T'_{d0}	2,8	5,6	9,2	1,5	5,6	9,5	6,0	9,0	11,5
T'_d	0,4	1,1	1,8	0,5	1,8	3,3	1,2	2,0	2,8
$T''_d = T''_q$	0,02	0,035	0,05	0,01	0,035	0,05	0,02	0,035	0,05
T_a	0,04	0,16	0,35	0,03	0,15	0,25	0,1	0,17	0,3

Os dados de barras e ramos do sistema de 14 barras são apresentados nas tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2 – Dados de barras do sistema teste de 14 barras.
Fonte: CHRISTIE, R. D. [43].

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	B shunt
Barra 1	Referência	1,060	0,0	0,0	-	-	0,00
Barra 2	PV	1,045	21,7	12,7	40,0	-	0,00
Barra 3	PV	1,010	94,2	19,0	0,0	-	0,00
Barra 4	PQ	-	47,8	-3,9	0,0	0,0	0,00
Barra 5	PQ	-	7,6	1,6	0,0	0,0	0,00
Barra 6	PV	1,070	11,2	7,5	0,0	-	0,00
Barra 7	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 8	PV	1,090	0,0	0,0	0,0	-	0,00
Barra 9	PQ	-	29,5	16,6	0,0	0,0	0,19
Barra 10	PQ	-	9,0	5,8	0,0	0,0	0,00
Barra 11	PQ	-	3,5	1,8	0,0	0,0	0,00
Barra 12	PQ	-	6,1	1,6	0,0	0,0	0,00
Barra 13	PQ	-	13,5	5,8	0,0	0,0	0,00
Barra 14	PQ	-	14,9	5,0	0,0	0,0	0,00

A simulação de curto-círcuito no PSP-UFU e no ANAFAS requer o uso das impedâncias de sequência do sistema, portanto, devem-se adequar os dados fornecidos.

As impedâncias de sequência negativa da rede de transmissão, de cargas estáticas e geradores são idênticas às impedâncias de sequência positiva. Nas linhas de transmissão, as correntes de sequência zero estão em fase, percorrendo pelos cabos e retornando no neutro aterrado. Como resultado, as impedâncias de sequência zero das linhas são diferentes das demais sequências, geralmente maiores [19]. Para a análise desse caso utilizou-se a seguinte aproximação: $Z_0 = 2,5Z_1$.

Tabela 4.3 – Dados de ramos do sistema teste de 14 barras.
Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D. [43].

De	Para	R (p.u.)	R₀ (p.u.)	X_L (p.u.)	X_{L0} (p.u.)	B = B₀ (p.u.)	TAP
Barra 1	Barra 2	0,01938	0,04845	0,05917	0,14793	0,05280	-
Barra 1	Barra 5	0,05403	0,13508	0,22304	0,55760	0,04920	-
Barra 2	Barra 3	0,04699	0,11748	0,19797	0,49493	0,04380	-
Barra 2	Barra 4	0,05811	0,14528	0,17632	0,44080	0,03400	-
Barra 2	Barra 5	0,05695	0,14238	0,17388	0,43470	0,03460	-
Barra 3	Barra 4	0,06701	0,16753	0,17103	0,42758	0,01280	-
Barra 4	Barra 5	0,01335	0,03338	0,04211	0,10528	0,00000	-
Barra 4	Barra 7	0,00000	0,00000	0,20912	0,52280	0,00000	0,978
Barra 4	Barra 9	0,00000	0,00000	0,55618	1,39045	0,00000	0,969
Barra 5	Barra 6	0,00000	0,00000	0,25202	0,63005	0,00000	0,932
Barra 6	Barra 11	0,09498	0,23745	0,19890	0,49725	0,00000	-
Barra 6	Barra 12	0,12291	0,30728	0,25581	0,63953	0,00000	-
Barra 6	Barra 13	0,06615	0,16538	0,13027	0,32568	0,00000	-
Barra 7	Barra 8	0,00000	0,00000	0,17615	0,44038	0,00000	-
Barra 7	Barra 9	0,00000	0,00000	0,11001	0,27503	0,00000	-
Barra 9	Barra 10	0,03181	0,07953	0,08450	0,21125	0,00000	-
Barra 9	Barra 14	0,12711	0,31778	0,27038	0,67595	0,00000	-
Barra 10	Barra 11	0,08205	0,20513	0,19207	0,48018	0,00000	-
Barra 12	Barra 13	0,22092	0,55230	0,19988	0,49970	0,00000	-
Barra 13	Barra 14	0,17093	0,42733	0,34802	0,87005	0,00000	-

As constantes referentes ao estudo dinâmico, baseadas na Tabela 4.1, são apresentados na Tabela 4.4, em que todos os dados estão em p.u. na base de 100 MVA.

Tabela 4.4 – Dados dos geradores do sistema teste de 14 barras.
Fonte: Adaptado de KIMBARK E. W. [30].

Nome	Barra	x_d	x_q	x'_d	x'_q	$x''_d = x_1$	x'_q
Gerador 1	Barra 1	0,4721	0,4635	0,0987	0,0987	0,0515	0,0644
Gerador 2	Barra 2	1,8871	1,8528	0,3946	0,3946	0,2059	0,2573
Comp. Síncrono 1	Barra 3	7,6923	4,9145	1,7094	4,9145	1,2821	1,2821
Comp. Síncrono 2	Barra 6	14,7541	9,4262	3,2787	9,4262	2,4590	2,4590
Comp. Síncrono 3	Barra 8	10,3448	6,6092	2,2989	6,6092	1,7241	1,7241
Nome	Barra	x_p	x_2	x_0	$r_a = r_1$	T'_{d0}	$T''_{d0} = T''_{q0}$
Gerador 1	Barra 1	0,0601	0,0515	0,0236	0,0014	2,4033	0,0150
Gerador 2	Barra 2	0,2402	0,2059	0,0944	0,0056	9,6071	0,0600
Comp. Síncrono 1	Barra 3	1,4530	1,2821	0,1175	0,0363	38,4615	0,1496
Comp. Síncrono 2	Barra 6	2,7869	2,4590	0,2254	0,0697	73,7705	0,2869
Comp. Síncrono 3	Barra 8	1,9540	1,7241	0,1580	0,0489	51,7241	0,2011

Os dados do sistema teste de 118 estão presentes no Apêndice B.

4.3 Fluxo de carga

Para o estudo de fluxo de carga foram construídos os sistemas de 14 e 118 barras no PSP-UFU e no ANAREDE.

4.3.1 Sistema teste de 14 barras

A Figura 4.1 mostra a rede criada no PSP-UFU.

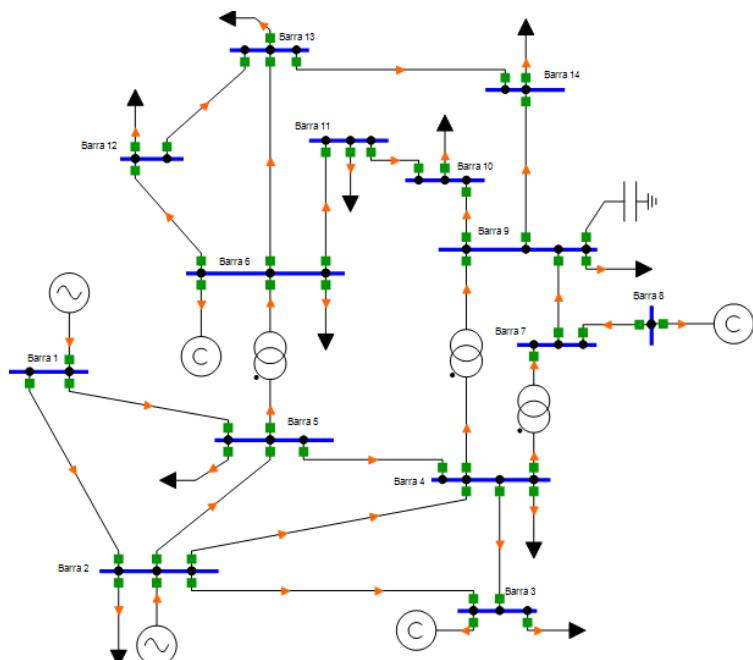


Figura 4.1 – Sistema teste de 14 barras no PSP-UFU.

Fonte: Autor.

Os resultados referentes aos dados de barras calculados pelo PSP-UFU são mostrados na Tabela 4.5, e a utilização dos métodos numéricos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson levaram aos mesmos valores. A mesma solução obtida pela simulação no ANAREDE é apresentada na Tabela 4.6 e comparada por meio da Tabela 4.7.

Tabela 4.5 – Resultados de barras do cálculo de fluxo de carga realizado pelo PSP-UFU.

Fonte: Autor.

Nome	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração ativa (MW)	Geração reativa (MVAr)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (MVAr)
Barra 1	1,060000	0,00000	232,39226	-16,54917	0,00000	0,00000
Barra 2	1,045000	-4,98257	40,00000	43,55680	21,70000	12,70000
Barra 3	1,010000	-12,72506	0,00000	25,07527	94,20000	19,00000
Barra 4	1,017671	-10,31286	0,00000	0,00000	47,80000	-3,90000
Barra 5	1,019514	-8,77381	0,00000	0,00000	7,60000	1,60000
Barra 6	1,070000	-14,22088	0,00000	12,73091	11,20000	7,50000
Barra 7	1,061520	-13,35956	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Barra 8	1,090000	-13,35956	0,00000	17,62343	0,00000	0,00000
Barra 9	1,055932	-14,93845	0,00000	0,00000	29,50000	16,60000
Barra 10	1,050985	-15,09721	0,00000	0,00000	9,00000	5,80000
Barra 11	1,056907	-14,79055	0,00000	0,00000	3,50000	1,80000
Barra 12	1,055189	-15,07551	0,00000	0,00000	6,10000	1,60000
Barra 13	1,050382	-15,15620	0,00000	0,00000	13,50000	5,80000
Barra 14	1,035530	-16,03357	0,00000	0,00000	14,90000	5,00000

Tabela 4.6 – Resultados de barras do cálculo de fluxo de carga realizado pelo ANAREDE.

Fonte: Autor.

Nome	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração ativa (MW)	Geração reativa (MVAr)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (MVAr)
Barra 1	1,060	0,0000	232,390	-16,550	0,000	0,000
Barra 2	1,045	-4,9847	40,000	43,557	21,700	12,700
Barra 3	1,010	-12,7254	0,000	25,075	94,200	19,000
Barra 4	1,018	-10,3132	0,000	0,000	47,800	-3,900
Barra 5	1,020	-8,7719	0,000	0,000	7,600	1,600
Barra 6	1,070	-14,2208	0,000	12,731	11,200	7,500
Barra 7	1,062	-13,3614	0,000	0,000	0,000	0,000
Barra 8	1,090	-13,3614	0,000	17,623	0,000	0,000
Barra 9	1,056	-14,9370	0,000	0,000	29,500	16,600
Barra 10	1,051	-15,0974	0,000	0,000	9,000	5,800
Barra 11	1,057	-14,7880	0,000	0,000	3,500	1,800
Barra 12	1,055	-15,0745	0,000	0,000	6,100	1,600
Barra 13	1,050	-15,1547	0,000	0,000	13,500	5,800
Barra 14	1,036	-16,0314	0,000	0,000	14,900	5,000

Tabela 4.7 – Divergência dos resultados de barras dos programas PSP-UFU e ANAREDE.
Fonte: Autor.

Nome	Tensão	Ângulo	Geração ativa	Geração reativa	Carga ativa	Carga reativa
Barra 1	0,0000%	0,0000%	0,0010%	0,0050%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	0,0000%	0,0435%	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Barra 3	0,0000%	0,0026%	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0000%
Barra 4	0,0323%	0,0037%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 5	0,0476%	0,0209%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 6	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0452%	0,0136%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 8	0,0000%	0,0136%	0,0000%	0,0024%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	0,0064%	0,0096%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 10	0,0014%	0,0015%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0088%	0,0170%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 12	0,0179%	0,0066%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 13	0,0364%	0,0097%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 14	0,0454%	0,0138%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

O fluxo de carga entre os elementos de ramo, calculados pelo PSP-UFU, são mostrados na Tabela 4.8 e os mesmos dados calculados pelo ANAREDE são apresentados na Tabela 4.9 e comparados na Tabela 4.10.

Tabela 4.8 – Resultados de ramos do cálculo de fluxo de carga realizado pelo PSP-UFU.
Fonte: Autor.

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVar)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVar)
Barra 1	Barra 2	156,882205	-20,404132	Barra 2	Barra 1	-152,584643	27,675973
Barra 1	Barra 5	75,510054	3,854966	Barra 5	Barra 1	-72,747205	2,229285
Barra 10	Barra 9	-5,214653	-4,184948	Barra 9	Barra 10	5,227528	4,219149
Barra 10	Barra 11	-3,785302	-1,615070	Barra 11	Barra 10	3,797883	1,644522
Barra 11	Barra 6	-7,297883	-3,444521	Barra 6	Barra 11	7,353256	3,560479
Barra 12	Barra 6	-7,714237	-2,353976	Barra 6	Barra 12	7,786046	2,503430
Barra 12	Barra 13	1,614260	0,753950	Barra 13	Barra 12	-1,607962	-0,748252
Barra 13	Barra 6	-17,535863	-6,798930	Barra 6	Barra 13	17,747948	7,216592
Barra 13	Barra 14	5,643848	1,747173	Barra 14	Barra 13	-5,589770	-1,637068
Barra 14	Barra 9	-9,310230	-3,362931	Barra 9	Barra 14	9,426385	3,610006
Barra 2	Barra 3	73,237444	3,560216	Barra 3	Barra 2	-70,914183	1,602184
Barra 2	Barra 4	56,131265	-1,550365	Barra 4	Barra 2	-54,454621	3,020660
Barra 2	Barra 5	41,516033	1,170977	Barra 5	Barra 2	-40,612287	-2,099038
Barra 3	Barra 4	-23,285780	4,473085	Barra 4	Barra 3	23,659228	-4,835615
Barra 4	Barra 5	-61,158036	15,823581	Barra 5	Barra 4	61,672452	-14,200954
Barra 4	Barra 7	28,073954	-9,681040	Barra 7	Barra 4	-28,073954	11,384229
Barra 4	Barra 9	16,079661	-0,427598	Barra 9	Barra 4	-16,079661	1,732293
Barra 5	Barra 6	44,087082	12,470711	Barra 6	Barra 5	-44,087082	-8,049594
Barra 7	Barra 8	-0,000002	-17,162946	Barra 8	Barra 7	0,000002	17,623425
Barra 7	Barra 9	28,074111	5,778720	Barra 9	Barra 7	-28,074111	-4,976655

Tabela 4.9 – Resultados de ramos do cálculo de fluxo de carga realizado pelo ANAREDE.
Fonte: Autor.

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 1	Barra 2	156,8800	-20,4000	Barra 2	Barra 1	-152,6000	27,6760
Barra 1	Barra 5	75,5100	3,8550	Barra 5	Barra 1	-72,7500	2,2294
Barra 10	Barra 9	-5,2150	-4,1850	Barra 9	Barra 10	5,2276	4,2191
Barra 10	Barra 11	-3,7850	-1,6150	Barra 11	Barra 10	3,7979	1,6445
Barra 11	Barra 6	-7,2980	-3,4450	Barra 6	Barra 11	7,3533	3,5605
Barra 12	Barra 6	-7,7140	-2,3540	Barra 6	Barra 12	7,7861	2,5034
Barra 12	Barra 13	1,6143	0,7540	Barra 13	Barra 12	-1,6080	-0,7483
Barra 13	Barra 6	-17,5400	-6,7990	Barra 6	Barra 13	17,7480	7,2166
Barra 13	Barra 14	5,6439	1,7472	Barra 14	Barra 13	-5,5900	-1,6370
Barra 14	Barra 9	-9,3100	-3,3630	Barra 9	Barra 14	9,4264	3,6100
Barra 2	Barra 3	73,2380	3,5602	Barra 3	Barra 2	-70,9100	1,6022
Barra 2	Barra 4	56,1320	-1,5500	Barra 4	Barra 2	-54,4500	3,0207
Barra 2	Barra 5	41,5160	1,1710	Barra 5	Barra 2	-40,6100	-2,0990
Barra 3	Barra 4	-23,2900	4,4731	Barra 4	Barra 3	23,6590	-4,8360
Barra 4	Barra 5	-61,1600	15,8240	Barra 5	Barra 4	61,6730	-14,2000
Barra 4	Barra 7	28,0740	-9,6810	Barra 7	Barra 4	-28,0700	11,3840
Barra 4	Barra 9	16,0800	-0,4276	Barra 9	Barra 4	-16,0800	1,7323
Barra 5	Barra 6	44,0870	12,4710	Barra 6	Barra 5	-44,0900	-8,0500
Barra 7	Barra 8	0,0000	-17,1600	Barra 8	Barra 7	0,0000	17,6230
Barra 7	Barra 9	28,0740	5,7787	Barra 9	Barra 7	-28,0700	-4,9770

Tabela 4.10 – Resultados de ramos do cálculo de fluxo de carga realizado pelo ANAREDE.
Fonte: Autor.

De	Para	Potência ativa	Potência reativa	De	Para	Potência ativa	Potência reativa
Barra 1	Barra 2	0,0014%	0,0203%	Barra 2	Barra 1	0,0101%	0,0001%
Barra 1	Barra 5	0,0001%	0,0009%	Barra 5	Barra 1	0,0038%	0,0052%
Barra 10	Barra 9	0,0067%	0,0012%	Barra 9	Barra 10	0,0014%	0,0012%
Barra 10	Barra 11	0,0080%	0,0043%	Barra 11	Barra 10	0,0004%	0,0013%
Barra 11	Barra 6	0,0016%	0,0139%	Barra 6	Barra 11	0,0006%	0,0006%
Barra 12	Barra 6	0,0031%	0,0010%	Barra 6	Barra 12	0,0007%	0,0012%
Barra 12	Barra 13	0,0025%	0,0013%	Barra 13	Barra 12	0,0024%	0,0064%
Barra 13	Barra 6	0,0236%	0,0010%	Barra 6	Barra 13	0,0003%	0,0001%
Barra 13	Barra 14	0,0009%	0,0015%	Barra 14	Barra 13	0,0041%	0,0042%
Barra 14	Barra 9	0,0025%	0,0021%	Barra 9	Barra 14	0,0002%	0,0002%
Barra 2	Barra 3	0,0008%	0,0004%	Barra 3	Barra 2	0,0059%	0,0010%
Barra 2	Barra 4	0,0013%	0,0235%	Barra 4	Barra 2	0,0085%	0,0013%
Barra 2	Barra 5	0,0001%	0,0020%	Barra 5	Barra 2	0,0056%	0,0018%
Barra 3	Barra 4	0,0181%	0,0003%	Barra 4	Barra 3	0,0010%	0,0080%
Barra 4	Barra 5	0,0032%	0,0026%	Barra 5	Barra 4	0,0009%	0,0067%
Barra 4	Barra 7	0,0002%	0,0004%	Barra 7	Barra 4	0,0141%	0,0020%
Barra 4	Barra 9	0,0021%	0,0005%	Barra 9	Barra 4	0,0021%	0,0004%
Barra 5	Barra 6	0,0002%	0,0023%	Barra 6	Barra 5	0,0066%	0,0050%
Barra 7	Barra 8	0,0000%	0,0172%	Barra 8	Barra 7	0,0000%	0,0024%
Barra 7	Barra 9	0,0004%	0,0003%	Barra 9	Barra 7	0,0146%	0,0069%

Por meio das tabelas apresentadas nota-se que os programas proporcionaram resultados de praticamente idênticos, com a maior divergência de 0,0476% para resultados de barras e 0,0236% para a solução dos ramos. Esse erro relativo é originado principalmente da diferença no número de casas decimais dos resultados de saída.

4.3.2 Sistema teste de 118 barras

A Figura 4.2 apresenta o sistema de 118 barras criado no PSP-UFU.

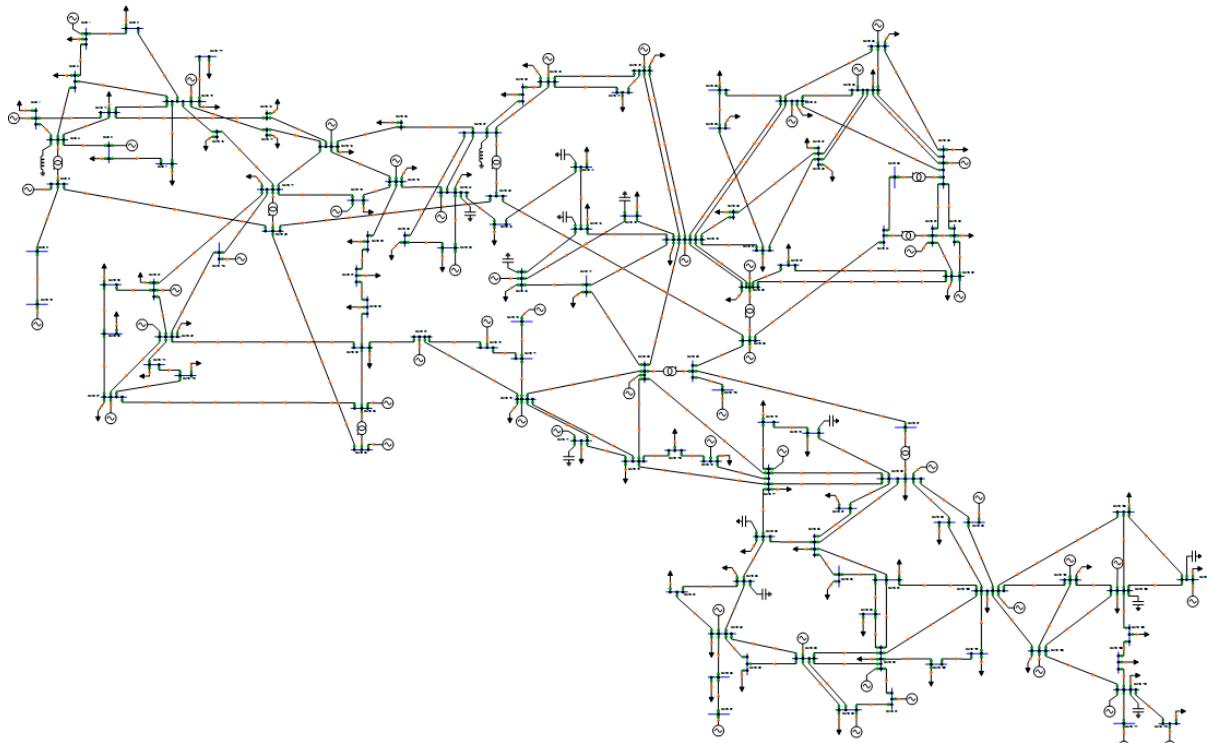


Figura 4.2 – Sistema teste de 118 barras criado no PSP-UFU.

Fonte: Autor.

As mesmas análises foram realizadas para esse sistema e exibidas no Apêndice B, as quais são divididas em dados de barras (Tabela B.3 a Tabela B.5) e dados de ramos (Tabela B.6 a Tabela B.8), apresentando divergências máximas de 0,1254% e 0,1466%, respectivamente. Esses erros, apesar de maiores comparados àqueles do sistema de 14 barras, são bastante pequenos e originados de valores que estão próximos a zero.

4.4 Curto-círcuito

Assim como no fluxo de carga, nessa análise foram criados os sistemas testes de 14 e 118 barras.

Para a realização do cálculo de curto-círcuito no ANAFAS são necessários os dados da rede em sua situação pré-falta, ou seja, é exigido o resultado do fluxo de carga. Para isso foi utilizada a solução do ANAREDE apresentados na seção anterior.

4.4.1 Sistema teste de 14 barras

Para esse sistema será analisado todos os tipos de falta presentes no PSP-UFU: trifásica, fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra. Os curtos-circuitos foram realizadas na barra 6 e sem nenhuma impedância de falta.

A) Curto-círcuito trifásico

Os resultados das correntes curto-círcito são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Correntes de curto-círcuito trifásico do sistema de 14 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.

Fonte: Autor.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	1935,356	-89,5	1935,356	150,5	1935,356	30,5
ANAFAS	1935,337	-89,5	1935,337	150,5	1935,337	30,5
Erro (%)	0,0010%	0,0000%	0,0010%	0,0000%	0,0010%	0,0000%

Os resultados são bastante próximos, com uma divergência máxima de 0,001%.

São apresentadas as tensões das barras durante a falta trifásica calculadas pelo PSP-UFU, e ANAFAS, além das divergências dos resultados, representados pelas tabelas 4.12, 4.13 e 4.14, respectivamente.

Tabela 4.12 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo PSP-UFU.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	0,9349	1,7	0,9349	-118,3	0,9349	121,7
Barra 2	0,8444	-1,8	0,8444	-121,8	0,8444	118,2
Barra 3	0,7482	-9,1	0,7482	-129,1	0,7482	110,9
Barra 4	0,6515	-3,3	0,6515	-123,3	0,6515	116,7
Barra 5	0,6362	-0,3	0,6362	-120,3	0,6362	119,7
Barra 6	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
Barra 7	0,5495	-10,8	0,5495	-130,8	0,5495	109,2
Barra 8	0,6254	-11,2	0,6254	-131,2	0,6254	108,8
Barra 9	0,4459	-16,4	0,4459	-136,4	0,4459	103,6
Barra 10	0,3662	-17,3	0,3662	-137,3	0,3662	102,7
Barra 11	0,1875	-18,6	0,1875	-138,6	0,1875	101,4
Barra 12	0,0310	-9,7	0,0310	-129,7	0,0310	110,3
Barra 13	0,0628	-20,8	0,0628	-140,8	0,0628	99,2
Barra 14	0,2744	-18,2	0,2744	-138,2	0,2744	101,8

Tabela 4.13 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	0,9349	1,7	0,9349	-118,3	0,9349	121,7
Barra 2	0,8444	-1,8	0,8444	-121,8	0,8444	118,2
Barra 3	0,7482	-9,1	0,7482	-129,1	0,7482	110,9
Barra 4	0,6518	-3,3	0,6518	-123,3	0,6518	116,7
Barra 5	0,6367	-0,3	0,6367	-120,3	0,6367	119,7
Barra 6	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
Barra 7	0,5500	-10,8	0,5500	-130,8	0,5500	109,2
Barra 8	0,6254	-11,2	0,6254	-131,2	0,6254	108,8
Barra 9	0,4459	-16,4	0,4459	-136,4	0,4459	103,6
Barra 10	0,3662	-17,3	0,3662	-137,3	0,3662	102,7
Barra 11	0,1876	-18,6	0,1876	-138,6	0,1876	101,4
Barra 12	0,0309	-9,7	0,0309	-129,7	0,0309	110,3
Barra 13	0,0625	-20,8	0,0625	-140,8	0,0625	99,2
Barra 14	0,2748	-18,2	0,2748	-138,2	0,2748	101,8

Tabela 4.14 – Divergência no cálculo do curto-círcuito trifásico entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 3	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 4	0,0460%	0,0000%	0,0460%	0,0000%	0,0460%	0,0000%
Barra 5	0,0785%	0,0000%	0,0785%	0,0000%	0,0785%	0,0000%
Barra 6	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0909%	0,0000%	0,0909%	0,0000%	0,0909%	0,0000%
Barra 8	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 10	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0533%	0,0000%	0,0533%	0,0000%	0,0533%	0,0000%
Barra 12	0,3236%	0,0000%	0,3236%	0,0000%	0,3236%	0,0000%
Barra 13	0,4800%	0,0000%	0,4800%	0,0000%	0,4800%	0,0000%
Barra 14	0,1456%	0,0000%	0,1456%	0,0000%	0,1456%	0,0000%

A maior divergência encontrada possui o valor de 0,48% e pode ser considerado baixo, pois origina na comparação de valores pequenos.

B) Curto-círcuito fase-fase

O resultado da corrente de curto-círcuito fase-fase entre as fases B e C calculadas por ambos os programas são apresentados pela Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Correntes de curto-círcuito fase-fase do sistema de 14 barras calculada pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	0,000	0,0	1676,068	-179,5	1676,068	0,5
ANAFAS	0,000	0,0	1676,073	-179,5	1676,073	0,5
Erro (%)	0,0000%	0,0000%	0,0003%	0,0000%	0,0003%	0,0000%

Novamente os resultados se apresentaram praticamente idênticos, com divergência quase nulas.

As tabelas abaixo apresentam as tensões das barras durante a falta fase-fase calculadas pelos programas e as divergências dos resultados:

Tabela 4.16 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase calculado pelo PSP-UFU.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	1,0600	0,0	0,9544	-122,0	0,9809	124,4
Barra 2	1,0450	-5,0	0,8748	-128,4	0,9221	122,7
Barra 3	1,0100	-12,7	0,7959	-138,4	0,8464	117,5
Barra 4	1,0177	-10,3	0,7119	-138,5	0,8048	125,6
Barra 5	1,0195	-8,8	0,6932	-136,9	0,8040	128,6
Barra 6	1,0700	-14,2	0,5350	165,8	0,5350	165,8
Barra 7	1,0615	-13,4	0,6970	-150,4	0,7284	125,9
Barra 8	1,0900	-13,4	0,7539	-147,5	0,7825	122,9
Barra 9	1,0559	-14,9	0,6620	-159,3	0,6461	128,4
Barra 10	1,0510	-15,1	0,6242	-164,6	0,6032	133,2
Barra 11	1,0569	-14,8	0,5631	-178,1	0,5424	147,8
Barra 12	1,0552	-15,1	0,5258	167,8	0,5308	162,0
Barra 13	1,0504	-15,2	0,5333	170,7	0,5226	158,9
Barra 14	1,0355	-16,0	0,5776	-171,8	0,5616	139,0

Tabela 4.17 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase calculado pelo ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	1,0600	0,0	0,9544	-122,0	0,9809	124,4
Barra 2	1,0450	-5,0	0,8748	-128,4	0,9221	122,7
Barra 3	1,0100	-12,7	0,7959	-138,4	0,8464	117,5
Barra 4	1,0180	-10,3	0,7122	-138,4	0,8051	125,6
Barra 5	1,0200	-8,8	0,6936	-136,9	0,8045	128,5
Barra 6	1,0700	-14,2	0,5350	165,8	0,5350	165,8
Barra 7	1,0620	-13,4	0,6975	-150,3	0,7288	125,9
Barra 8	1,0900	-13,4	0,7539	-147,5	0,7825	122,9
Barra 9	1,0560	-14,9	0,6621	-159,3	0,6462	128,4
Barra 10	1,0510	-15,1	0,6242	-164,6	0,6032	133,2
Barra 11	1,0570	-14,8	0,5631	-178,1	0,5425	147,8
Barra 12	1,0550	-15,1	0,5257	167,8	0,5307	162,1
Barra 13	1,0500	-15,2	0,5331	170,6	0,5224	158,9
Barra 14	1,0360	-16,0	0,5780	-171,7	0,5620	138,9

Tabela 4.18 – Divergência no cálculo do curto-círcuito fase-fase entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 3	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 4	0,0295%	0,0000%	0,0421%	0,0723%	0,0373%	0,0000%
Barra 5	0,0490%	0,0000%	0,0577%	0,0000%	0,0622%	0,0778%
Barra 6	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0471%	0,0000%	0,0717%	0,0665%	0,0549%	0,0000%
Barra 8	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	0,0095%	0,0000%	0,0151%	0,0000%	0,0155%	0,0000%
Barra 10	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0095%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0184%	0,0000%
Barra 12	0,0190%	0,0000%	0,0190%	0,0000%	0,0188%	0,0617%
Barra 13	0,0381%	0,0000%	0,0375%	0,0586%	0,0383%	0,0000%
Barra 14	0,0483%	0,0000%	0,0692%	0,0582%	0,0712%	0,0720%

O maior erro relativo encontrado foi de 0,0778%.

C) Curto-círcuito fase-fase-terra

Os resultados das correntes de curto-círcuito fase-fase-terra nas fases B e C são apresentados na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Correntes de curto-círcuito fase-fase-terra do sistema de 14 barras calculada pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	0,000	0,0	2001,322	142,1	2174,894	35,4
ANAFAS	0,000	0,0	2001,314	142,1	2174,895	35,4
Erro (%)	0,0000%	0,0000%	0,0004%	0,0000%	0,0001%	0,0000%

A maior divergência é de 0,0004%.

