



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

THALES LIMA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL LIVRE,
GRÁFICO, E MULTIPLATAFORMA PARA ANALISAR SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE E DINÂMICO**

UBERLÂNDIA
2019

THALES LIMA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL LIVRE,
GRÁFICO, E MULTIPLATAFORMA PARA ANALISAR SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE E DINÂMICO**

Tese de doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães
Orientador – Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Prof. Dr. José Wilson Resende
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Prof. Dr. David Calhau Jorge
Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior
Universidade de São Paulo – USP

UBERLÂNDIA

2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 Oliveira, Thales Lima, 1991-
2019 Desenvolvimento de um programa computacional livre, gráfico,
e multiplataforma para analisar sistemas elétricos de potência em
regime permanente e dinâmico [recurso eletrônico] / Thales Lima
Oliveira. - 2019.

Orientador: Geraldo Caixeta Guimarães.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-
graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2444>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Guimarães, Geraldo Caixeta, 1954-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação
em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

THALES LIMA OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL LIVRE,
GRÁFICO, E MULTIPLATAFORMA PARA ANALISAR SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE E DINÂMICO**

Tese de doutorado apresentado à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, área de concentração: Engenharia Elétrica.

Prof. Geraldo Caixeta Guimarães
Orientador

Prof. José Roberto Camacho
Coordenador da Pós-Graduação



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 249, COPEL				
Data:	18 de outubro de dois mil e dezenove	Hora de início:	13:30	Hora de encerramento:	16:40
Matrícula do Discente:	11613EEL009				
Nome do Discente:	Thales Lima Oliveira				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento de um programa computacional livre, gráfico, e multiplataforma para analisar sistemas elétricos de potência em regime permanente e dinâmico.				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Sistemas de energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Programa: ENGENHARIA ELÉTRICA (32006012001P9). Nome: ANÁLISE COMPUTACIONAL VIA ATP DRAW DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. Data de Início: 01/01/2011. Natureza do Projeto: PESQUISA. Situação do Projeto: EM ANDAMENTO				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: José Wilson Resende - FEELT/UFU; José Rubens Macedo Junior - FEELT/UFU; David Calhau Jorge - UFTM; José Carlos de Melo Vieira Júnior - EESC/USP; Geraldo Caixeta Guimarães - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Geraldo Caixeta Guimarães, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **Doutor**.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/10/2019, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Melo Vieira Júnior, Usuário Externo**, em 21/10/2019, às 21:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Wilson Resende, Usuário Externo**, em 22/10/2019, às 08:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **David Calhau Jorge, Usuário Externo**, em 22/10/2019, às 08:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Caixeta Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/10/2019, às 22:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1504206** e o código CRC **832C8F5C**.

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida. Obrigado por me acompanhar, proteger, abençoar e conceder boa saúde e força.

Agradeço ao meu orientador, professor Caixeta, pela constante disposição em me auxiliar e pelas contribuições essenciais para o desenvolvimento de todas as etapas da tese. Estendo o meu agradecimento a todos os professores que tive ao longo da vida, pois eles foram fundamentais no caminho que trilhei até chegar aqui.

Expresso minha eterna gratidão aos meus pais, Wilson e Cidinha. Obrigado por todo carinho, dedicação, presença, incentivo, bons conselhos, por serem minha fonte de inspiração e por nunca terem poupado esforços para me fazer todo tipo de bem. Agradeço 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.

Registro meu especial agradecimento à minha amada noiva Andréia, sempre tão afetuosa, atenciosa e paciente. Sou grato por constantemente estar pronta para me ouvir e disposta a fazer o que tiver ao seu alcance para me ajudar. Muito obrigado por superar comigo os momentos desafiadores, e por tornar os momentos felizes ainda melhores.

Aos amigos, gratidão pela torcida, orações, palavras de apoio e gestos de companheirismo. As boas experiências compartilhadas com vocês tornam a caminhada mais leve e agradável.

Agradeço também a todos os companheiros do Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela boa convivência e partilha de aprendizados. Obrigado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Uberlândia por ter me acolhido nos últimos dez anos, os quais envolveram a realização da minha graduação, mestrado e doutorado. Sinto sincera gratidão por todas as experiências vivenciadas, que foram decisivas para o meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL LIVRE, GRÁFICO, E MULTIPLATAFORMA PARA ANALISAR SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE E DINÂMICO

No que diz respeito à análise computacional de sistemas de potência, já existem vários simuladores comerciais e não comerciais, 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, protegido por licenças proprietárias. Em oposição aos programas privativos, nasceu o conceito de programas livres e de código aberto (*open-source*), que promove o acesso livre à informação, inclusive ao código fonte. 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), ferramentas CAD, dependência de *software* proprietário e sistemas operacionais, além de 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 inúmeros tipos de sistema de potência e quatro estudos: fluxo de potência, curto-circuito, harmônicos e estabilidade. Essa plataforma possui código aberto e recursos avançados de interface gráfica com ferramentas CAD, permitindo a construção de qualquer rede elétrica e sistemas de controle por meio da manipulação de elementos visuais. Destaca-se, ainda, sua natureza multiplataforma, tornando-o independente de um único sistema operacional. Tais características são sem precedentes em programas de código aberto para sistemas de potência.

Com o intuito de validar as ferramentas de cálculo desenvolvidas, foram construídos sistemas testes e compararam-se os resultados do PSP-UFU com aqueles originados do Anarede, Anafas, HarmZs, Anatem e MATLAB/Simulink, os quais são programas já bem estabelecidos. Os resultados comparativos se mostraram bastante satisfatórios, atestando o PSP-UFU como um *software* capaz de auxiliar como ferramenta as áreas de pesquisa e educação, além de aplicações práticas em engenharia.

Palavras-chave: Análise dinâmica, código aberto, estabilidade, interface gráfica de usuário, Plataforma de Sistemas de Potência.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A FREE OPEN-SOURCE, GRAPHICAL AND MULTIPLATFORM SOFTWARE TO ANALYZE STEADY-STATE AND DYNAMIC ELECTRICAL POWER SYSTEMS

As regards to the computational analysis of power systems, several commercial and non-commercial simulators were developed, capable of performing several calculations through mathematical modeling of the components of a power grid. Commercial software, usually not free, makes it impossible to insert and customize new tools by possessing the closed code, protected by proprietary licenses. As opposed to private programs, the concept of free and open-source software was born, which promotes unrestricted access to information, including the source code. Some open-source applications have been created in the area of electrical power systems, but there are some shortcomings in these programs, such as the lack of a graphical user interface (GUI), CAD tools, dependence on proprietary software and operating systems, besides the discontinuation in development.

Within this context, the development of the PSP-UFU (Power Systems Platform of the Federal University of Uberlândia) was started, capable of performing, for numerous types of power systems, four studies: load flow, short-circuit, harmonics and stability. This platform has an open-source and advanced graphical interface with CAD tools, allowing the construction of any electrical network and control systems through the manipulation of visual elements. It also stands out its multiplatform nature, making it independent of a single operating system. Such features are unprecedented in open-source programs for power systems.

To validate the calculation tools developed, test systems were carried out and the results from PSP-UFU were compared with those originated from Anarede, Anafas, HarmZs Anatem, and MATLAB/Simulink, which are well-established programs. The comparative results proved to be very good, attesting to the PSP-UFU as a software capable of assisting research and education areas as well as practical engineering applications.

Keywords: Dynamic analysis, graphical user interface, open source, Power Systems Platform, stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1.1 – Passos a serem seguidos para o estudo de um sistema físico	33
Figura 1.2 – Tipos de licenças e suas intensidades de direitos autorais	41
Figura 1.3 – Exemplo de co-simulação entre programas <i>Open-Source</i>	42
Figura 2.1 – Tempo de fenômenos e controles típicos de sistemas de potência	58
Figura 2.2 – Construção da matriz admitância	60
Figura 2.3 – Circuito equivalente π das linhas de transmissão e distribuição	61
Figura 2.4 – Circuito equivalente dos transformadores	62
Figura 2.5 – Tensões e correntes no modelo do transformador	62
Figura 2.6 – Circuito equivalente de elementos shunt	64
Figura 2.7 – Circuito equivalente do motor de indução	69
Figura 2.8 – Método numérico de Gauss-Seidel para fluxo de carga	73
Figura 2.9 – Método numérico de Newton-Raphson para fluxo de carga	78
Figura 2.10 – Componentes simétricas: (a) Sequência positiva; (b) Sequência negativa; (c) Sequência zero	83
Figura 2.11 – Soma das três componentes de sequência da Figura 2.10	84
Figura 2.12 – Caminho das correntes e circuito equivalente: (a) sequência positiva; (b) sequência negativa; (c) sequência zero	85
Figura 2.13 – Circuitos equivalentes de sequência zero dos transformadores.	88
Figura 2.14 – Equivalente de Thevenin de um sistema pré-falta (a) e durante a falta (b)	90
Figura 2.15 – Faltas assimétricas e suas condições de contorno: (a) fase-terra; (b) fase-fase; (c) fase-fase-terra	92
Figura 2.16 – Diagrama esquemático da máquina síncrona	97
Figura 2.17 – Representação da máquina síncrona com cinco enrolamentos	98
Figura 2.18 – Circuito equivalente da máquina síncrona: (a) Eixo direto; (b) Eixo em quadratura	100
Figura 2.19 – Modelos de máquinas síncronas de diferentes complexidades	101
Figura 2.20 – Curva típica de saturação em circuito aberto para um gerador de 2,4 MVA	108
Figura 2.21 – Diagrama de blocos do Modelo 2 das máquinas síncronas	113
Figura 2.22 – Diagrama de blocos do Modelo 3 das máquinas síncronas	113
Figura 2.23 – Diagrama de blocos do Modelo 4 das máquinas síncronas	114