A Tabela 4.20 e a Tabela 4.21, apresentam as tensões das barras durante a falta fase-fase-terra calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS, respectivamente. A Tabela 4.22 mostra as divergências dos resultados.

Tabela 4.20 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase-terra calculado pelo PSP-UFU.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	1,0119	0,9	0,9459	-120,1	0,9564	123,2
Barra 2	0,9756	-3,5	0,8582	-124,6	0,8754	120,3
Barra 3	0,9122	-10,8	0,7706	-133,6	0,7924	114,4
Barra 4	0,9220	-8,1	0,6687	-127,2	0,6838	119,8
Barra 5	0,9300	-6,5	0,6503	-123,6	0,6631	122,3
Barra 6	0,9193	-10,5	0,0000	0,0	0,0000	0,0
Barra 7	0,9207	-11,4	0,5855	-136,8	0,5893	114,9
Barra 8	0,9125	-11,6	0,6867	-139,5	0,6909	116,8
Barra 9	0,9155	-13,1	0,4778	-141,7	0,4716	109,4
Barra 10	0,9078	-13,0	0,3944	-142,7	0,3870	108,8
Barra 11	0,9091	-11,9	0,2032	-144,0	0,1979	107,9
Barra 12	0,9021	-11,8	0,0406	-137,2	0,0327	129,2
Barra 13	0,8972	-12,0	0,0753	-146,7	0,0649	112,0
Barra 14	0,8874	-13,9	0,3039	-143,6	0,2882	109,6

Tabela 4.21 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-fase calculado pelo ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	1,0119	0,9	0,9459	-120,1	0,9564	123,2
Barra 2	0,9756	-3,5	0,8582	-124,6	0,8753	120,3
Barra 3	0,9122	-10,8	0,7706	-133,6	0,7924	114,4
Barra 4	0,9224	-8,1	0,6691	-127,2	0,6841	119,8
Barra 5	0,9305	-6,5	0,6507	-123,6	0,6636	122,3
Barra 6	0,9193	-10,5	0,0000	0,0	0,0000	0,0
Barra 7	0,9212	-11,4	0,5859	-136,8	0,5897	114,9
Barra 8	0,9125	-11,6	0,6867	-139,5	0,6909	116,8
Barra 9	0,9156	-13,1	0,4779	-141,7	0,4717	109,4
Barra 10	0,9078	-13,0	0,3944	-142,7	0,3870	108,8
Barra 11	0,9092	-11,9	0,2033	-144,0	0,1980	107,9
Barra 12	0,9019	-11,8	0,0404	-137,2	0,0326	129,4
Barra 13	0,8968	-12,0	0,0750	-146,7	0,0646	112,0
Barra 14	0,8878	-13,9	0,3044	-143,6	0,2886	109,6

Tabela 4.22 – Divergência no cálculo do curto-círcuito fase-fase entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0114%	0,0000%
Barra 3	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 4	0,0434%	0,0000%	0,0598%	0,0000%	0,0439%	0,0000%
Barra 5	0,0537%	0,0000%	0,0615%	0,0000%	0,0753%	0,0000%
Barra 6	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0543%	0,0000%	0,0683%	0,0000%	0,0678%	0,0000%
Barra 8	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	0,0109%	0,0000%	0,0209%	0,0000%	0,0212%	0,0000%
Barra 10	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0110%	0,0000%	0,0492%	0,0000%	0,0505%	0,0000%
Barra 12	0,0222%	0,0000%	0,4950%	0,0000%	0,3067%	0,1546%
Barra 13	0,0446%	0,0000%	0,4000%	0,0000%	0,4644%	0,0000%
Barra 14	0,0451%	0,0000%	0,1643%	0,0000%	0,1386%	0,0000%

Assim como ocorre na falta trifásica a maior divergência foi originada por pequenos valores, ocasionando um erro relativo de 0,495% que pode ser considerado baixo.

D) Curto-círcuito fase-terra

Os resultados das correntes de curto-círcuito fase terra na fase A são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 4.23 – Correntes de curto-círcuito fase-terra no sistema de 14 barras calculada pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	2182,542	-91,7	0,000	0,0	0,000	0,0
ANAFAS	2182,551	-91,7	0,000	0,0	0,000	0,0
Erro (%)	0,0004%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

A maior divergência é de 0,0004%.

Abaixo são apresentadas as tensões das barras durante a falta fase-terra calculadas pelo PSP-UFU, e ANAFAS, além das divergências dos resultados:

Tabela 4.24 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-terra calculado pelo PSP-UFU.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	0,9629	1,5	1,0500	-117,6	1,0286	118,3
Barra 2	0,8825	-2,2	1,0328	-121,5	0,9981	112,5
Barra 3	0,8036	-9,7	0,9898	-127,7	0,9491	103,4
Barra 4	0,6930	-3,8	1,0018	-125,3	0,9537	106,0
Barra 5	0,6707	-0,7	1,0075	-124,0	0,9563	107,9
Barra 6	0,0000	0,0	1,0511	-126,5	0,9672	100,2
Barra 7	0,6103	-10,7	1,0246	-126,7	0,9855	101,0
Barra 8	0,7241	-11,0	1,0362	-125,4	1,0054	99,4
Barra 9	0,4922	-15,7	1,0181	-128,3	0,9811	99,4
Barra 10	0,4054	-16,5	1,0148	-128,2	0,9725	99,1
Barra 11	0,2083	-17,5	1,0279	-127,5	0,9672	99,4
Barra 12	0,0391	-2,2	1,0291	-127,4	0,9586	99,0
Barra 13	0,0739	-15,8	1,0223	-127,5	0,9559	98,8
Barra 14	0,3084	-16,3	0,9970	-128,8	0,9561	97,8

Tabela 4.25 – Tensões do sistema de 14 barras com curto-círcuito fase-terra calculado pelo ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	0,9629	1,5	1,0500	-117,6	1,0286	118,3
Barra 2	0,8825	-2,2	1,0328	-121,5	0,9981	112,5
Barra 3	0,8036	-9,7	0,9898	-127,7	0,9491	103,4
Barra 4	0,6933	-3,8	1,0022	-125,3	0,9540	106,0
Barra 5	0,6712	-0,7	1,0079	-124,0	0,9568	107,9
Barra 6	0,0000	0,0	1,0511	-126,5	0,9672	100,2
Barra 7	0,6108	-10,7	1,0250	-126,7	0,9860	101,0
Barra 8	0,7241	-11,0	1,0362	-125,4	1,0054	99,4
Barra 9	0,4922	-15,7	1,0182	-128,3	0,9812	99,4
Barra 10	0,4054	-16,5	1,0148	-128,2	0,9725	99,1
Barra 11	0,2084	-17,5	1,0280	-127,5	0,9673	99,4
Barra 12	0,0390	-2,2	1,0289	-127,4	0,9584	99,0
Barra 13	0,0736	-15,8	1,0219	-127,5	0,9555	98,8
Barra 14	0,3089	-16,3	0,9975	-128,8	0,9566	97,8

Tabela 4.26 – Divergência no cálculo do curto-círcuito fase-terra entre os programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 3	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 4	0,0433%	0,0000%	0,0399%	0,0000%	0,0314%	0,0000%
Barra 5	0,0745%	0,0000%	0,0397%	0,0000%	0,0523%	0,0000%
Barra 6	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0819%	0,0000%	0,0390%	0,0000%	0,0507%	0,0000%
Barra 8	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	0,0000%	0,0000%	0,0098%	0,0000%	0,0102%	0,0000%
Barra 10	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0480%	0,0000%	0,0097%	0,0000%	0,0103%	0,0000%
Barra 12	0,2564%	0,0000%	0,0194%	0,0000%	0,0209%	0,0000%
Barra 13	0,4076%	0,0000%	0,0391%	0,0000%	0,0419%	0,0000%
Barra 14	0,1619%	0,0000%	0,0501%	0,0000%	0,0523%	0,0000%

Novamente a maior divergência foi originada por pequenos valores, ocasionando um erro relativo de 0,4076% que pode ser considerado satisfatório.

4.4.2 Sistema teste de 118 barras

Para o sistema teste de 118 barras foi aplicado um curto-círcuito trifásico na barra 69 sem impedância de falta. Os resultados comparativos das correntes de curto são apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 – Correntes de curto-círcuito trifásico do sistema de 118 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.
Fonte: Autor.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	9648,312	-68,8	9648,312	171,2	9648,312	51,2
ANAFAS	9648,485	-68,8	9648,485	171,2	9648,485	51,2
Erro (%)	0,0018%	0,0000%	0,0018%	0,0000%	0,0018%	0,0000%

Observa-se que o maior erro obtido foi de 0,0018%, ou seja, os resultados são praticamente idênticos.

Os resultados de tensões durante a falta de ambos os programas, além da tabela comparativa, são apresentados no Apêndice B e a maior divergência encontrada foi de 0,0966%.

4.5 Análise dinâmica

Na análise dinâmica do sistema serão expostos os gráficos para três tipos de distúrbios: curto-círculo trifásico, perda de carga e perda de geração. A rede utilizada é o sistema teste de 14 barras.

Como foi dito anteriormente, não serão comparados os resultados com outro *software*, uma vez que o TransUFU já é consolidado. Os cartões de entrada de dados gerados pelo PSP-UFU são apresentados no Apêndice C.

4.5.1 Curto-círculo trifásico

O curto-círculo foi aplicado na barra 6 no instante de 1 segundo durante 100 ms. A Figura 4.3 mostra as tensões terminais de todas as máquinas síncronas do sistema.

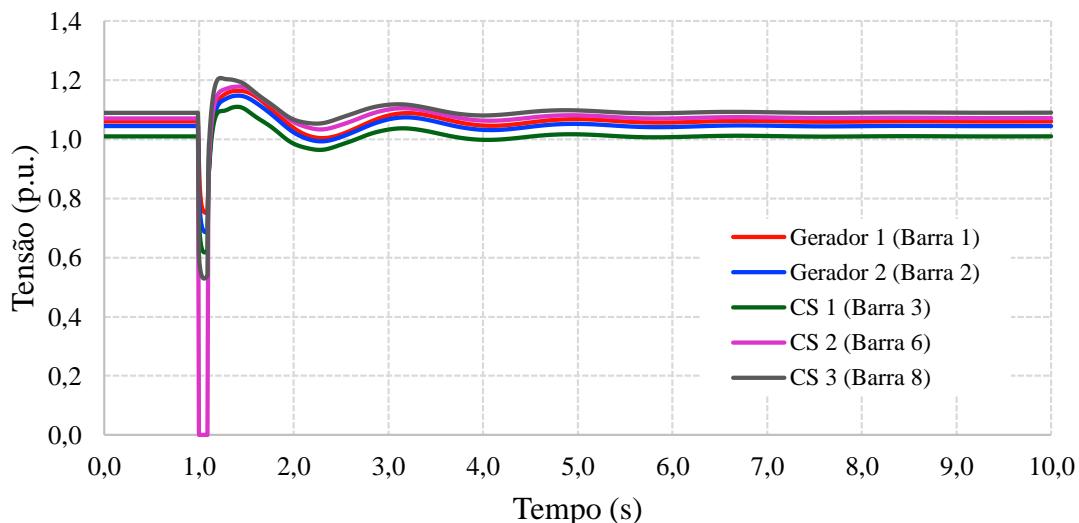


Figura 4.3 – Tensão terminal das máquinas síncronas durante o curto-círcito.

Fonte: Autor.

Observam-se os afundamentos das tensões nos barramentos durante a permanência do curto-círculo, entre os quais destaca-se a tensão da barra 6 que se apresentou como o caso mais grave por ser o local do curto. Também pode ser notada a atuação dos reguladores, pois as tensões retornam para seus valores originais.

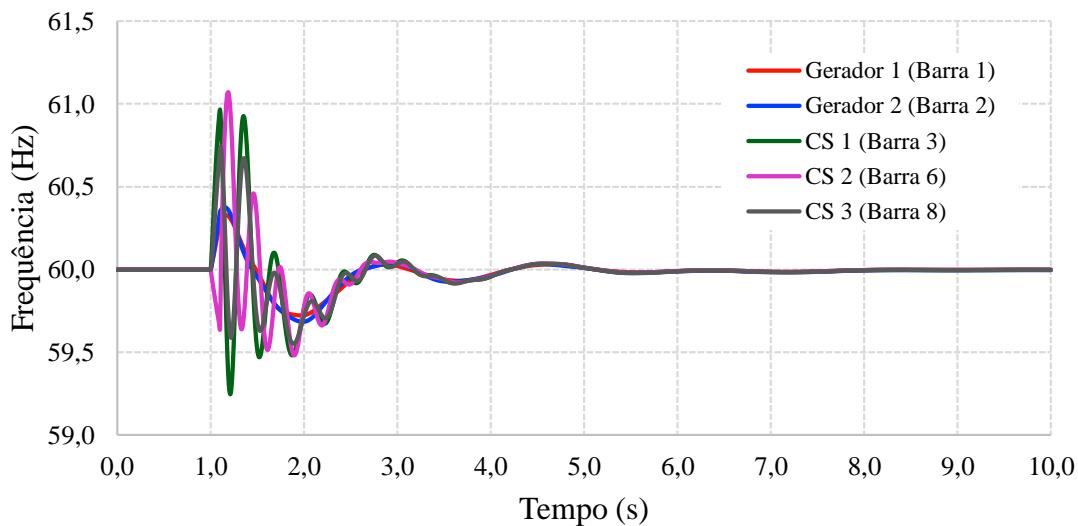


Figura 4.4 – Frequência nos terminais das máquinas síncronas durante o curto-circuito.
Fonte: Autor.

A Figura 4.4 apresenta o comportamento da frequência das máquinas síncronas frente ao curto-circuito. Nota-se que a frequência sofre um acréscimo durante o período de permanência do curto-circuito, atingindo um valor máximo de 60,98 Hz, ocasionado pela aceleração das máquinas síncronas do sistema. Após o fim da falta, a frequência oscila e retorna ao seu valor original (60 Hz), pois não há divergência na relação geração/carga após a perturbação.

A Figura 4.5 e Figura 4.6 representam a dinâmica da potência ativa e reativa das máquinas, respectivamente.

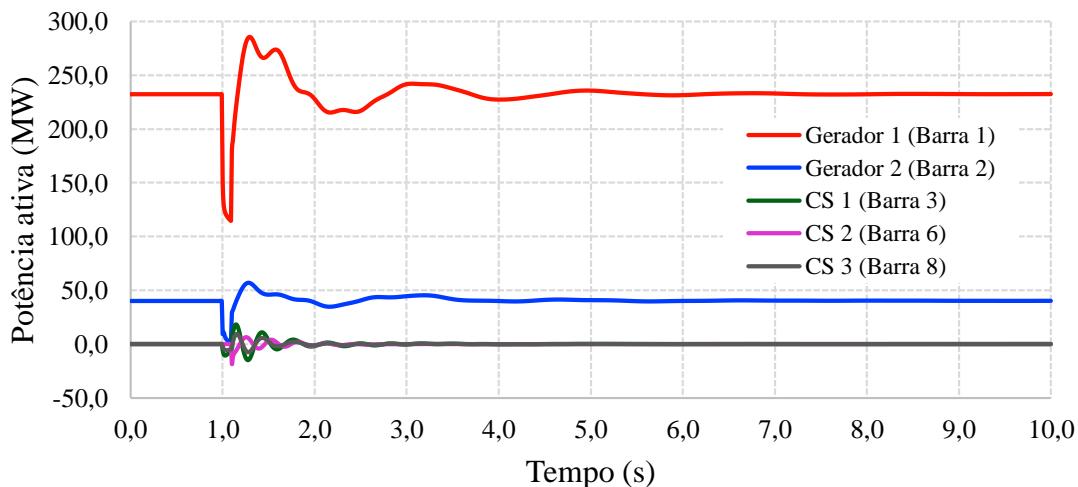


Figura 4.5 – Potência ativa das máquinas síncronas durante o curto-circuito.
Fonte: Autor.

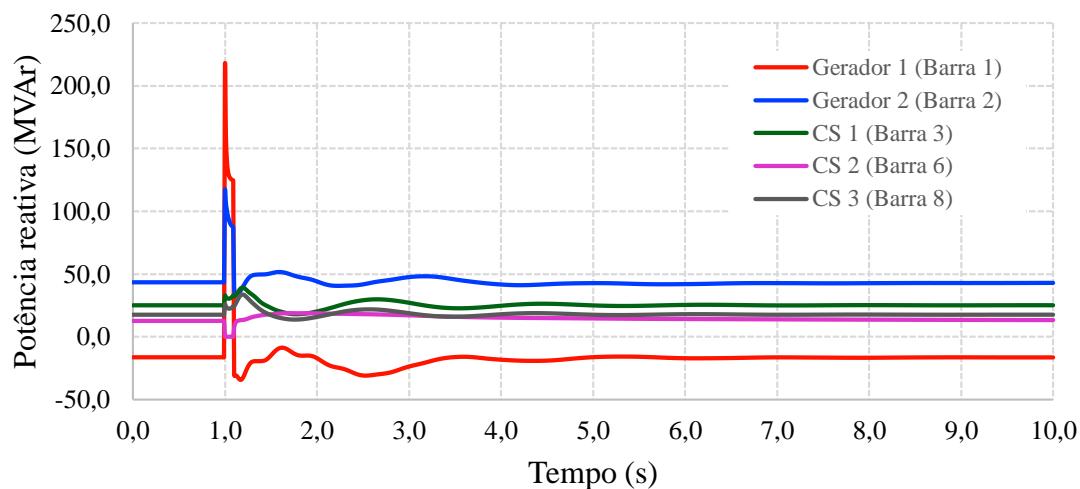


Figura 4.6 – Potência reativa das máquinas síncronas durante o curto-circuito.
Fonte: Autor.

Enquanto a potência ativa dos geradores durante o curto-circuito é drasticamente reduzida, a potência reativa tem seu valor elevado, mostrando assim, um comportamento típico para esse tipo de perturbação da rede.

4.5.2 Perda de carga

Para essa perturbação foi removida a carga de $47,8 -j3,9$ MVA da barra 4.

A perda de carga leva a aceleração das máquinas do sistema e consequentemente a elevação da frequência, como mostra a Figura 4.7.

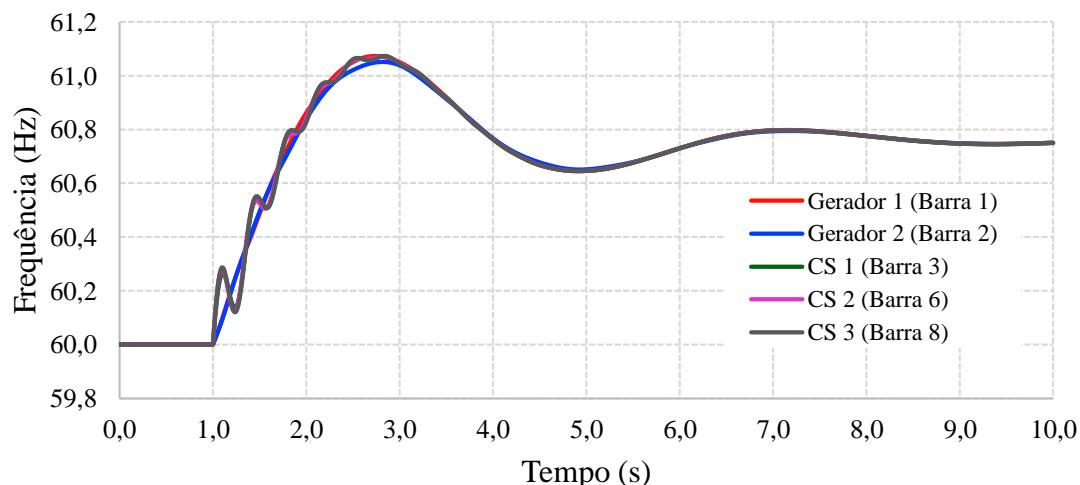


Figura 4.7 – Frequência das máquinas síncronas na perda de carga.
Fonte: Autor.

Devido à atuação dos reguladores de velocidade presentes nos geradores 1 e 2, a frequência se estabiliza no valor de 60,67 Hz e não retorna para seu valor nominal ocasionado pela ausência de um controle secundário.

As potência ativa e reativa das máquinas síncronas são apresentadas pela Figura 4.8 e Figura 4.9, respectivamente.

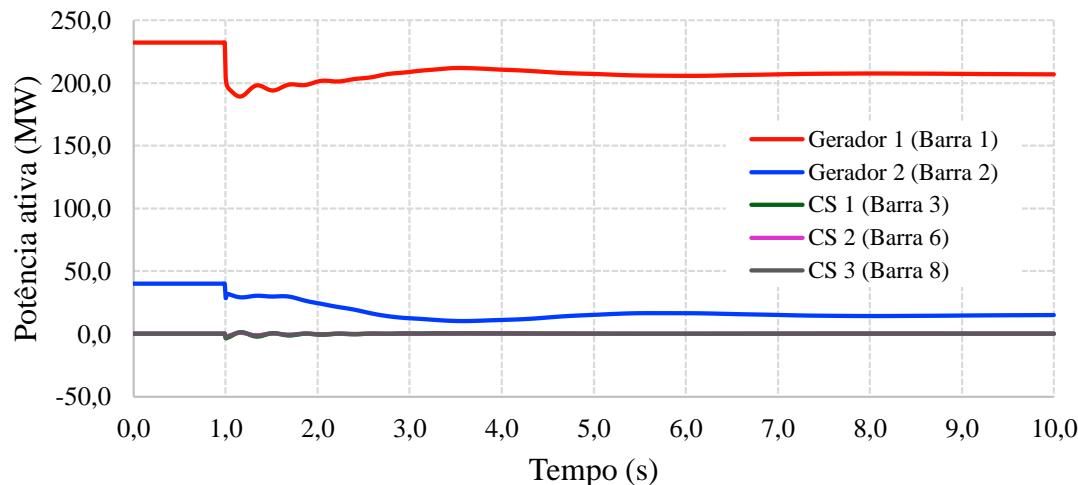


Figura 4.8 – Potência ativa das máquinas síncronas na perda de carga.
Fonte: Autor.

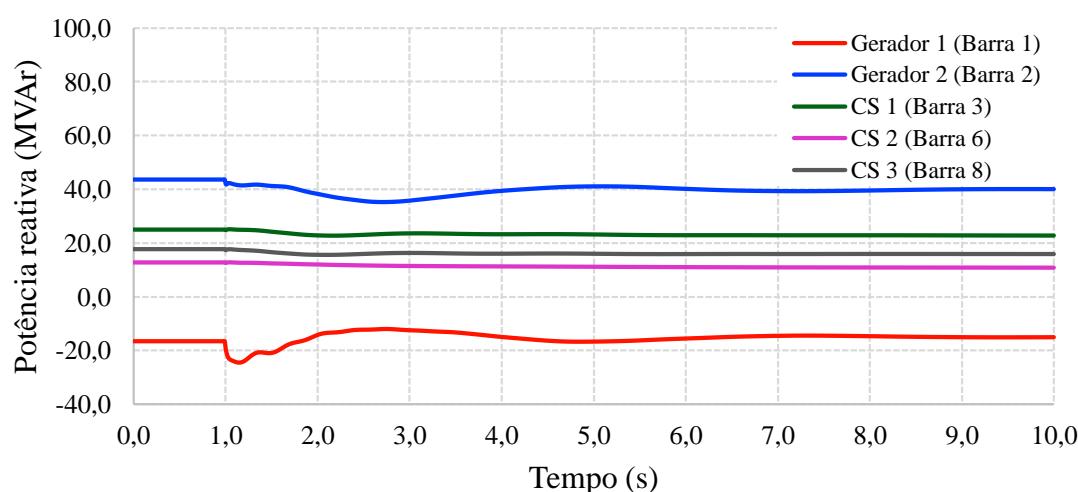


Figura 4.9 – Potência reativa das máquinas síncronas na perda de carga.
Fonte: Autor.

Observa-se que a toda potência ativa e reativa removida do sistema será subtraída aquelas geradas pelas máquinas síncronas, equilibrando o balanço de potência. Isso ocorre devido à presença dos reguladores de velocidade e tensão.

Finalmente, para esse caso, é apresentado o comportamento das tensões, representado pela Figura 4.10.

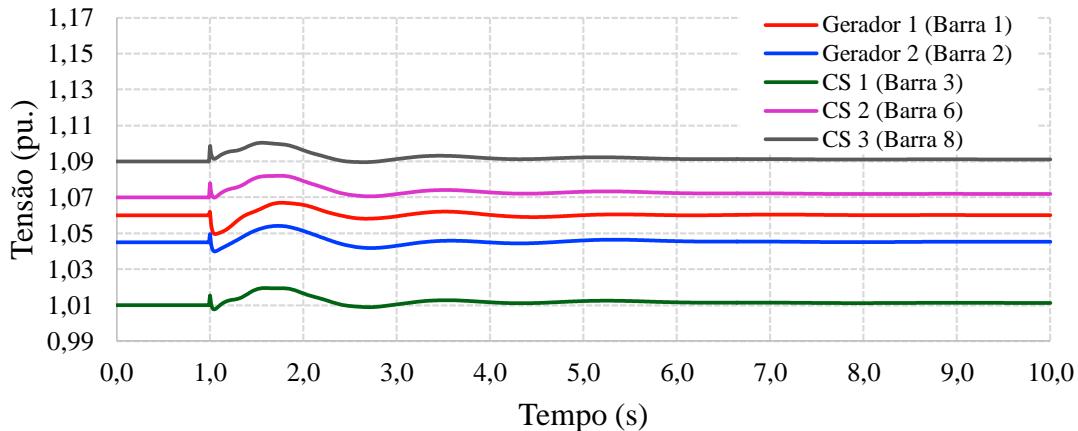


Figura 4.10 – Tensão das máquinas síncronas na perda de carga.
Fonte: Autor.

Devido ao alívio de carga do sistema as correntes serão reduzidas, acarretando na atenuação da queda de tensão nas linhas de transmissão e consequentemente elevando as tensões dos barramentos. As tensões somente irão retornar aos seus valores nominais devido à presença do regulador de tensão atuando sobre a excitação das máquinas síncronas.

4.5.3 Perda de geração

Para esse caso será removido o gerador 2 no instante de 1s.

A Figura 4.11 o comportamento da frequência frente ao distúrbio aplicado.

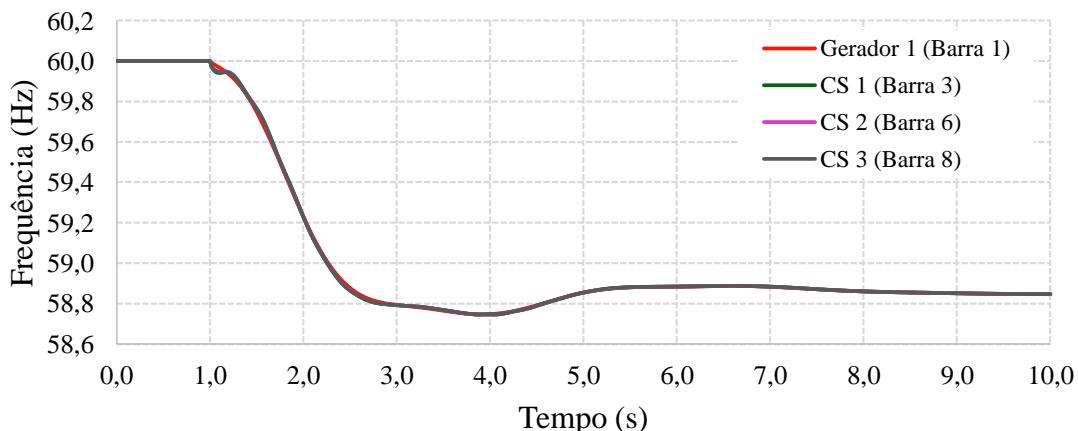


Figura 4.11 – Frequência das máquinas síncronas na perda de geração.
Fonte: Autor.

De forma análoga à perda de carga, a perda de geração desacelera as máquinas, reduzindo assim, a frequência do sistema para o valor de 58,90 Hz. Novamente a ausência de um controle secundário impossibilita a frequência de retornar para 60 Hz.

Toda a potência ativa solicitada devido chaveamento do gerador 2 é assumida pelo gerador 1, pois é o único restante. Uma vez que os compensadores síncronos não possuem uma fonte de força primária, atuando assim como motores, não existe geração de potência ativa.

A potência reativa é modificada em todas as máquinas devido ao regulador de tensão presente nelas. Esses comportamentos de potência podem ser observados nas figuras seguintes:

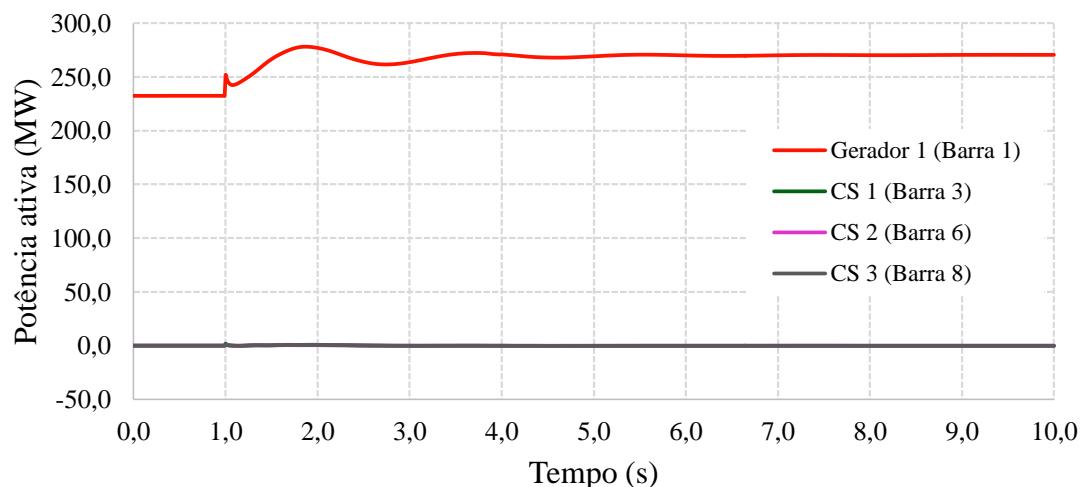


Figura 4.12 – Potência ativa das máquinas síncronas na perda de geração.
Fonte: Autor.

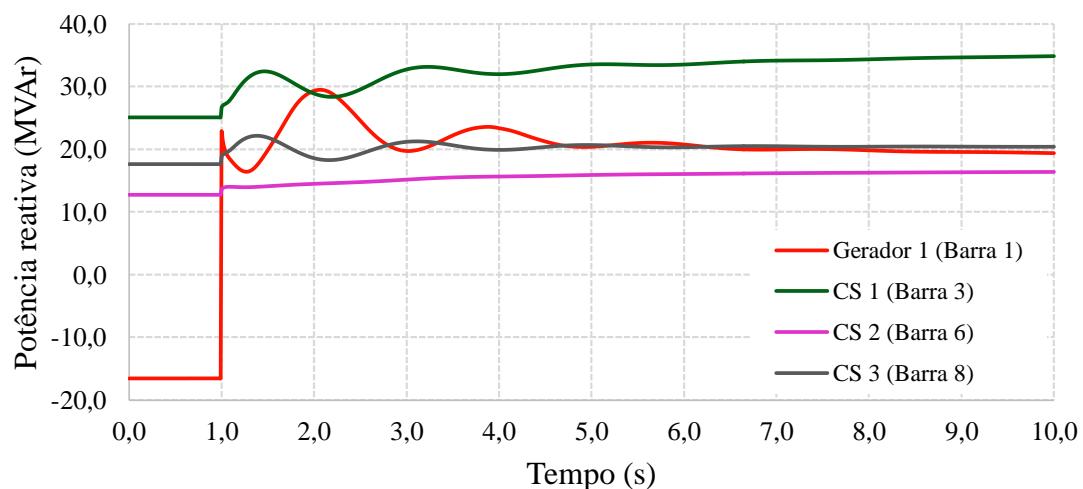


Figura 4.13 – Potência reativa das máquinas síncronas na perda de geração.
Fonte: Autor.

Finalmente é apresentado o comportamento das tensões terminais do gerador e dos compensadores síncronos, representado pela Figura 4.14.