Figura 2.24 – Diagrama de blocos do Modelo 5 das máquinas síncronas	115
Figura 2.25 – Eixos de referência da máquina síncrona e da rede	120
Figura 2.26 – Equivalente de Norton da máquina síncrona	121
Figura 2.27 – Equivalente de Norton do motor de indução	123
Figura 2.28 – Comportamento da carga ZIP implementada no <i>software</i> : (a) curva de Tensão x Potência; (b) Curva de Tensão x Corrente	124
Figura 2.29 – Estrutura geral da ferramenta de estabilidade	132
Figura 2.30 – Inicialização da ferramenta de estabilidade	133
Figura 2.31 – Processo iterativo para cálculo dos elementos dinâmicos	135
Figura 2.32 – Diagrama esquemático dos reguladores da máquina síncrona	139
Figura 2.33 – Estrutura da inicialização do sistema de controle	142
Figura 3.1 – Padrão de arquitetura de <i>software Model-View-Controller</i>	153
Figura 3.2 – Estrutura geral do PSP-UFU e suas relações com as bibliotecas externas ao C++	154
Figura 3.3 – Diagrama de classes simplificado do módulo <i>Model</i> do PSP-UFU.	155
Figura 3.4 – Diagrama de classes simplificado do módulo <i>Controller</i> do PSP-UFU.	158
Figura 3.5 – Tela principal do programa PSP-UFU no sistema operacional Windows.	162
Figura 3.6 – Elementos elétricos de potência do PSP-UFU.	163
Figura 3.7 – Formulário dos barramentos no PSP-UFU.	164
Figura 3.8 – Formulário das cargas no PSP-UFU.	166
Figura 3.9 – Formulário de edição de chaveamentos.	167
Figura 3.10 – Formulário dos capacitores e indutores no PSP-UFU.	168
Figura 3.11 – Formulário da fonte de corrente harmônica no PSP-UFU.	169
Figura 3.12 – Formulário das linhas elétricas no PSP-UFU.	170
Figura 3.13 – Formulário dos transformadores no PSP-UFU.	171
Figura 3.14 – Formulário dos geradores síncronos no PSP-UFU.	173
Figura 3.15 – Formulário de estabilidade dos geradores síncronos no PSP-UFU	173
Figura 3.16 – Formulário dos motores de indução no PSP-UFU.	176
Figura 3.17 – Formulário de estabilidade dos motores de indução no PSP-UFU	176
Figura 3.18 – Sistema teste IEEE 14 barras importado para o PSP-UFU utilizando a ferramenta de <i>layout</i> automático.	180
Figura 3.19 – Modelo sintético de 500 barras da Carolina do Sul importado para o PSP-UFU utilizando a ferramenta de <i>layout</i> automático.	181

Figura 3.20 – Editor de elementos de controle do PSP-UFU.	182
Figura 3.21 – Formulário de edição de entradas e saídas de sistemas de controle de um AVR.	183
Figura 3.22 – Formulário de edição de dados da função transferência no PSP-UFU.	185
Figura 3.23 – Formulário de edição de dados do somador no PSP-UFU	185
Figura 3.24 – Formulário de edição de dados das expressões matemáticas, com destaque ao realce de erro.	188
Figura 3.25 – Submenu Ribbon simulação.	189
Figura 3.26 – Lista de eventos de estabilidade.	189
Figura 3.27 – Configurações de simulação.	190
Figura 3.28 – Formulário da ferramenta de resposta na frequência.	191
Figura 3.29 – Formulário de edição de dados de texto vinculado no PSP-UFU.	191
Figura 3.30 – Exemplo de campos de textos e caixa de informações instantâneas no PSP-UFU.	194
Figura 3.31 – Visualizador de dados tabulados no PSP-UFU.	194
Figura 3.32 – Visualizador de gráficos do PSP-UFU.	195
Figura 3.33 – Exemplo de tradução do PSP-UFU para português utilizando o <i>software</i> livre Poedit.	197
Figura 3.34 – PSP-UFU no sistema operacional Ubuntu.	198
Figura 4.1 – Sistema teste do IEEE de 14 barras criado no PSP-UFU.	203
Figura 4.2 – Sistema teste do IEEE de 30 barras criado no PSP-UFU.	205
Figura 4.3 – Sistema teste do IEEE de 57 barras criado no PSP-UFU.	208
Figura 4.4 – Sistema teste do IEEE de 118 barras criado no PSP-UFU.	212
Figura 4.5 – Sistema de controle DC1C e PSS1A sob teste.	228
Figura 4.6 – Resultado do sistema de controle teste nos programas MATLAB/Simulink e PSP-UFU.	229
Figura 4.7 – Resultado da resposta na frequência nos programas HarmZs e PSP-UFU.	231
Figura 4.8 – Comparação da frequência da máquina 1 perante a um curto-circuito na barra 13.	233
Figura 4.9 – Comparação da potência ativa da máquina 1 perante a um curto-circuito na barra 13.	234
Figura 4.10 – Comparação da potência mecânica da máquina 1 perante a um curto-circuito na barra 13.	234

Figura 4.11 – Comparação da tensão terminal da máquina 1 perante a um curto-circuito na barra 13.	235
Figura 4.12 – Comparação da frequência da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.	236
Figura 4.13 – Comparação da potência ativa da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.	237
Figura 4.14 – Comparação da potência mecânica da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.	237
Figura 4.15 – Comparação da tensão terminal da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.	238
Figura 4.16 – Comparação da frequência da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.	239
Figura 4.17 – Comparação da potência ativa da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.	239
Figura 4.18 – Comparação da potência mecânica da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.	240
Figura 4.19 – Comparação da tensão terminal da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.	241
Figura 4.20 – Comparação do escorregamento do motor de indução durante a partida.	242
Figura 4.21 – Comparação da potência ativa do motor de indução durante a partida.	243
Figura 4.22 – Comparação do torque elétrico em relação a velocidade.	243
Figura A.1 – Modelo de AVR utilizado nas simulações.	276
Figura A.2 – Modelo de regulador de velocidade e turbina utilizado nas simulações.	277

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Programas não comerciais para sistemas elétricos de potência	51
Tabela 3.1 – Operadores da biblioteca fparser utilizados no bloco de controle de Expressão Matemática	150
Tabela 3.2 – Funções da biblioteca fparser utilizados no bloco de controle de Expressão Matemática	151
Tabela 3.3 – Descrição dos parâmetros do formulário das barras no PSP-UFU.	165
Tabela 3.4 – Descrição dos parâmetros do formulário das cargas no PSP-UFU.	167
Tabela 3.5 – Descrição dos parâmetros do formulário da fonte de corrente harmônica no PSP-UFU.	169
Tabela 3.6 – Descrição dos parâmetros do formulário das linhas elétricas no PSP-UFU.	170
Tabela 3.7 – Descrição dos parâmetros do formulário dos transformadores no PSP-UFU.	172
Tabela 3.8 – Descrição dos parâmetros do formulário geral dos geradores síncronos no PSP-UFU	174
Tabela 3.9 – Descrição dos parâmetros do formulário de estabilidade dos geradores síncronos no PSP-UFU	175
Tabela 3.10 – Descrição dos parâmetros do formulário geral dos motores de indução no PSP-UFU	177
Tabela 3.11 – Descrição dos parâmetros de estabilidade dos motores de indução no PSP-UFU	177
Tabela 3.12 – Campos de texto no PSP-UFU.	193
Tabela 4.1 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 14 barras gerado pelo PSP-UFU.	203
Tabela 4.2 – Desvio do resultado de barras do sistema de 14 barras do estudo de fluxo de carga.	204
Tabela 4.3 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 30 barras gerado pelo PSP-UFU.	205
Tabela 4.4 – Desvio do resultado de barras do sistema de 30 barras do estudo de fluxo de carga.	206
Tabela 4.5 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 57 barras gerado pelo PSP-UFU.	208

Tabela 4.6 – Desvio do resultado de barras do sistema de 57 barras do estudo de fluxo de carga.	210
Tabela 4.7 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 118 barras gerado pelo PSP-UFU.	212
Tabela 4.8 – Desvio do resultado de barras do sistema de 118 barras do estudo de fluxo de carga.	215
Tabela 4.9 – Correntes de curto-circuito trifásico na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.	219
Tabela 4.10 – Tensões durante a falta trifásica na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	219
Tabela 4.11 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta trifásica na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	219
Tabela 4.12 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta trifásica entre os programas PSP-UFU e Anafas.	220
Tabela 4.13 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta trifásica entre os programas PSP-UFU e Anafas.	220
Tabela 4.14 – Correntes de curto-circuito fase-fase na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.	221
Tabela 4.15 – Tensões durante a falta trifásica na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	221
Tabela 4.16 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta fase-fase na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	222
Tabela 4.17 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta fase-fase entre os programas PSP-UFU e Anafas.	222
Tabela 4.18 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta fase-fase entre os programas PSP-UFU e Anafas.	223
Tabela 4.19 – Correntes de curto-circuito fase-fase-terra na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.	223
Tabela 4.20 – Tensões durante a falta fase-fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	223
Tabela 4.21 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta fase-fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	224
Tabela 4.22 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta fase-fase-terra entre os programas PSP-UFU e Anafas.	224

Tabela 4.23 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta fase-fase-terra entre os programas PSP-UFU e Anafas.	225
Tabela 4.24 – Correntes de curto-circuito trifásico na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.	225
Tabela 4.25 – Tensões durante a falta fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	226
Tabela 4.26 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.	226
Tabela 4.27 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta fase-terra entre os programas PSP-UFU e Anafas.	227
Tabela 4.28 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta trifásica entre os programas PSP-UFU e Anafas.	227
Tabela 4.29 – Comparação das distorções harmônicas de tensão do PSP-UFU e HarmZs.	230
Tabela 4.30 – Parâmetros do motor de indução	241
Tabela A.1 – Dados de barras do sistema IEEE de 14 barras.	259
Tabela A.2 – Dados de ramos do sistema IEEE de 14 barras.	260
Tabela A.3 – Dados de barras do sistema IEEE de 30 barras	261
Tabela A.4 – Dados de ramos do sistema IEEE de 30 barras.	261
Tabela A.5 – Dados de barras do sistema IEEE de 57 barras.	263
Tabela A.6 – Dados de ramos do sistema IEEE 57 barras.	264
Tabela A.7 – Dados de barras do sistema IEEE 118 barras.	266
Tabela A.8 – Dados de ramos do sistema IEEE 118 barras.	269
Tabela A.9 – Dados de falta dos ramos do sistema de 14 barras	274
Tabela A.10 – Dados de falta das máquinas síncronas do sistema de 14 barras (na base de potência da máquina).	275
Tabela A.11 – Dados das máquinas síncronas do sistema de 14 barras (na base de potência da máquina).	275
Tabela A.12 – Dados dos AVRs do sistema de 14 barras.	276
Tabela A.13 – Dados dos reguladores de velocidade do sistema de 14 barras.	277