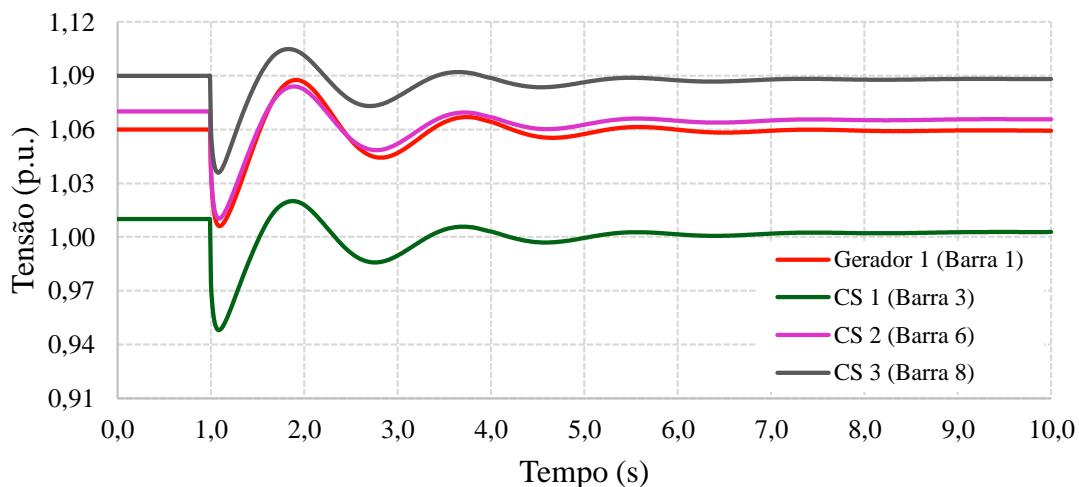


Figura 4.14 – Potência ativa das máquinas síncronas na perda de geração.

Fonte: Autor.

A ausência momentânea da potência reativa do gerador no instante de seu chaveamento ocasiona a redução da tensão nos barramentos, que é corrigida em alguns instantes devido à atuação dos reguladores de tensão nas máquinas síncronas sobressalentes.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões do trabalho e as sugestões para os trabalhos futuros. Para tal, é feita a consolidação das análises parciais expostas em cada capítulo, dando assim, uma visão geral dos estudos realizados na dissertação, bem como as suas contribuições.

A modelagem matemática, tanto na área de Engenharia Elétrica, quanto em outros campos de estudo, é amplamente utilizada para simular sistemas reais a fim de prever seus comportamentos. Anteriormente às aplicações computacionais desses modelos, foi realizado um estudo detalhado dos elementos que se desejava modelar, assim como os equacionamentos envolvidos. Para isso foram apresentados os tópicos necessários para implementação das ferramentas desenvolvidas no *software* PSP-UFU, as quais são: estudo de fluxo de carga, cálculo de curto-circuito e estudo dinâmico de um SEP.

Para o estudo de fluxo de carga foram citados, a princípio, a modelagem dos principais elementos passivos de um SEP inseridos na matriz admitância, além das equações de fluxo de potência para os elementos de ramo. Também foi explicitado o desenvolvimento e os algoritmos para implementação computacional de dois métodos de solução numérica para solução de fluxo de carga: Gauss-Seidel e Newton-Raphson. A construção desses dois métodos numéricos no PSP-UFU se mostrou interessante, pois ambos possuem processos de cálculo distintos, tornando possível a solução, ainda que um dos métodos não encontre uma convergência nos resultados.

Assim como no fluxo de carga, o cálculo de curto-circuito utiliza a matriz admitância e os elementos elétricos da rede foram modelados para se adequar nesse estudo. Como foram implementados curtos-circuitos desbalanceados (F-T, F-F e F-F-T), foi necessário empregar o método das componentes simétricas, que trata a rede trifásica desbalanceada como três circuitos平衡ados. Também foram apresentadas as equações de cálculo de curto-círcito para cada tipo de falta presente no *software*.

Os cálculos relativos aos estudos dinâmicos, realizados em conjunto com o TransUFU, foram explanados para maior compreensão no seu funcionamento, assessorando a integração correta dos dois programas.

Uma vez estabelecida a fundamentação teórica do simulador proposto, deu-se início à fase de implementação computacional. Para tal foram necessários o conhecimento de ferramentas que possibilassem seu desenvolvimento. Utilizou-se o C++, o qual é uma linguagem de programação popular e bastante empregada na área acadêmica, além de ser orientada a objetos, que foi o paradigma utilizado no desenvolvimento PSP-UFU.

Foram utilizadas, durante toda a elaboração do programa, bibliotecas de domínio público e de código aberto, permitindo assim, que se desenvolvesse um *software* completamente gratuito e sem restrições de licenças protetoras. Para produzir a GUI utilizou-se o wxWidgets que é um *framework* multiplataforma, permitindo a aplicação do PSP-UFU em outros sistemas operacionais.

A arquitetura de *software* empregada é simples e de fácil compreensão com a intenção de facilitar a implementação de novas ferramentas, além daquelas criadas nessa pesquisa, por outros programadores. A adoção dessa arquitetura também se mostrou bastante eficiente na organização das classes presentes no programa, possibilitando a criação de sistemas mais complexos.

A interface gráfica do PSP-UFU somadas às ferramentas de criação e navegação das redes elétricas de potência, além do acesso ao mecanismo de cálculo e resultados se mostraram bastante amigáveis e intuitivas, fato importantíssimo, pois auxiliam o usuário na concepção e análise de seus projetos.

Para validar as ferramentas de cálculo programadas compararam-se os resultados do PSP-UFU com outros programas bem estabelecidos no setor elétrico, os quais são: o ANAREDE (fluxo de carga) e o ANAFAS (curto-circuito), ambos desenvolvidos pelo CEPEL. Para tanto foram construídos os sistemas teste do IEEE de 14 e 118 barras nos três programas.

Os resultados de fluxo de carga e curto-circuito no PSP-UFU do sistema teste de 14 barras apresentaram divergências mínimas com os programas da CEPEL, com erros relativos próximos a zero, atestando a correta operação dos algoritmos de cálculo desenvolvidos. Também obteve-se a mesma conclusão para o sistema teste de 118 barras, confirmando a eficácia do *software* para sistemas com um maior número de barramentos. Para a análise dinâmica foram aplicados alguns distúrbios e observado o comportamento das máquinas

síncronas da rede para cada um deles. Os resultados obtidos decorreram conforme com a literatura, comprovando, assim, a integração adequada do PSP-UFU com o TransUFU.

A principal contribuição dessa dissertação é o *software* PSP-UFU, o qual proporciona ferramentas gráficas para criação de redes elétricas de potência e realiza os estudos supracitados validados por vários testes. A plataforma pode ser empregada tanto como instrumento didático para alunos dos cursos de Engenharia Elétrica, quanto para profissionais do setor elétrico. Salienta-se ainda que o programa desenvolvido possui grande potencial, uma vez que ele é gratuito e de código aberto, permitindo o desenvolvimento de novas ferramentas e aprimoramento daquelas já criadas.

Finalmente recomenda-se as seguintes melhorias no PSP-UFU que podem ser realizadas por pesquisas no futuro:

- Remover a dependência com o TransUFU por meio do desenvolvimento de uma ferramenta de análise eletromecânica, a qual é possível inserir componentes dinâmicos, como geradores/motores síncronos, motores/geradores de indução, relés, dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), como SVCs (*Static VAr Compensators*), CSC (Compensador Série Controlado), etc.;
- Criar uma interface para visualização de gráficos no tempo com a possibilidade de exportação dos dados em diversos tipos de formato de saída: CSV (*Comma Separated Values*) e formatos compatíveis com programas visualizadores de gráficos, como o GNUPlot;
- Desenvolver uma GUI, a qual é possível confeccionar controles genéricos para os dispositivos controlados. Essa interface possuirá vários elementos de controle, como somadores, funções transferência, limitadores, elementos não lineares, etc.. Também será possível editar, gravar no disco e compartilhar com outros usuários os controles criados;
- Implementar novos componentes para estudos em regime permanente: transformadores de três enrolamentos, elementos passivos em série, linha de transmissão em corrente contínua, dispositivos FACTS;
- Otimizar e incrementar as ferramentas já desenvolvidas, as quais podem-se destacar:

- Explorar a matriz esparsidade da matriz admitância com o intuito de reduzir o tempo nas iterações do método numérico no estudo de fluxo de carga e a sua inversão para o curto-círcuito;
- Desenvolver a ferramenta de fluxo de potência ótimo, incluindo estratégias de controle;
- Desenvolver a ferramenta de fluxo de carga continuado;
- Implementar outros tipos de falta: defeito shunt e abertura de fases em qualquer ponto da linha de transmissão, abertura terminal de fases e faltas simultâneas;
- Destacar itens com limites de potência ou tensão extrapolados;
- Otimizar as ferramentas gráficas já desenvolvidas para uma melhor criação e navegação das redes elétricas.
- Melhoria da arquitetura de *software* presente atualmente no PSP-UFU para facilitar a inserção das novas ferramentas, por meio dessa pesquisa, e a sua ampliação e manutenção por vários desenvolvedores no futuro;
- Utilizar a linguagem de programação C++ em conjunto com bibliotecas gráficas gratuitas para desenvolvimento das técnicas mais modernas na GUI;
- Criar um manual de usuário *on-line* e em formato de arquivo de texto (*off-line*) com todas as funcionalidades do programa desenvolvido;
- Compilar a aplicação final no sistema operacional Mac;
- Publicar o código fonte do *software* em um local com boa visibilidade e facilidade de acesso.

REFERÊNCIAS

- [1] STAGG, G.; GLENN, W; EL-ABIAD, A. H.. **Computer methods in power system analysis.** New York: McGraw-Hill, 1968.
- [2] ELGERD, O. I.. **Electrical Energy Systems Theory: An Introduction.** New York: McGraw-Hill, 1971.
- [3] SHAHRIARI, A.; MOKHLIS, H.; BAKAR, H. A.. **Critical Reviews of Load Flow Methods for Well, Ill and Unsolvable Condition.** Journal of Electrical Engineering, vol. 63. 2012.
- [4] STOTT, B.. **Review of load-flow calculation methods.** Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 7. IEEE, pp. 916–929, 1974.
- [5] JAMALI, S.; SHATERI, H.. **Some trouble-making aspects of load flow analysis in distribution systems and their solutions.** IET, pp. 1–5, 2005.
- [6] BALAMURUGAN, K.; SRINIVASAN, D.. **Review of power flow studies on distribution network with distributed generation.** IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011.
- [7] SARKINEN, J.. **An Open source(d) controller.** Telecommunications Energy Conference, p.767-768, 2007.
- [8] MEYER, S. W.; LIU, T.. **ATP: Alternative Transient Program, versão para Windows – 1984.** Disponível em <<http://www.emtp.org/>>. Acesso: 26 nov. 2015.
- [9] MILANO, F. **PSAT: Power System Analysis Toolbox, versão 2.1.9.** Disponível em : <<http://faraday1.ucd.ie/psat.html>>. Acesso: 26 nov. 2015.
- [10] ZIMMERMAN, R. D.; MUTILLO-SÁNCHEZ C. E.. **MATPOWER, versão 5.1.** Disponível em: <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>>. Acesso: 26 nov. 2015.
- [11] DUGAN R. C.. **OpenDSS: Open Distribution System Simulator, versão 7.6.** Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/electricdss/>>. Acesso: 26 nov. 2015.
- [12] LEUVEN EMTP CENTER (LEC). **Alternative Transient Program Rule Book.** 1987.
- [13] MILANO, F. **Power System Analisys Toolbox: Documentation for PSAT version 2.0.0.** 2006. 238p.
- [14] ZIMMERMAN, R. D.; MUTILLO-SÁNCHEZ C. E.. **MATPOWER 5.1: User's Manual.** 2015. 168p.

- [15] DUGAN R. C.. **Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)**. 2013. 180p.
- [16] WXWIDGETS. **wxWidgets: Cross-Platform GUI Library**. Disponível em <<http://www.wxwidgets.org/>>. Acesso: 20 out. 2015.
- [17] GUIMARÃES, G. C.. **Manual do TransUFU: Programa de Análise de Estabilidade Transitória da UFU**, Universidade Federal de Uberlândia, 2000.
- [18] FREE SOFTWARE FUNDATION. **GNU General Public License, version 2**. Disponível em: <<http://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>>. Acesso 27 nov. 2015.
- [19] ARRILLAGA, J.; WATSON N. R.. **Computer Modelling of Electrical Power System**. 2^a ed. London: John Wiley & Sons, 2001.
- [20] STEVENSON JR.; WILLIAN D.. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2^a ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [21] ANDERSON, P. M.. **Analysis of faulted power systems**. New York: IEEE Press, 1995.
- [22] MONTICELLI, A. J.. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- [23] ATKINSON, K. E.. **An introduction to numerical analysis**. 2^a ed. Iowa: John Wiley & Sons, 1989.
- [24] FORTESCUE, C.L.. **Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks**. Trans. AIEE, v.37, p.1027-1140, 1918.
- [25] PAPATHANASSIOU, S. A.. **Modeling Transformers with Off-Nominal Ratios for Unbalanced Conditions**. Power Engineering Review, IEEE, v.22, p.50-52, 2002.
- [26] KUNDUR P.. **Power System Stability and Control**. United States: McGraw-Hill Professional, 1994.
- [27] ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A.. **Power System Control and Stability**. 2^a ed. United States: Wiley-IEEE Press, 2003.
- [28] WEEDY, B. M.. **Electric Power Systems**. London: John Wiley and Sons, 1979.
- [29] CONCORDIA, C.. **Synchronous Machines. Theory and Performance**. New York: John Wiley and Sons, 1951.
- [30] KIMBARK, E. W.. **Power System Stability: Synchronous Machines**. New York: John Wiley and Sons, 1956. v.3.
- [31] GUIMARÃES G. C.. **Computer methods for transient stability analysis of isolated power generation system with special reference to prime mover and induction**

- motor modelling.** 1990. 281 f. Tese (Doctor of Philosophy) – Department of Engineering, University of Aberdeen.
- [32] STROUSTRUP, B.. **The C++ Programming Language.** 3^a ed. New Jersey: Addison-Wesley, 1997.
- [33] SMART, J.; HOCK, K.. **Cross-Platform GUI Programming with wxWidgets.** United States: Prentice Hall PTR, 2006.
- [34] INTERNATIONAL STANDARD. **ISO/IEC 14882: Information technology – Programming languages – C++.** Geneva, 2014.
- [35] DOXYGEN. **Doxxygen: Generate documentation from source.** Disponível em <<http://www.doxygen.org/>>. Acesso: 06 nov. 2015.
- [36] KALICINSKI, M. **RapidXML.** Disponível em <<http://rapidxml.sourceforge.net/>>. Acesso 07 nov. 2015.
- [37] CEPEL. **ANAREDE, versão 10.00.02.** Licença acadêmica. Rio de Janeiro, 2015.
- [38] CEPEL. **ANAFAS, versão 6.5.1.** Licença acadêmica. Rio de Janeiro, 2014.
- [39] TAMASHIRO, M. A.; PERES, L. M; PICCINI A. R.; RESENDE J. O. GUIMARÃES G. C.. **Avaliação de Programas Gratuitos para Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas Elétricos de Potência.** V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Foz do Iguaçu, 2014.
- [40] CEPEL. **Programa ANAREDE - Análise de Redes Elétricas: Conheça o Programa.** Disponível em <<http://www.anarede.cepel.br/cprog.html>>. Acesso: 13 nov. 2015.
- [41] CEPEL. **Programa de Análise de Redes: Manual do Usuário.** Rio de Janeiro, 2015. 344p.
- [42] CEPEL. **Programa de Análise de Faltas simultâneas: Manual do Usuário.** Rio de Janeiro, 2014. 175p.
- [43] CHRISTIE, R. D. **Power System Test Case Archive.** Disponível em <<https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Acesso: 13 nov. 2015.

APÊNDICE A

DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES DE CURTOS-CIRCUITOS DESBALANCEADOS

Para aplicar o procedimento para o desenvolvimento das equações de curtos-circuitos desbalanceados mencionado na seção 2.3.3, deve-se primeiramente destacar algumas equações utilizadas nesse processo:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{cases} \dot{V}_0 = -\dot{Z}_0 \dot{I}_0 \\ \dot{V}_1 = \dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1 \\ \dot{V}_2 = -\dot{Z}_2 \dot{I}_2 \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

A.1 Faltas fase-terra

A.1.1 Fase A

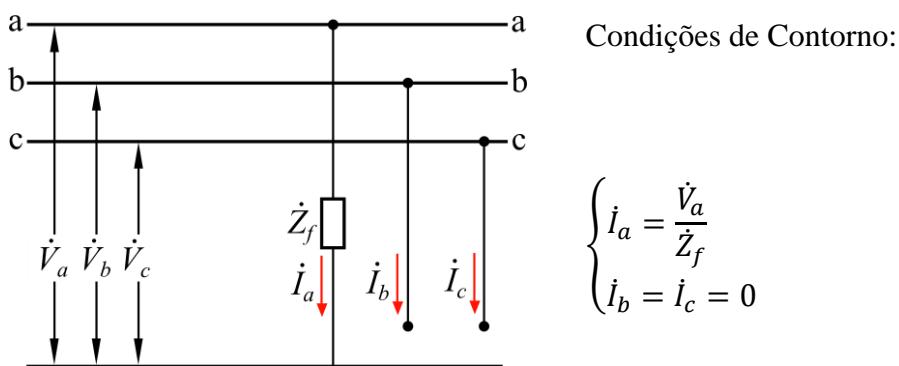


Figura A.1 – Ponto da falta F-T na fase A

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_a}{3} = \frac{\dot{V}_a}{3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.4})$$

Encontrando \dot{V}_a por meio da equação (A.2):

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (\text{A.5})$$

Utilizando (A.3) e (A.5) na equação (A.4):

$$\dot{I}_0 3\dot{Z}_f = \dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_0 - \dot{Z}_0 \dot{I}_0 - \dot{Z}_2 \dot{I}_0 \quad (\text{A.6})$$

Desenvolvendo a equação (A.6) e aplicando a igualdade das correntes de sequência presentes em (A.4), tem-se:

$$\boxed{\dot{I}_0 = \dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f}} \quad (\text{A.7})$$

A.1.2 Fase B

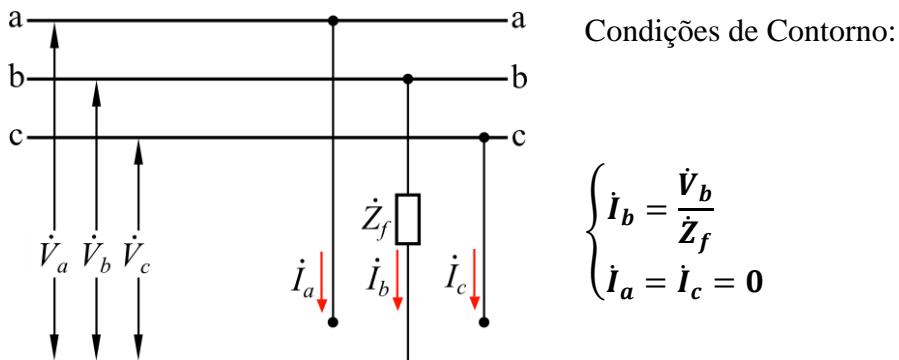


Figura A.2 – Ponto da falta F-T na fase B

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$\begin{cases} \dot{I}_0 = \dot{V}_b / 3\dot{Z}_f \\ \dot{I}_1 = a \dot{V}_b / 3\dot{Z}_f = a\dot{I}_0 \\ \dot{I}_2 = a^2 \dot{V}_b / 3\dot{Z}_f = a^2\dot{I}_0 \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Encontrando \dot{V}_b por meio da equação (A.2):

$$\dot{V}_b = \dot{V}_0 + a^2 \dot{V}_1 + a \dot{V}_2 \quad (\text{A.9})$$

Utilizando (A.3) e (A.9) em (A.8):

$$\dot{I}_0 3\dot{Z}_f = a^2 \dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_0 - \dot{Z}_0 \dot{I}_0 - \dot{Z}_2 \dot{I}_0 \quad (\text{A.10})$$

Desenvolvendo a equação (A.10) e aplicando a igualdade das correntes de sequência presentes em (A.8), tem-se:

$$\dot{I}_0 = \frac{a^2 \dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.11})$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.12})$$

$$\dot{I}_2 = \frac{a \dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.13})$$

A.1.3 Fase C

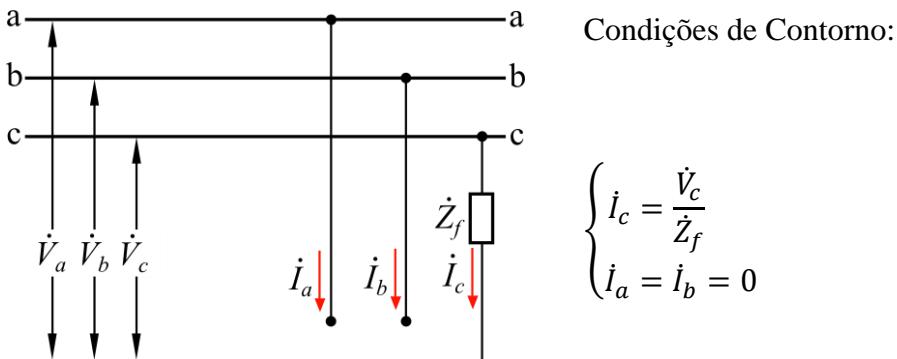


Figura A.3 – Ponto da falta F-T na fase C

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$\begin{cases} \dot{I}_0 = \dot{V}_c / 3\dot{Z}_f \\ \dot{I}_1 = a^2 \dot{V}_c / 3\dot{Z}_f = a^2 \dot{I}_0 \\ \dot{I}_2 = a \dot{V}_c / 3\dot{Z}_f = a \dot{I}_0 \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Encontrando \dot{V}_c por meio da equação (A.2):

$$\dot{V}_c = \dot{V}_0 + a^2 \dot{V}_1 + a \dot{V}_2 \quad (\text{A.15})$$

Utilizando (A.3) e (A.15) em (A.14):

$$\dot{I}_0 3\dot{Z}_f = a\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_0 - \dot{Z}_0 \dot{I}_0 - \dot{Z}_2 \dot{I}_0 \quad (\text{A.16})$$

Desenvolvendo a equação (A.16) e aplicando a igualdade das correntes de sequência presentes em (A.14), tem-se:

$$\dot{I}_0 = \frac{a^2 \dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.17})$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.18})$$

$$\dot{I}_2 = \frac{a\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.19})$$

A.2 Faltas fase-fase

A.2.1 Fases A e B

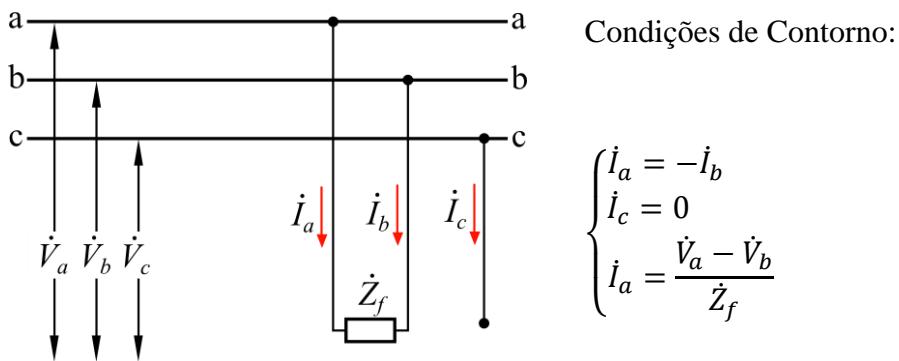


Figura A.4 – Ponto da falta F-F nas fases A e B

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$\dot{I}_0 = 0 \quad (\text{A.20})$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_a - \dot{V}_b}{3\dot{Z}_f} - a \frac{\dot{V}_a - \dot{V}_b}{3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.21})$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1(a + 1) \quad (\text{A.22})$$

Encontrando $\dot{V}_a - \dot{V}_b$ por meio da equação (A.2):

$$\dot{V}_a - \dot{V}_b = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 - a^2\dot{V}_1 - a\dot{V}_2 \quad (\text{A.23})$$

Utilizando (A.3) e (A.23) em (A.21):

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1\dot{I}_1 - \dot{Z}_2\dot{I}_1(a + 1) - a^2(\dot{E} - \dot{Z}_1\dot{I}_1) + a\dot{Z}_2\dot{I}_1(a + 1)}{3\dot{Z}_f} \\ &\quad - \frac{a\dot{E} - a\dot{Z}_1\dot{I}_1 - a\dot{Z}_2\dot{I}_1(a + 1) - (\dot{E} - \dot{Z}_1\dot{I}_1) + a^2\dot{Z}_2\dot{I}_1(a + 1)}{3\dot{Z}_f} \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

Desenvolvendo a equação (A.24) e aplicando a igualdade das correntes de sequência presentes em (A.22), tem-se:

$$\boxed{\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f}} \quad (\text{A.25})$$

$$\boxed{\dot{I}_2 = -a^2 \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f}} \quad (\text{A.26})$$

A.2.2 Fases B e C

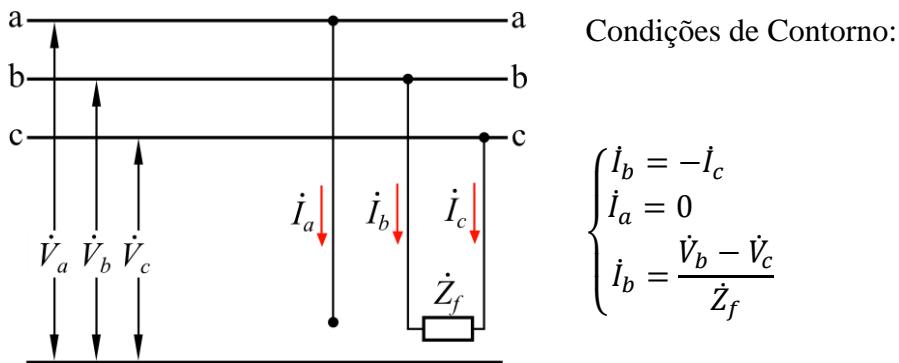


Figura A.5 – Ponto da falta F-F nas fases B e C

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$\dot{I}_0 = 0 \quad (\text{A.27})$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_b - \dot{V}_c}{3\dot{Z}_f} - a \frac{\dot{V}_b - \dot{V}_c}{3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.28})$$

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1 \quad (\text{A.29})$$

Encontrando $\dot{V}_b - \dot{V}_c$ por meio da equação (A.2):

$$\dot{V}_b - \dot{V}_c = \dot{V}_1(a^2 - a) + \dot{V}_2(a - a^2) \quad (\text{A.30})$$

Utilizando (A.3) e (A.30) em (A.28):

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{(\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1)(1 - a^2) - \dot{Z}_2 \dot{I}_1(1 - a^2)}{3\dot{Z}_f} \\ &\quad - \frac{(\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1)(a - 1) - \dot{Z}_2 \dot{I}_1(a - 1)}{3\dot{Z}_f} \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

Desenvolvendo a equação (A.31) e aplicando a igualdade das correntes de sequência presentes em (A.29), tem-se:

$$\boxed{\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f}} \quad (\text{A.32})$$

$$\boxed{\dot{I}_2 = -\frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f}} \quad (\text{A.33})$$

A.2.3 Fases C e A

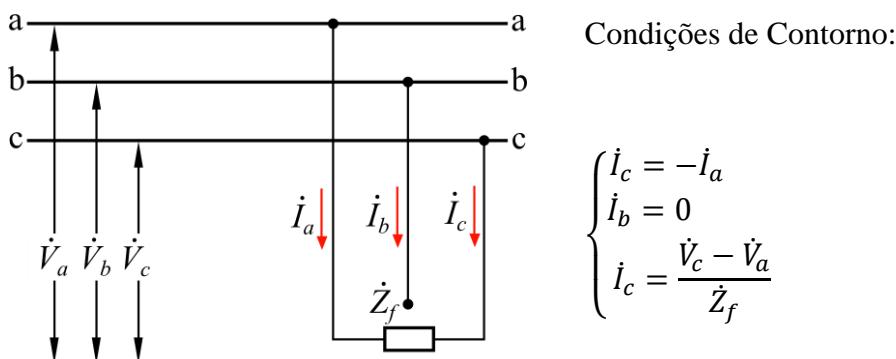


Figura A.6 – Ponto da falta F-F nas fases C e A

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$\dot{I}_0 = 0 \quad (\text{A.34})$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_c - \dot{V}_a}{3\dot{Z}_f} - a \frac{\dot{V}_c - \dot{V}_a}{3\dot{Z}_f} \quad (\text{A.35})$$

$$\dot{I}_2 = -a\dot{I}_1 \quad (\text{A.36})$$

Encontrando $\dot{V}_c - \dot{V}_a$ por meio da equação (A.2):

$$\dot{V}_c - \dot{V}_a = \dot{V}_1(a - 1) + \dot{V}_2(a^2 - 1) \quad (\text{A.37})$$

Utilizando (A.3) e (A.37) em (A.35):

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = & -\frac{(\dot{E} - \dot{Z}_1\dot{I}_1)(a - 1) - \dot{Z}_2\dot{I}_1(1 - a)}{3\dot{Z}_f} \\ & + \frac{(\dot{E} - \dot{Z}_1\dot{I}_1)(1 - a^2) - \dot{Z}_2\dot{I}_1(a^2 - 1)}{3\dot{Z}_f} \end{aligned} \quad (\text{A.38})$$

Desenvolvendo a equação (A.38) e aplicando a igualdade das correntes de sequência presentes em (A.36), tem-se:

$$\boxed{\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f}} \quad (\text{A.39})$$

$$\boxed{\dot{I}_2 = -a \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_f}} \quad (\text{A.40})$$

A.3 Faltas fase-fase-terra

A.3.1 Fases A e B

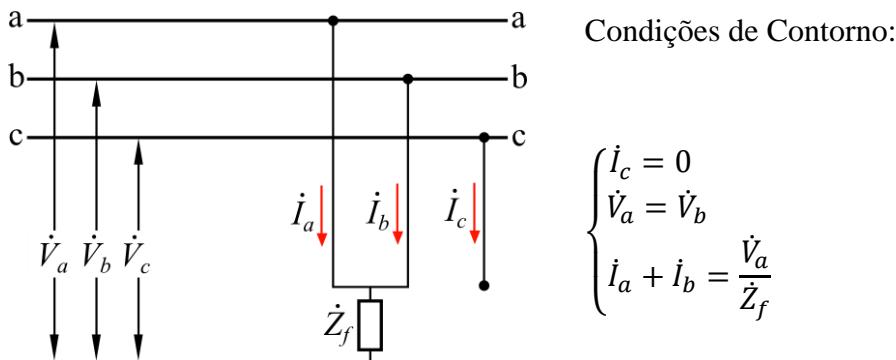


Figura A.7 – Ponto da falta F-F-T nas fases A e B

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b = \frac{\dot{V}_a}{\dot{Z}_f} \quad (\text{A.41})$$

Empregando as condições de contorno na equação (A.2):

$$\dot{V}_a = \dot{V}_b \rightarrow \dot{V}_2 = a^2 \dot{V}_1 \quad (\text{A.42})$$

Extraindo \dot{V}_a da equação (A.2):

$$\dot{V}_a = \dot{V}_0 + \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (\text{A.43})$$

Utilizando (A.3), (A.42) e (A.43) em (A.41):

$$\boxed{\dot{I}_0 = -a \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{3\dot{Z}_f + \dot{Z}_0}} \quad (\text{A.44})$$

Desenvolvendo (A.42):

$$\boxed{\dot{I}_2 = -a^2 \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{Z}_2}} \quad (\text{A.45})$$

Para encontrar \dot{I}_1 deve-se utilizar a condição de contorno $\dot{I}_c = 0$ e aplicar as equações (A.44) e (A.45):

$$\dot{I}_0 + a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2 = 0 \rightarrow a\dot{I}_1 - a\frac{\dot{E} - \dot{Z}_1\dot{I}_1}{3\dot{Z}_f + \dot{Z}_0} - a\frac{\dot{E} - \dot{Z}_2\dot{I}_1}{\dot{Z}_2} = 0 \quad (\text{A.46})$$

Desenvolvendo a equação (A.46), tem-se:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_2\dot{Z}_f + \dot{Z}_2\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_1\dot{Z}_f + \dot{Z}_1\dot{Z}_0} \quad (\text{A.47})$$