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3F-T	Falta trifásica para a terra
Anafas	Programa de Análise de Falhas Simultâneas
Anarede	Programa de Análise de Redes Elétricas
Anatem	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
API	Application Programming Interface
ATP	Alternative Transient Program
AVR	Automatic Voltage Regulator
CA	Corrente Alternada
CAD	Computer Aided Design
CC	Corrente Contínua
CDF	Common Data Format
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
COI	Center of Inertia
CSV	Comma Separated Values
DBM	Data Base Module
EAD	Equação Algébrico-Diferencial
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
EEFC	Equações Estáticas do Fluxo de Carga
EMTP	Electromagnetic Transients Program
EPRI	Electric Power Research Institute
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
FEELT	Faculdade de Engenharia Elétrica
F-F	Falta fase-fase
F-F-T	Falta fase-fase-terra
FORTTRAN	Formula Translation System
FOSS	Free and Open Source Software
F-T	Falta fase-terra
GIS	Geografic Information System
GPL	General Public License
GPU	Graphical Processing Unity
GUI	Graphical User Interface

HVDC	High Voltage Direct Current
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LU	Lower-Upper
MVC	Model-View-Controller
MVP	Model-View-Presenter
MVVM	Model-View-View Model
OpenDSS	Open Distribution System Simulator
OpenGL	Open Graphics Library
p.u.	Por Unidade
POO	Programação Orientado a Objetos
PSAT	Power System Analysis Toolbox
PSP-UFU	Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia
PSS	Power System Stabilizer
PTW	Power*Tools for Windows
RTTI	Run-Time Type Information
RV	Regulador de Velocidade
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SN	Saddle Node
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
STL	Standard Template Library
SVC	Static VAR Compensator
TACS	Transient Analysis of Control Systems
TCL	Thermostatically Controlled Loads
TCSC	Thyristor Controlled Series Compensator
TEF	Transient Energy Function
THD	Total Harmonic Distortion
TNA	Transient Network Analyser
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
ULTC	Under-Load Tap Chager
VST	Voltage Stability Toolbox

W3C	World Wide Web Consortium
XML	eXtensible Markup Language
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
ZIP	Impedância, Corrente e Potência Constante

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 Introdução	33
1.1 Simulação	33
1.2 Estudos em sistemas potência	34
1.2.1 Fluxo de carga	34
1.2.2 Estabilidade de sistemas de potência	35
1.3 Programas computacionais para estudos em sistemas de potência	36
1.3.1 Programas comerciais	37
1.3.1.1 Anarede	37
1.3.1.2 Anatem	37
1.3.1.3 CYME	38
1.3.1.4 ETAP	38
1.3.1.5 PowerFactory	38
1.3.1.6 PowerWorld Simulator	39
1.3.1.7 PSS [®] E	39
1.3.1.8 Power*Tools for Windows	39
1.3.1.9 SimPowerSystems	40
1.3.2 Programas não comerciais	40
1.3.2.1 ATP	42
1.3.2.2 InterPSS	43
1.3.2.3 MATPOWER	44
1.3.2.4 MATACDC	45
1.3.2.5 MatDyn	45
1.3.2.6 PSAT	46
1.3.2.7 TransUFU	47
1.3.2.8 UFUFlow	48
1.3.2.9 VST	48
1.3.2.10 Outros programas não comerciais	49
1.3.3 Características dos programas não comerciais em sistemas de potência	50

1.4 Objetivos	52
1.4.1 Objetivos específicos	53
1.5 Estrutura da tese	54

CAPÍTULO II

2 Modelagens matemáticas e soluções numéricas	57
2.1 Considerações iniciais	57
2.2 A matriz admitância	59
2.2.1 Linhas de transmissão e distribuição	61
2.2.2 Transformadores	62
2.2.3 Elementos shunt	64
2.3 Fluxo de carga	64
2.3.1 Equações do fluxo de carga	65
2.3.1.1 Motor de indução trifásico no cálculo do fluxo de carga	68
2.3.2 Método de Gauss-Seidel para solução do fluxo de carga	70
2.3.3 Método de Newton-Raphson para solução do fluxo de carga	73
2.3.3.1 Algoritmo de eliminação Gaussiana	79
2.3.4 Controles e limites em um problema de fluxo de carga	81
2.4 Curto-circuito	82
2.4.1 Método das componentes simétricas	82
2.4.2 Modelo dos elementos para estudo de curto-circuito	85
2.4.2.1 Geradores	85
2.4.2.2 Linha de transmissão e distribuição	86
2.4.2.3 Transformadores	86
2.4.3 Matriz impedância nos estudos de curto-circuito	89
2.4.4 Equações do curto-circuito	89
2.4.4.1 Faltas balanceadas	89
2.4.4.2 Faltas desbalanceadas	91
2.5 Estabilidade	95
2.5.1 Máquinas síncronas	96
2.5.1.1 Modelos subtransitório e transitório	101
2.5.1.2 Inclusão de efeitos de acoplamentos mútuos diferentes	106
2.5.1.3 Saturação	108

2.5.1.4	Equações mecânicas	111
2.5.1.5	Modelos das máquinas síncronas	112
2.5.2	Cargas	116
2.5.2.1	Carga ZIP	116
2.5.2.2	Motor de indução	117
2.5.3	Rede elétrica	120
2.5.3.1	Máquinas síncronas na rede elétrica	120
2.5.3.2	Motor de indução na rede elétrica	123
2.5.3.3	Cargas ZIP na rede elétrica	123
2.5.4	Faltas e chaveamentos	125
2.5.5	Integração numérica	125
2.5.5.1	Aplicação do método Trapezoidal Implícito nas equações das máquinas síncronas	127
2.5.5.2	Aplicação do método Trapezoidal Implícito nas equações das máquinas de indução	128
2.5.6	Método para solução de equações lineares na ferramenta de estabilidade	130
2.5.7	Estrutura da ferramenta de estabilidade	131
2.5.7.1	Inicialização da rede elétrica e dos elementos dinâmicos	132
2.5.7.2	Solução iterativa dos elementos dinâmicos	135
2.6	Harmônicos	136
2.7	Sistemas de controle	138
2.7.1	Inicialização	141

CAPÍTULO III

3	O programa PSP-UFU	143
3.1	Considerações iniciais	143
3.2	Ferramentas computacionais	144
3.2.1	Linguagem de programação	145
3.2.2	Framework e bibliotecas utilizadas	146
3.2.2.1	wxWidgets	147
3.2.2.2	OpenGL	147
3.2.2.3	RapidXml	148
3.2.2.4	Function parser	149

3.2.2.5 wxMathPlot	152
3.3 Arquitetura de <i>software</i>	152
3.3.1 Estrutura do PSP-UFU	153
3.3.1.1 Módulo Model	155
3.3.1.2 Módulo Controller	157
3.3.2 Documentação	161
3.4 Interface gráfica	161
3.4.1 Editor de elementos de potência	163
3.4.1.1 Manipulação e navegação	178
3.4.1.2 Geração automática do layout de diagramas unifilares	179
3.4.2 Editor de elementos de controle	182
3.4.3 Simulação	188
3.4.4 Saída de dados	191
3.4.5 Internacionalização	196
3.5 Multiplataforma	197
3.6 Licença do PSP-UFU	198

CAPÍTULO IV

4 Testes comparativos e análises dos resultados	201
4.1 Considerações iniciais	201
4.2 Fluxo de carga	202
4.2.1 Sistema teste de 14 barras	202
4.2.2 Sistema teste de 30 barras	204
4.2.3 Sistema teste de 57 barras	207
4.2.4 Sistema teste de 118 barras	211
4.3 Curto-circuito	218
4.3.1 Falta trifásica	218
4.3.2 Falta fase-fase	221
4.3.3 Falta fase-fase-terra	223
4.3.4 Falta fase-terra	225
4.4 Sistemas de controle	228
4.5 Harmônicos	229
4.6 Estabilidade	231

4.6.1 Curto-circuito	233
4.6.2 Remoção de carga	236
4.6.3 Remoção de geração	238
4.6.4 Partida de motor de indução	241

CAPÍTULO V

5 Conclusões	245
Referências	251

APÊNDICE A

A Dados dos sistemas simulados	259
A.1 Fluxo de carga	259
A.1.1 Sistema teste do IEEE de 14 barras	259
A.1.2 Sistema teste do IEEE de 30 barras	260
A.1.3 Sistema teste do IEEE de 57 barras	262
A.1.4 Sistema teste do IEEE de 118 barras	266
A.2 Curto-circuito	273
A.3 Estabilidade	275

APÊNDICE B

B Arquivos do Anatem	279
B.1 Arquivo principal	279
B.2 Controle definido pelo usuário (CDU)	283

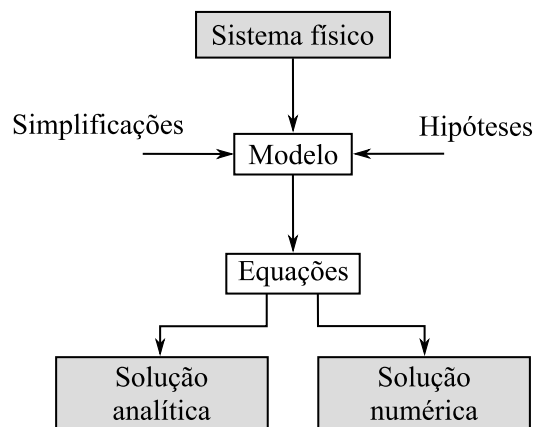
1 INTRODUÇÃO

1.1 Simulação

O processo de simulação consiste em reproduzir fenômenos do universo. Ao simular algo é necessário que seja desenvolvido um modelo, que representa as características, comportamentos e funções de um sistema físico. No contexto deste trabalho o sistema físico é o Sistema Elétrico de Potência (SEP) e os modelos são os elementos presentes nele (por exemplo: geradores, linhas de transmissão, cargas, etc.).

A Figura 1.1 mostra os passos necessários para o estudo de um sistema físico, em que o primeiro deles é definir o modelo, o qual necessita de hipóteses e simplificações [1]. Em seguida, é necessário formular o modelo em equações. Finalmente, as equações devem ser resolvidas de forma analítica ou numérica.

Figura 1.1 – Passos a serem seguidos para o estudo de um sistema físico



Fonte: Adaptado de MILANO, F. [1].