A.3.2 Fases B e C

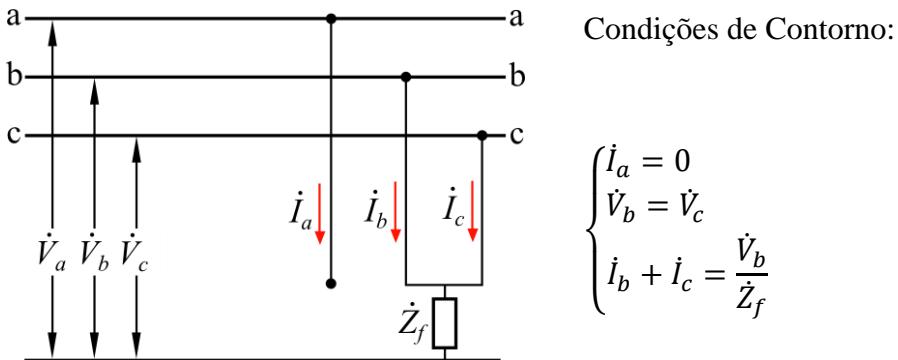


Figura A.8 – Ponto da falta F-F-T nas fases B e C

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_b + \dot{I}_c = \frac{\dot{V}_b}{\dot{Z}_f} \quad (\text{A.48})$$

Empregando as condições de contorno na equação (A.2):

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c \rightarrow \dot{V}_2 = \dot{V}_1 \quad (\text{A.49})$$

Extraindo \dot{V}_b da equação (A.2):

$$\dot{V}_b = \dot{V}_0 + a^2\dot{V}_1 + a\dot{V}_2 \quad (\text{A.50})$$

Utilizando (A.3), (A.49) e (A.50) em (A.48):

$$\boxed{\dot{I}_0 = -\frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{3\dot{Z}_f + \dot{Z}_0}} \quad (\text{A.51})$$

Desenvolvendo (A.49):

$$\boxed{\dot{I}_2 = -\frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{Z}_2}} \quad (\text{A.52})$$

Para encontrar \dot{I}_1 deve-se utilizar a condição de contorno $\dot{I}_a = 0$ e aplicar as equações (A.51) e (A.52):

$$\dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 0 \rightarrow \dot{I}_1 - \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{3\dot{Z}_f + \dot{Z}_0} - \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{Z}_2} = 0 \quad (\text{A.53})$$

Desenvolvendo a equação (A.53), tem-se:

$$\boxed{\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_2\dot{Z}_f + \dot{Z}_2\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_1\dot{Z}_f + \dot{Z}_1\dot{Z}_0}} \quad (\text{A.54})$$

A.3.3 Fases C e A

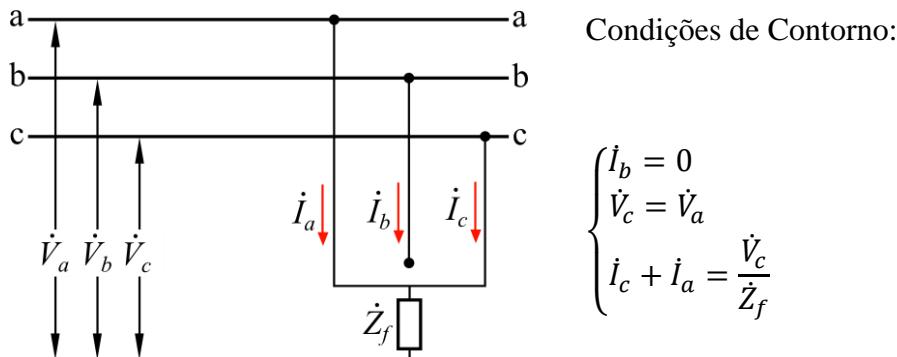


Figura A.9 – Ponto de falta F-F-T nas fases C e A

Utilizando as condições de contorno na equação (A.1):

$$3\dot{I}_0 = \dot{I}_c + \dot{I}_a = \frac{\dot{V}_c}{\dot{Z}_f} \quad (\text{A.55})$$

Empregando as condições de contorno na equação (A.2):

$$\dot{V}_c = \dot{V}_a \rightarrow \dot{V}_2 = a\dot{V}_1 \quad (\text{A.56})$$

Extraindo \dot{V}_c da equação (A.2):

$$\dot{V}_c = \dot{V}_0 + a\dot{V}_1 + a^2\dot{V}_2 \quad (\text{A.57})$$

Utilizando (A.3), (A.56) e (A.57) em (A.55):

$$\boxed{\dot{I}_0 = -a^2 \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{3\dot{Z}_f + \dot{Z}_0}} \quad (\text{A.58})$$

Desenvolvendo (A.56):

$$\boxed{\dot{I}_2 = -a \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{Z}_2}} \quad (\text{A.59})$$

Para encontrar \dot{I}_1 deve-se utilizar a condição de contorno $\dot{I}_a = 0$ e aplicar as equações (A.58) e (A.59):

$$\dot{I}_0 + a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 = 0 \rightarrow a^2\dot{I}_1 - a^2 \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{3\dot{Z}_f + \dot{Z}_0} - a^2 \frac{\dot{E} - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{Z}_2} = 0 \quad (\text{A.60})$$

Desenvolvendo a equação (A.53), tem-se:

$$\boxed{\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}(\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_f)}{\dot{Z}_1\dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_2\dot{Z}_f + \dot{Z}_2\dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_1\dot{Z}_f + \dot{Z}_1\dot{Z}_0}} \quad (\text{A.61})$$

APÊNDICE B

SISTEMA TESTE DE 118 BARRAS

Nesse apêndice são apresentados os dados do sistema teste do IEEE de 118 barras presentes em [43], além dos resultados do cálculo de fluxo de carga e curto-círcuito realizados pelo PSP-UFU.

B.1 Dados de entrada

B.1.1 Dados de barras

Tabela B.1 – Dados de barras do sistema teste de 118 barras.

Fonte: CHRISTIE, R. D. [43].

Nome	Tipo	Tensão desejada	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)	B shunt
Barra 1	PV	0,955	0,0	-	51,0	27,0	0,00
Barra 2	PQ	-	0,0	0,0	20,0	9,0	0,00
Barra 3	PQ	-	0,0	0,0	39,0	10,0	0,00
Barra 4	PV	0,998	-9,0	-	30,0	12,0	0,00
Barra 5	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,40
Barra 6	PV	0,990	0,0	-	52,0	22,0	0,00
Barra 7	PQ	-	0,0	0,0	19,0	2,0	0,00
Barra 8	PV	1,015	-28,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 9	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 10	PV	1,050	450,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 11	PQ	-	0,0	0,0	70,0	23,0	0,00
Barra 12	PV	0,990	85,0	-	47,0	10,0	0,00
Barra 13	PQ	-	0,0	0,0	34,0	16,0	0,00
Barra 14	PQ	-	0,0	0,0	14,0	1,0	0,00
Barra 15	PV	0,970	0,0	-	90,0	30,0	0,00
Barra 16	PQ	-	0,0	0,0	25,0	10,0	0,00
Barra 17	PQ	-	0,0	0,0	11,0	3,0	0,00
Barra 18	PV	0,973	0,0	-	60,0	34,0	0,00
Barra 19	PV	0,962	0,0	-	45,0	25,0	0,00
Barra 20	PQ	-	0,0	0,0	18,0	3,0	0,00
Barra 21	PQ	-	0,0	0,0	14,0	8,0	0,00
Barra 22	PQ	-	0,0	0,0	10,0	5,0	0,00

Nome	Tipo	Tensão desejada	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	B shunt
Barra 23	PQ	-	0,0	0,0	7,0	3,0	0,00
Barra 24	PV	0,992	-13,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 25	PV	1,050	220,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 26	PV	1,015	314,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 27	PV	0,968	-9,0	-	62,0	13,0	0,00
Barra 28	PQ	-	0,0	0,0	17,0	7,0	0,00
Barra 29	PQ	-	0,0	0,0	24,0	4,0	0,00
Barra 30	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 31	PV	0,967	7,0	-	43,0	27,0	0,00
Barra 32	PV	0,963	0,0	-	59,0	23,0	0,00
Barra 33	PQ	-	0,0	0,0	23,0	9,0	0,00
Barra 34	PV	0,984	0,0	-	59,0	26,0	0,14
Barra 35	PQ	-	0,0	0,0	33,0	9,0	0,00
Barra 36	PV	0,980	0,0	-	31,0	17,0	0,00
Barra 37	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,25
Barra 38	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 39	PQ	-	0,0	0,0	27,0	11,0	0,00
Barra 40	PV	0,970	-46,0	-	20,0	23,0	0,00
Barra 41	PQ	-	0,0	0,0	37,0	10,0	0,00
Barra 42	PV	0,985	-59,0	-	37,0	23,0	0,00
Barra 43	PQ	-	0,0	0,0	18,0	7,0	0,00
Barra 44	PQ	-	0,0	0,0	16,0	8,0	0,10
Barra 45	PQ	-	0,0	0,0	53,0	22,0	0,10
Barra 46	PV	1,005	19,0	-	28,0	10,0	0,10
Barra 47	PQ	-	0,0	0,0	34,0	0,0	0,00
Barra 48	PQ	-	0,0	0,0	20,0	11,0	0,15
Barra 49	PV	1,025	204,0	-	87,0	30,0	0,00
Barra 50	PQ	-	0,0	0,0	17,0	4,0	0,00
Barra 51	PQ	-	0,0	0,0	17,0	8,0	0,00
Barra 52	PQ	-	0,0	0,0	18,0	5,0	0,00
Barra 53	PQ	-	0,0	0,0	23,0	11,0	0,00
Barra 54	PV	0,955	48,0	-	113,0	32,0	0,00
Barra 55	PV	0,952	0,0	-	63,0	22,0	0,00
Barra 56	PV	0,954	0,0	-	84,0	18,0	0,00
Barra 57	PQ	-	0,0	0,0	12,0	3,0	0,00
Barra 58	PQ	-	0,0	0,0	12,0	3,0	0,00
Barra 59	PV	0,985	155,0	-	277,0	113,0	0,00
Barra 60	PQ	-	0,0	0,0	78,0	3,0	0,00
Barra 61	PV	0,995	160,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 62	PV	0,998	0,0	-	77,0	14,0	0,00
Barra 63	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 64	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00

Nome	Tipo	Tensão desejada	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)	B shunt
Barra 65	PV	1,005	391,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 66	PV	1,050	392,0	-	39,0	18,0	0,00
Barra 67	PQ	-	0,0	0,0	28,0	7,0	0,00
Barra 68	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 69	Referência	1,035	-	-	0,0	0,0	0,00
Barra 70	PV	0,984	0,0	-	66,0	20,0	0,00
Barra 71	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 72	PV	0,980	-12,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 73	PV	0,991	-6,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 74	PV	0,958	0,0	-	68,0	27,0	0,12
Barra 75	PQ	-	0,0	0,0	47,0	11,0	0,00
Barra 76	PV	0,943	0,0	-	68,0	36,0	0,00
Barra 77	PV	1,006	0,0	-	61,0	28,0	0,00
Barra 78	PQ	-	0,0	0,0	71,0	26,0	0,00
Barra 79	PQ	-	0,0	0,0	39,0	32,0	0,20
Barra 80	PV	1,040	477,0	-	130,0	26,0	0,00
Barra 81	PQ	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Barra 82	PQ	-	0,0	0,0	54,0	27,0	0,20
Barra 83	PQ	-	0,0	0,0	20,0	10,0	0,10
Barra 84	PQ	-	0,0	0,0	11,0	7,0	0,00
Barra 85	PV	0,985	0,0	-	24,0	15,0	0,00
Barra 86	PQ	-	0,0	0,0	21,0	10,0	0,00
Barra 87	PV	1,015	4,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 88	PQ	-	0,0	0,0	48,0	10,0	0,00
Barra 89	PV	1,005	607,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 90	PV	0,985	-85,0	-	78,0	42,0	0,00
Barra 91	PV	0,980	-10,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 92	PV	0,990	0,0	-	65,0	10,0	0,00
Barra 93	PQ	-	0,0	0,0	12,0	7,0	0,00
Barra 94	PQ	-	0,0	0,0	30,0	16,0	0,00
Barra 95	PQ	-	0,0	0,0	42,0	31,0	0,00
Barra 96	PQ	-	0,0	0,0	38,0	15,0	0,00
Barra 97	PQ	-	0,0	0,0	15,0	9,0	0,00
Barra 98	PQ	-	0,0	0,0	34,0	8,0	0,00
Barra 99	PV	1,010	-42,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 100	PV	1,017	252,0	-	37,0	18,0	0,00
Barra 101	PQ	-	0,0	0,0	22,0	15,0	0,00
Barra 102	PQ	-	0,0	0,0	5,0	3,0	0,00
Barra 103	PV	1,010	40,0	-	23,0	16,0	0,00
Barra 104	PV	0,971	0,0	-	38,0	25,0	0,00
Barra 105	PV	0,965	0,0	-	31,0	26,0	0,20
Barra 106	PQ	-	0,0	0,0	43,0	16,0	0,00

Nome	Tipo	Tensão desejada	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)	B shunt
Barra 107	PV	0,952	-22,0	-	28,0	12,0	0,06
Barra 108	PQ	-	0,0	0,0	2,0	1,0	0,00
Barra 109	PQ	-	0,0	0,0	8,0	3,0	0,00
Barra 110	PV	0,973	0,0	-	39,0	30,0	0,06
Barra 111	PV	0,980	36,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 112	PV	0,975	-43,0	-	25,0	13,0	0,00
Barra 113	PV	0,993	-6,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 114	PQ	-	0,0	0,0	8,0	3,0	0,00
Barra 115	PQ	-	0,0	0,0	22,0	7,0	0,00
Barra 116	PV	1,005	-184,0	-	0,0	0,0	0,00
Barra 117	PQ	-	0,0	0,0	20,0	8,0	0,00
Barra 118	PQ	-	0,0	0,0	33,0	15,0	0,00

B.1.2 Dados de ramos

Tabela B.2 – Dados de ramos do sistema teste de 118 barras.
Fonte: CHRISTIE, R. D. [43].

De	Para	R (p.u.)	X _L (p.u.)	B (p.u.)	TAP
Barra 1	Barra 2	0,03030	0,09990	0,02540	-
Barra 1	Barra 3	0,01290	0,04240	0,01082	-
Barra 4	Barra 5	0,00176	0,00798	0,00210	-
Barra 3	Barra 5	0,02410	0,10800	0,02840	-
Barra 5	Barra 6	0,01190	0,05400	0,01426	-
Barra 6	Barra 7	0,00459	0,02080	0,00550	-
Barra 8	Barra 9	0,00244	0,03050	1,16200	-
Barra 8	Barra 5	0,00000	0,02670	0,00000	0,985
Barra 9	Barra 10	0,00258	0,03220	1,23000	-
Barra 4	Barra 11	0,02090	0,06880	0,01748	-
Barra 5	Barra 11	0,02030	0,06820	0,01738	-
Barra 11	Barra 12	0,00595	0,01960	0,00502	-
Barra 2	Barra 12	0,01870	0,06160	0,01572	-
Barra 3	Barra 12	0,04840	0,16000	0,04060	-
Barra 7	Barra 12	0,00862	0,03400	0,00874	-
Barra 11	Barra 13	0,02225	0,07310	0,01876	-
Barra 12	Barra 14	0,02150	0,07070	0,01816	-
Barra 13	Barra 15	0,07440	0,24440	0,06268	-
Barra 14	Barra 15	0,05950	0,19500	0,05020	-
Barra 12	Barra 16	0,02120	0,08340	0,02140	-
Barra 15	Barra 17	0,01320	0,04370	0,04440	-
Barra 16	Barra 17	0,04540	0,18010	0,04660	-

De	Para	R (p.u.)	X_L (p.u.)	B (p.u.)	TAP
Barra 17	Barra 18	0,01230	0,05050	0,01298	-
Barra 18	Barra 19	0,01119	0,04930	0,01142	-
Barra 19	Barra 20	0,02520	0,11700	0,02980	-
Barra 15	Barra 19	0,01200	0,03940	0,01010	-
Barra 20	Barra 21	0,01830	0,08490	0,02160	-
Barra 21	Barra 22	0,02090	0,09700	0,02460	-
Barra 22	Barra 23	0,03420	0,15900	0,04040	-
Barra 23	Barra 24	0,01350	0,04920	0,04980	-
Barra 23	Barra 25	0,01560	0,08000	0,08640	-
Barra 26	Barra 25	0,00000	0,03820	0,00000	0,960
Barra 25	Barra 27	0,03180	0,16300	0,17640	-
Barra 27	Barra 28	0,01913	0,08550	0,02160	-
Barra 28	Barra 29	0,02370	0,09430	0,02380	-
Barra 30	Barra 17	0,00000	0,03880	0,00000	0,960
Barra 8	Barra 30	0,00431	0,05040	0,51400	-
Barra 26	Barra 30	0,00799	0,08600	0,90800	-
Barra 17	Barra 31	0,04740	0,15630	0,03990	-
Barra 29	Barra 31	0,01080	0,03310	0,00830	-
Barra 23	Barra 32	0,03170	0,11530	0,11730	-
Barra 31	Barra 32	0,02980	0,09850	0,02510	-
Barra 27	Barra 32	0,02290	0,07550	0,01926	-
Barra 15	Barra 33	0,03800	0,12440	0,03194	-
Barra 19	Barra 34	0,07520	0,24700	0,06320	-
Barra 35	Barra 36	0,00224	0,01020	0,00268	-
Barra 35	Barra 37	0,01100	0,04970	0,01318	-
Barra 33	Barra 37	0,04150	0,14200	0,03660	-
Barra 34	Barra 36	0,00871	0,02680	0,00568	-
Barra 34	Barra 37	0,00256	0,00940	0,00984	-
Barra 38	Barra 37	0,00000	0,03750	0,00000	0,935
Barra 37	Barra 39	0,03210	0,10600	0,02700	-
Barra 37	Barra 40	0,05930	0,16800	0,04200	-
Barra 30	Barra 38	0,00464	0,05400	0,42200	-
Barra 39	Barra 40	0,01840	0,06050	0,01552	-
Barra 40	Barra 41	0,01450	0,04870	0,01222	-
Barra 40	Barra 42	0,05550	0,18300	0,04660	-
Barra 41	Barra 42	0,04100	0,13500	0,03440	-
Barra 43	Barra 44	0,06080	0,24540	0,06068	-
Barra 34	Barra 43	0,04130	0,16810	0,04226	-
Barra 44	Barra 45	0,02240	0,09010	0,02240	-
Barra 45	Barra 46	0,04000	0,13560	0,03320	-
Barra 46	Barra 47	0,03800	0,12700	0,03160	-
Barra 46	Barra 48	0,06010	0,18900	0,04720	-
Barra 47	Barra 49	0,01910	0,06250	0,01604	-
Barra 42	Barra 49	0,07150	0,32300	0,08600	-

De	Para	R (p.u.)	X_L (p.u.)	B (p.u.)	TAP
Barra 42	Barra 49	0,07150	0,32300	0,08600	-
Barra 45	Barra 49	0,06840	0,18600	0,04440	-
Barra 48	Barra 49	0,01790	0,05050	0,01258	-
Barra 49	Barra 50	0,02670	0,07520	0,01874	-
Barra 49	Barra 51	0,04860	0,13700	0,03420	-
Barra 51	Barra 52	0,02030	0,05880	0,01396	-
Barra 52	Barra 53	0,04050	0,16350	0,04058	-
Barra 53	Barra 54	0,02630	0,12200	0,03100	-
Barra 49	Barra 54	0,07300	0,28900	0,07380	-
Barra 49	Barra 54	0,08690	0,29100	0,07300	-
Barra 54	Barra 55	0,01690	0,07070	0,02020	-
Barra 54	Barra 56	0,00275	0,00955	0,00732	-
Barra 55	Barra 56	0,00488	0,01510	0,00374	-
Barra 56	Barra 57	0,03430	0,09660	0,02420	-
Barra 50	Barra 57	0,04740	0,13400	0,03320	-
Barra 56	Barra 58	0,03430	0,09660	0,02420	-
Barra 51	Barra 58	0,02550	0,07190	0,01788	-
Barra 54	Barra 59	0,05030	0,22930	0,05980	-
Barra 56	Barra 59	0,08250	0,25100	0,05690	-
Barra 56	Barra 59	0,08030	0,23900	0,05360	-
Barra 55	Barra 59	0,04739	0,21580	0,05646	-
Barra 59	Barra 60	0,03170	0,14500	0,03760	-
Barra 59	Barra 61	0,03280	0,15000	0,03880	-
Barra 60	Barra 61	0,00264	0,01350	0,01456	-
Barra 60	Barra 62	0,01230	0,05610	0,01468	-
Barra 61	Barra 62	0,00824	0,03760	0,00980	-
Barra 63	Barra 59	0,00000	0,03860	0,00000	0,960
Barra 63	Barra 64	0,00172	0,02000	0,21600	-
Barra 64	Barra 61	0,00000	0,02680	0,00000	0,985
Barra 38	Barra 65	0,00901	0,09860	1,04600	-
Barra 64	Barra 65	0,00269	0,03020	0,38000	-
Barra 49	Barra 66	0,01800	0,09190	0,02480	-
Barra 49	Barra 66	0,01800	0,09190	0,02480	-
Barra 62	Barra 66	0,04820	0,21800	0,05780	-
Barra 62	Barra 67	0,02580	0,11700	0,03100	-
Barra 65	Barra 66	0,00000	0,03700	0,00000	0,935
Barra 66	Barra 67	0,02240	0,10150	0,02682	-
Barra 65	Barra 68	0,00138	0,01600	0,63800	-
Barra 47	Barra 69	0,08440	0,27780	0,07092	-
Barra 49	Barra 69	0,09850	0,32400	0,08280	-
Barra 68	Barra 69	0,00000	0,03700	0,00000	0,935
Barra 69	Barra 70	0,03000	0,12700	0,12200	-
Barra 24	Barra 70	0,00221	0,41150	0,10198	-
Barra 70	Barra 71	0,00882	0,03550	0,00878	-

De	Para	R (p.u.)	X_L (p.u.)	B (p.u.)	TAP
Barra 24	Barra 72	0,04880	0,19600	0,04880	-
Barra 71	Barra 72	0,04460	0,18000	0,04444	-
Barra 71	Barra 73	0,00866	0,04540	0,01178	-
Barra 70	Barra 74	0,04010	0,13230	0,03368	-
Barra 70	Barra 75	0,04280	0,14100	0,03600	-
Barra 69	Barra 75	0,04050	0,12200	0,12400	-
Barra 74	Barra 75	0,01230	0,04060	0,01034	-
Barra 76	Barra 77	0,04440	0,14800	0,03680	-
Barra 69	Barra 77	0,03090	0,10100	0,10380	-
Barra 75	Barra 77	0,06010	0,19990	0,04978	-
Barra 77	Barra 78	0,00376	0,01240	0,01264	-
Barra 78	Barra 79	0,00546	0,02440	0,00648	-
Barra 77	Barra 80	0,01700	0,04850	0,04720	-
Barra 77	Barra 80	0,02940	0,10500	0,02280	-
Barra 79	Barra 80	0,01560	0,07040	0,01870	-
Barra 68	Barra 81	0,00175	0,02020	0,80800	-
Barra 81	Barra 80	0,00000	0,03700	0,00000	0,935
Barra 77	Barra 82	0,02980	0,08530	0,08174	-
Barra 82	Barra 83	0,01120	0,03665	0,03796	-
Barra 83	Barra 84	0,06250	0,13200	0,02580	-
Barra 83	Barra 85	0,04300	0,14800	0,03480	-
Barra 84	Barra 85	0,03020	0,06410	0,01234	-
Barra 85	Barra 86	0,03500	0,12300	0,02760	-
Barra 86	Barra 87	0,02828	0,20740	0,04450	-
Barra 85	Barra 88	0,02000	0,10200	0,02760	-
Barra 85	Barra 89	0,02390	0,17300	0,04700	-
Barra 88	Barra 89	0,01390	0,07120	0,01934	-
Barra 89	Barra 90	0,05180	0,18800	0,05280	-
Barra 89	Barra 90	0,02380	0,09970	0,10600	-
Barra 90	Barra 91	0,02540	0,08360	0,02140	-
Barra 89	Barra 92	0,00990	0,05050	0,05480	-
Barra 89	Barra 92	0,03930	0,15810	0,04140	-
Barra 91	Barra 92	0,03870	0,12720	0,03268	-
Barra 92	Barra 93	0,02580	0,08480	0,02180	-
Barra 92	Barra 94	0,04810	0,15800	0,04060	-
Barra 93	Barra 94	0,02230	0,07320	0,01876	-
Barra 94	Barra 95	0,01320	0,04340	0,01110	-
Barra 80	Barra 96	0,03560	0,18200	0,04940	-
Barra 82	Barra 96	0,01620	0,05300	0,05440	-
Barra 94	Barra 96	0,02690	0,08690	0,02300	-
Barra 80	Barra 97	0,01830	0,09340	0,02540	-
Barra 80	Barra 98	0,02380	0,10800	0,02860	-
Barra 80	Barra 99	0,04540	0,20600	0,05460	-
Barra 92	Barra 100	0,06480	0,29500	0,04720	-

De	Para	R (p.u.)	X_L (p.u.)	B (p.u.)	TAP
Barra 94	Barra 100	0,01780	0,05800	0,06040	-
Barra 95	Barra 96	0,01710	0,05470	0,01474	-
Barra 96	Barra 97	0,01730	0,08850	0,02400	-
Barra 98	Barra 100	0,03970	0,17900	0,04760	-
Barra 99	Barra 100	0,01800	0,08130	0,02160	-
Barra 100	Barra 101	0,02770	0,12620	0,03280	-
Barra 92	Barra 102	0,01230	0,05590	0,01464	-
Barra 101	Barra 102	0,02460	0,11200	0,02940	-
Barra 100	Barra 103	0,01600	0,05250	0,05360	-
Barra 100	Barra 104	0,04510	0,20400	0,05410	-
Barra 103	Barra 104	0,04660	0,15840	0,04070	-
Barra 103	Barra 105	0,05350	0,16250	0,04080	-
Barra 100	Barra 106	0,06050	0,22900	0,06200	-
Barra 104	Barra 105	0,00994	0,03780	0,00986	-
Barra 105	Barra 106	0,01400	0,05470	0,01434	-
Barra 105	Barra 107	0,05300	0,18300	0,04720	-
Barra 105	Barra 108	0,02610	0,07030	0,01844	-
Barra 106	Barra 107	0,05300	0,18300	0,04720	-
Barra 108	Barra 109	0,01050	0,02880	0,00760	-
Barra 103	Barra 110	0,03906	0,18130	0,04610	-
Barra 109	Barra 110	0,02780	0,07620	0,02020	-
Barra 110	Barra 111	0,02200	0,07550	0,02000	-
Barra 110	Barra 112	0,02470	0,06400	0,06200	-
Barra 17	Barra 113	0,00913	0,03010	0,00768	-
Barra 32	Barra 113	0,06150	0,20300	0,05180	-
Barra 32	Barra 114	0,01350	0,06120	0,01628	-
Barra 27	Barra 115	0,01640	0,07410	0,01972	-
Barra 114	Barra 115	0,00230	0,01040	0,00276	-
Barra 68	Barra 116	0,00034	0,00405	0,16400	-
Barra 12	Barra 117	0,03290	0,14000	0,03580	-
Barra 75	Barra 118	0,01450	0,04810	0,01198	-

B.2 Fluxo de carga

B.2.1 Resultados de barras

Tabela B.3 – Resultados de barras do sistema teste de 118 barras calculados pelo PSP-UFU.
Fonte: Autor.

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 1	PV	0,95500	-19,04194	0,00000	-2,53493	51,0	27,0

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 2	PQ	0,97140	-18,50121	0,00000	0,00000	20,0	9,0
Barra 3	PQ	0,96744	-18,15382	0,00000	0,00000	39,0	10,0
Barra 4	PV	0,99800	-14,44444	-9,00000	-22,36935	30,0	12,0
Barra 5	PQ	1,00096	-13,97587	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 6	PV	0,99000	-16,72038	0,00000	17,83088	52,0	22,0
Barra 7	PQ	0,98933	-17,16544	0,00000	0,00000	19,0	2,0
Barra 8	PV	1,01500	-8,95366	-28,00000	66,16404	0,0	0,0
Barra 9	PQ	1,04292	-1,69955	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 10	PV	1,05000	5,88136	450,00000	-51,04211	0,0	0,0
Barra 11	PQ	0,98491	-17,00581	0,00000	0,00000	70,0	23,0
Barra 12	PV	0,99000	-17,52472	85,00000	92,31751	47,0	10,0
Barra 13	PQ	0,96816	-18,38156	0,00000	0,00000	34,0	16,0
Barra 14	PQ	0,98359	-18,24090	0,00000	0,00000	14,0	1,0
Barra 15	PV	0,97000	-18,53462	0,00000	7,05394	90,0	30,0
Barra 16	PQ	0,98393	-17,82455	0,00000	0,00000	25,0	10,0
Barra 17	PQ	0,99520	-16,01322	0,00000	0,00000	11,0	3,0
Barra 18	PV	0,97300	-18,22716	0,00000	28,20813	60,0	34,0
Barra 19	PV	0,96200	-18,69467	0,00000	-14,28198	45,0	25,0
Barra 20	PQ	0,95695	-17,82307	0,00000	0,00000	18,0	3,0
Barra 21	PQ	0,95774	-16,23960	0,00000	0,00000	14,0	8,0
Barra 22	PQ	0,96904	-13,68996	0,00000	0,00000	10,0	5,0
Barra 23	PQ	0,99948	-8,77918	0,00000	0,00000	7,0	3,0
Barra 24	PV	0,99200	-8,92605	-13,00000	-13,39090	0,0	0,0
Barra 25	PV	1,05000	-1,83919	220,00000	50,02692	0,0	0,0
Barra 26	PV	1,01500	-0,05730	314,00000	9,58309	0,0	0,0
Barra 27	PV	0,96800	-14,41282	-9,00000	3,97747	62,0	13,0
Barra 28	PQ	0,96157	-16,13709	0,00000	0,00000	17,0	7,0
Barra 29	PQ	0,96322	-17,12909	0,00000	0,00000	24,0	4,0
Barra 30	PQ	0,98578	-10,97029	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 31	PV	0,96700	-17,01210	7,00000	32,51521	43,0	27,0
Barra 32	PV	0,96300	-14,95685	0,00000	-16,30578	59,0	23,0
Barra 33	PQ	0,97082	-19,15396	0,00000	0,00000	23,0	9,0
Barra 34	PV	0,98400	-18,49852	0,00000	-18,31258	59,0	26,0
Barra 35	PQ	0,98041	-18,95418	0,00000	0,00000	33,0	9,0
Barra 36	PV	0,98000	-18,95429	0,00000	8,11811	31,0	17,0
Barra 37	PQ	0,99042	-18,03953	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 38	PQ	0,96299	-12,89171	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 39	PQ	0,96987	-21,43228	0,00000	0,00000	27,0	11,0
Barra 40	PV	0,97000	-22,51435	-46,00000	28,73723	20,0	23,0
Barra 41	PQ	0,96683	-22,95768	0,00000	0,00000	37,0	10,0
Barra 42	PV	0,98500	-21,35462	-59,00000	41,03702	37,0	23,0
Barra 43	PQ	0,97712	-18,54774	0,00000	0,00000	18,0	7,0

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 44	PQ	0,98443	-16,06213	0,00000	0,00000	16,0	8,0
Barra 45	PQ	0,98638	-14,23184	0,00000	0,00000	53,0	22,0
Barra 46	PV	1,00500	-11,42796	19,00000	-5,02493	28,0	10,0
Barra 47	PQ	1,01705	-9,20394	0,00000	0,00000	34,0	0,0
Barra 48	PQ	1,02063	-9,98499	0,00000	0,00000	20,0	11,0
Barra 49	PV	1,02500	-8,98183	204,00000	115,86497	87,0	30,0
Barra 50	PQ	1,00108	-11,02051	0,00000	0,00000	17,0	4,0
Barra 51	PQ	0,96688	-13,63908	0,00000	0,00000	17,0	8,0
Barra 52	PQ	0,95682	-14,59239	0,00000	0,00000	18,0	5,0
Barra 53	PQ	0,94598	-15,56702	0,00000	0,00000	23,0	11,0
Barra 54	PV	0,95500	-14,65507	48,00000	3,90057	113,0	32,0
Barra 55	PV	0,95200	-14,94488	0,00000	4,66410	63,0	22,0
Barra 56	PV	0,95400	-14,75824	0,00000	-2,28587	84,0	18,0
Barra 57	PQ	0,97058	-13,55399	0,00000	0,00000	12,0	3,0
Barra 58	PQ	0,95904	-14,41071	0,00000	0,00000	12,0	3,0
Barra 59	PV	0,98500	-10,55440	155,00000	76,83410	277,0	113,0
Barra 60	PQ	0,99316	-6,77266	0,00000	0,00000	78,0	3,0
Barra 61	PV	0,99500	-5,88129	160,00000	-40,39399	0,0	0,0
Barra 62	PV	0,99800	-6,49797	0,00000	1,25825	77,0	14,0
Barra 63	PQ	0,96874	-7,17536	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 64	PQ	0,98374	-5,40936	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 65	PV	1,00500	-2,28348	391,00000	79,79576	0,0	0,0
Barra 66	PV	1,05000	-2,44425	392,00000	-1,95788	39,0	18,0
Barra 67	PQ	1,01968	-5,08391	0,00000	0,00000	28,0	7,0
Barra 68	PQ	1,00325	-2,40354	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 69	Referência	1,03500	0,00000	513,65651	-82,38461	0,0	0,0
Barra 70	PV	0,98400	-7,36708	0,00000	8,13438	66,0	20,0
Barra 71	PQ	0,98684	-7,78285	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 72	PV	0,98000	-8,90534	-12,00000	-11,12528	0,0	0,0
Barra 73	PV	0,99100	-7,99435	-6,00000	9,65382	0,0	0,0
Barra 74	PV	0,95800	-8,32263	0,00000	-5,63408	68,0	27,0
Barra 75	PQ	0,96734	-7,06299	0,00000	0,00000	47,0	11,0
Barra 76	PV	0,94300	-8,19666	0,00000	5,26209	68,0	36,0
Barra 77	PV	1,00600	-3,24808	0,00000	12,15832	61,0	28,0
Barra 78	PQ	1,00342	-3,55220	0,00000	0,00000	71,0	26,0
Barra 79	PQ	1,00922	-3,25356	0,00000	0,00000	39,0	32,0
Barra 80	PV	1,04000	-1,00944	477,00000	105,48074	130,0	26,0
Barra 81	PQ	0,99681	-1,85578	0,00000	0,00000	0,0	0,0
Barra 82	PQ	0,98855	-2,72733	0,00000	0,00000	54,0	27,0
Barra 83	PQ	0,98438	-1,53515	0,00000	0,00000	20,0	10,0
Barra 84	PQ	0,97970	1,00118	0,00000	0,00000	11,0	7,0
Barra 85	PV	0,98500	2,55647	0,00000	-5,60659	24,0	15,0

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 86	PQ	0,98669	1,18702	0,00000	0,00000	21,0	10,0
Barra 87	PV	1,01500	1,44623	4,00000	11,02161	0,0	0,0
Barra 88	PQ	0,98745	5,69116	0,00000	0,00000	48,0	10,0
Barra 89	PV	1,00500	9,74913	607,00000	-5,90506	0,0	0,0
Barra 90	PV	0,98500	3,33915	-85,00000	59,30841	78,0	42,0
Barra 91	PV	0,98000	3,35141	-10,00000	-13,08803	0,0	0,0
Barra 92	PV	0,99000	3,88156	0,00000	-15,42611	65,0	10,0
Barra 93	PQ	0,98543	0,84984	0,00000	0,00000	12,0	7,0
Barra 94	PQ	0,98983	-1,31706	0,00000	0,00000	30,0	16,0
Barra 95	PQ	0,98033	-2,28970	0,00000	0,00000	42,0	31,0
Barra 96	PQ	0,99228	-2,45667	0,00000	0,00000	38,0	15,0
Barra 97	PQ	1,01117	-2,08354	0,00000	0,00000	15,0	9,0
Barra 98	PQ	1,02351	-2,56609	0,00000	0,00000	34,0	8,0
Barra 99	PV	1,01000	-2,93260	-42,00000	-17,53561	0,0	0,0
Barra 100	PV	1,01700	-1,94047	252,00000	94,00099	37,0	18,0
Barra 101	PQ	0,99142	-0,35240	0,00000	0,00000	22,0	15,0
Barra 102	PQ	0,98913	2,36573	0,00000	0,00000	5,0	3,0
Barra 103	PV	1,01000	-5,68156	40,00000	75,42232	23,0	16,0
Barra 104	PV	0,97100	-8,25154	0,00000	2,38823	38,0	25,0
Barra 105	PV	0,96500	-9,35574	0,00000	-18,33455	31,0	26,0
Barra 106	PQ	0,96115	-9,61590	0,00000	0,00000	43,0	16,0
Barra 107	PV	0,95200	-12,41664	-22,00000	6,55782	28,0	12,0
Barra 108	PQ	0,96621	-10,55582	0,00000	0,00000	2,0	1,0
Barra 109	PQ	0,96703	-11,00841	0,00000	0,00000	8,0	3,0
Barra 110	PV	0,97300	-11,85527	0,00000	0,28081	39,0	30,0
Barra 111	PV	0,98000	-10,21019	36,00000	-1,84383	0,0	0,0
Barra 112	PV	0,97500	-14,95449	-43,00000	41,51169	25,0	13,0
Barra 113	PV	0,99300	-16,01525	-6,00000	6,37658	0,0	0,0
Barra 114	PQ	0,96009	-15,29097	0,00000	0,00000	8,0	3,0
Barra 115	PQ	0,96002	-15,29924	0,00000	0,00000	22,0	7,0
Barra 116	PV	1,00500	-2,83852	-184,00000	51,31889	0,0	0,0
Barra 117	PQ	0,97382	-19,06572	0,00000	0,00000	20,0	8,0
Barra 118	PQ	0,94944	-8,05237	0,00000	0,00000	33,0	15,0

Tabela B.4 – Resultados de barras do sistema teste de 118 barras calculados pelo ANAREDE.

Fonte: Autor.

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 1	PV	0,9550	-19,0451	0,0000	-2,5350	51,0	27,0
Barra 2	PQ	0,9714	-18,5008	0,0000	0,0000	20,0	9,0
Barra 3	PQ	0,9674	-18,1570	0,0000	0,0000	39,0	10,0

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 4	PV	0,9980	-14,4443	-9,0000	-22,3700	30,0	12,0
Barra 5	PQ	1,0010	-13,9744	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 6	PV	0,9900	-16,7189	0,0000	17,8310	52,0	22,0
Barra 7	PQ	0,9893	-17,1658	0,0000	0,0000	19,0	2,0
Barra 8	PV	1,0150	-8,9553	-28,0000	66,1640	0,0	0,0
Barra 9	PQ	1,0430	-1,7017	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 10	PV	1,0500	5,8803	450,0000	-51,0400	0,0	0,0
Barra 11	PQ	0,9849	-17,0054	0,0000	0,0000	70,0	23,0
Barra 12	PV	0,9900	-17,5268	85,0000	92,3180	47,0	10,0
Barra 13	PQ	0,9682	-18,3805	0,0000	0,0000	34,0	16,0
Barra 14	PQ	0,9836	-18,2430	0,0000	0,0000	14,0	1,0
Barra 15	PV	0,9700	-18,5352	0,0000	7,0541	90,0	30,0
Barra 16	PQ	0,9839	-17,8247	0,0000	0,0000	25,0	10,0
Barra 17	PQ	0,9952	-16,0142	0,0000	0,0000	11,0	3,0
Barra 18	PV	0,9730	-18,2258	0,0000	28,2080	60,0	34,0
Barra 19	PV	0,9620	-18,6956	0,0000	-14,2800	45,0	25,0
Barra 20	PQ	0,9569	-17,8247	0,0000	0,0000	18,0	3,0
Barra 21	PQ	0,9577	-16,2376	0,0000	0,0000	14,0	8,0
Barra 22	PQ	0,9690	-13,6880	0,0000	0,0000	10,0	5,0
Barra 23	PQ	0,9995	-8,7777	0,0000	0,0000	7,0	3,0
Barra 24	PV	0,9920	-8,9267	-13,0000	-13,3900	0,0	0,0
Barra 25	PV	1,0500	-1,8392	220,0000	50,0270	0,0	0,0
Barra 26	PV	1,0150	-0,0573	314,0000	9,5832	0,0	0,0
Barra 27	PV	0,9680	-14,4156	-9,0000	3,9777	62,0	13,0
Barra 28	PQ	0,9616	-16,1402	0,0000	0,0000	17,0	7,0
Barra 29	PQ	0,9632	-17,1314	0,0000	0,0000	24,0	4,0
Barra 30	PQ	0,9858	-10,9721	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 31	PV	0,9670	-17,0111	7,0000	32,5150	43,0	27,0
Barra 32	PV	0,9630	-14,9599	0,0000	-16,3100	59,0	23,0
Barra 33	PQ	0,9708	-19,1540	0,0000	0,0000	23,0	9,0
Barra 34	PV	0,9840	-18,5008	0,0000	-18,3100	59,0	26,0
Barra 35	PQ	0,9804	-18,9534	0,0000	0,0000	33,0	9,0
Barra 36	PV	0,9800	-18,9534	0,0000	8,1182	31,0	17,0
Barra 37	PQ	0,9904	-18,0424	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 38	PQ	0,9630	-12,8916	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 39	PQ	0,9699	-21,4344	0,0000	0,0000	27,0	11,0
Barra 40	PV	0,9700	-22,5172	-46,0000	28,7370	20,0	23,0
Barra 41	PQ	0,9668	-22,9584	0,0000	0,0000	37,0	10,0
Barra 42	PV	0,9850	-21,3541	-59,0000	41,0370	37,0	23,0
Barra 43	PQ	0,9771	-18,5466	0,0000	0,0000	18,0	7,0
Barra 44	PQ	0,9844	-16,0600	0,0000	0,0000	16,0	8,0
Barra 45	PQ	0,9864	-14,2323	0,0000	0,0000	53,0	22,0

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 46	PV	1,0050	-11,4305	19,0000	-5,0250	28,0	10,0
Barra 47	PQ	1,0170	-9,2017	0,0000	0,0000	34,0	0,0
Barra 48	PQ	1,0210	-9,9867	0,0000	0,0000	20,0	11,0
Barra 49	PV	1,0250	-8,9840	204,0000	115,8700	87,0	30,0
Barra 50	PQ	1,0010	-11,0180	0,0000	0,0000	17,0	4,0
Barra 51	PQ	0,9669	-13,6421	0,0000	0,0000	17,0	8,0
Barra 52	PQ	0,9568	-14,5932	0,0000	0,0000	18,0	5,0
Barra 53	PQ	0,9460	-15,5673	0,0000	0,0000	23,0	11,0
Barra 54	PV	0,9550	-14,6563	48,0000	3,9007	113,0	32,0
Barra 55	PV	0,9520	-14,9427	0,0000	4,6642	63,0	22,0
Barra 56	PV	0,9540	-14,7594	0,0000	-2,2860	84,0	18,0
Barra 57	PQ	0,9706	-13,5562	0,0000	0,0000	12,0	3,0
Barra 58	PQ	0,9590	-14,4099	0,0000	0,0000	12,0	3,0
Barra 59	PV	0,9850	-10,5539	155,0000	76,8340	277,0	113,0
Barra 60	PQ	0,9932	-6,7724	0,0000	0,0000	78,0	3,0
Barra 61	PV	0,9950	-5,8843	160,0000	-40,3900	0,0	0,0
Barra 62	PV	0,9980	-6,4973	0,0000	1,2583	77,0	14,0
Barra 63	PQ	0,9687	-7,1734	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 64	PQ	0,9837	-5,4087	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 65	PV	1,0050	-2,2861	391,0000	79,7970	0,0	0,0
Barra 66	PV	1,0500	-2,4465	392,0000	-1,9580	39,0	18,0
Barra 67	PQ	1,0200	-5,0821	0,0000	0,0000	28,0	7,0
Barra 68	PQ	1,0030	-2,4064	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 69	Referência	1,0350	0,0000	513,6700	-82,3900	0,0	0,0
Barra 70	PV	0,9840	-7,3682	0,0000	8,1349	66,0	20,0
Barra 71	PQ	0,9868	-7,7808	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 72	PV	0,9800	-8,9038	-12,0000	-11,1300	0,0	0,0
Barra 73	PV	0,9910	-7,9928	-6,0000	9,6538	0,0	0,0
Barra 74	PV	0,9580	-8,3251	0,0000	-5,6340	68,0	27,0
Barra 75	PQ	0,9673	-7,0646	0,0000	0,0000	47,0	11,0
Barra 76	PV	0,9430	-8,1990	0,0000	5,2621	68,0	36,0
Barra 77	PV	1,0060	-3,2487	0,0000	12,1580	61,0	28,0
Barra 78	PQ	1,0030	-3,5523	0,0000	0,0000	71,0	26,0
Barra 79	PQ	1,0090	-3,2544	0,0000	0,0000	39,0	32,0
Barra 80	PV	1,0400	-1,0084	477,0000	105,4800	130,0	26,0
Barra 81	PQ	0,9968	-1,8564	0,0000	0,0000	0,0	0,0
Barra 82	PQ	0,9885	-2,7273	0,0000	0,0000	54,0	27,0
Barra 83	PQ	0,9844	-1,5355	0,0000	0,0000	20,0	10,0
Barra 84	PQ	0,9797	1,0010	0,0000	0,0000	11,0	7,0
Barra 85	PV	0,9850	2,5565	0,0000	-5,6070	24,0	15,0
Barra 86	PQ	0,9867	1,1866	0,0000	0,0000	21,0	10,0
Barra 87	PV	1,0150	1,4461	4,0000	11,0220	0,0	0,0

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 88	PQ	0,9875	5,6912	0,0000	0,0000	48,0	10,0
Barra 89	PV	1,0050	9,7489	607,0000	-5,9050	0,0	0,0
Barra 90	PV	0,9850	3,3392	-85,0000	59,3080	78,0	42,0
Barra 91	PV	0,9800	3,3512	-10,0000	-13,0900	0,0	0,0
Barra 92	PV	0,9900	3,8812	0,0000	-15,4300	65,0	10,0
Barra 93	PQ	0,9854	0,8497	0,0000	0,0000	12,0	7,0
Barra 94	PQ	0,9898	-1,3178	0,0000	0,0000	30,0	16,0
Barra 95	PQ	0,9803	-2,2918	0,0000	0,0000	42,0	31,0
Barra 96	PQ	0,9923	-2,4580	0,0000	0,0000	38,0	15,0
Barra 97	PQ	1,0110	-2,0856	0,0000	0,0000	15,0	9,0
Barra 98	PQ	1,0240	-2,5669	0,0000	0,0000	34,0	8,0
Barra 99	PV	1,0100	-2,9335	-42,0000	-17,5400	0,0	0,0
Barra 100	PV	1,0170	-1,9423	252,0000	94,0010	37,0	18,0
Barra 101	PQ	0,9914	-0,3523	0,0000	0,0000	22,0	15,0
Barra 102	PQ	0,9891	2,3657	0,0000	0,0000	5,0	3,0
Barra 103	PV	1,0100	-5,6837	40,0000	75,4220	23,0	16,0
Barra 104	PV	0,9710	-8,2506	0,0000	2,3883	38,0	25,0
Barra 105	PV	0,9650	-9,3564	0,0000	-18,3300	31,0	26,0
Barra 106	PQ	0,9611	-9,6142	0,0000	0,0000	43,0	16,0
Barra 107	PV	0,9520	-12,4160	-22,0000	6,5578	28,0	12,0
Barra 108	PQ	0,9662	-10,5539	0,0000	0,0000	2,0	1,0
Barra 109	PQ	0,9670	-11,0065	0,0000	0,0000	8,0	3,0
Barra 110	PV	0,9730	-11,8545	0,0000	0,2808	39,0	30,0
Barra 111	PV	0,9800	-10,2101	36,0000	-1,8440	0,0	0,0
Barra 112	PV	0,9750	-14,9542	-43,0000	41,5120	25,0	13,0
Barra 113	PV	0,9930	-16,0142	-6,0000	6,3766	0,0	0,0
Barra 114	PQ	0,9601	-15,2922	0,0000	0,0000	8,0	3,0
Barra 115	PQ	0,9600	-15,2980	0,0000	0,0000	22,0	7,0
Barra 116	PV	1,0050	-0,0495	-184,0000	51,3190	0,0	0,0
Barra 117	PQ	0,9738	-0,3328	0,0000	0,0000	20,0	8,0
Barra 118	PQ	0,9494	-0,1405	0,0000	0,0000	33,0	15,0

Tabela B.5 – Divergência dos resultados de barras do sistema de 118 barras calculados pelos programas PSP-UFU e ANAREDE
Fonte: Autor.

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 1	PV	0,0000%	0,0167%	0,0000%	0,0027%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	PQ	0,0003%	0,0022%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 3	PQ	0,0044%	0,0177%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 4	PV	0,0000%	0,0012%	0,0000%	0,0029%	0,0000%	0,0000%
Barra 5	PQ	0,0039%	0,0103%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 6	PV	0,0000%	0,0088%	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	PQ	0,0028%	0,0022%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 8	PV	0,0000%	0,0186%	0,0000%	0,0001%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	PQ	0,0079%	0,1254%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 10	PV	0,0000%	0,0186%	0,0000%	0,0041%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	PQ	0,0005%	0,0025%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 12	PV	0,0000%	0,0118%	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Barra 13	PQ	0,0042%	0,0058%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 14	PQ	0,0009%	0,0114%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 15	PV	0,0000%	0,0030%	0,0000%	0,0023%	0,0000%	0,0000%
Barra 16	PQ	0,0034%	0,0009%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 17	PQ	0,0002%	0,0060%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 18	PV	0,0000%	0,0075%	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Barra 19	PV	0,0000%	0,0050%	0,0000%	0,0139%	0,0000%	0,0000%
Barra 20	PQ	0,0048%	0,0092%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 21	PQ	0,0044%	0,0122%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 22	PQ	0,0038%	0,0146%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 23	PQ	0,0025%	0,0167%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 24	PV	0,0000%	0,0071%	0,0000%	0,0067%	0,0000%	0,0000%
Barra 25	PV	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
Barra 26	PV	0,0000%	0,0056%	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0000%
Barra 27	PV	0,0000%	0,0194%	0,0000%	0,0058%	0,0000%	0,0000%
Barra 28	PQ	0,0033%	0,0194%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 29	PQ	0,0017%	0,0137%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 30	PQ	0,0019%	0,0169%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 31	PV	0,0000%	0,0058%	0,0000%	0,0006%	0,0000%	0,0000%
Barra 32	PV	0,0000%	0,0206%	0,0000%	0,0259%	0,0000%	0,0000%
Barra 33	PQ	0,0022%	0,0001%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 34	PV	0,0000%	0,0124%	0,0000%	0,0141%	0,0000%	0,0000%
Barra 35	PQ	0,0011%	0,0039%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 36	PV	0,0000%	0,0045%	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0000%
Barra 37	PQ	0,0022%	0,0161%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 38	PQ	0,0013%	0,0012%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 39	PQ	0,0029%	0,0097%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 40	PV	0,0000%	0,0128%	0,0000%	0,0008%	0,0000%	0,0000%
Barra 41	PQ	0,0033%	0,0032%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 42	PV	0,0000%	0,0023%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 43	PQ	0,0019%	0,0059%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 44	PQ	0,0033%	0,0132%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 45	PQ	0,0021%	0,0030%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 46	PV	0,0000%	0,0223%	0,0000%	0,0014%	0,0000%	0,0000%
Barra 47	PQ	0,0050%	0,0243%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 48	PQ	0,0359%	0,0167%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 49	PV	0,0000%	0,0239%	0,0000%	0,0043%	0,0000%	0,0000%
Barra 50	PQ	0,0083%	0,0230%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 51	PQ	0,0024%	0,0223%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 52	PQ	0,0019%	0,0058%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 53	PQ	0,0018%	0,0016%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 54	PV	0,0000%	0,0081%	0,0000%	0,0033%	0,0000%	0,0000%
Barra 55	PV	0,0000%	0,0143%	0,0000%	0,0021%	0,0000%	0,0000%
Barra 56	PV	0,0000%	0,0078%	0,0000%	0,0058%	0,0000%	0,0000%
Barra 57	PQ	0,0018%	0,0162%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 58	PQ	0,0041%	0,0057%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 59	PV	0,0000%	0,0049%	0,0000%	0,0001%	0,0000%	0,0000%
Barra 60	PQ	0,0044%	0,0044%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 61	PV	0,0000%	0,0508%	0,0000%	0,0099%	0,0000%	0,0000%
Barra 62	PV	0,0000%	0,0096%	0,0000%	0,0043%	0,0000%	0,0000%
Barra 63	PQ	0,0038%	0,0269%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 64	PQ	0,0039%	0,0117%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 65	PV	0,0000%	0,1148%	0,0000%	0,0016%	0,0000%	0,0000%
Barra 66	PV	0,0000%	0,0932%	0,0000%	0,0059%	0,0000%	0,0000%
Barra 67	PQ	0,0312%	0,0348%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 68	PQ	0,0249%	0,1200%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 69	Referência	0,0000%	0,0000%	0,0026%	0,0065%	0,0000%	0,0000%
Barra 70	PV	0,0000%	0,0158%	0,0000%	0,0064%	0,0000%	0,0000%
Barra 71	PQ	0,0044%	0,0267%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 72	PV	0,0000%	0,0177%	0,0000%	0,0424%	0,0000%	0,0000%
Barra 73	PV	0,0000%	0,0199%	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
Barra 74	PV	0,0000%	0,0294%	0,0000%	0,0014%	0,0000%	0,0000%
Barra 75	PQ	0,0036%	0,0223%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 76	PV	0,0000%	0,0289%	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
Barra 77	PV	0,0000%	0,0182%	0,0000%	0,0026%	0,0000%	0,0000%
Barra 78	PQ	0,0423%	0,0039%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 79	PQ	0,0221%	0,0258%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 80	PV	0,0000%	0,1030%	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Barra 81	PQ	0,0007%	0,0327%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 82	PQ	0,0046%	0,0019%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 83	PQ	0,0023%	0,0248%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 84	PQ	0,0004%	0,0220%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 85	PV	0,0000%	0,0027%	0,0000%	0,0072%	0,0000%	0,0000%
Barra 86	PQ	0,0009%	0,0358%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 87	PV	0,0000%	0,0061%	0,0000%	0,0036%	0,0000%	0,0000%
Barra 88	PQ	0,0048%	0,0005%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 89	PV	0,0000%	0,0026%	0,0000%	0,0010%	0,0000%	0,0000%

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
Barra 90	PV	0,0000%	0,0015%	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Barra 91	PV	0,0000%	0,0053%	0,0000%	0,0151%	0,0000%	0,0000%
Barra 92	PV	0,0000%	0,0088%	0,0000%	0,0252%	0,0000%	0,0000%
Barra 93	PQ	0,0033%	0,0168%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 94	PQ	0,0030%	0,0561%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 95	PQ	0,0033%	0,0928%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 96	PQ	0,0017%	0,0539%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 97	PQ	0,0164%	0,0973%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 98	PQ	0,0479%	0,0297%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 99	PV	0,0000%	0,0321%	0,0000%	0,0250%	0,0000%	0,0000%
Barra 100	PV	0,0000%	0,0955%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 101	PQ	0,0020%	0,0178%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 102	PQ	0,0031%	0,0005%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 103	PV	0,0000%	0,0384%	0,0000%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
Barra 104	PV	0,0000%	0,0115%	0,0000%	0,0029%	0,0000%	0,0000%
Barra 105	PV	0,0000%	0,0071%	0,0000%	0,0248%	0,0000%	0,0000%
Barra 106	PQ	0,0048%	0,0174%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 107	PV	0,0000%	0,0052%	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
Barra 108	PQ	0,0012%	0,0183%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 109	PQ	0,0027%	0,0172%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 110	PV	0,0000%	0,0065%	0,0000%	0,0057%	0,0000%	0,0000%
Barra 111	PV	0,0000%	0,0008%	0,0000%	0,0095%	0,0000%	0,0000%
Barra 112	PV	0,0000%	0,0019%	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Barra 113	PV	0,0000%	0,0067%	0,0000%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Barra 114	PQ	0,0007%	0,0083%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 115	PQ	0,0024%	0,0083%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 116	PV	0,0000%	0,0840%	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
Barra 117	PQ	0,0025%	0,0121%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 118	PQ	0,0041%	0,0287%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

B.2.2 Resultados de ramos

Tabela B.6 – Resultados de ramos do sistema teste de 118 barras calculados pelo PSP-UFU
Fonte: Autor.

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 1	Barra 2	-12,35446	-13,03394	Barra 2	Barra 1	12,45202	10,99923
Barra 1	Barra 3	-38,64524	-16,50100	Barra 3	Barra 1	38,89273	16,31468
Barra 100	Barra 101	-16,74301	22,89994	Barra 101	Barra 100	16,98011	-25,12794
Barra 100	Barra 103	121,75311	-22,14845	Barra 103	Barra 100	-119,40185	24,35776

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 100	Barra 104	56,18459	10,64700	Barra 104	Barra 100	-54,72929	-9,41242
Barra 100	Barra 106	60,36112	9,47599	Barra 106	Barra 100	-58,13581	-7,12303
Barra 101	Barra 102	-38,98009	10,12794	Barra 102	Barra 101	39,39389	-11,12706
Barra 103	Barra 104	32,45208	13,86711	Barra 104	Barra 103	-31,85488	-15,83171
Barra 103	Barra 105	43,35104	12,84853	Barra 105	Barra 103	-42,24853	-13,48046
Barra 103	Barra 110	60,59876	8,34893	Barra 110	Barra 103	-59,14882	-6,15244
Barra 104	Barra 105	48,58421	2,63235	Barra 105	Barra 104	-48,33435	-2,60609
Barra 105	Barra 106	8,86319	3,87987	Barra 106	Barra 105	-8,84827	-5,15163
Barra 105	Barra 107	26,75472	-2,37494	Barra 107	Barra 105	-26,34730	-0,55488
Barra 105	Barra 108	23,96504	-11,12844	Barra 108	Barra 105	-23,77451	9,92229
Barra 106	Barra 107	23,98409	-3,72533	Barra 107	Barra 106	-23,65270	0,55052
Barra 108	Barra 109	21,77456	-10,92231	Barra 109	Barra 108	-21,70868	10,39292
Barra 109	Barra 110	13,70870	-13,39293	Barra 110	Barra 109	-13,60676	11,77165
Barra 11	Barra 12	34,19325	-36,02046	Barra 12	Barra 11	-34,04302	36,02584
Barra 11	Barra 13	35,05296	11,36035	Barra 13	Barra 11	-34,73659	-12,11008
Barra 110	Barra 111	-35,70295	0,95614	Barra 111	Barra 110	36,00000	-1,84383
Barra 110	Barra 112	69,45858	-30,61415	Barra 112	Barra 110	-68,00000	28,51169
Barra 114	Barra 115	1,35559	0,22125	Barra 115	Barra 114	-1,35554	-0,47542
Barra 12	Barra 14	18,28606	2,63084	Barra 14	Barra 12	-18,20999	-4,14907
Barra 12	Barra 16	7,46444	4,27137	Barra 16	Barra 12	-7,44627	-6,28448
Barra 12	Barra 117	20,15255	5,19725	Barra 117	Barra 12	-20,00000	-8,00000
Barra 13	Barra 15	0,73662	-3,88993	Barra 15	Barra 13	-0,73547	-1,99267
Barra 14	Barra 15	4,21003	3,14906	Barra 15	Barra 14	-4,18000	-7,84059
Barra 15	Barra 17	-103,94807	-24,49218	Barra 17	Barra 15	105,53436	25,45621
Barra 15	Barra 19	11,54620	15,71291	Barra 19	Barra 15	-11,49577	-16,48985
Barra 15	Barra 33	7,31779	-4,33352	Barra 33	Barra 15	-7,29292	1,40714
Barra 16	Barra 17	-17,55369	-3,71553	Barra 17	Barra 16	17,69919	-0,27071
Barra 17	Barra 18	80,31525	24,98017	Barra 18	Barra 17	-79,43263	-22,61362
Barra 17	Barra 31	14,84269	11,57341	Barra 31	Barra 17	-14,64940	-14,77744
Barra 17	Barra 113	2,12907	6,25466	Barra 113	Barra 17	-2,12460	-6,99887
Barra 18	Barra 19	19,43280	16,82175	Barra 19	Barra 18	-19,35253	-17,53713
Barra 19	Barra 20	-10,56408	5,14336	Barra 20	Barra 19	10,60605	-7,69185
Barra 19	Barra 34	-3,58750	-10,39835	Barra 34	Barra 19	3,64335	4,59770
Barra 2	Barra 12	-32,45188	-19,99928	Barra 12	Barra 2	32,73408	19,41683
Barra 20	Barra 21	-28,60597	4,69184	Barra 21	Barra 20	28,77594	-5,88291
Barra 21	Barra 22	-42,77587	-2,11711	Barra 22	Barra 21	43,19301	1,76985
Barra 22	Barra 23	-53,19297	-6,76986	Barra 23	Barra 22	54,23213	7,68633
Barra 23	Barra 24	8,68055	10,32229	Barra 24	Barra 23	-8,64819	-15,14206
Barra 23	Barra 25	-162,75203	-26,09071	Barra 25	Barra 23	166,96258	38,60502
Barra 23	Barra 32	92,83964	5,08202	Barra 32	Barra 23	-90,06649	-6,29333
Barra 24	Barra 70	-5,60683	-1,60874	Barra 70	Barra 24	5,65155	-8,16609
Barra 24	Barra 72	1,25505	3,35990	Barra 72	Barra 24	-1,23781	-8,03515

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 25	Barra 27	143,50576	30,05598	Barra 27	Barra 25	-137,10931	-15,25778
Barra 26	Barra 25	90,46804	21,59019	Barra 25	Barra 26	-90,46804	-18,63408
Barra 26	Barra 30	223,53206	-12,00709	Barra 30	Barra 26	-219,56312	-36,16376
Barra 27	Barra 28	32,85203	-0,58760	Barra 28	Barra 27	-32,63165	-0,43802
Barra 27	Barra 32	12,53169	1,76290	Barra 32	Barra 27	-12,49157	-3,42605
Barra 27	Barra 115	20,72591	5,05995	Barra 115	Barra 27	-20,64446	-6,52458
Barra 28	Barra 29	15,63173	-6,56200	Barra 29	Barra 28	-15,56145	4,63728
Barra 29	Barra 31	-8,43833	-8,63735	Barra 31	Barra 29	8,45454	7,91395
Barra 3	Barra 5	-68,10123	-13,77382	Barra 5	Barra 3	69,33530	16,55234
Barra 3	Barra 12	-9,79136	-12,54090	Barra 12	Barra 3	9,89949	9,00878
Barra 30	Barra 17	231,51987	93,96673	Barra 17	Barra 30	-231,51987	-70,99388
Barra 30	Barra 38	62,14358	16,75471	Barra 38	Barra 30	-61,89290	-53,90852
Barra 31	Barra 32	-29,80504	12,37870	Barra 32	Barra 31	30,14668	-13,58686
Barra 32	Barra 113	4,04300	-17,77789	Barra 113	Barra 32	-3,87538	13,37545
Barra 32	Barra 114	9,36857	1,77836	Barra 114	Barra 32	-9,35486	-3,22141
Barra 33	Barra 37	-15,70703	-10,40715	Barra 37	Barra 33	15,84886	7,37256
Barra 34	Barra 36	30,23875	4,69783	Barra 36	Barra 34	-30,15427	-4,98564
Barra 34	Barra 37	-94,27787	-41,69163	Barra 37	Barra 34	94,55778	41,76044
Barra 34	Barra 43	1,39677	1,63910	Barra 43	Barra 34	-1,39015	-5,67547
Barra 35	Barra 36	0,84602	3,64034	Barra 36	Barra 35	-0,84568	-3,89625
Barra 35	Barra 37	-33,84526	-12,64051	Barra 37	Barra 35	33,99285	12,02747
Barra 37	Barra 39	54,89115	2,84201	Barra 39	Barra 37	-53,89949	-2,16150
Barra 37	Barra 40	43,99928	-3,80812	Barra 40	Barra 37	-42,82711	3,09309
Barra 38	Barra 37	243,28966	110,08908	Barra 37	Barra 38	-243,28966	-84,71777
Barra 38	Barra 65	-181,39673	-56,18057	Barra 65	Barra 38	184,59946	-10,09514
Barra 39	Barra 40	26,89958	-8,83852	Barra 40	Barra 39	-26,74518	7,88612
Barra 4	Barra 5	-103,13139	-34,43892	Barra 5	Barra 4	103,15227	35,17575
Barra 4	Barra 11	64,13274	0,06957	Barra 11	Barra 4	-63,26949	1,05382
Barra 40	Barra 41	15,42814	1,19861	Barra 41	Barra 40	-15,39098	-2,21981
Barra 40	Barra 42	-11,85570	-6,44058	Barra 42	Barra 40	11,94926	2,29614
Barra 41	Barra 42	-21,60899	-7,78020	Barra 42	Barra 41	21,83051	5,23301
Barra 42	Barra 49	-64,88987	5,25393	Barra 49	Barra 42	68,05839	0,37013
Barra 42	Barra 49	-64,88987	5,25393	Barra 49	Barra 42	68,05839	0,37013
Barra 43	Barra 44	-16,60984	-1,32453	Barra 44	Barra 43	16,78710	-3,79703
Barra 44	Barra 45	-32,78706	5,48808	Barra 45	Barra 44	33,04552	-6,62355
Barra 45	Barra 46	-36,33699	-3,56620	Barra 46	Barra 45	36,88140	2,12000
Barra 45	Barra 49	-49,70850	-2,08082	Barra 49	Barra 45	51,44562	2,31226
Barra 46	Barra 47	-31,11878	-1,21451	Barra 47	Barra 46	31,48316	-0,79785
Barra 46	Barra 48	-14,76258	-5,83017	Barra 48	Barra 46	14,89933	1,41815
Barra 47	Barra 49	-9,52558	-10,84205	Barra 49	Barra 47	9,56084	9,28526
Barra 47	Barra 69	-55,95754	11,63989	Barra 69	Barra 47	58,70364	-10,06769
Barra 48	Barra 49	-34,89927	3,20722	Barra 49	Barra 48	35,11112	-3,92560