Até o surgimento dos computadores digitais, ocorrido durante a década de 50, os estudos de SEPs eram realizados com o auxílio dos analisadores de redes, ou TNA (*Transient Network Analyser*) [2]. Esses dispositivos eram computadores analógicos especiais desenvolvidos especificamente para a análise de sistemas elétricos em escala reduzida [3]. Entretanto, o advento da análise digital conduziu a uma forma mais conveniente de realizar simulações por meio de computadores digitais.

Para isso, adequaram-se os modelos de forma a serem expressos em termos de equações matemáticas que pudessem ser traduzidas em código de programação de computador. As hipóteses e simplificações são muitas vezes ditados pelos métodos de solução numérica disponíveis para resolver os sistemas de equações [1].

1.2 Estudos em sistemas potência

Com o advento e considerável desenvolvimento dos computadores tornou-se possível a análise de eventos em simuladores cada vez mais poderosos, 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.

Vários tipos de estudos são realizados por meio de simulações do SEP e, na conjuntura desse trabalho, serão aqui contextualizados dois importantes estudos: **fluxo de carga e estabilidade de sistemas de potência**.

1.2.1 Fluxo de carga

Um estudo fundamental no planejamento da expansão e operação 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. Esse estudo tem como objetivo encontrar o fluxo de potência nos ramos e as tensões nodais do SEP impostas pela geração e a carga.

As equações formuladas a partir dos modelos dos elementos presentes no estudo de fluxo de carga são não lineares e não possuem solução analítica explícita. Portanto é necessária a utilização de métodos numéricos iterativos para solução do problema de fluxo de carga.

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 desenvolvidos fundamentalmente para redes malhadas.

Aplicados às redes de distribuição, esses métodos podem apresentar 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].

1.2.2 Estabilidade de sistemas de potência

Estabilidade de sistemas de potência é a habilidade de um SEP, para uma certa condição de operação, de reestabelecer um estado de operação de equilíbrio após ser submetido a um distúrbio físico. A estabilidade é reconhecida como um importante problema para a segurança da operação desde a década de 20. Muitos *blackouts* de grande porte causados pela instabilidade do SEP têm ilustrado a importância desse fenômeno [7].

Normalmente são realizados dois tipos de estudos de estabilidade. A recuperação de uma rápida e brusca perturbação é chamada de **estabilidade transitória**, e sua solução é geralmente obtida no domínio do tempo. Outro estudo é denominado **estabilidade dinâmica**, utilizado para descrever a resposta do sistema frente a pequenas perturbações ao longo de muito tempo, o qual pode ser resolvido tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. A estabilidade dinâmica pode ser tratada como uma extensão da estabilidade transitória, em que os efeitos de pequenas constantes de tempo devem ser ignorados [8].

O modelo para representação do SEP em um estudo de estabilidade transitória é feito por meio do sistema de equações algébrico-diferenciais (EADs), em que o estado inicial é considerado estável e originado de um estudo de fluxo de carga. A solução das equações se dá por meio de um método de integração numérico e, então, é observada a resposta do sistema de potência. Caso a solução no domínio do tempo, após alguma perturbação, leve um ou mais parâmetros do sistema a valores fisicamente impossíveis ou, até mesmo, a solução das equações diferenciais não obtenha convergência em processos iterativos, o sistema é dito instável. Em contrapartida, caso as variáveis de estado dos elementos do sistema oscilem após uma perturbação e se estabeleçam em um novo ponto de operação, mesmo que distinto dos valores iniciais, o sistema é considerado estável.

Quando se trata de estabilidade transitória, um importante elemento do SEP que se deve ser considerado são das máquinas síncronas. Enquanto as equações diferenciais mecânicas desses elementos são muito bem estabelecidas, as EADs que associam os fluxos do estator com as suas correntes e a tensão de campo não é muito bem estabelecido na literatura [1][8]. Vários

modelos desse elemento são considerados na literatura, todos originados da “teoria das duas reações” de Park [9], em que se pode destacar o modelo de Anderson-Fouad [8][10], utilizado nessa tese e descrito na maioria dos livros de sistemas de potência, e o modelo de Sauer-Pai [1][11], muito empregado em diversos programas de estabilidade transitória.

São observados na literatura vários métodos de integração numérica utilizados para solução do problema de estabilidade, como os métodos explícitos de Runge-Kutta [1][8] e Euler modificado [2][12]; além dos métodos implícitos de Euler [8] e Trapezoidal [1][8][13]. O método Trapezoidal implícito se mostra bastante robusto e confiável, levando-o a ser utilizado na maioria das aplicações comerciais e não-comerciais de sistemas de potência [1] e também empregado nessa tese como a ferramenta de solução das EADs.

Cabe ainda ressaltar o desenvolvimento de métodos diretos de análise de estabilidade transitória, os quais tentam deduzir as equações diferenciais do sistema por meio de uma **função de Lyapunov**, capaz de medir a estabilidade do sistema [1][14]. A quantidade total de energia do sistema é geralmente utilizada como a função de Lyapunov, chamada de Função de Energia Transitória (TEF, do inglês, *Transient Energy Function*) [1].

A grande vantagem dos métodos diretos frente à integração numérica é o tempo de processamento. Os métodos diretos se mostram adequados para aplicações em tempo real, uma vez que eles podem fornecer informações de estabilidade sem a necessidade de solução de equações diferenciais [14].

Porém, são observados vários pontos negativos oriundos da TEF, intrínsecos do método direto de Lyapunov, os quais podem ser citados: não existência de um método genérico sistemático para determinação da função de Lyapunov [15]; dificuldade no cálculo da região de estabilidade da TEF para grandes sistemas [1]; e impossibilidade de aplicar ações corretivas no estudo devido à incapacidade de mudança do sistema após um instante inicial.

Desde o final da década de 70 observam-se publicações que definem procedimentos adequados para construção da função de Lyapunov [15][16][17][18].

1.3 Programas computacionais para estudos em sistemas de potência

Vários programas computacionais foram desenvolvidos na área de sistemas de potência capazes de realizar os estudos supracitados. Um grande acervo foi compilado no *site* OpenElectrical [19], em que é apresentada uma lista de pacotes de *software* mais utilizados,

tanto comerciais como não comerciais. São aqui destacados os programas mais relevantes no âmbito brasileiro e mundial.

1.3.1 Programas comerciais

A maioria dos programas para estudos no SEP são produtos comerciais obtidos por meio de licenças com um alto custo de aquisição [1]. Além disso, esses programas proprietários possuem licenças com direitos exclusivos para o produtor e seu uso, redistribuição ou modificação são proibidos sem a permissão do desenvolvedor. A aquisição dessas permissões, quando concedida, implica em um custo ainda maior ao usuário.

Na conjuntura desse trabalho, os programas comerciais Anarede, Anatem, CYME, ETAP, PowerFactory, PowerWorld Simulator, PSS[®]E, Power*Tools for Windows e SimPowerSystems são aqui sucintamente destacados, sendo que muitos deles também são evidenciados em [19] e [20]. Com exceção do Anatem, todos as aplicações mencionadas possuem uma interface gráfica de usuário (GUI, do inglês *Graphical User Interface*) e ferramentas CAD (*Computer Aided Design*) bastante amigável e intuitiva.

1.3.1.1 Anarede

O Anarede, desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), permite a realização dos seguintes estudos: fluxo de carga, equivalente de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão, redespacho de tensão, redespacho de potência ativa e fluxo de potência continuado [21]. Segundo seus desenvolvedores, o Anarede é o programa mais utilizado no Brasil para análise de SEP em regime permanente [22].

1.3.1.2 Anatem

Também desenvolvido pelo CEPEL, o programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos – Anatem, é uma aplicação computacional para realização de estudos de estabilidade. Possui a capacidade de representação dos principais componentes dinâmicos: geradores síncronos, dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), elos de corrente contínua, motores de indução, cargas estáticas e dinâmicas, usinas eólicas e sistemas de controle de forma geral [23].

É amplamente utilizado pelo setor elétrico brasileiro em praticamente todos os estudos envolvendo dinâmica e transitórios eletromecânicos de usinas elétricas do sistema interligado nacional (SIN).

1.3.1.3 CYME

Desenvolvido pela empresa canadense CYME International, o *software* CYME possui ferramentas de simulação na área de transmissão, distribuição e industrial. É um programa modular, que fornece solução em diversos tipos de estudo: fluxo de carga, curto-circuito balanceado ou desbalanceado, fluxo de potência ótimo, balanceamento e alocação/estimação de cargas, análise de estabilidade transitória, análise de harmônicos, entre outros estudos. Possui uma vasta biblioteca de equipamentos industriais e elementos de controle [24].

Como método numérico de solução de fluxo de carga, o *software* permite ao usuário a escolha entre Newton-Raphson, Desacoplado Rápido ou Gauss-Seidel [20].

1.3.1.4 ETAP

O programa ETAP é uma plataforma de engenharia elétrica de projeto, simulação e operação para automação de sistemas de geração, transmissão distribuição e industriais com a possibilidade de aplicação em tempo real [25].

Permite o estudo de arcos elétricos, fluxo de carga, curto-circuito, partida de motor, fluxo de carga ótimo, estabilidade transitória, partida de gerador, estimação de parâmetros, coordenação da proteção, dimensionamento e descarga de baterias, entre outros [19].

1.3.1.5 PowerFactory

O programa PowerFactory, desenvolvido pela DlgSILENT, possui a vantagem da integração entre os modelos de geração, transmissão, distribuição e redes industriais e a capacidade de análise de suas interações. Dentre várias funcionalidades do *software* destacam-se as seguintes: fluxo de carga (monofásico, bifásico e trifásico), curto-circuito, harmônicos, estabilidade transitória, transitórios eletromagnéticos, simulação quase dinâmica, redução de redes, funções de proteção, fluxo de carga ótimo e estabilidade de pequenos sinais (análise de autovalores) [26].

Possui integração com GIS (*Geographic Information System*), o qual permite coletar, armazenar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados; além do sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), *software* de supervisão das variáveis de um sistema de controle.

1.3.1.6 PowerWorld Simulator

O PowerWorld Simulator é um pacote de simulação de sistema de energia interativa projetado para simular operação do sistema de potência de alta tensão em um período de tempo variando de vários minutos a vários dias. O *software* contém um pacote de análise de fluxo de carga altamente eficaz capaz de resolver de forma eficiente sistemas de até 250000 barras. Além disso o programa possui vários complementos adicionais: cálculo de curto-circuito, análise de contingência, fluxo de carga ótimo, estabilidade transitória e de tensão [27].