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 49	Barra 50	53,65824	13,42752	Barra 50	Barra 49	-52,87375	-13,14148
Barra 49	Barra 51	66,62526	20,44321	Barra 51	Barra 49	-64,34310	-17,40512
Barra 49	Barra 54	37,76400	13,07024	Barra 54	Barra 49	-36,57354	-15,59951
Barra 49	Barra 54	37,74242	11,19838	Barra 54	Barra 49	-36,37726	-13,79057
Barra 49	Barra 66	-132,23353	4,32885	Barra 66	Barra 49	135,23473	8,32407
Barra 49	Barra 66	-132,23353	4,32885	Barra 66	Barra 49	135,23473	8,32407
Barra 49	Barra 69	-46,55706	10,65574	Barra 69	Barra 49	48,80032	-12,06134
Barra 5	Barra 6	88,51152	2,20233	Barra 6	Barra 5	-87,58001	0,61147
Barra 5	Barra 11	77,18458	1,74007	Barra 11	Barra 5	-75,97616	0,60613
Barra 50	Barra 57	35,87378	9,14148	Barra 57	Barra 50	-35,20987	-10,49198
Barra 51	Barra 52	28,55816	6,24587	Barra 52	Barra 51	-28,37073	-6,99451
Barra 51	Barra 58	18,78502	3,15922	Barra 58	Barra 51	-18,68441	-4,53356
Barra 52	Barra 53	10,37075	1,99451	Barra 53	Barra 52	-10,31661	-5,44920
Barra 53	Barra 54	-12,68337	-5,55081	Barra 54	Barra 53	12,73575	2,99304
Barra 54	Barra 55	7,07294	1,45694	Barra 55	Barra 54	-7,06262	-3,25028
Barra 54	Barra 56	18,52655	4,34680	Barra 56	Barra 54	-18,51554	-4,97547
Barra 54	Barra 59	-30,38407	-7,50613	Barra 59	Barra 54	30,90582	4,25670
Barra 55	Barra 56	-21,41997	-5,82436	Barra 56	Barra 55	21,44640	5,56646
Barra 55	Barra 59	-34,51720	-8,26126	Barra 59	Barra 55	35,15719	5,87818
Barra 56	Barra 57	-22,98660	-9,10427	Barra 57	Barra 56	23,20987	7,49198
Barra 56	Barra 58	-6,66513	-3,69342	Barra 58	Barra 56	6,68441	1,53356
Barra 56	Barra 59	-27,96437	-4,17304	Barra 59	Barra 56	28,67552	0,98707
Barra 56	Barra 59	-29,31464	-3,90613	Barra 59	Barra 56	30,07475	1,12915
Barra 59	Barra 60	-43,31765	3,57454	Barra 60	Barra 59	43,94026	-4,40506
Barra 59	Barra 61	-51,71968	5,03249	Barra 61	Barra 59	52,64015	-4,62593
Barra 6	Barra 7	35,58049	-4,78059	Barra 7	Barra 6	-35,52025	4,51488
Barra 60	Barra 61	-112,06839	8,51938	Barra 61	Barra 60	112,40683	-8,22755
Barra 60	Barra 62	-9,87161	-7,11437	Barra 62	Barra 60	9,88885	5,73797
Barra 61	Barra 62	25,49409	-13,85797	Barra 62	Barra 61	-25,42511	13,19958
Barra 62	Barra 66	-37,16153	-17,26493	Barra 66	Barra 62	37,92999	14,67587
Barra 62	Barra 67	-24,30216	-14,41438	Barra 67	Barra 62	24,49806	12,14732
Barra 63	Barra 59	151,77583	67,48246	Barra 59	Barra 63	-151,77583	-57,02403
Barra 63	Barra 64	-151,77569	-67,48248	Barra 64	Barra 63	152,25817	52,50582
Barra 64	Barra 61	30,54088	13,98571	Barra 61	Barra 64	-30,54088	-13,68254
Barra 64	Barra 65	-182,79897	-66,49154	Barra 65	Barra 64	183,79213	40,06397
Barra 65	Barra 66	8,55912	72,24974	Barra 66	Barra 65	-8,55912	-70,55455
Barra 65	Barra 68	14,04949	-22,42281	Barra 68	Barra 65	-14,04548	-41,85817
Barra 66	Barra 67	53,15971	19,27266	Barra 67	Barra 66	-52,49806	-19,14732
Barra 68	Barra 69	-125,87415	112,82312	Barra 69	Barra 68	125,87415	-103,64046
Barra 68	Barra 81	-44,20577	-4,61052	Barra 81	Barra 68	44,26235	-75,54187
Barra 68	Barra 116	184,12592	-66,35447	Barra 116	Barra 68	-184,00000	51,31889
Barra 69	Barra 70	108,17265	16,09578	Barra 70	Barra 69	-104,75223	-14,05685

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVar)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVar)
Barra 69	Barra 75	109,91780	20,50069	Barra 75	Barra 69	-105,07144	-18,34494
Barra 69	Barra 77	62,18795	6,78842	Barra 77	Barra 69	-61,02841	-13,81048
Barra 7	Barra 12	16,52051	-6,51495	Barra 12	Barra 7	-16,49321	5,76660
Barra 70	Barra 71	16,86777	-12,42529	Barra 71	Barra 70	-16,82873	11,72982
Barra 70	Barra 74	16,27853	12,87241	Barra 74	Barra 70	-16,08167	-15,39899
Barra 70	Barra 75	-0,04623	9,91020	Barra 75	Barra 70	0,10616	-13,13964
Barra 71	Barra 72	10,81640	-0,98900	Barra 72	Barra 71	-10,76219	-3,09013
Barra 71	Barra 73	6,01241	-10,74083	Barra 73	Barra 71	-6,00000	9,65382
Barra 74	Barra 75	-51,91830	-6,22192	Barra 75	Barra 74	52,28398	6,47071
Barra 75	Barra 77	-34,56590	-9,56827	Barra 77	Barra 75	35,36695	7,38465
Barra 75	Barra 118	40,24783	23,58214	Barra 118	Barra 75	-39,90649	-23,55032
Barra 76	Barra 77	-61,11743	-21,05295	Barra 77	Barra 76	63,17072	24,39887
Barra 76	Barra 118	-6,88254	-9,68496	Barra 118	Barra 76	6,90649	8,55032
Barra 77	Barra 78	45,40731	6,60805	Barra 78	Barra 77	-45,32876	-7,62493
Barra 77	Barra 80	-96,54462	-37,42537	Barra 80	Barra 77	98,31653	37,53954
Barra 77	Barra 80	-44,35266	-20,54975	Barra 80	Barra 77	45,03341	20,59428
Barra 77	Barra 82	-3,01911	17,55235	Barra 82	Barra 77	3,16030	-25,27829
Barra 78	Barra 79	-25,67119	-18,37509	Barra 79	Barra 78	25,72459	17,95751
Barra 79	Barra 80	-64,72457	-29,58689	Barra 80	Barra 79	65,49179	31,08558
Barra 8	Barra 5	338,18301	128,66812	Barra 5	Barra 8	-338,18301	-95,74748
Barra 8	Barra 9	-440,63531	-89,73352	Barra 9	Barra 8	445,25496	24,42888
Barra 8	Barra 30	74,45280	27,22944	Barra 30	Barra 8	-74,10022	-74,55768
Barra 80	Barra 96	18,96404	21,06700	Barra 96	Barra 80	-18,66019	-24,61719
Barra 80	Barra 97	26,42099	25,75374	Barra 97	Barra 80	-26,17837	-27,18761
Barra 80	Barra 98	28,94805	8,31834	Barra 98	Barra 80	-28,74224	-10,42913
Barra 80	Barra 99	19,56294	8,16863	Barra 99	Barra 80	-19,35038	-12,94180
Barra 81	Barra 80	-44,26235	75,54187	Barra 80	Barra 81	44,26235	-73,04638
Barra 82	Barra 83	-47,22136	24,39300	Barra 83	Barra 82	47,55588	-26,99225
Barra 82	Barra 96	-9,93888	-6,57030	Barra 96	Barra 82	9,95779	1,29595
Barra 83	Barra 84	-24,78563	14,68632	Barra 84	Barra 83	25,34568	-15,99168
Barra 83	Barra 85	-42,77023	11,99590	Barra 85	Barra 83	43,66506	-12,29027
Barra 84	Barra 85	-36,34566	8,99167	Barra 85	Barra 84	36,79020	-9,23895
Barra 85	Barra 86	17,17247	-7,35367	Barra 86	Barra 85	-17,05304	5,09097
Barra 85	Barra 88	-50,39186	7,59948	Barra 88	Barra 85	50,93178	-7,53037
Barra 85	Barra 89	-71,23584	0,67681	Barra 89	Barra 85	72,48803	3,73357
Barra 86	Barra 87	-3,94695	-15,09097	Barra 87	Barra 86	4,00000	11,02161
Barra 88	Barra 89	-98,93176	-2,46963	Barra 89	Barra 88	100,32734	7,69866
Barra 89	Barra 90	58,21874	-4,72433	Barra 90	Barra 89	-56,47828	5,81322
Barra 89	Barra 90	110,82853	-5,44206	Barra 90	Barra 89	-107,93420	7,07131
Barra 89	Barra 92	201,54245	-2,10410	Barra 92	Barra 89	-197,56100	16,96055
Barra 89	Barra 92	63,59499	-5,06680	Barra 92	Barra 89	-62,01790	7,29171
Barra 9	Barra 10	-445,25465	-24,42895	Barra 10	Barra 9	450,00000	-51,04211

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 90	Barra 91	1,41250	4,42388	Barra 91	Barra 90	-1,40417	-6,46222
Barra 91	Barra 92	-8,59582	-6,62581	Barra 92	Barra 91	8,63590	3,58676
Barra 92	Barra 93	57,62376	-11,65830	Barra 93	Barra 92	-56,72016	12,50150
Barra 92	Barra 94	52,17036	-15,21440	Barra 94	Barra 92	-50,74878	15,90549
Barra 92	Barra 100	31,49747	-18,00248	Barra 100	Barra 92	-30,70786	13,82159
Barra 92	Barra 102	44,65149	-8,38996	Barra 102	Barra 92	-44,39389	8,12706
Barra 93	Barra 94	44,72018	-19,50150	Barra 94	Barra 93	-44,18155	19,43966
Barra 94	Barra 95	40,86069	9,01439	Barra 95	Barra 94	-40,62344	-9,31150
Barra 94	Barra 96	19,78758	-9,82150	Barra 96	Barra 94	-19,65932	7,97679
Barra 94	Barra 100	4,28215	-50,53806	Barra 100	Barra 94	-3,86754	45,80659
Barra 95	Barra 96	-1,37653	-21,68851	Barra 96	Barra 95	1,45519	20,50615
Barra 96	Barra 97	-11,09345	-20,16170	Barra 97	Barra 96	11,17837	18,18761
Barra 98	Barra 100	-5,25775	2,42913	Barra 100	Barra 98	5,27741	-7,29532
Barra 99	Barra 100	-22,64960	-4,59381	Barra 100	Barra 99	22,74227	2,79365

Tabela B.7 – Resultados de ramos do sistema teste de 118 barras calculados pelo ANAREDE

Fonte: Autor.

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 1	Barra 2	-12,3500	-13,0300	Barra 2	Barra 1	12,4520	10,9990
Barra 1	Barra 3	-38,6500	-16,5000	Barra 3	Barra 1	38,8930	16,3150
Barra 100	Barra 101	-16,7400	22,9000	Barra 101	Barra 100	16,9800	-25,1300
Barra 100	Barra 103	121,7500	-22,1500	Barra 103	Barra 100	-119,4000	24,3580
Barra 100	Barra 104	56,1850	10,6470	Barra 104	Barra 100	-54,7300	-9,4120
Barra 100	Barra 106	60,3610	9,4760	Barra 106	Barra 100	-58,1400	-7,1230
Barra 101	Barra 102	-38,9800	10,1280	Barra 102	Barra 101	39,3940	-11,1300
Barra 103	Barra 104	32,4520	13,8670	Barra 104	Barra 103	-31,8500	-15,8300
Barra 103	Barra 105	43,3510	12,8490	Barra 105	Barra 103	-42,2500	-13,4800
Barra 103	Barra 110	60,5990	8,3489	Barra 110	Barra 103	-59,1500	-6,1520
Barra 104	Barra 105	48,5840	2,6323	Barra 105	Barra 104	-48,3300	-2,6060
Barra 105	Barra 106	8,8631	3,8799	Barra 106	Barra 105	-8,8480	-5,1520
Barra 105	Barra 107	26,7550	-2,3750	Barra 107	Barra 105	-26,3500	-0,5549
Barra 105	Barra 108	23,9650	-11,1300	Barra 108	Barra 105	-23,7700	9,9223
Barra 106	Barra 107	23,9840	-3,7250	Barra 107	Barra 106	-23,6500	0,5505
Barra 108	Barra 109	21,7750	-10,9200	Barra 109	Barra 108	-21,7100	10,3930
Barra 109	Barra 110	13,7090	-13,3900	Barra 110	Barra 109	-13,6100	11,7720
Barra 11	Barra 12	34,1930	-36,0200	Barra 12	Barra 11	-34,0400	36,0260
Barra 11	Barra 13	35,0520	11,3600	Barra 13	Barra 11	-34,7400	-12,1100
Barra 110	Barra 111	-35,7000	0,9561	Barra 111	Barra 110	36,0000	-1,8440
Barra 110	Barra 112	69,4590	-30,6100	Barra 112	Barra 110	-68,0000	28,5120
Barra 114	Barra 115	1,3554	0,2213	Barra 115	Barra 114	-1,3550	-0,4755

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 12	Barra 14	18,2850	2,6310	Barra 14	Barra 12	-18,2100	-4,1490
Barra 12	Barra 16	7,4638	4,2715	Barra 16	Barra 12	-7,4460	-6,2850
Barra 12	Barra 117	20,1530	5,1973	Barra 117	Barra 12	-20,0000	-8,0000
Barra 13	Barra 15	0,7361	-3,8900	Barra 15	Barra 13	-0,7350	-1,9930
Barra 14	Barra 15	4,2094	3,1492	Barra 15	Barra 14	-4,1790	-7,8410
Barra 15	Barra 17	-103,9000	-24,4900	Barra 17	Barra 15	105,5300	25,4560
Barra 15	Barra 19	11,5460	15,7130	Barra 19	Barra 15	-11,5000	-16,4900
Barra 15	Barra 33	7,3169	-4,3330	Barra 33	Barra 15	-7,2920	1,4069
Barra 16	Barra 17	-17,5500	-3,7150	Barra 17	Barra 16	17,7000	-0,2709
Barra 17	Barra 18	80,3150	24,9800	Barra 18	Barra 17	-79,4300	-22,6100
Barra 17	Barra 31	14,8430	11,5730	Barra 31	Barra 17	-14,6500	-14,7800
Barra 17	Barra 113	2,1290	6,2547	Barra 113	Barra 17	-2,1250	-6,9990
Barra 18	Barra 19	19,4330	16,8220	Barra 19	Barra 18	-19,3500	-17,5400
Barra 19	Barra 20	-10,5600	5,1435	Barra 20	Barra 19	10,6060	-7,6920
Barra 19	Barra 34	-3,5880	-10,4000	Barra 34	Barra 19	3,6441	4,5975
Barra 2	Barra 12	-32,4500	-20,0000	Barra 12	Barra 2	32,7340	19,4170
Barra 20	Barra 21	-28,6100	4,6919	Barra 21	Barra 20	28,7760	-5,8830
Barra 21	Barra 22	-42,7800	-2,1170	Barra 22	Barra 21	43,1930	1,7698
Barra 22	Barra 23	-53,1900	-6,7700	Barra 23	Barra 22	54,2330	7,6863
Barra 23	Barra 24	8,6774	10,3230	Barra 24	Barra 23	-8,6450	-15,1400
Barra 23	Barra 25	-162,8000	-26,0900	Barra 25	Barra 23	166,9600	38,6050
Barra 23	Barra 32	92,8410	5,0818	Barra 32	Barra 23	-90,0700	-6,2930
Barra 24	Barra 70	-5,6080	-1,6080	Barra 70	Barra 24	5,6532	-8,1660
Barra 24	Barra 72	1,2535	3,3603	Barra 72	Barra 24	-1,2360	-8,0360
Barra 25	Barra 27	143,5100	30,0560	Barra 27	Barra 25	-137,1000	-15,2600
Barra 26	Barra 25	90,4680	21,5900	Barra 25	Barra 26	-90,4700	-18,6300
Barra 26	Barra 30	223,5300	-12,0100	Barra 30	Barra 26	-219,6000	-36,1600
Barra 27	Barra 28	32,8520	-0,5876	Barra 28	Barra 27	-32,6300	-0,4380
Barra 27	Barra 32	12,5320	1,7630	Barra 32	Barra 27	-12,4900	-3,4260
Barra 27	Barra 115	20,7260	5,0599	Barra 115	Barra 27	-20,6400	-6,5250
Barra 28	Barra 29	15,6320	-6,5620	Barra 29	Barra 28	-15,5600	4,6373
Barra 29	Barra 31	-8,4380	-8,6370	Barra 31	Barra 29	8,4547	7,9139
Barra 3	Barra 5	-68,1000	-13,7700	Barra 5	Barra 3	69,3360	16,5520
Barra 3	Barra 12	-9,7910	-12,5400	Barra 12	Barra 3	9,8996	9,0087
Barra 30	Barra 17	231,5200	93,9670	Barra 17	Barra 30	-231,5000	-70,9900
Barra 30	Barra 38	62,1390	16,7550	Barra 38	Barra 30	-61,8900	-53,9100
Barra 31	Barra 32	-29,8100	12,3790	Barra 32	Barra 31	30,1470	-13,5900
Barra 32	Barra 113	4,0431	-17,7800	Barra 113	Barra 32	-3,8750	13,3750
Barra 32	Barra 114	9,3691	1,7783	Barra 114	Barra 32	-9,3550	-3,2210
Barra 33	Barra 37	-15,7100	-10,4100	Barra 37	Barra 33	15,8500	7,3723
Barra 34	Barra 36	30,2390	4,6977	Barra 36	Barra 34	-30,1500	-4,9860
Barra 34	Barra 37	-94,2800	-41,6900	Barra 37	Barra 34	94,5590	41,7600

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 34	Barra 43	1,3959	1,6394	Barra 43	Barra 34	-1,3890	-5,6760
Barra 35	Barra 36	0,8457	3,6403	Barra 36	Barra 35	-0,8454	-3,8960
Barra 35	Barra 37	-33,8500	-12,6400	Barra 37	Barra 35	33,9930	12,0270
Barra 37	Barra 39	54,8900	2,8421	Barra 39	Barra 37	-53,9000	-2,1620
Barra 37	Barra 40	43,9990	-3,8080	Barra 40	Barra 37	-42,8300	3,0928
Barra 38	Barra 37	243,2900	110,0900	Barra 37	Barra 38	-243,3000	-84,7200
Barra 38	Barra 65	-181,4000	-56,1800	Barra 65	Barra 38	184,6100	-10,0900
Barra 39	Barra 40	26,8990	-8,8380	Barra 40	Barra 39	-26,7400	7,8858
Barra 4	Barra 5	-103,1000	-34,4400	Barra 5	Barra 4	103,1500	35,1760
Barra 4	Barra 11	64,1330	0,0696	Barra 11	Barra 4	-63,2700	1,0538
Barra 40	Barra 41	15,4270	1,1989	Barra 41	Barra 40	-15,3900	-2,2200
Barra 40	Barra 42	-11,8600	-6,4400	Barra 42	Barra 40	11,9500	2,2959
Barra 41	Barra 42	-21,6100	-7,7800	Barra 42	Barra 41	21,8310	5,2328
Barra 42	Barra 49	-64,8900	5,2543	Barra 49	Barra 42	68,0590	0,3701
Barra 42	Barra 49	-64,8900	5,2543	Barra 49	Barra 42	68,0590	0,3701
Barra 43	Barra 44	-16,6100	-1,3240	Barra 44	Barra 43	16,7880	-3,7970
Barra 44	Barra 45	-32,7900	5,4883	Barra 45	Barra 44	33,0470	-6,6240
Barra 45	Barra 46	-36,3400	-3,5660	Barra 46	Barra 45	36,8820	2,1200
Barra 45	Barra 49	-49,7100	-2,0810	Barra 49	Barra 45	51,4460	2,3122
Barra 46	Barra 47	-31,1200	-1,2140	Barra 47	Barra 46	31,4840	-0,7981
Barra 46	Barra 48	-14,7600	-5,8300	Barra 48	Barra 46	14,8990	1,4181
Barra 47	Barra 49	-9,5250	-10,8400	Barra 49	Barra 47	9,5600	9,2857
Barra 47	Barra 69	-55,9600	11,6410	Barra 69	Barra 47	58,7050	-10,0700
Barra 48	Barra 49	-34,9000	3,2073	Barra 49	Barra 48	35,1110	-3,9260
Barra 49	Barra 50	53,6580	13,4280	Barra 50	Barra 49	-52,8700	-13,1400
Barra 49	Barra 51	66,6250	20,4430	Barra 51	Barra 49	-64,3400	-17,4100
Barra 49	Barra 54	37,7640	13,0700	Barra 54	Barra 49	-36,5700	-15,6000
Barra 49	Barra 54	37,7430	11,1980	Barra 54	Barra 49	-36,3800	-13,7900
Barra 49	Barra 66	-132,2000	4,3290	Barra 66	Barra 49	135,2400	8,3240
Barra 49	Barra 66	-132,2000	4,3290	Barra 66	Barra 49	135,2400	8,3240
Barra 49	Barra 69	-46,5600	10,6560	Barra 69	Barra 49	48,8020	-12,0600
Barra 5	Barra 6	88,5120	2,2023	Barra 6	Barra 5	-87,5800	0,6116
Barra 5	Barra 11	77,1850	1,7401	Barra 11	Barra 5	-75,9800	0,6062
Barra 50	Barra 57	35,8740	9,1415	Barra 57	Barra 50	-35,2100	-10,4900
Barra 51	Barra 52	28,5580	6,2459	Barra 52	Barra 51	-28,3700	-6,9940
Barra 51	Barra 58	18,7850	3,1592	Barra 58	Barra 51	-18,6800	-4,5340
Barra 52	Barra 53	10,3710	1,9945	Barra 53	Barra 52	-10,3200	-5,4490
Barra 53	Barra 54	-12,6800	-5,5510	Barra 54	Barra 53	12,7360	2,9930
Barra 54	Barra 55	7,0729	1,4569	Barra 55	Barra 54	-7,0630	-3,2500
Barra 54	Barra 56	18,5260	4,3468	Barra 56	Barra 54	-18,5200	-4,9750
Barra 54	Barra 59	-30,3800	-7,5060	Barra 59	Barra 54	30,9060	4,2567
Barra 55	Barra 56	-21,4200	-5,8240	Barra 56	Barra 55	21,4460	5,5664

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 55	Barra 59	-34,5200	-8,2610	Barra 59	Barra 55	35,1570	5,8782
Barra 56	Barra 57	-22,9900	-9,1040	Barra 57	Barra 56	23,2100	7,4920
Barra 56	Barra 58	-6,6650	-3,6930	Barra 58	Barra 56	6,6844	1,5336
Barra 56	Barra 59	-27,9600	-4,1730	Barra 59	Barra 56	28,6760	0,9870
Barra 56	Barra 59	-29,3100	-3,9060	Barra 59	Barra 56	30,0750	1,1291
Barra 59	Barra 60	-43,3200	3,5746	Barra 60	Barra 59	43,9400	-4,4050
Barra 59	Barra 61	-51,7200	5,0325	Barra 61	Barra 59	52,6400	-4,6260
Barra 6	Barra 7	35,5800	-4,7810	Barra 7	Barra 6	-35,5200	4,5149
Barra 60	Barra 61	-112,1000	8,5194	Barra 61	Barra 60	112,4100	-8,2280
Barra 60	Barra 62	-9,8720	-7,1140	Barra 62	Barra 60	9,8889	5,7380
Barra 61	Barra 62	25,4940	-13,8600	Barra 62	Barra 61	-25,4300	13,2000
Barra 62	Barra 66	-37,1600	-17,2600	Barra 66	Barra 62	37,9300	14,6760
Barra 62	Barra 67	-24,3000	-14,4100	Barra 67	Barra 62	24,4980	12,1470
Barra 63	Barra 59	151,7800	67,4820	Barra 59	Barra 63	-151,8000	-57,0200
Barra 63	Barra 64	-151,8000	-67,4800	Barra 64	Barra 63	152,2600	52,5060
Barra 64	Barra 61	30,5410	13,9860	Barra 61	Barra 64	-30,5400	-13,6800
Barra 64	Barra 65	-182,8000	-66,4900	Barra 65	Barra 64	183,7900	40,0640
Barra 65	Barra 66	8,5602	72,2500	Barra 66	Barra 65	-8,5600	-70,5500
Barra 65	Barra 68	14,0410	-22,4200	Barra 68	Barra 65	-14,0400	-41,8600
Barra 66	Barra 67	53,1600	19,2730	Barra 67	Barra 66	-52,5000	-19,1500
Barra 68	Barra 69	-125,9000	112,8200	Barra 69	Barra 68	125,8800	-103,6000
Barra 68	Barra 81	-44,2100	-4,6100	Barra 81	Barra 68	44,2630	-75,5400
Barra 68	Barra 116	184,1300	-66,3500	Barra 116	Barra 68	-184,0000	51,3190
Barra 69	Barra 70	108,1800	16,0960	Barra 70	Barra 69	-104,8000	-14,0600
Barra 69	Barra 75	109,9200	20,5000	Barra 75	Barra 69	-105,1000	-18,3400
Barra 69	Barra 77	62,1900	6,7879	Barra 77	Barra 69	-61,0300	-13,8100
Barra 7	Barra 12	16,5200	-6,5150	Barra 12	Barra 7	-16,4900	5,7665
Barra 70	Barra 71	16,8690	-12,4300	Barra 71	Barra 70	-16,8300	11,7300
Barra 70	Barra 74	16,2780	12,8730	Barra 74	Barra 70	-16,0800	-15,4000
Barra 70	Barra 75	-0,0462	9,9104	Barra 75	Barra 70	0,1062	-13,1400
Barra 71	Barra 72	10,8180	-0,9894	Barra 72	Barra 71	-10,7600	-3,0900
Barra 71	Barra 73	6,0124	-10,7400	Barra 73	Barra 71	-6,0000	9,6538
Barra 74	Barra 75	-51,9200	-6,2220	Barra 75	Barra 74	52,2850	6,4704
Barra 75	Barra 77	-34,5700	-9,5680	Barra 77	Barra 75	35,3670	7,3847
Barra 75	Barra 118	40,2480	23,5820	Barra 118	Barra 75	-39,9100	-23,5500
Barra 76	Barra 77	-61,1200	-21,0500	Barra 77	Barra 76	63,1710	24,3990
Barra 76	Barra 118	-6,8830	-9,6850	Barra 118	Barra 76	6,9065	8,5503
Barra 77	Barra 78	45,4080	6,6079	Barra 78	Barra 77	-45,3300	-7,6250
Barra 77	Barra 80	-96,5400	-37,4300	Barra 80	Barra 77	98,3160	37,5400
Barra 77	Barra 80	-44,3500	-20,5500	Barra 80	Barra 77	45,0330	20,5940
Barra 77	Barra 82	-3,0190	17,5520	Barra 82	Barra 77	3,1599	-25,2800
Barra 78	Barra 79	-25,6700	-18,3800	Barra 79	Barra 78	25,7240	17,9580

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 79	Barra 80	-64,7200	-29,5900	Barra 80	Barra 79	65,4910	31,0860
Barra 8	Barra 5	338,1900	128,6700	Barra 5	Barra 8	-338,2000	-95,7500
Barra 8	Barra 9	-440,6000	-89,7300	Barra 9	Barra 8	445,2500	24,4290
Barra 8	Barra 30	74,4490	27,2300	Barra 30	Barra 8	-74,1000	-74,5600
Barra 80	Barra 96	18,9640	21,0670	Barra 96	Barra 80	-18,6600	-24,6200
Barra 80	Barra 97	26,4210	25,7540	Barra 97	Barra 80	-26,1800	-27,1900
Barra 80	Barra 98	28,9480	8,3183	Barra 98	Barra 80	-28,7400	-10,4300
Barra 80	Barra 99	19,5630	8,1686	Barra 99	Barra 80	-19,3500	-12,9400
Barra 81	Barra 80	-44,2600	75,5420	Barra 80	Barra 81	44,2630	-73,0500
Barra 82	Barra 83	-47,2200	24,3930	Barra 83	Barra 82	47,5560	-26,9900
Barra 82	Barra 96	-9,9390	-6,5700	Barra 96	Barra 82	9,9576	1,2960
Barra 83	Barra 84	-24,7900	14,6860	Barra 84	Barra 83	25,3460	-15,9900
Barra 83	Barra 85	-42,7700	11,9960	Barra 85	Barra 83	43,6650	-12,2900
Barra 84	Barra 85	-36,3500	8,9916	Barra 85	Barra 84	36,7900	-9,2390
Barra 85	Barra 86	17,1720	-7,3540	Barra 86	Barra 85	-17,0500	5,0910
Barra 85	Barra 88	-50,3900	7,5995	Barra 88	Barra 85	50,9320	-7,5300
Barra 85	Barra 89	-71,2400	0,6768	Barra 89	Barra 85	72,4880	3,7336
Barra 86	Barra 87	-3,9470	-15,0900	Barra 87	Barra 86	4,0000	11,0220
Barra 88	Barra 89	-98,9300	-2,4700	Barra 89	Barra 88	100,3300	7,6987
Barra 89	Barra 90	58,2190	-4,7240	Barra 90	Barra 89	-56,4800	5,8132
Barra 89	Barra 90	110,8300	-5,4420	Barra 90	Barra 89	-107,9000	7,0713
Barra 89	Barra 92	201,5400	-2,1040	Barra 92	Barra 89	-197,6000	16,9610
Barra 89	Barra 92	63,5950	-5,0670	Barra 92	Barra 89	-62,0200	7,2917
Barra 9	Barra 10	-445,3000	-24,4300	Barra 10	Barra 9	450,0000	-51,0400
Barra 90	Barra 91	1,4125	4,4239	Barra 91	Barra 90	-1,4040	-6,4620
Barra 91	Barra 92	-8,5960	-6,6260	Barra 92	Barra 91	8,6359	3,5868
Barra 92	Barra 93	57,6240	-11,6600	Barra 93	Barra 92	-56,7200	12,5010
Barra 92	Barra 94	52,1700	-15,2100	Barra 94	Barra 92	-50,7500	15,9050
Barra 92	Barra 100	31,4970	-18,0000	Barra 100	Barra 92	-30,7100	13,8220
Barra 92	Barra 102	44,6520	-8,3900	Barra 102	Barra 92	-44,3900	8,1271
Barra 93	Barra 94	44,7200	-19,5000	Barra 94	Barra 93	-44,1800	19,4400
Barra 94	Barra 95	40,8610	9,0144	Barra 95	Barra 94	-40,6200	-9,3120
Barra 94	Barra 96	19,7870	-9,8210	Barra 96	Barra 94	-19,6600	7,9767
Barra 94	Barra 100	4,2823	-50,5400	Barra 100	Barra 94	-3,8680	45,8070
Barra 95	Barra 96	-1,3770	-21,6900	Barra 96	Barra 95	1,4554	20,5060
Barra 96	Barra 97	-11,0900	-20,1600	Barra 97	Barra 96	11,1780	18,1880
Barra 98	Barra 100	-5,2580	2,4291	Barra 100	Barra 98	5,2773	-7,2950
Barra 99	Barra 100	-22,6500	-4,5940	Barra 100	Barra 99	22,7420	2,7937

Tabela B.8 – Divergência dos resultados de ramos do sistema de 118 barras calculados pelos programas PSP-UFU e ANAREDE
Fonte: Autor.

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVar)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVar)
Barra 1	Barra 2	0,0361%	0,0302%	Barra 2	Barra 1	0,0001%	0,0021%
Barra 1	Barra 3	0,0123%	0,0060%	Barra 3	Barra 1	0,0007%	0,0020%
Barra 100	Barra 101	0,0180%	0,0003%	Barra 101	Barra 100	0,0006%	0,0082%
Barra 100	Barra 103	0,0026%	0,0070%	Barra 103	Barra 100	0,0015%	0,0010%
Barra 100	Barra 104	0,0007%	0,0000%	Barra 104	Barra 100	0,0013%	0,0044%
Barra 100	Barra 106	0,0002%	0,0001%	Barra 106	Barra 100	0,0072%	0,0005%
Barra 101	Barra 102	0,0002%	0,0006%	Barra 102	Barra 101	0,0003%	0,0264%
Barra 103	Barra 104	0,0002%	0,0008%	Barra 104	Barra 103	0,0153%	0,0108%
Barra 103	Barra 105	0,0001%	0,0037%	Barra 105	Barra 103	0,0035%	0,0034%
Barra 103	Barra 110	0,0004%	0,0003%	Barra 110	Barra 103	0,0020%	0,0072%
Barra 104	Barra 105	0,0004%	0,0020%	Barra 105	Barra 104	0,0090%	0,0034%
Barra 105	Barra 106	0,0010%	0,0007%	Barra 106	Barra 105	0,0031%	0,0071%
Barra 105	Barra 107	0,0011%	0,0027%	Barra 107	Barra 105	0,0103%	0,0029%
Barra 105	Barra 108	0,0002%	0,0141%	Barra 108	Barra 105	0,0190%	0,0001%
Barra 106	Barra 107	0,0004%	0,0090%	Barra 107	Barra 106	0,0114%	0,0011%
Barra 108	Barra 109	0,0020%	0,0211%	Barra 109	Barra 108	0,0061%	0,0008%
Barra 109	Barra 110	0,0022%	0,0219%	Barra 110	Barra 109	0,0238%	0,0030%
Barra 11	Barra 12	0,0007%	0,0013%	Barra 12	Barra 11	0,0089%	0,0004%
Barra 11	Barra 13	0,0027%	0,0031%	Barra 13	Barra 11	0,0098%	0,0007%
Barra 110	Barra 111	0,0083%	0,0005%	Barra 111	Barra 110	0,0000%	0,0095%
Barra 110	Barra 112	0,0006%	0,0136%	Barra 112	Barra 110	0,0000%	0,0011%
Barra 114	Barra 115	0,0142%	0,0199%	Barra 115	Barra 114	0,0401%	0,0175%
Barra 12	Barra 14	0,0058%	0,0062%	Barra 14	Barra 12	0,0000%	0,0016%
Barra 12	Barra 16	0,0086%	0,0029%	Barra 16	Barra 12	0,0036%	0,0083%
Barra 12	Barra 117	0,0022%	0,0010%	Barra 117	Barra 12	0,0000%	0,0000%
Barra 13	Barra 15	0,0690%	0,0019%	Barra 15	Barra 13	0,0635%	0,0166%
Barra 14	Barra 15	0,0150%	0,0046%	Barra 15	Barra 14	0,0239%	0,0052%
Barra 15	Barra 17	0,0463%	0,0089%	Barra 17	Barra 15	0,0041%	0,0008%
Barra 15	Barra 19	0,0017%	0,0006%	Barra 19	Barra 15	0,0368%	0,0009%
Barra 15	Barra 33	0,0121%	0,0121%	Barra 33	Barra 15	0,0127%	0,0172%
Barra 16	Barra 17	0,0210%	0,0143%	Barra 17	Barra 16	0,0046%	0,0694%
Barra 17	Barra 18	0,0003%	0,0007%	Barra 18	Barra 17	0,0033%	0,0160%
Barra 17	Barra 31	0,0021%	0,0036%	Barra 31	Barra 17	0,0041%	0,0173%
Barra 17	Barra 113	0,0034%	0,0007%	Barra 113	Barra 17	0,0190%	0,0019%
Barra 18	Barra 19	0,0010%	0,0015%	Barra 19	Barra 18	0,0131%	0,0163%
Barra 19	Barra 20	0,0386%	0,0028%	Barra 20	Barra 19	0,0005%	0,0019%
Barra 19	Barra 34	0,0138%	0,0159%	Barra 34	Barra 19	0,0205%	0,0043%
Barra 2	Barra 12	0,0058%	0,0036%	Barra 12	Barra 2	0,0002%	0,0009%
Barra 20	Barra 21	0,0141%	0,0014%	Barra 21	Barra 20	0,0002%	0,0015%
Barra 21	Barra 22	0,0096%	0,0050%	Barra 22	Barra 21	0,0000%	0,0029%

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 22	Barra 23	0,0056%	0,0020%	Barra 23	Barra 22	0,0016%	0,0004%
Barra 23	Barra 24	0,0362%	0,0069%	Barra 24	Barra 23	0,0369%	0,0136%
Barra 23	Barra 25	0,0295%	0,0027%	Barra 25	Barra 23	0,0015%	0,0000%
Barra 23	Barra 32	0,0015%	0,0042%	Barra 32	Barra 23	0,0039%	0,0053%
Barra 24	Barra 70	0,0208%	0,0459%	Barra 70	Barra 24	0,0291%	0,0011%
Barra 24	Barra 72	0,1238%	0,0118%	Barra 72	Barra 24	0,1466%	0,0105%
Barra 25	Barra 27	0,0030%	0,0001%	Barra 27	Barra 25	0,0068%	0,0146%
Barra 26	Barra 25	0,0000%	0,0009%	Barra 25	Barra 26	0,0022%	0,0219%
Barra 26	Barra 30	0,0009%	0,0242%	Barra 30	Barra 26	0,0168%	0,0104%
Barra 27	Barra 28	0,0001%	0,0002%	Barra 28	Barra 27	0,0051%	0,0050%
Barra 27	Barra 32	0,0025%	0,0058%	Barra 32	Barra 27	0,0126%	0,0014%
Barra 27	Barra 115	0,0004%	0,0010%	Barra 115	Barra 27	0,0216%	0,0064%
Barra 28	Barra 29	0,0017%	0,0001%	Barra 29	Barra 28	0,0093%	0,0005%
Barra 29	Barra 31	0,0039%	0,0040%	Barra 31	Barra 29	0,0018%	0,0006%
Barra 3	Barra 5	0,0018%	0,0277%	Barra 5	Barra 3	0,0010%	0,0020%
Barra 3	Barra 12	0,0037%	0,0072%	Barra 12	Barra 3	0,0011%	0,0009%
Barra 30	Barra 17	0,0001%	0,0003%	Barra 17	Barra 30	0,0086%	0,0055%
Barra 30	Barra 38	0,0074%	0,0017%	Barra 38	Barra 30	0,0047%	0,0028%
Barra 31	Barra 32	0,0166%	0,0025%	Barra 32	Barra 31	0,0011%	0,0231%
Barra 32	Barra 113	0,0024%	0,0118%	Barra 113	Barra 32	0,0097%	0,0033%
Barra 32	Barra 114	0,0056%	0,0032%	Barra 114	Barra 32	0,0015%	0,0126%
Barra 33	Barra 37	0,0189%	0,0273%	Barra 37	Barra 33	0,0072%	0,0036%
Barra 34	Barra 36	0,0008%	0,0028%	Barra 36	Barra 34	0,0142%	0,0073%
Barra 34	Barra 37	0,0023%	0,0039%	Barra 37	Barra 34	0,0013%	0,0010%
Barra 34	Barra 43	0,0625%	0,0182%	Barra 43	Barra 34	0,0826%	0,0093%
Barra 35	Barra 36	0,0335%	0,0010%	Barra 36	Barra 35	0,0325%	0,0064%
Barra 35	Barra 37	0,0140%	0,0040%	Barra 37	Barra 35	0,0005%	0,0039%
Barra 37	Barra 39	0,0021%	0,0032%	Barra 39	Barra 37	0,0009%	0,0231%
Barra 37	Barra 40	0,0006%	0,0032%	Barra 40	Barra 37	0,0067%	0,0092%
Barra 38	Barra 37	0,0001%	0,0008%	Barra 37	Barra 38	0,0043%	0,0026%
Barra 38	Barra 65	0,0018%	0,0010%	Barra 65	Barra 38	0,0057%	0,0509%
Barra 39	Barra 40	0,0021%	0,0059%	Barra 40	Barra 39	0,0194%	0,0040%
Barra 4	Barra 5	0,0305%	0,0031%	Barra 5	Barra 4	0,0022%	0,0007%
Barra 4	Barra 11	0,0004%	0,0158%	Barra 11	Barra 4	0,0008%	0,0022%
Barra 40	Barra 41	0,0074%	0,0243%	Barra 41	Barra 40	0,0063%	0,0085%
Barra 40	Barra 42	0,0362%	0,0091%	Barra 42	Barra 40	0,0062%	0,0105%
Barra 41	Barra 42	0,0047%	0,0025%	Barra 42	Barra 41	0,0022%	0,0040%
Barra 42	Barra 49	0,0002%	0,0070%	Barra 49	Barra 42	0,0009%	0,0003%
Barra 42	Barra 49	0,0002%	0,0070%	Barra 49	Barra 42	0,0009%	0,0003%
Barra 43	Barra 44	0,0010%	0,0400%	Barra 44	Barra 43	0,0054%	0,0007%
Barra 44	Barra 45	0,0090%	0,0041%	Barra 45	Barra 44	0,0045%	0,0067%
Barra 45	Barra 46	0,0083%	0,0056%	Barra 46	Barra 45	0,0016%	0,0001%

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 45	Barra 49	0,0030%	0,0085%	Barra 49	Barra 45	0,0007%	0,0025%
Barra 46	Barra 47	0,0039%	0,0420%	Barra 47	Barra 46	0,0027%	0,0311%
Barra 46	Barra 48	0,0175%	0,0029%	Barra 48	Barra 46	0,0022%	0,0035%
Barra 47	Barra 49	0,0061%	0,0189%	Barra 49	Barra 47	0,0088%	0,0047%
Barra 47	Barra 69	0,0044%	0,0096%	Barra 69	Barra 47	0,0023%	0,0229%
Barra 48	Barra 49	0,0021%	0,0026%	Barra 49	Barra 48	0,0003%	0,0102%
Barra 49	Barra 50	0,0005%	0,0036%	Barra 50	Barra 49	0,0071%	0,0113%
Barra 49	Barra 51	0,0004%	0,0010%	Barra 51	Barra 49	0,0048%	0,0280%
Barra 49	Barra 54	0,0000%	0,0018%	Barra 54	Barra 49	0,0097%	0,0032%
Barra 49	Barra 54	0,0015%	0,0034%	Barra 54	Barra 49	0,0075%	0,0041%
Barra 49	Barra 66	0,0254%	0,0034%	Barra 66	Barra 49	0,0039%	0,0008%
Barra 49	Barra 66	0,0254%	0,0034%	Barra 66	Barra 49	0,0039%	0,0008%
Barra 49	Barra 69	0,0063%	0,0024%	Barra 69	Barra 49	0,0034%	0,0111%
Barra 5	Barra 6	0,0005%	0,0015%	Barra 6	Barra 5	0,0000%	0,0164%
Barra 5	Barra 11	0,0005%	0,0018%	Barra 11	Barra 5	0,0051%	0,0051%
Barra 50	Barra 57	0,0006%	0,0003%	Barra 57	Barra 50	0,0004%	0,0189%
Barra 51	Barra 52	0,0006%	0,0005%	Barra 52	Barra 51	0,0026%	0,0073%
Barra 51	Barra 58	0,0001%	0,0006%	Barra 58	Barra 51	0,0236%	0,0096%
Barra 52	Barra 53	0,0024%	0,0004%	Barra 53	Barra 52	0,0329%	0,0037%
Barra 53	Barra 54	0,0266%	0,0035%	Barra 54	Barra 53	0,0020%	0,0015%
Barra 54	Barra 55	0,0006%	0,0025%	Barra 55	Barra 54	0,0053%	0,0087%
Barra 54	Barra 56	0,0029%	0,0001%	Barra 56	Barra 54	0,0241%	0,0094%
Barra 54	Barra 59	0,0134%	0,0017%	Barra 59	Barra 54	0,0006%	0,0000%
Barra 55	Barra 56	0,0001%	0,0061%	Barra 56	Barra 55	0,0019%	0,0011%
Barra 55	Barra 59	0,0081%	0,0031%	Barra 59	Barra 55	0,0006%	0,0004%
Barra 56	Barra 57	0,0148%	0,0030%	Barra 57	Barra 56	0,0006%	0,0002%
Barra 56	Barra 58	0,0020%	0,0115%	Barra 58	Barra 56	0,0001%	0,0023%
Barra 56	Barra 59	0,0156%	0,0008%	Barra 59	Barra 56	0,0017%	0,0029%
Barra 56	Barra 59	0,0158%	0,0033%	Barra 59	Barra 56	0,0008%	0,0043%
Barra 59	Barra 60	0,0054%	0,0017%	Barra 60	Barra 59	0,0006%	0,0012%
Barra 59	Barra 61	0,0006%	0,0001%	Barra 61	Barra 59	0,0003%	0,0014%
Barra 6	Barra 7	0,0014%	0,0086%	Barra 7	Barra 6	0,0007%	0,0004%
Barra 60	Barra 61	0,0282%	0,0003%	Barra 61	Barra 60	0,0028%	0,0055%
Barra 60	Barra 62	0,0040%	0,0052%	Barra 62	Barra 60	0,0005%	0,0005%
Barra 61	Barra 62	0,0004%	0,0146%	Barra 62	Barra 61	0,0192%	0,0032%
Barra 62	Barra 66	0,0041%	0,0285%	Barra 66	Barra 62	0,0000%	0,0009%
Barra 62	Barra 67	0,0089%	0,0304%	Barra 67	Barra 62	0,0002%	0,0026%
Barra 63	Barra 59	0,0027%	0,0007%	Barra 59	Barra 63	0,0159%	0,0071%
Barra 63	Barra 64	0,0160%	0,0037%	Barra 64	Barra 63	0,0012%	0,0003%
Barra 64	Barra 61	0,0004%	0,0021%	Barra 61	Barra 64	0,0029%	0,0185%
Barra 64	Barra 65	0,0006%	0,0023%	Barra 65	Barra 64	0,0012%	0,0001%
Barra 65	Barra 66	0,0126%	0,0004%	Barra 66	Barra 65	0,0102%	0,0064%

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 65	Barra 68	0,0605%	0,0125%	Barra 68	Barra 65	0,0391%	0,0044%
Barra 66	Barra 67	0,0005%	0,0017%	Barra 67	Barra 66	0,0037%	0,0140%
Barra 68	Barra 69	0,0205%	0,0028%	Barra 69	Barra 68	0,0046%	0,0391%
Barra 68	Barra 81	0,0096%	0,0112%	Barra 81	Barra 68	0,0015%	0,0025%
Barra 68	Barra 116	0,0022%	0,0067%	Barra 116	Barra 68	0,0000%	0,0002%
Barra 69	Barra 70	0,0068%	0,0014%	Barra 70	Barra 69	0,0456%	0,0224%
Barra 69	Barra 75	0,0020%	0,0034%	Barra 75	Barra 69	0,0272%	0,0270%
Barra 69	Barra 77	0,0033%	0,0076%	Barra 77	Barra 69	0,0026%	0,0034%
Barra 7	Barra 12	0,0031%	0,0008%	Barra 12	Barra 7	0,0195%	0,0018%
Barra 70	Barra 71	0,0073%	0,0379%	Barra 71	Barra 70	0,0075%	0,0016%
Barra 70	Barra 74	0,0032%	0,0046%	Barra 74	Barra 70	0,0104%	0,0065%
Barra 70	Barra 75	0,0714%	0,0020%	Barra 75	Barra 70	0,0574%	0,0027%
Barra 71	Barra 72	0,0148%	0,0400%	Barra 72	Barra 71	0,0203%	0,0041%
Barra 71	Barra 73	0,0001%	0,0077%	Barra 73	Barra 71	0,0000%	0,0002%
Barra 74	Barra 75	0,0033%	0,0014%	Barra 75	Barra 74	0,0019%	0,0047%
Barra 75	Barra 77	0,0119%	0,0028%	Barra 77	Barra 75	0,0001%	0,0007%
Barra 75	Barra 118	0,0004%	0,0006%	Barra 118	Barra 75	0,0088%	0,0013%
Barra 76	Barra 77	0,0042%	0,0140%	Barra 77	Barra 76	0,0004%	0,0005%
Barra 76	Barra 118	0,0066%	0,0004%	Barra 118	Barra 76	0,0001%	0,0002%
Barra 77	Barra 78	0,0015%	0,0022%	Barra 78	Barra 77	0,0027%	0,0010%
Barra 77	Barra 80	0,0048%	0,0124%	Barra 80	Barra 77	0,0005%	0,0012%
Barra 77	Barra 80	0,0060%	0,0012%	Barra 80	Barra 77	0,0009%	0,0013%
Barra 77	Barra 82	0,0036%	0,0020%	Barra 82	Barra 77	0,0128%	0,0068%
Barra 78	Barra 79	0,0046%	0,0267%	Barra 79	Barra 78	0,0023%	0,0027%
Barra 79	Barra 80	0,0071%	0,0105%	Barra 80	Barra 79	0,0012%	0,0013%
Barra 8	Barra 5	0,0021%	0,0015%	Barra 5	Barra 8	0,0050%	0,0026%
Barra 8	Barra 9	0,0080%	0,0039%	Barra 9	Barra 8	0,0011%	0,0005%
Barra 8	Barra 30	0,0051%	0,0021%	Barra 30	Barra 8	0,0003%	0,0031%
Barra 80	Barra 96	0,0002%	0,0000%	Barra 96	Barra 80	0,0010%	0,0114%
Barra 80	Barra 97	0,0000%	0,0010%	Barra 97	Barra 80	0,0062%	0,0088%
Barra 80	Barra 98	0,0002%	0,0005%	Barra 98	Barra 80	0,0078%	0,0083%
Barra 80	Barra 99	0,0003%	0,0004%	Barra 99	Barra 80	0,0020%	0,0139%
Barra 81	Barra 80	0,0053%	0,0002%	Barra 80	Barra 81	0,0015%	0,0050%
Barra 82	Barra 83	0,0029%	0,0000%	Barra 83	Barra 82	0,0002%	0,0083%
Barra 82	Barra 96	0,0012%	0,0045%	Barra 96	Barra 82	0,0019%	0,0039%
Barra 83	Barra 84	0,0176%	0,0022%	Barra 84	Barra 83	0,0013%	0,0105%
Barra 83	Barra 85	0,0005%	0,0008%	Barra 85	Barra 83	0,0001%	0,0022%
Barra 84	Barra 85	0,0119%	0,0007%	Barra 85	Barra 84	0,0005%	0,0006%
Barra 85	Barra 86	0,0028%	0,0045%	Barra 86	Barra 85	0,0178%	0,0007%
Barra 85	Barra 88	0,0037%	0,0002%	Barra 88	Barra 85	0,0004%	0,0050%
Barra 85	Barra 89	0,0058%	0,0016%	Barra 89	Barra 85	0,0000%	0,0009%
Barra 86	Barra 87	0,0013%	0,0064%	Barra 87	Barra 86	0,0000%	0,0036%

De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MVAr)
Barra 88	Barra 89	0,0018%	0,0149%	Barra 89	Barra 88	0,0026%	0,0005%
Barra 89	Barra 90	0,0004%	0,0070%	Barra 90	Barra 89	0,0031%	0,0003%
Barra 89	Barra 90	0,0013%	0,0012%	Barra 90	Barra 89	0,0317%	0,0002%
Barra 89	Barra 92	0,0012%	0,0047%	Barra 92	Barra 89	0,0197%	0,0026%
Barra 89	Barra 92	0,0000%	0,0040%	Barra 92	Barra 89	0,0034%	0,0002%
Barra 9	Barra 10	0,0102%	0,0043%	Barra 10	Barra 9	0,0000%	0,0041%
Barra 90	Barra 91	0,0001%	0,0005%	Barra 91	Barra 90	0,0118%	0,0034%
Barra 91	Barra 92	0,0021%	0,0029%	Barra 92	Barra 91	0,0000%	0,0012%
Barra 92	Barra 93	0,0004%	0,0146%	Barra 93	Barra 92	0,0003%	0,0040%
Barra 92	Barra 94	0,0007%	0,0289%	Barra 94	Barra 92	0,0024%	0,0031%
Barra 92	Barra 100	0,0015%	0,0138%	Barra 100	Barra 92	0,0070%	0,0030%
Barra 92	Barra 102	0,0011%	0,0005%	Barra 102	Barra 92	0,0088%	0,0005%
Barra 93	Barra 94	0,0004%	0,0077%	Barra 94	Barra 93	0,0035%	0,0018%
Barra 94	Barra 95	0,0008%	0,0001%	Barra 95	Barra 94	0,0085%	0,0053%
Barra 94	Barra 96	0,0029%	0,0051%	Barra 96	Barra 94	0,0035%	0,0011%
Barra 94	Barra 100	0,0035%	0,0038%	Barra 100	Barra 94	0,0118%	0,0009%
Barra 95	Barra 96	0,0339%	0,0069%	Barra 96	Barra 95	0,0145%	0,0007%
Barra 96	Barra 97	0,0311%	0,0084%	Barra 97	Barra 96	0,0033%	0,0021%
Barra 98	Barra 100	0,0048%	0,0012%	Barra 100	Barra 98	0,0020%	0,0043%
Barra 99	Barra 100	0,0018%	0,0040%	Barra 100	Barra 99	0,0012%	0,0019%

B.3 Curto-circuito

Tabela B.9 – Tensões do sistema de 118 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo PSP-UFU.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	0,8004	-16,4	0,8004	-136,4	0,8004	103,6
Barra 2	0,8101	-15,8	0,8101	-135,8	0,8101	104,2
Barra 3	0,8068	-15,3	0,8068	-135,3	0,8068	104,7
Barra 4	0,8253	-11,1	0,8253	-131,1	0,8253	108,9
Barra 5	0,8265	-10,6	0,8265	-130,6	0,8265	109,4
Barra 6	0,8250	-13,8	0,8250	-133,8	0,8250	106,2
Barra 7	0,8238	-14,3	0,8238	-134,3	0,8238	105,7
Barra 8	0,8274	-4,9	0,8274	-124,9	0,8274	115,1
Barra 9	0,8619	4,0	0,8619	-116,0	0,8619	124,0
Barra 10	0,8861	12,8	0,8861	-107,2	0,8861	132,8
Barra 11	0,8157	-14,0	0,8157	-134,0	0,8157	106,0
Barra 12	0,8232	-14,7	0,8232	-134,7	0,8232	105,3
Barra 13	0,7939	-15,6	0,7939	-135,6	0,7939	104,4

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 14	0,8079	-15,6	0,8079	-135,6	0,8079	104,4
Barra 15	0,7690	-16,5	0,7690	-136,5	0,7690	103,5
Barra 16	0,8058	-15,1	0,8058	-135,1	0,8058	104,9
Barra 17	0,7879	-13,6	0,7879	-133,6	0,7879	106,4
Barra 18	0,7748	-16,3	0,7748	-136,3	0,7748	103,7
Barra 19	0,7586	-16,9	0,7586	-136,9	0,7586	103,1
Barra 20	0,7428	-16,1	0,7428	-136,1	0,7428	103,9
Barra 21	0,7348	-14,5	0,7348	-134,5	0,7348	105,5
Barra 22	0,7335	-12,0	0,7335	-132,0	0,7335	108,0
Barra 23	0,7407	-6,9	0,7407	-126,9	0,7407	113,1
Barra 24	0,6773	-8,5	0,6773	-128,5	0,6773	111,5
Barra 25	0,8328	2,4	0,8328	-117,6	0,8328	122,4
Barra 26	0,8100	5,0	0,8100	-115,0	0,8100	125,0
Barra 27	0,7738	-12,5	0,7738	-132,5	0,7738	107,5
Barra 28	0,7710	-14,3	0,7710	-134,3	0,7710	105,7
Barra 29	0,7750	-15,5	0,7750	-135,5	0,7750	104,5
Barra 30	0,7597	-7,6	0,7597	-127,6	0,7597	112,4
Barra 31	0,7790	-15,4	0,7790	-135,4	0,7790	104,6
Barra 32	0,7630	-13,3	0,7630	-133,3	0,7630	106,7
Barra 33	0,7294	-17,3	0,7294	-137,3	0,7294	102,7
Barra 34	0,6974	-17,1	0,6974	-137,1	0,6974	102,9
Barra 35	0,6979	-17,6	0,6979	-137,6	0,6979	102,4
Barra 36	0,6989	-17,7	0,6989	-137,7	0,6989	102,3
Barra 37	0,6984	-16,5	0,6984	-136,5	0,6984	103,5
Barra 38	0,6539	-10,5	0,6539	-130,5	0,6539	109,5
Barra 39	0,6763	-21,3	0,6763	-141,3	0,6763	98,7
Barra 40	0,6729	-23,2	0,6729	-143,2	0,6729	96,8
Barra 41	0,6598	-23,8	0,6598	-143,8	0,6598	96,2
Barra 42	0,6418	-22,5	0,6418	-142,5	0,6418	97,5
Barra 43	0,6403	-16,9	0,6403	-136,9	0,6403	103,1
Barra 44	0,5686	-13,6	0,5686	-133,6	0,5686	106,4
Barra 45	0,5422	-11,2	0,5422	-131,2	0,5422	108,8
Barra 46	0,5324	-8,5	0,5324	-128,5	0,5324	111,5
Barra 47	0,4646	-5,9	0,4646	-125,9	0,4646	114,1
Barra 48	0,5362	-5,1	0,5362	-125,0	0,5362	115,0
Barra 49	0,5378	-3,5	0,5378	-123,5	0,5378	116,5
Barra 50	0,5399	-5,7	0,5399	-125,7	0,5399	114,3
Barra 51	0,5397	-8,4	0,5397	-128,4	0,5397	111,6
Barra 52	0,5389	-9,4	0,5389	-129,4	0,5389	110,6
Barra 53	0,5460	-10,3	0,5460	-130,3	0,5460	109,7
Barra 54	0,5611	-9,2	0,5611	-129,2	0,5611	110,8
Barra 55	0,5633	-9,6	0,5633	-129,7	0,5633	110,3

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 56	0,5610	-9,4	0,5610	-129,4	0,5610	110,6
Barra 57	0,5504	-8,3	0,5504	-128,3	0,5504	111,7
Barra 58	0,5474	-9,2	0,5474	-129,2	0,5474	110,8
Barra 59	0,5642	-2,1	0,5642	-122,1	0,5642	117,9
Barra 60	0,5445	3,1	0,5445	-116,9	0,5445	123,1
Barra 61	0,5432	4,1	0,5432	-115,8	0,5432	124,2
Barra 62	0,5479	3,1	0,5479	-116,9	0,5479	123,1
Barra 63	0,5207	1,5	0,5207	-118,5	0,5207	121,5
Barra 64	0,5104	3,7	0,5104	-116,3	0,5104	123,7
Barra 65	0,4626	7,2	0,4626	-112,8	0,4626	127,2
Barra 66	0,5436	8,6	0,5436	-111,4	0,5436	128,6
Barra 67	0,5420	5,2	0,5420	-114,8	0,5420	125,2
Barra 68	0,3450	5,8	0,3450	-114,2	0,3450	125,8
Barra 69	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
Barra 70	0,3291	-14,1	0,3291	-134,1	0,3291	105,9
Barra 71	0,3871	-14,2	0,3871	-134,2	0,3871	105,8
Barra 72	0,5556	-12,3	0,5556	-132,3	0,5556	107,7
Barra 73	0,4182	-14,6	0,4182	-134,6	0,4182	105,4
Barra 74	0,3041	-13,7	0,3041	-133,7	0,3041	106,3
Barra 75	0,2764	-11,0	0,2764	-131,0	0,2764	109,0
Barra 76	0,3494	-7,9	0,3494	-127,9	0,3494	112,1
Barra 77	0,4071	5,0	0,4071	-115,0	0,4071	125,0
Barra 78	0,4145	5,0	0,4145	-115,0	0,4145	125,0
Barra 79	0,4329	6,1	0,4329	-113,9	0,4329	126,1
Barra 80	0,4928	9,9	0,4928	-110,1	0,4928	129,9
Barra 81	0,3919	7,3	0,3919	-112,7	0,3919	127,3
Barra 82	0,5433	6,0	0,5433	-114,0	0,5433	126,0
Barra 83	0,5839	7,3	0,5839	-112,7	0,5839	127,3
Barra 84	0,6491	9,3	0,6491	-110,7	0,6491	129,3
Barra 85	0,6855	10,4	0,6855	-109,6	0,6855	130,4
Barra 86	0,7147	7,3	0,7147	-112,7	0,7147	127,3
Barra 87	0,7866	5,8	0,7866	-114,2	0,7866	125,8
Barra 88	0,7216	14,7	0,7216	-105,3	0,7216	134,7
Barra 89	0,7595	19,2	0,7595	-100,8	0,7595	139,2
Barra 90	0,7475	10,3	0,7475	-109,7	0,7475	130,3
Barra 91	0,7392	10,1	0,7392	-109,9	0,7392	130,1
Barra 92	0,7209	12,0	0,7209	-108,0	0,7209	132,0
Barra 93	0,6797	8,9	0,6797	-111,1	0,6797	128,9
Barra 94	0,6501	6,4	0,6501	-113,6	0,6501	126,4
Barra 95	0,6093	5,9	0,6093	-114,1	0,6093	125,9
Barra 96	0,5726	6,4	0,5726	-113,6	0,5726	126,4
Barra 97	0,5313	7,7	0,5313	-112,3	0,5313	127,7