1.3.1.7 PSS[®]E

PSS[®]E é um simulador de sistema de potência e ferramenta de análise para operação de transmissão de potência e planejamento. É utilizado em mais de 145 países por engenheiros, consultores, universidades e laboratórios de pesquisa [28]. Foi o primeiro programa do sistema de potência baseado em uma GUI, lançado em 1976 [19].

Permite a realização de estudos como fluxo de carga, simulação dinâmica de pequenas e grandes perturbações, fluxo de carga ótimo, análise de contingência, análise harmônica, curvas PV (potência ativa por tensão) e QV (potência reativa por tensão), faltas balanceadas e desbalanceadas, dentre outros. Também é possível a criação de modelos de controle definidos pelos usuários por meio de rotinas desenvolvidas por meio de linguagens de programação, tais como FORTRAN e Python, ou pela construção na forma de diagrama de blocos [20].

*1.3.1.8 Power*Tools for Windows*

Criado pela SKM System Analysis, o Power*Tools for Windows (PTW), desenvolvido desde 1978 (então com o nome de DAPPER), possui uma série de pacotes para análise de SEPs voltadas para sistemas industriais. Possui atualmente mais de 45000 usuários em todo o mundo, e a presença em 89 países [19][29].

Possui funções de fluxo de carga, fluxo de carga ótimo, dimensionamento de transformadores e alimentadores, coordenação de proteção (módulo CAPTOR), análise de arcos elétricos, partida transitória de motores (módulo TMS), análise harmônica (módulo HI_WAVE), estabilidade transitória (módulo I*SIM), dimensionamento de baterias, entre outras.

1.3.1.9 SimPowerSystems

É uma *toolbox* que expande o Simulink do MATLAB, fornecendo vários modelos de elementos e ferramentas para sistemas de potência. Dentre esses modelos são incluídas máquinas trifásicas, componentes para aplicação em sistemas FACTS e sistemas de energia renovável. As principais análises realizadas pelo programa são o fluxo de carga, estabilidade transitória, análise harmônica e cálculo da distorção harmônica [30]. É uma das ferramentas mais utilizadas para pesquisa devido principalmente a sua generalização e consequente facilidade na criação de novas tecnologias aliada à poderosa GUI oferecida pelo Simulink.

Modelos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e da *toolbox* Simscape podem ser integrados aos modelos elétricos [20][30], ampliando ainda mais a capacidade de generalização do *software*.

1.3.2 Programas não comerciais

Apesar dos programas comerciais supracitados serem bem estabelecidos no setor elétrico e computacionalmente eficientes, eles são geralmente problemáticos para propósitos educacionais e de pesquisa acadêmica. Isso se deve ao fato das dificuldades na alteração do seu código fonte (quando possível) ou a inserção de novos algoritmos. A flexibilidade e habilidade de fácil prototipagem são geralmente mais importantes que eficiência computacional [31].

Em contraponto às licenças comerciais ou protetoras, surgiu o conceito de código aberto (*open-source*), primeiramente utilizado em 1998 [31][32]. A Figura 1.2 ilustra (com alguns exemplos) os tipos de licenças e suas intensidades de direitos autorais (*copyrights*).

Figura 1.2 – Tipos de licenças e suas intensidades de direitos autorais

Sem <i>copyrights</i> ← (fraco) <i>Copyrights</i> (forte) → Tudo reservado				
Domínio Público	Licenças não Protetoras	Licenças Protetoras	Licenças Proprietárias	Comércio Secreto
	Ex.: BSD, LGPL, GPL	MS Shared Source	MS EULA	DVD CSS

Fonte: Adaptado de SARKINEN, J. [32].

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 [32].

Como já foi dito anteriormente, a maioria dos programas para estudos no SEP são produtos comerciais obtidos por meio de licenças com um alto custo de aquisição. Uma alternativa que adota a cultura *open-source* são os programas gratuitos e de código aberto (FOSS, do inglês *Free and Open Source Software*).

Os FOSSs são soluções ideais para aplicação na área educacional e para a pesquisa, pois permite ao programador a possibilidade de uma completa modificação e adaptação do programa para adequação aos problemas estudados. Assim que tais programas são incrementados com novos algoritmos por outros pesquisadores, os novos códigos são incluídos na fonte original e, então, o *software* se mantém atualizado, evitando sua obsolescência. O desenvolvimento de novas tecnologias também é um grande atrativo para utilização dos FOSSs por profissionais do setor elétrico como usuários finais.

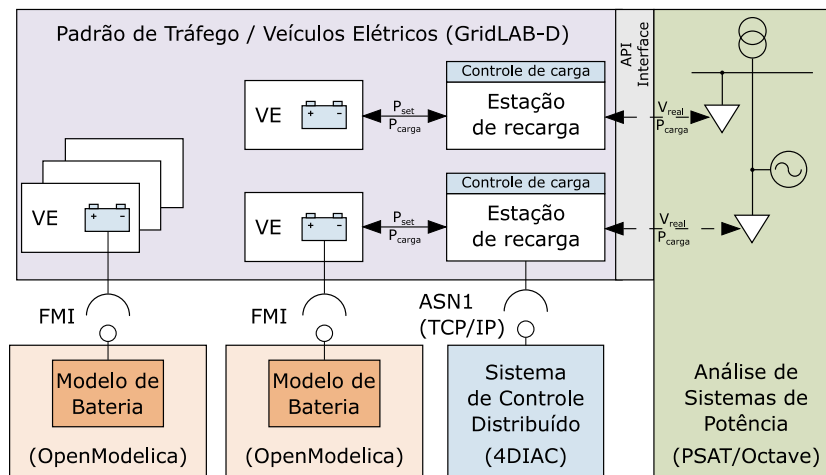
Na área de educação, exemplos de sucesso de aplicação de FOSSs em cursos de sistemas de potência são apresentados na literatura, evidenciados em [33] e [34]. A possibilidade de análise e modificação do código fonte permitem aos alunos a compreensão dos mecanismos envolvidos entre teoria, modelagem e *scripting*, liberdade não concedida por programas proprietários.

Outra grande vantagem dos FOSSs tanto na área de pesquisa quanto em aplicações industriais, é a possibilidade de adequação de vários programas livres para trabalharem em conjunto, fornecendo resultados de simulações interdisciplinares. Como exemplo, para sistemas de potência, trabalhos de co-simulação de programas *open-source* foram realizados parcialmente em [35] e totalmente em [36].

Em [36] é elaborada uma co-simulação de componentes, controles e sistemas de potência baseados somente em programas *open-source*. Utilizaram-se os pacotes de simulação

GridLAB-D, OpenModelica, PSAT e 4DIAC, para realizar estudo de carga e descarga de baterias, tráfego e recarga de veículos elétricos, controle distribuído em *smart grids* e análise em sistemas de potência, como mostra a Figura 1.3. Por meio da co-simulação é possível explorar as características individuais dos programas com o intuito de modelar e simular vários aspectos complexos [36].

Figura 1.3 – Exemplo de co-simulação entre programas *Open-Source*



Fonte: Adaptado de STIFTER, M.; et al. [36].

São aqui levantados os principais programas computacionais não comerciais para o SEP, principalmente aqueles que possuem código aberto. Destacam-se suas principais características, as quais foram utilizadas também como referência para o desenvolvimento da aplicação deste trabalho. Os pacotes de *software* analisados foram: ATP, InterPSS, MATACDC, MatDyn, PSAT, TransUFU, UFUFlow e VST.

1.3.2.1 ATP

O ATP (*Alternative Transiente Program*), também conhecido ATP-EMTP, foi concebido em 1984 e aprimorado até os dias atuais por grupos de usuários oficiais localizados em diversas partes do mundo. Essa ferramenta consiste de uma versão adaptada de um dos primeiros programas para simulação computacional, o EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*), desenvolvido na década de 60 [38].

Esse *software* não é de domínio público, entretanto ele é disponibilizado gratuitamente por seus grupos de usuários para qualquer pessoa que não tenha participado voluntariamente na comercialização de algum programa de transitórios eletromagnéticos [39].

O principal foco de estudo do ATP é o fenômeno transitório eletromagnético e eletromecânico [39], e utiliza como método de integração das equações diferenciais o Trapezoidal Implícito. Redes complexas e sistemas de controle de estruturas genéricas podem ser simulados. Aliado ao ATPDraw [40], ferramenta gráfica para criação do circuito elétrico no sistema operacional Windows, o ATP é uma poderosa ferramenta e bastante utilizada na área acadêmica. Sua popularidade está ligada à sua capacidade de generalização provida pelas ferramentas adicionais DBM, TACS e MODELS.

A DBM (*Data Base Module*) permite a criação de novos componentes que ampliam sua biblioteca. Um conjunto de componentes existentes no próprio programa ou aqueles criados por usuários podem ser agrupados em um único módulo, sendo criado um novo modelo no ATP.

A TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) possibilita a representação de funções lógicas e matemáticas complexas, funções transferência e outros dispositivos para a criação de um sistema de controle em conjunto com a solução da rede de potência. Os sinais gerados pela TACS podem ser aplicados em qualquer nó do circuito modelado como fontes de corrente ou tensão. Esses sinais ainda podem ser aplicados em dispositivos de chaveamento, permitindo a criação de elementos que envolvem eletrônica de potência.

A MODELS é uma linguagem de programação de uso geral, similar à linguagem Pascal, utilizada na representação e estudo de sistemas variantes no tempo [38]. Por meio dessa ferramenta, é possível criar novos elementos antes não presentes no programa ou na rotina TACS, ampliando ainda mais a capacidade de generalização do ATP.

1.3.2.2 InterPSS

InterPSS é um projeto *open-source* destinado a desenvolver um sistema de *software* baseado em tecnologia da Internet para projeto, análise e simulação de sistemas de potência direcionado para o uso de engenharia do mundo real [41], ou seja é um *software* direcionado para a área industrial. Possui uma arquitetura de *software* é aberta e modular, fato ao qual permite que componentes desenvolvidos por outros desenvolvedores sejam facilmente integrados ao programa com o intuito de aumentar sua funcionalidade ou comportamento. O mecanismo de simulação foi projetado para ser genérico para fácil integração e extensão, com recursos de GUI mínimos [42].

É desenvolvido na linguagem de programação Java e atualmente possui implementada as ferramentas de fluxo de carga, curto-circuito, estabilidade transitória, análise de sistemas distribuídos e análise de sistemas de alimentação CC.