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 98	0,5717	5,8	0,5717	-114,2	0,5717	125,8
Barra 99	0,6549	2,3	0,6549	-117,7	0,6549	122,3
Barra 100	0,7162	3,7	0,7162	-116,3	0,7162	123,7
Barra 101	0,7073	6,4	0,7073	-113,6	0,7073	126,4
Barra 102	0,7151	10,1	0,7151	-109,9	0,7151	130,1
Barra 103	0,7571	-2,5	0,7571	-122,5	0,7571	117,5
Barra 104	0,7400	-5,8	0,7400	-125,8	0,7400	114,2
Barra 105	0,7418	-7,2	0,7418	-127,2	0,7418	112,8
Barra 106	0,7302	-7,2	0,7302	-127,2	0,7302	112,8
Barra 107	0,7445	-11,2	0,7445	-131,2	0,7445	108,8
Barra 108	0,7583	-9,0	0,7583	-129,0	0,7583	111,0
Barra 109	0,7655	-9,7	0,7655	-129,7	0,7655	110,3
Barra 110	0,7876	-11,0	0,7876	-131,0	0,7876	109,0
Barra 111	0,8076	-9,4	0,8076	-129,4	0,8076	110,6
Barra 112	0,8025	-15,0	0,8025	-135,0	0,8025	105,0
Barra 113	0,7914	-13,9	0,7914	-133,9	0,7914	106,1
Barra 114	0,7635	-13,5	0,7635	-133,5	0,7635	106,5
Barra 115	0,7640	-13,5	0,7640	-133,5	0,7640	106,5
Barra 116	0,3481	4,4	0,3481	-115,6	0,3481	124,4
Barra 117	0,8098	-16,2	0,8098	-136,2	0,8098	103,8
Barra 118	0,3084	-9,8	0,3084	-129,8	0,3084	110,2

Tabela B.10 – Tensões do sistema de 118 barras com curto-círcuito trifásico calculado pelo ANAFAS.
Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 1	0,8004	-16,4	0,8004	-136,4	0,8004	103,6
Barra 2	0,8101	-15,8	0,8101	-135,8	0,8101	104,2
Barra 3	0,8067	-15,3	0,8067	-135,3	0,8067	104,7
Barra 4	0,8253	-11,1	0,8253	-131,1	0,8253	108,9
Barra 5	0,8266	-10,6	0,8266	-130,6	0,8266	109,4
Barra 6	0,8250	-13,8	0,8250	-133,8	0,8250	106,2
Barra 7	0,8238	-14,3	0,8238	-134,3	0,8238	105,7
Barra 8	0,8274	-4,9	0,8274	-124,9	0,8274	115,1
Barra 9	0,8620	4,0	0,8620	-116,0	0,8620	124,0
Barra 10	0,8861	12,8	0,8861	-107,2	0,8861	132,8
Barra 11	0,8157	-14,0	0,8157	-134,0	0,8157	106,0
Barra 12	0,8232	-14,7	0,8232	-134,7	0,8232	105,3
Barra 13	0,7940	-15,6	0,7940	-135,6	0,7940	104,4
Barra 14	0,8079	-15,6	0,8079	-135,6	0,8079	104,4
Barra 15	0,7690	-16,5	0,7690	-136,5	0,7690	103,5

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 16	0,8057	-15,1	0,8057	-135,1	0,8057	104,9
Barra 17	0,7879	-13,6	0,7879	-133,6	0,7879	106,4
Barra 18	0,7748	-16,3	0,7748	-136,3	0,7748	103,7
Barra 19	0,7586	-16,9	0,7586	-136,9	0,7586	103,1
Barra 20	0,7428	-16,1	0,7428	-136,1	0,7428	103,9
Barra 21	0,7347	-14,5	0,7347	-134,5	0,7347	105,5
Barra 22	0,7335	-12,0	0,7335	-132,0	0,7335	108,0
Barra 23	0,7408	-6,9	0,7408	-126,9	0,7408	113,1
Barra 24	0,6773	-8,5	0,6773	-128,5	0,6773	111,5
Barra 25	0,8328	2,4	0,8328	-117,6	0,8328	122,4
Barra 26	0,8100	5,0	0,8100	-115,0	0,8100	125,0
Barra 27	0,7738	-12,5	0,7738	-132,5	0,7738	107,5
Barra 28	0,7710	-14,3	0,7710	-134,3	0,7710	105,7
Barra 29	0,7750	-15,5	0,7750	-135,5	0,7750	104,5
Barra 30	0,7597	-7,6	0,7597	-127,6	0,7597	112,4
Barra 31	0,7790	-15,4	0,7790	-135,4	0,7790	104,6
Barra 32	0,7630	-13,3	0,7630	-133,3	0,7630	106,7
Barra 33	0,7294	-17,3	0,7294	-137,3	0,7294	102,7
Barra 34	0,6974	-17,1	0,6974	-137,1	0,6974	102,9
Barra 35	0,6979	-17,6	0,6979	-137,6	0,6979	102,4
Barra 36	0,6990	-17,7	0,6990	-137,7	0,6990	102,3
Barra 37	0,6983	-16,5	0,6983	-136,5	0,6983	103,5
Barra 38	0,6539	-10,5	0,6539	-130,5	0,6539	109,5
Barra 39	0,6764	-21,3	0,6764	-141,3	0,6764	98,7
Barra 40	0,6729	-23,2	0,6729	-143,2	0,6729	96,8
Barra 41	0,6598	-23,8	0,6598	-143,8	0,6598	96,2
Barra 42	0,6418	-22,5	0,6418	-142,5	0,6418	97,5
Barra 43	0,6403	-16,9	0,6403	-136,9	0,6403	103,1
Barra 44	0,5686	-13,6	0,5686	-133,6	0,5686	106,4
Barra 45	0,5423	-11,2	0,5423	-131,2	0,5423	108,8
Barra 46	0,5325	-8,5	0,5325	-128,5	0,5325	111,5
Barra 47	0,4646	-5,9	0,4646	-125,9	0,4646	114,1
Barra 48	0,5366	-5,1	0,5366	-125,1	0,5366	114,9
Barra 49	0,5378	-3,5	0,5378	-123,5	0,5378	116,5
Barra 50	0,5398	-5,7	0,5398	-125,7	0,5398	114,3
Barra 51	0,5397	-8,4	0,5397	-128,4	0,5397	111,6
Barra 52	0,5389	-9,4	0,5389	-129,4	0,5389	110,6
Barra 53	0,5460	-10,3	0,5460	-130,3	0,5460	109,7
Barra 54	0,5611	-9,2	0,5611	-129,2	0,5611	110,8
Barra 55	0,5633	-9,6	0,5633	-129,6	0,5633	110,4
Barra 56	0,5610	-9,4	0,5610	-129,4	0,5610	110,6
Barra 57	0,5504	-8,3	0,5504	-128,3	0,5504	111,7

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 58	0,5474	-9,2	0,5474	-129,2	0,5474	110,8
Barra 59	0,5642	-2,1	0,5642	-122,1	0,5642	117,9
Barra 60	0,5446	3,1	0,5446	-116,9	0,5446	123,1
Barra 61	0,5432	4,1	0,5432	-115,9	0,5432	124,1
Barra 62	0,5479	3,1	0,5479	-116,9	0,5479	123,1
Barra 63	0,5206	1,5	0,5206	-118,5	0,5206	121,5
Barra 64	0,5103	3,7	0,5103	-116,3	0,5103	123,7
Barra 65	0,4626	7,2	0,4626	-112,8	0,4626	127,2
Barra 66	0,5436	8,6	0,5436	-111,4	0,5436	128,6
Barra 67	0,5423	5,2	0,5423	-114,8	0,5423	125,2
Barra 68	0,3447	5,8	0,3447	-114,2	0,3447	125,8
Barra 69	0,0000	0,0	0,0000	0,0	0,0000	0,0
Barra 70	0,3291	-14,1	0,3291	-134,1	0,3291	105,9
Barra 71	0,3871	-14,2	0,3871	-134,2	0,3871	105,8
Barra 72	0,5556	-12,3	0,5556	-132,3	0,5556	107,7
Barra 73	0,4182	-14,6	0,4182	-134,6	0,4182	105,4
Barra 74	0,3041	-13,7	0,3041	-133,7	0,3041	106,3
Barra 75	0,2763	-11,0	0,2763	-131,0	0,2763	109,0
Barra 76	0,3494	-7,9	0,3494	-127,9	0,3494	112,1
Barra 77	0,4071	5,0	0,4071	-115,0	0,4071	125,0
Barra 78	0,4141	5,0	0,4141	-115,0	0,4141	125,0
Barra 79	0,4327	6,1	0,4327	-113,9	0,4327	126,1
Barra 80	0,4929	9,9	0,4929	-110,1	0,4929	129,9
Barra 81	0,3919	7,3	0,3919	-112,7	0,3919	127,3
Barra 82	0,5432	6,0	0,5432	-114,0	0,5432	126,0
Barra 83	0,5839	7,3	0,5839	-112,7	0,5839	127,3
Barra 84	0,6491	9,3	0,6491	-110,7	0,6491	129,3
Barra 85	0,6855	10,4	0,6855	-109,6	0,6855	130,4
Barra 86	0,7148	7,3	0,7148	-112,7	0,7148	127,3
Barra 87	0,7866	5,8	0,7866	-114,2	0,7866	125,8
Barra 88	0,7216	14,7	0,7216	-105,3	0,7216	134,7
Barra 89	0,7595	19,2	0,7595	-100,8	0,7595	139,2
Barra 90	0,7475	10,3	0,7475	-109,7	0,7475	130,3
Barra 91	0,7392	10,1	0,7392	-109,9	0,7392	130,1
Barra 92	0,7210	12,0	0,7210	-108,0	0,7210	132,0
Barra 93	0,6797	8,9	0,6797	-111,1	0,6797	128,9
Barra 94	0,6501	6,4	0,6501	-113,6	0,6501	126,4
Barra 95	0,6093	5,9	0,6093	-114,1	0,6093	125,9
Barra 96	0,5726	6,4	0,5726	-113,6	0,5726	126,4
Barra 97	0,5312	7,7	0,5312	-112,3	0,5312	127,7
Barra 98	0,5722	5,8	0,5722	-114,2	0,5722	125,8
Barra 99	0,6549	2,3	0,6549	-117,7	0,6549	122,3

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)
Barra 100	0,7163	3,7	0,7163	-116,3	0,7163	123,7
Barra 101	0,7073	6,4	0,7073	-113,6	0,7073	126,4
Barra 102	0,7151	10,1	0,7151	-109,9	0,7151	130,1
Barra 103	0,7571	-2,5	0,7571	-122,5	0,7571	117,5
Barra 104	0,7400	-5,8	0,7400	-125,8	0,7400	114,2
Barra 105	0,7418	-7,2	0,7418	-127,2	0,7418	112,8
Barra 106	0,7301	-7,2	0,7301	-127,2	0,7301	112,8
Barra 107	0,7445	-11,2	0,7445	-131,2	0,7445	108,8
Barra 108	0,7583	-9,0	0,7583	-129,0	0,7583	111,0
Barra 109	0,7655	-9,7	0,7655	-129,7	0,7655	110,3
Barra 110	0,7876	-11,0	0,7876	-131,0	0,7876	109,0
Barra 111	0,8076	-9,4	0,8076	-129,4	0,8076	110,6
Barra 112	0,8025	-15,0	0,8025	-135,0	0,8025	105,0
Barra 113	0,7914	-13,9	0,7914	-133,9	0,7914	106,1
Barra 114	0,7635	-13,5	0,7635	-133,5	0,7635	106,5
Barra 115	0,7639	-13,5	0,7639	-133,5	0,7639	106,5
Barra 116	0,3481	4,4	0,3481	-115,6	0,3481	124,4
Barra 117	0,8098	-16,2	0,8098	-136,2	0,8098	103,8
Barra 118	0,3084	-9,8	0,3084	-129,8	0,3084	110,2

Tabela B.11 – Divergências do cálculo de curto-círcuito trifásico do sistema de 118 barras realizados pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.

Fonte: Autor.

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 1	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 3	0,0124%	0,0000%	0,0124%	0,0000%	0,0124%	0,0000%
Barra 4	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 5	0,0121%	0,0000%	0,0121%	0,0000%	0,0121%	0,0000%
Barra 6	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 8	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	0,0116%	0,0000%	0,0116%	0,0000%	0,0116%	0,0000%
Barra 10	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 12	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 13	0,0126%	0,0000%	0,0126%	0,0000%	0,0126%	0,0000%
Barra 14	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 15	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 16	0,0124%	0,0000%	0,0124%	0,0000%	0,0124%	0,0000%
Barra 17	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 18	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 19	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 20	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 21	0,0136%	0,0000%	0,0136%	0,0000%	0,0136%	0,0000%
Barra 22	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 23	0,0135%	0,0000%	0,0135%	0,0000%	0,0135%	0,0000%
Barra 24	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 25	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 26	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 27	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 28	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 29	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 30	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 31	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 32	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 33	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 34	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 35	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 36	0,0143%	0,0000%	0,0143%	0,0000%	0,0143%	0,0000%
Barra 37	0,0143%	0,0000%	0,0143%	0,0000%	0,0143%	0,0000%
Barra 38	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 39	0,0148%	0,0000%	0,0148%	0,0000%	0,0148%	0,0000%
Barra 40	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 41	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 42	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 43	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 44	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 45	0,0184%	0,0000%	0,0184%	0,0000%	0,0184%	0,0000%
Barra 46	0,0188%	0,0000%	0,0188%	0,0000%	0,0188%	0,0000%
Barra 47	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 48	0,0745%	0,0000%	0,0745%	0,0799%	0,0745%	0,0870%
Barra 49	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 50	0,0185%	0,0000%	0,0185%	0,0000%	0,0185%	0,0000%
Barra 51	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 52	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 53	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 54	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 55	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0772%	0,0000%	0,0906%
Barra 56	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 57	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 58	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 59	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 60	0,0184%	0,0000%	0,0184%	0,0000%	0,0184%	0,0000%

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 61	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0863%	0,0000%	0,0806%
Barra 62	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 63	0,0192%	0,0000%	0,0192%	0,0000%	0,0192%	0,0000%
Barra 64	0,0196%	0,0000%	0,0196%	0,0000%	0,0196%	0,0000%
Barra 65	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 66	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 67	0,0553%	0,0000%	0,0553%	0,0000%	0,0553%	0,0000%
Barra 68	0,0870%	0,0000%	0,0870%	0,0000%	0,0870%	0,0000%
Barra 69	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 70	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 71	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 72	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 73	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 74	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 75	0,0362%	0,0000%	0,0362%	0,0000%	0,0362%	0,0000%
Barra 76	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 77	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 78	0,0966%	0,0000%	0,0966%	0,0000%	0,0966%	0,0000%
Barra 79	0,0462%	0,0000%	0,0462%	0,0000%	0,0462%	0,0000%
Barra 80	0,0203%	0,0000%	0,0203%	0,0000%	0,0203%	0,0000%
Barra 81	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 82	0,0184%	0,0000%	0,0184%	0,0000%	0,0184%	0,0000%
Barra 83	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 84	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 85	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 86	0,0140%	0,0000%	0,0140%	0,0000%	0,0140%	0,0000%
Barra 87	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 88	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 89	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 90	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 91	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 92	0,0139%	0,0000%	0,0139%	0,0000%	0,0139%	0,0000%
Barra 93	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 94	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 95	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 96	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 97	0,0188%	0,0000%	0,0188%	0,0000%	0,0188%	0,0000%
Barra 98	0,0874%	0,0000%	0,0874%	0,0000%	0,0874%	0,0000%
Barra 99	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 100	0,0140%	0,0000%	0,0140%	0,0000%	0,0140%	0,0000%
Barra 101	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 102	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 103	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 104	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 105	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 106	0,0137%	0,0000%	0,0137%	0,0000%	0,0137%	0,0000%
Barra 107	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 108	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 109	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 110	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 111	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 112	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 113	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 114	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 115	0,0131%	0,0000%	0,0131%	0,0000%	0,0131%	0,0000%
Barra 116	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 117	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 118	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

APÊNDICE C

CARTÕES DO TRANSUFU

C.1 Curto-circuito

```
11111111
11111111
      0      0      5      0      0
Barra_1    1
Barra_2    2
Barra_6    3
Barra_8    4
Barra_3    5
CARTAO GERADO AUTOMATICAMENTE PELO PROGRAMA PSP-UFU (THALESLIMA.UFU@GMAIL.COM)
QUALQUER DADO EDITADO MANUALMENTE NESSE ARQUIVO SERA APAGADO
NOME DO PROJETO: Sistema teste de 14 barras - Curto-Circuito na barra 6
DATA: 19/11/2015
      60.    100. 0 0      100    0 0 0 0 0
Barra_1    1.06      0. 232.39226 -16.54917      0.      0.
Barra_2    1.045   -4.98257      40. 43.55680     21.7    12.7
Barra_3    1.01   -12.72506      0. 25.07527     94.2    19.
Barra_4    1.01767 -10.31286      0.      0.     47.8   -3.9
Barra_5    1.01951 -8.77381      0.      0.     7.6    1.6
Barra_6    1.07   -14.22088      0. 12.73091    11.2    7.5
Barra_7    1.06152 -13.35956      0.      0.      0.      0.
Barra_8    1.09   -13.35956      0. 17.62343      0.      0.
Barra_9    1.05593 -14.93845      0.      0.     29.5   16.6
Barra_10   1.05098 -15.09721      0.      0.      9.    5.8
Barra_11   1.05691 -14.79055      0.      0.     3.5    1.8
Barra_12   1.05519 -15.07551      0.      0.     6.1    1.6
Barra_13   1.05038 -15.15620      0.      0.     13.5   5.8
Barra_14   1.03553 -16.03357      0.      0.     14.9      5.
END
Barra_1 Barra_2  0.01938 0.05917  0.0528    0.
Barra_1 Barra_5  0.05403 0.22304  0.0492    0.
Barra_2 Barra_3  0.04699 0.19797  0.0438    0.
Barra_2 Barra_5  0.05695 0.17388  0.0346    0.
Barra_2 Barra_4  0.05811 0.17632  0.034     0.
Barra_4 Barra_5  0.01335 0.04211  0.        0.
Barra_3 Barra_4  0.06701 0.17103  0.0128    0.
Barra_7 Barra_8  0.        0.17615  0.        0.
Barra_7 Barra_9  0.        0.11001  0.        0.
Barra_9 Barra_10 0.03181 0.0845   0.        0.
Barra_9 Barra_14 0.12711 0.27038   0.        0.
Barra_10 Barra_11 0.08205 0.19207   0.        0.
Barra_6 Barra_11 0.09498 0.1989   0.        0.
Barra_6 Barra_12 0.12291 0.25581   0.        0.
Barra_6 Barra_13 0.06615 0.13027   0.        0.
Barra_12 Barra_13 0.22092 0.19988   0.        0.
Barra_13 Barra_14 0.17093 0.34802   0.        0.
Barra_4 Barra_7  0.        0.20912  0.        -2.2
Barra_4 Barra_9  0.        0.55618  0.        -3.1
Barra_5 Barra_6  0.        0.25202  0.        -6.8
Barra_9 Barra_9  0.-5.26316 0.        0.        0.
END
0
END
```

```

Barra_1 1 233. 5. 0.23 0.23 1.1 1.080.0032 5.60.0000 0.14 1.75 1
Barra_1 1 0.12 0.15 0.035 0.
Barra_2 2 58.3 5. 0.23 0.23 1.1 1.080.0032 5.60.0000 0.14 1.75 1
Barra_2 2 0.12 0.15 0.035 0.
Barra_6 3 12.2 1. 0.4 1.15 1.8 1.150.0085 9.0.0001 0.34 1.75 1
Barra_6 3 0.3 0.3 0.035 0.
Barra_8 4 17.4 1. 0.4 1.15 1.8 1.150.0085 9.0.0001 0.34 1.75 1
Barra_8 4 0.3 0.3 0.035 0.
Barra_3 5 23.4 1. 0.4 1.15 1.8 1.150.0085 9.0.0000 0.34 1.75 1
Barra_3 5 0.3 0.3 0.035 0.
END
Barra_1 1 232.39226 -16.54917
Barra_2 2 40. 43.55680
Barra_6 3 0. 12.73091
Barra_8 4 0. 17.62343
Barra_3 5 0. 25.07527
END
Barra_1 1 400. 0.03 0.02 1. 5.0.000 Barra_1 1. 1. 0.8 0.00021
Barra_1 1 3. 2. 1.5 1.6
Barra_2 2 400. 0.03 0.02 1. 6.60.000 Barra_2 1. 1. 0.8 0.00021
Barra_2 2 3. 2. 1.5 1.6
Barra_6 3 400. 0.03 0.02 1. 5.0.000 Barra_6 1. 1. 0.8 0.00021
Barra_6 3 3. 2. 1.5 1.6
Barra_8 4 400. 0.03 0.02 1. 5.0.000 Barra_8 1. 1. 0.8 0.00011
Barra_8 4 3. 2. 1.5 1.6
Barra_3 5 400. 0.03 0.02 1. 5.0.000 Barra_3 1. 1. 0.8 0.00011
Barra_3 5 3. 2. 1.5 1.6
END
Barra_1 1 0.05 1. 0.2 0.3 0.3 0.
Barra_2 2 0.05 1. 0.2 0.3 0.3 0.
END
END
Barra_1 1 0.001 10. 99999. 0.01 0 0 0 1 1 1 1
Barra_1 Barra_1 +100 0. 0. 10. 0. 0.
Barra_1 Barra_1 -100 0. 0. 10. 0. 0.
Barra_6 Barra_6 +100 1. 0. 0.0001 0. 0.
Barra_6 Barra_6 -100 1.1 0. 0.0001 0. 0.
END
END
END

```

C.2 Chaveamento de carga

```

1111111
1111111
0 0 5 0 0
Barra_1 1
Barra_2 2
Barra_6 3
Barra_8 4
Barra_3 5
CARTAO GERADO AUTOMATICAMENTE PELO PROGRAMA PSP-UFU (THALESLIMA.UFU@GMAIL.COM)
QUALQUER DADO EDITADO MANUALMENTE NESSE ARQUIVO SERA APAGADO
NOME DO PROJETO: Sistema teste de 14 barras - Perda de carga na barra 4
DATA: 19/11/2015
60. 100. 0 0 100 0 0 0 0 0
Barra_1 1.06 0. 232.39226 -16.54917 0. 0.
Barra_2 1.045 -4.98257 40. 43.55680 21.7 12.7
Barra_3 1.01 -12.72506 0. 25.07527 94.2 19.
Barra_4 1.01767 -10.31286 0. 0. 0. 0.
Barra_5 1.01951 -8.77381 0. 0. 7.6 1.6

```

```

Barra_6      1.07 -14.22088      0.  12.73091      11.2     7.5
Barra_7      1.06152 -13.35956      0.          0.          0.          0.
Barra_8      1.09 -13.35956      0.  17.62343      0.          0.
Barra_9      1.05593 -14.93845      0.          0.          29.5     16.6
Barra_10     1.05098 -15.09721      0.          0.          9.          5.8
Barra_11     1.05691 -14.79055      0.          0.          3.5        1.8
Barra_12     1.05519 -15.07551      0.          0.          6.1        1.6
Barra_13     1.05038 -15.15620      0.          0.          13.5      5.8
Barra_14     1.03553 -16.03357      0.          0.          14.9        5.
PSP1        1.01767 -10.31286      0.          0.          47.8     -3.9
END
Barra_1 Barra_2  0.01938 0.05917  0.0528      0.
Barra_1 Barra_5  0.05403 0.22304  0.0492      0.
Barra_2 Barra_3  0.04699 0.19797  0.0438      0.
Barra_2 Barra_5  0.05695 0.17388  0.0346      0.
Barra_2 Barra_4  0.05811 0.17632  0.034       0.
Barra_4 Barra_5  0.01335 0.04211  0.          0.
Barra_3 Barra_4  0.06701 0.17103  0.0128      0.
Barra_7 Barra_8  0.          0.17615  0.          0.
Barra_7 Barra_9  0.          0.11001  0.          0.
Barra_9 Barra_10 0.03181 0.0845   0.          0.
Barra_9 Barra_14 0.12711 0.27038  0.          0.
Barra_10Barra_11 0.08205 0.19207  0.          0.
Barra_6 Barra_11 0.09498 0.1989   0.          0.
Barra_6 Barra_12 0.12291 0.25581  0.          0.
Barra_6 Barra_13 0.06615 0.13027  0.          0.
Barra_12Barra_13 0.22092 0.19988  0.          0.
Barra_13Barra_14 0.17093 0.34802  0.          0.
PSP1        Barra_4  0.          0.00001  0.          0.
Barra_4 Barra_7  0.          0.20912  0.          -2.2
Barra_4 Barra_9  0.          0.55618  0.          -3.1
Barra_5 Barra_6  0.          0.25202  0.          -6.8
Barra_9 Barra_9  0.-5.26316 0.          0.          0.
END
0
END
Barra_1 1 233.    5.  0.23  0.23  1.1  1.080.0032  5.60.0000 0.14 1.75  1
Barra_1 1 0.12  0.15 0.035  0.
Barra_2 2 58.3    5.  0.23  0.23  1.1  1.080.0032  5.60.0000 0.14 1.75  1
Barra_2 2 0.12  0.15 0.035  0.
Barra_6 3 12.2    1.  0.4   1.15  1.8  1.150.0085  9.0.0001 0.34 1.75  1
Barra_6 3 0.3   0.3 0.035  0.
Barra_8 4 17.4    1.  0.4   1.15  1.8  1.150.0085  9.0.0001 0.34 1.75  1
Barra_8 4 0.3   0.3 0.035  0.
Barra_3 5 23.4    1.  0.4   1.15  1.8  1.150.0085  9.0.0000 0.34 1.75  1
Barra_3 5 0.3   0.3 0.035  0.
END
Barra_1 1 232.39226 -16.54917
Barra_2 2      40.  43.55680
Barra_6 3      0.  12.73091
Barra_8 4      0.  17.62343
Barra_3 5      0.  25.07527
END
Barra_1 1 400. 0.03 0.02  1.  5.0.000  Barra_1 1.  1.  0.8  0.00021
Barra_1 1 3.  2. 1.5  1.6
Barra_2 2 400. 0.03 0.02  1.  6.60.000  Barra_2 1.  1.  0.8  0.00021
Barra_2 2 3.  2. 1.5  1.6
Barra_6 3 400. 0.03 0.02  1.  5.0.000  Barra_6 1.  1.  0.8  0.00021
Barra_6 3 3.  2. 1.5  1.6
Barra_8 4 400. 0.03 0.02  1.  5.0.000  Barra_8 1.  1.  0.8  0.00011
Barra_8 4 3.  2. 1.5  1.6
Barra_3 5 400. 0.03 0.02  1.  5.0.000  Barra_3 1.  1.  0.8  0.00011
Barra_3 5 3.  2. 1.5  1.6
END
Barra_1 1 0.05  1.  0.2           0.3        0.3        0.
Barra_2 2 0.05  1.  0.2           0.3        0.3        0.

```

```

END
END
      0.001      20.      99999.      0.01 0 0 0 1 1 1 1
Barra_1 Barra_1 +100      0.      0.      10.      0.      0.
Barra_1 Barra_1 -100      0.      0.      10.      0.      0.
PSP1    Barra_4 -100      1.      0.      0.00001      0.      0.
END
END
END

```

C.3 Chaveamento de gerador

```

1111111
1111111
      0      0      5      0      0
Barra_1    1
PSP1      2
Barra_6    3
Barra_8    4
Barra_3    5
CARTAO GERADO AUTOMATICAMENTE PELO PROGRAMA PSP-UFU (THALESLIMA.UFU@GMAIL.COM)
QUALQUER DADO EDITADO MANUALMENTE NESSE ARQUIVO SERA APAGADO
NOME DO PROJETO: Sistema teste de 14 barras 2 - Perda do gerador da barra 2
DATA: 19/11/2015
      60.      100. 0 0      100      0 0 0 0 0
Barra_1    1.06      0. 232.39226 -16.54917      0.      0.
Barra_2    1.045     -4.98257      0.      0.      21.7      12.7
Barra_3    1.01     -12.72506      0.      25.07527      94.2      19.
Barra_4    1.01767   -10.31286      0.      0.      47.8      -3.9
Barra_5    1.01951   -8.77381      0.      0.      7.6      1.6
Barra_6    1.07     -14.22088      0.      12.73091      11.2      7.5
Barra_7    1.06152   -13.35956      0.      0.      0.      0.
Barra_8    1.09     -13.35956      0.      17.62343      0.      0.
Barra_9    1.05593   -14.93845      0.      0.      29.5      16.6
Barra_10   1.05098   -15.09721      0.      0.      9.      5.8
Barra_11   1.05691   -14.79055      0.      0.      3.5      1.8
Barra_12   1.05519   -15.07551      0.      0.      6.1      1.6
Barra_13   1.05038   -15.15620      0.      0.      13.5      5.8
Barra_14   1.03553   -16.03357      0.      0.      14.9      5.
PSP1      1.045     -4.98257      40.      43.55680      0.      0.
END
Barra_1 Barra_2    0.01938 0.05917 0.0528      0.
Barra_1 Barra_5    0.05403 0.22304 0.0492      0.
Barra_2 Barra_3    0.04699 0.19797 0.0438      0.
Barra_2 Barra_5    0.05695 0.17388 0.0346      0.
Barra_2 Barra_4    0.05811 0.17632 0.034      0.
Barra_4 Barra_5    0.01335 0.04211 0.      0.
Barra_3 Barra_4    0.06701 0.17103 0.0128      0.
Barra_7 Barra_8    0. 0.17615 0.      0.
Barra_7 Barra_9    0. 0.11001 0.      0.
Barra_9 Barra_10   0.03181 0.0845 0.      0.
Barra_9 Barra_14   0.12711 0.27038 0.      0.
Barra_10 Barra_11  0.08205 0.19207 0.      0.
Barra_6 Barra_11   0.09498 0.1989 0.      0.
Barra_6 Barra_12   0.12291 0.25581 0.      0.
Barra_6 Barra_13   0.06615 0.13027 0.      0.
Barra_12 Barra_13  0.22092 0.19988 0.      0.
Barra_13 Barra_14  0.17093 0.34802 0.      0.
PSP1    Barra_2    0. 0.00001 0.      0.
Barra_4 Barra_7    0. 0.20912 0.      -2.2
Barra_4 Barra_9    0. 0.55618 0.      -3.1
Barra_5 Barra_6    0. 0.25202 0.      -6.8

```

```

Barra_9 Barra_9          0.-5.26316      0.      0.
END
0
END
Barra_1  1  233.    5.  0.23  0.23   1.1  1.080.0032  5.60.0000  0.14 1.75   1
Barra_1  1  0.12   0.15 0.035   0.
PSP1    2  58.3    5.  0.23  0.23   1.1  1.080.0032  5.60.0000  0.14 1.75   1
PSP1    2  0.12   0.15 0.035   0.
Barra_6  3  12.2    1.  0.4   1.15   1.8  1.150.0085  9.0.0001  0.34 1.75   1
Barra_6  3  0.3    0.3 0.035   0.
Barra_8  4  17.4    1.  0.4   1.15   1.8  1.150.0085  9.0.0001  0.34 1.75   1
Barra_8  4  0.3    0.3 0.035   0.
Barra_3  5  23.4    1.  0.4   1.15   1.8  1.150.0085  9.0.0000  0.34 1.75   1
Barra_3  5  0.3    0.3 0.035   0.
END
Barra_1  1  232.39226 -16.54917
PSP1    2        40.  43.55680
Barra_6  3        0.  12.73091
Barra_8  4        0.  17.62343
Barra_3  5        0.  25.07527
END
Barra_1  1  400.  0.03 0.02   1.   5.0.000   Barra_1   1.  1.  0.8   0.00021
Barra_1  1  3.    2.  1.5  1.6
PSP1    2  400.  0.03 0.02   1.   6.60.000   PSP1    1.  1.  0.8   0.00021
PSP1    2  3.    2.  1.5  1.6
Barra_6  3  400.  0.03 0.02   1.   5.0.000   Barra_6   1.  1.  0.8   0.00021
Barra_6  3  3.    2.  1.5  1.6
Barra_8  4  400.  0.03 0.02   1.   5.0.000   Barra_8   1.  1.  0.8   0.00011
Barra_8  4  3.    2.  1.5  1.6
Barra_3  5  400.  0.03 0.02   1.   5.0.000   Barra_3   1.  1.  0.8   0.00011
Barra_3  5  3.    2.  1.5  1.6
END
Barra_1  1  0.05   1.  0.2
PSP1    2  0.05   1.  0.2
END
END
          0.001      20.    99999.     0.01 1 0 0 1 1 1 1
Barra_1 Barra_1 +100      0.      0.      10.      0.      0.
Barra_1 Barra_1 -100      0.      0.      10.      0.      0.
PSP1    Barra_2 -100      1.      0.      0.00001   0.      0.
END
PSP1    2        1.
END
END
END

```