Como método de solução de fluxo de carga é utilizado o Newton-Raphson ou Desacoplado rápido. A solução de equações diferenciais para análise de estabilidade transitória utiliza-se o Euler modificado ou Runge-Kutta.

O InterPSS possui duas versões: *Desktop edition* e *Web edition*. A versão *Desktop*, disponível para Windows, possui um editor de diagramas unifilares em que é possível inserir barramentos e ramos. Os dados são inseridos em formulários de dados ou em *scripts* em Java. O código fonte da versão atual, denominada 1.4.04, não foi encontrado em suas páginas oficiais na internet, fato também observado em [20].

Já a versão *Web*, atualmente 2.2.1, é totalmente baseada na tecnologia de computação em nuvem, hospedada no *Google Cloud Computing*, ambiente que permite executar serviços baseados na nuvem. Toda a simulação é realizada por um “motor” de simulação executado na internet [20], porém não dispõe de interface gráfica. O código fonte da versão *Web* pode ser encontrado na plataforma de hospedagem GitHub [43].

1.3.2.3 MATPOWER

O MATPOWER é um pacote de arquivos M do MATLAB para solução de fluxo de carga e fluxo de carga ótimo, visando atender a necessidade de pesquisadores, professores e estudantes [44]. Ele foi projetado para entregar a melhor performance computacional possível enquanto é mantido a simplicidade do código e facilidade de modificação. O pacote de ferramentas é *open-source* e também compatível com GNU Octave, FOSS similar ao MATLAB.

A solução do fluxo de carga é realizada de forma completa e convencional, denominada “AC”, ou de forma simplificada e mais rápida, denominada “DC”. Para o cálculo “AC” o programa disponibiliza quatro métodos numéricos de solução: Newton-Raphson, duas versões do método desacoplado, e Gauss-Seidel. A formulação simplificada do fluxo de carga “DC”, permite a solução das equações do problema de forma direta, dispensando um método numérico e alcançando um resultado em tempo de processamento menor em detrimento da redução na precisão na resposta final.

Para o cálculo do fluxo de carga ótimo, o *toolbox* permite a utilização tanto dos modelos AC quanto DC. Para solução desse problema utilizam-se métodos disponibilizados em funções do próprio MATLAB tanto em código na linguagem do MATLAB quanto em funções disponíveis por arquivos pré-compilados para arquitetura de cada máquina implementados em C ou Fortran.

Os dados de entrada são inseridos por arquivos de texto no formato similar ao padrão IEEE CDF e PTI. O programa não possui GUI ou ferramentas CAD. A documentação do código é disponibilizada dentro de cada arquivo M e pode ser acessada pelo terminal do MATLAB.

1.3.2.4 MATA CDC

O MATA CDC é primeiro programa *open-source* destinado para cálculo do fluxo de carga de redes HVDC (*High Voltage Direct Current*) e sistemas híbridos CA/CC [45]. O *software* é totalmente integrado com o MATPOWER e compartilham da mesma filosofia de arquitetura, os quais mantêm a simplicidade do código fonte e facilidade de utilização e modificação.

O fluxo de carga CA/CC é resolvido sequencialmente, ou seja, o programa resolve o fluxo de potência híbrido iterando entre os sistemas de corrente alternada e contínua. Durante esse processo as variáveis do sistema CC permanecem inalteradas enquanto é solucionado o sistema CA, e vice-versa. O MATA CDC permite a fácil inclusão de estratégias de controle para estudos de regime permanente.

O programa não possui interface gráfica ou ferramentas CAD, além de ser totalmente dependente do programa proprietário MATLAB. A documentação é providenciada por um manual de usuário [46] e pela publicação [45], sem nenhuma descrição específica de cada uma das funções implementadas.

1.3.2.5 MatDyn

Assim como o MATA CDC, o MatDyn utiliza as funcionalidades do MATPOWER e também compartilha a filosofia de facilidade de utilização e modificação do seu código fonte escrito na linguagem de programação MATLAB. O foco desse pacote de ferramentas é estabilidade transitória e simulações no domínio do tempo em sistemas de potência [47].

A modelagem do sistema dinâmico é efetuada por meio de equações algébrico-diferenciais e a solução desse sistema é realizada de forma independente, ou seja, resolvem-se

primeiro as equações diferenciais e em sequência as equações algébricas. Essa abordagem é adotada com intuito de manter o código mais simples possível, uma vez que uma implementação de solução simultânea gera matrizes Jacobianas complexas, fabricando uma codificação de difícil interpretação.

São implementados quatro métodos de solução das EADs: Euler modificado de segunda ordem; Runge-Kutta de quarta ordem; Runge-Kutta Fehlberg de ordem quatro e com controle de passo de integração; e Runge-Kutta Higham-Hall de ordem seis com passo variável e extrapolação de suas variáveis. Todos os métodos são explícitos e para se obter resultados precisos o passo de integração deve permanecer pequeno mesmo quando os efeitos de pequenas constantes de tempo deixam de existir. Isso torna o programa parcialmente inadequado para grandes períodos de simulação.

Também com o intuito de manter o código simples e cumprir com a filosofia do programa desenvolvido, algumas simplificações são feitas na modelagem do sistema: desconsideração da saliência durante o período transitório e modelagem das cargas somente como impedância constante.

Da mesma forma que o MATPOWER e MATA CDC, o MatDyn não possui GUI e é dependente do MATLAB. A documentação do programa está presente na publicação [47] e em um manual de usuários [48]. As funções implementadas nos arquivos M não são explicitamente documentadas.

1.3.2.6 PSAT

O *Power System Analysis Toolbox*, ou PSAT, é um *software* baseado em MATLAB e GNU Octave para análise e planejamento de sistemas de potência de pequeno e grande portes. Possibilita o estudo de fluxo de carga, fluxo de carga continuado, fluxo de carga ótimo, análise de estabilidade de pequenos sinais e simulações no domínio do tempo. Estão presentes vários modelos estáticos e dinâmicos de componentes do SEP, como: cargas não convencionais, máquinas síncronas e assíncronas, reguladores e dispositivos FACTS [31]. Nas versões mais recentes, estão presentes vários modelos de turbinas eólicas e a possibilidade de conversão dos resultados em formatos de saída como: arquivo de texto, planilhas e em LaTeX [20].

Os métodos de solução do fluxo de carga implementados são o Newton-Raphson e Desacoplado Rápido. A formulação do programa permite a inclusão de modelo de barra de referência distribuído. Para resolver as EADs para estudos no domínio do tempo foram

desenvolvidos os métodos de integração de Euler regressivo e Trapezoidal, ambos implícitos. A solução das equações é realizada de forma simultânea, sendo o único programa baseado em MATLAB a realizar tal implementação.

Como editor de rede de potência, o PSAT utiliza o Simulink, o que permite ao usuário a possibilidade de facilmente desenhar um SEP por meio de blocos de elementos do sistema elétrico. Os dados do sistema e dos elementos são inseridos em formulários gráficos dedicados. Na versão para MATLAB, o PSAT permite a construção de modelos definidos pelo usuário por meio de uma GUI. Isso permite estender as capacidades do programa, auxiliando usuários finais a inserirem seus próprios modelos.

As funcionalidades de interface gráfica, editor de redes e modelos definidos por usuários não estão disponíveis na versão desenvolvida para o GNU Octave, sendo essa limitada apenas à comandos via terminal e arquivos de entrada de texto.

1.3.2.7 *TransUFU*

O TransUFU (*Transient Stability Program* da Universidade Federal de Uberlândia) fornece resposta dinâmica de um sistema elétrico face a distúrbios devidos a: chaveamentos e faltas [49]. O programa foi criado com a finalidade didática para estudantes e pesquisadores. Desde a sua criação, ele vem sendo utilizado no âmbito da FEELT/UFU (Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia) em disciplinas dos cursos de graduação e pós-graduação, além do desenvolvimento de trabalhos em projetos de pesquisa. Foi desenvolvido na linguagem de programação FORTRAN e é compilada somente para ambiente Windows.

O programa permite o estudo de sistemas de pequeno e médio porte, limitando-se à inserção da seguinte quantidade de elementos [20]: 20 máquinas síncronas; 30 motores de indução; 20 compensadores estáticos; 50 barras; 100 ramos e 20 linhas chaveadas.

Como método de integração para solução das equações algébrico-diferenciais utiliza-se o Trapezoidal Implícito. Várias técnicas como fatoração da matriz admitância para solução de sistemas lineares, utilização de constantes de integração para evitar cálculos repetitivos e extrapolação de variáveis não integráveis foram implementados no programa com o intuito de otimizar os cálculos, diminuindo de forma significativa seu tempo de processamento.

O TransUFU não possui interface gráfica ou editor de redes, sendo seus dados inseridos por meio de arquivos de texto rigorosamente tabulados. Sua execução é realizada por meio de

linha de comando em terminal. Como saída de dados, o executável gera uma listagem com os parâmetros inseridos pelo usuário e resultados de inicializações dos elementos dinâmicos, além de arquivos com os gráficos no tempo, os quais podem ser acessados por meio do programa PlotXY, originalmente desenvolvido para o ATP.

1.3.2.8 UFUFlow

Assim como o TransUFU, o UFUFlow (Programa de Fluxo de carga da Universidade Federal de Uberlândia), é programado em FORTRAN é utilizado na FEELT/UFU como ferramenta de ensino para estudantes de graduação e pós-graduação. O *software* visa analisar as condições de regime permanente de um sistema elétrico, os quais são utilizados como dados de entrada do TransUFU [50]. Sua primeira versão foi gerada em 1985, utilizando um ambiente de programação comercial, o Microsoft Fortran PowerStation [20].

A versão utiliza alguns limites para simulação [50]: 40 barras ou nós do sistema e 40 ramos, incluindo linhas de transmissão e os transformadores.

Os dados de entrada são inseridos da mesma forma do TransUFU, por meio de arquivos de texto tabulados. Após a leitura dos dados, o programa utiliza o método de solução numérica de Newton-Raphson como solucionador do problema de fluxo de carga. Os resultados são gerados na forma de um relatório em um arquivo de texto.

O UFUFlow é desprovido de qualquer GUI ou ferramentas CAD, além de não manter documentação de seu código fonte, somente um manual de usuários apresentado na referência [50]. O executável é compilado somente para ambiente Windows.

1.3.2.9 VST

O *Voltage Stability Toolbox*, ou VST, é um pacote de ferramentas desenvolvido no ambiente MATLAB, criado para análise de bifurcação e estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência. O VST combina as comprovadas capacidades computacionais e analíticas da teoria da bifurcação e a habilidade do MATLAB de promover a criação de uma GUI, elementos gráficos, além de seus *toolboxes*. Essa ferramenta permite a realização de estudos de fluxo de carga, estabilidade transitória e de pequenos sinais, e análise de bifurcação [51].

Como método de solução do fluxo de carga, utiliza-se o Newton-Raphson convencional e o Newton-Raphson-Seydel para casos de não convergência do método anterior, situação

recorrente na análise de estabilidade de tensão próxima a um ponto de bifurcação SN (do inglês, *Saddle Node*).

Para simulação dinâmica, o VST separa a solução de um sistema de EADs em equações diferenciais ordinárias (EDOs) e equações algébricas. Para solução das EDOs é utilizado o método de integração de quarta ordem de Runge-Kutta, enquanto o Newton-Raphson é usado para solução das equações algébricas na atualização das magnitudes das tensões e seus ângulos em cada passo de integração.

O programa possui GUI composta por formulários de dados, os quais os dados de arquivos no formato IEEE CDF podem ser editados, além dos resultados originados pelas ferramentas de cálculo presentes no *software*. O VST não possui ferramentas CAD para criação e modificação de diagramas unifilares.

1.3.2.10 Outros programas não comerciais

Cabe ainda ressaltar outros programas não comerciais que envolvem parcialmente o escopo deste trabalho, contemplados em [37]: UWPFLOW, TEFTS, AMES, DCOPFJ, Pylon e OpenDSS.

Os programas UWPFLOW e TEFTS são desenvolvidos na linguagem C para os ambientes Windows e UNIX. O UWPFLOW é uma ferramenta de pesquisa projetada para calcular pontos de bifurcação utilizando métodos solução continuada e diretos em sistemas de potência CA, CC com presença de dispositivos FACTS. TEFTS é um programa de estabilidade transitória utilizando a Função de Energia Transitória e estabilidade de tensão em modelos dinâmicos de sistemas CA-HVDC.

O AMES e o DCOPFJ são FOSS programados em Java desenvolvidos e mantidos por um grupo de pesquisadores de várias áreas da Iowa State University. O AMES está atualmente em sua versão 4.0 [52], também utilizando Python como linguagem de programação; e tem como objetivo o estudo do mercado de energia norte-americano operando em redes de transmissão CA. O AMES é integrado ao DCOPFJ, *software* que permite o estudo de problemas de fluxo de carga ótimo sendo adequado para pesquisa, educação e treinamento.

Pylon é um pacote de *software* para simulação de sistemas de potência e mercado de energia [53]. A proposta do programa é fornecer uma ferramenta simples, porém poderosa, livre para engenheiros que não possuem vínculo à programas proprietários, o qual pode ser utilizado e expandido de forma fácil. Pylon é a portabilidade do MATPOWER na linguagem Python, ou

seja, a reescrita do programa baseado em MATLAB nessa nova linguagem de programação. Realiza estudos de fluxo de carga e fluxo de carga ótimo, estimação de estado e simulação de mercado de energia, além de possuir analisadores de arquivos dos programas PSS[®]E, MATPOWER e PSAT.

O OpenDSS é um simulador destinado à representação de sistemas distribuição. Ele é projetado para dar suporte à maioria dos tipos de análise do planejamento da distribuição associados com a interconexão de geração distribuída a sistemas utilitários. Nele é possível representar condições desbalanceadas, processos estocásticos, além de outros aspectos da distribuição de energia elétrica incluindo modelos detalhados de equipamentos. Usuários podem estender o programa adicionando modelos definidos por usuários. Assim como o InterPSS, o OpenDSS é um *software* orientado para a indústria e também utilizado em pesquisas acadêmicas. O programa é mantido por um grupo de engenheiros trabalhando com a EPRI (*Electric Power Research Institute*).

1.3.3 Características dos programas não comerciais em sistemas de potência

Como pode ser observado na seção anterior, esforços notáveis foram feitos pela comunidade acadêmica para criação de programas para fins educacionais e de pesquisa. Entretanto, a maioria das ferramentas disponíveis não seguem completamente as regras dos FOSSs, os quais apresentam pelo menos a falta de um dos seguintes tópicos: ampla distribuição do *software*; acesso ao seu código fonte; comunidade de usuários; documentação abrangente; distribuição do programa utilizando alguma licença a qual permite a livre modificação e redistribuição do código [37].

Muitos FOSSs para sistemas elétricos são desenvolvidos para MATLAB, *software* proprietário com alto custo de aquisição, principalmente fora do ambiente acadêmico, e que possui seu código fonte fechado. Esses FOSS, por facilidade de desenvolvimento, empregam bastante as funções matemáticas disponíveis no MATLAB, dificultando a portabilidade para outras linguagens de programação.

Os programas InterPSS e PSAT utilizam o paradigma de programação orientado a objetos (POO), enquanto os demais empregam a programação procedural. Vale salientar que o PSAT usa um formato padrão de POO do MATLAB que não é muito usual e dificulta o seu entendimento [20].

Outras características importantes que são largamente implementadas em programas comerciais mas são desconsideradas em programas *open-source* de sistemas de potência, são: presença de uma **GUI amigável** atrelada a **ferramentas CAD** (desenho assistido por computador, do inglês, *Computer-Aided Design*) para criação de diagramas unifilares de redes de potência e/ou diagrama de controles, **software multiplataforma** (como por exemplo a distribuição de um mesmo programa para o sistema operacional Windows e distribuições Linux); utilização de uma **arquitetura de software padrão**, proporcionando inúmeras vantagens aos programadores, como o desenvolvimento simultâneo, reutilização do código e facilidade de modificação do código; e **independência de programas comerciais**, permitindo a modificação completa, possibilitando a inserção de novas tecnologias e algoritmos de solução dos modelos implementados.

A Tabela 1.1 ilustra os estudos realizados pelas ferramentas analisadas, além de várias outras características importantes em um programa de sistemas de potência: Linguagem de programação, Fluxo de Carga (FC), Curto-Circuito (CC), Fluxo de Carga Ótimo (FCO), Fluxo de Carga Continuado ou Análise de Estabilidade de Tensão (FCC), Estabilidade Transitória (ET), Transitórios Eletromagnéticos (TEM), Análise Harmônica (AH), Interface Gráfica de Usuários (GUI), editor de diagramas (unifilares e/ou diagrama de blocos) (CAD), Multiplataforma (MP), Arquitetura de *Software* Padrão (ASP) e *Open-Source* (OS).

Tabela 1.1 – Programas não comerciais para sistemas elétricos de potência

Programa	Linguagem	FC	CC	FCO	FCC	ET	TEM	AH	GUI	CAD	MP	ASP	OS
ATP/ATPDraw	Fortran/Delphi						✓		✓	✓			
AMES/DCOPFJ	Java	✓		✓									✓
InterPSS	Java	✓	✓			✓						✓	✓
MATACDC	MATLAB	✓				✓					✓		✓
MatDyn	MATLAB	✓				✓					✓		✓
MATPOWER	MATLAB	✓		✓							✓		✓
OpenDSS	Delphi	✓				✓		✓	✓	✓			✓
PSAT	MATLAB/Octave	✓		✓	✓	✓					✓		✓
Pylon	Python	✓		✓		✓		✓					✓
TEFTS	C					✓					✓		✓
TransUFU	Fortran					✓							
UFUFlow	Fortran	✓		✓									
UWPFLOW	C	✓			✓						✓		✓
VST	MATLAB	✓			✓	✓		✓			✓		✓
PSP-UFU	C++	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Adaptado de MILANO, F; et al. [1][31][37].

Algumas características importantes não explícitas na Tabela 1.1 devem ser destacadas:

- Os programas sinalizados como multiplataforma e desenvolvidos na linguagem MATLAB possuem essa característica devido à independência de plataforma do *software* MATLAB, o qual é um programa multiplataforma, porém, como já foi mencionado anteriormente, é proprietário de código fechado.
- No PSAT, para ser considerado verdadeiramente como um FOSS, desenvolveu-se uma versão em GNU Octave [31], porém com algumas limitações, como a impossibilidade de utilização de ferramentas gráficas (GUI e CAD na Tabela 1.1) e criação de controles definidos pelo usuário.
- Apesar de sinalizado como código aberto, o InterPSS não disponibiliza seu código fonte da versão *desktop*, a qual possui interface gráfica e ferramentas CAD. Somente sua versão web possui código aberto [20][43].
- O único programa que possui arquitetura de *software* padrão é o InterPSS, a qual é aberta e modular, permitindo que outros desenvolvedores facilmente insiram novas funcionalidades e modelos no programa.
- Os programas ATP, ATPDraw, UFUFlow e TransUFU não possuem código aberto que são somente disponibilizados a grupos restritos.
- Nenhum dos programas citados possuem interface gráfica para criação de diagramas de blocos para controles, sendo uma característica somente de programas comerciais.

É nessa perspectiva que a presente tese encontra sustentação. A criação de um *software* de sistemas de potência livre e de código aberto que supre as deficiências citadas é de suma importância na área de pesquisa, educação e também aplicações práticas de engenharia. Salienta-se que além dos importantes estudos implementados nessa pesquisa, preocupou-se com a facilidade de implementação de novas ferramentas e tecnologias no programa criado, tanto por usuários finais quanto por programadores.

1.4 Objetivos

O principal objetivo e contribuição desta tese é o desenvolvimento de um *software* livre de código aberto, gráfico e multiplataforma para estudos em sistemas elétricos de potência, possuindo uma arquitetura de *software* padrão e modular, a qual permite a fácil modificação e implementação de novas tecnologias por programadores utilizando o código fonte

publicamente disponibilizado. Para usuários finais e aplicações práticas de engenharia, ferramentas de desenho assistido por computadores para criação de diagramas unifilares de circuitos de potência e diagramas de blocos de sistemas de controle são desenvolvidos, permitindo a generalização de elementos do sistema elétrico por meio de uma interface gráfica, sem a necessidade de modificação do código fonte. Tais características são amplamente empregadas em programas comerciais, porém não são existentes em aplicações livres, justificando sua implementação no presente trabalho. O *software* desenvolvido, em sua versão final, tem o objetivo de auxiliar como ferramenta as áreas de pesquisa e educação, além de aplicações industriais em sistemas elétricos de potência.

1.4.1 Objetivos específicos

Alguns objetivos específicos necessários para a realização do trabalho são listados:

- Contextualizar os principais estudos que envolvem o escopo desta tese e destacar os mais notáveis simuladores que os realizam, com enfoque nos programas não comerciais. Esse objetivo é utilizado para justificar a criação do *software* deste trabalho e auxiliar no seu desenvolvimento como referência. Esse tópico foi elucidado no presente capítulo;
- Levantar o estado da arte dos modelos e solução de suas equações dos estudos implementados na aplicação, além das tecnologias que são empregadas no seu desenvolvimento;
- Investigar e utilizar os códigos fontes disponíveis dos programas analisados, com o intuito de auxiliar no desenvolvimento dos modelos de elementos elétricos e solução dos cálculos de fluxo de carga, curto-circuito, harmônicos e análise de estabilidade;
- Implementar o programa utilizando o paradigma de programação de orientação a objetos e a arquitetura de *software* padrão MVC (*model-view-control*);
- Criar e publicar uma documentação *online* detalhada do código fonte, caracterizando as classes e métodos desenvolvidos;
- Realizar testes comparativos do *software* desenvolvido com aqueles já bem estabelecidos no sistema elétrico, visando verificar a correta implementação das ferramentas de cálculo;

- Disponibilizar o programa desenvolvido, assim como seu código fonte, de forma pública e gratuita por meio de uma plataforma de hospedagem.

1.5 Estrutura da tese

Para alcançar os objetivos propostos, além do presente capítulo introdutório, esta tese se encontra assim estruturada:

CAPÍTULO II – Modelagens matemáticas e soluções numéricas

Nesse capítulo são apresentados os modelos matemáticos dos elementos elétricos e de controle presentes no *software* desenvolvido, destacando as hipóteses levantadas e as simplificações. Também são apresentadas as soluções numéricas para os estudos de fluxo de carga, curto-circuito, harmônicos e análise de estabilidade. As ferramentas de cálculo são expostas de maneira a esclarecer as estratégias utilizadas na implementação no programa final, evidenciando os módulos criados e suas interações no formato de fluxogramas.

CAPÍTULO III – O programa PSP-UFU

O programa desenvolvido, batizado de PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia), é apresentado nesse capítulo, caracterizando-o em sua totalidade, destacando a linguagem e paradigma de programação utilizados, arquitetura de *software*, bibliotecas gráficas, matemáticas, analisadores de arquivos e classes auxiliares utilizadas, as quais são justificadas suas aplicações. São apresentados os elementos desenvolvidos e as ferramentas gráficas e de cálculos dos estudos implementados.

CAPÍTULO IV – Testes comparativos e análises dos resultados

Uma vez definidos os modelos dos elementos elétricos e suas soluções numéricas no *software* para estudos de fluxo de carga, curto-circuito, harmônicos e estabilidade, nesse capítulo faz-se um estudo comparativo com outros simuladores bem consolidados no sistema elétrico, de modo a atestar a correta operação e desempenho da aplicação criada observando discrepâncias significativas nos resultados. Para isso utilizam-se sistemas teste padrões construídos em ambos programas, os quais são submetidos a diferentes distúrbios, caso aplicável, em suas topologias.

CAPÍTULO V – Conclusões

Finalmente, o capítulo final, de caráter conclusivo, é destinado a sintetizar o trabalho realizado até então, destacando os avanços em relação ao estado da arte. São ainda destacados alguns itens que poderão ser contemplados em pesquisas futuras.

2 MODELAGENS MATEMÁTICAS E SOLUÇÕES NUMÉRICAS

2.1 Considerações iniciais

A representação matemática de um sistema elétrico é realizada por meio da modelagem de cada elemento do sistema, de maneira que seja possível representá-los na forma de equações para cada tipo de estudo. Esse capítulo lida com a modelagem matemática desses elementos, além das soluções numéricas de suas equações para os estudos de fluxo de carga, curto-circuito e estabilidade.

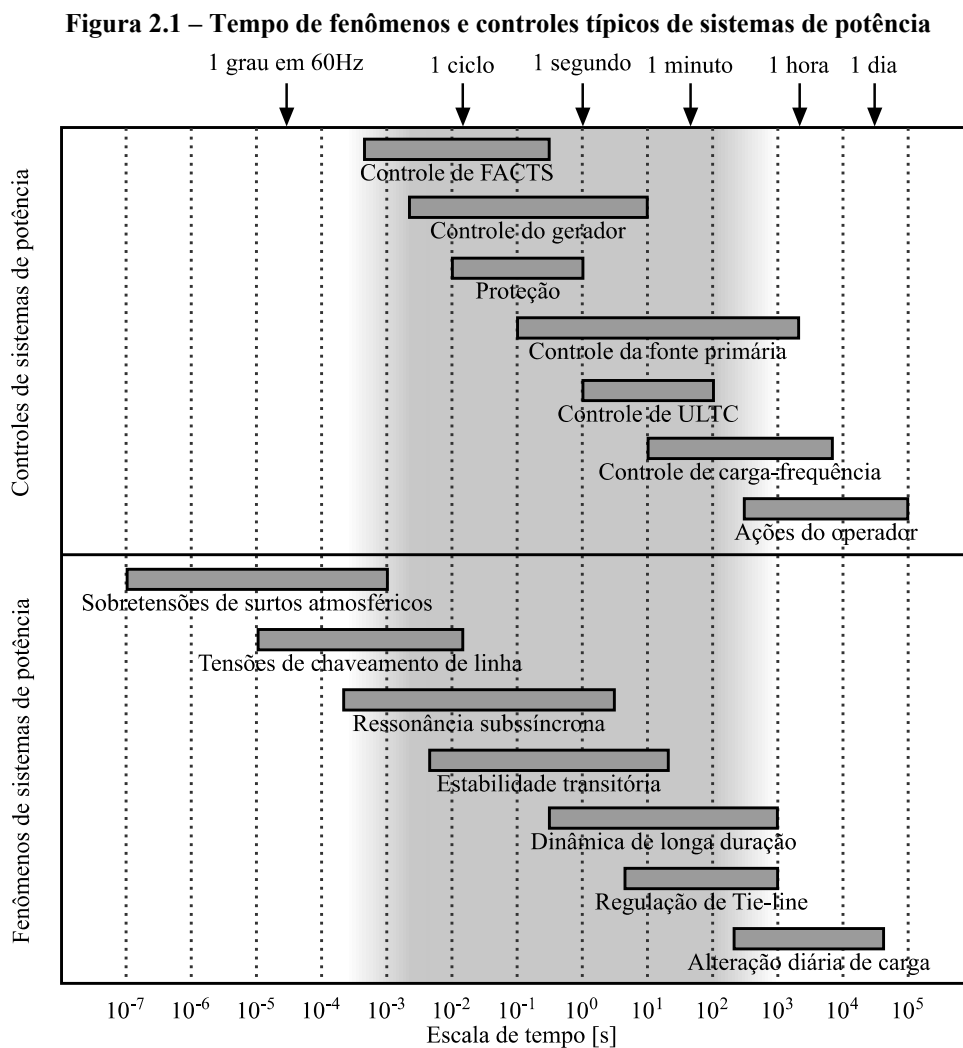
O fluxo de carga consiste na determinação da tensão das barras e correntes nos ramos sob condições reais ou ideais de operação normal do sistema elétrico. Essa análise é fundamental para planejar a expansão do sistema, uma vez que sua operação satisfatória depende do conhecimento dos efeitos da interligação com outras redes, de novas cargas, centrais geradoras e linhas antes que elas sejam instaladas [54]. Uma vez que o fluxo de carga calcula o estado em regime permanente da rede elétrica, os modelos apresentados são estáticos, não apresentando equações que variam no tempo. Como é necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre geração e carga por meio de equações não lineares, um método matemático de solução se faz necessário. Foram implementados dois métodos bastante conhecidos e bem estabelecidos na literatura e em programas comerciais e não-comerciais: o Gauss-Seidel e o Newton Raphson. O cálculo de fluxo de carga também é aproveitado nos estudos descritos a seguir como cálculo de suas condições iniciais.

O principal objetivo da análise de curto-circuito é o cálculo das correntes e tensões de falta para especificação de disjuntores, transformadores de corrente e a parametrização de relés de proteção [8]. De 70 a 80% das faltas em linhas de transmissão são entre uma fase e terra, as quais ocorrem devido ao centelhamento de apenas uma fase da linha para a torre e então para a terra. O menor número de faltas, cerca de 5%, envolve todas as três fases, chamadas de faltas trifásicas. Os outros tipos de faltas envolvem duas fases e duas fases e a terra. Todas essas falhas, exceto a trifásica, são assimétricas e causam desequilíbrio entre as fases [54]. Diante desse cenário faz-se necessária a utilização do método das componentes simétricas, ou teorema

de Fortescue [55], o qual permite a decomposição do sistema desequilibrado em equivalentes equilibrados, uma vez que a rede é representada no programa de forma simétrica em relação às três fases.

Como já mencionado anteriormente, estabilidade de sistemas de potência é a habilidade de um SEP, para uma certa condição de operação, de reestabelecer um estado de operação de equilíbrio após ser submetido a um distúrbio físico. A recuperação de uma grande perturbação é chamada de estabilidade transitória e a solução é obtida no domínio do tempo [8]. As formulações dos modelos são desenvolvidas na forma de equações algébrico-diferenciais e necessitam de um método de integração numérica para suas soluções.

A Figura 2.1 ilustra a escala de tempo de fenômenos e controles estudados na análise de sistema de potência, onde é destacada a área em que os modelos dos elementos dinâmicos implementados no programa são adequados (em cinza).



Fonte: Adaptado de MILANO, F. [1].

Diferentes modelos de um mesmo elemento elétrico são apresentados nesse capítulo. Isso se deve ao fato de que, em sistemas de potência, as constantes de tempo de diferentes fenômenos podem abranger um amplo intervalo de tempo [1], fato ilustrado na Figura 2.1.

2.2 A matriz admitância

Entre as várias formas de descrever o comportamento de uma rede de potência que obedece às leis de Kirchhoff, destaca-se a análise nodal, a qual é particularmente adequada para implementação computacional, uma vez que é feita de forma sistemática. A abordagem nodal possui as seguintes vantagens [8]:

- O número de nós é obtido diretamente do diagrama unifilar 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.

Para relacionar as tensões e correntes em todos os nós (ou barras) da rede de potência utiliza-se a matriz admitância de barras (\mathbf{Y}_{bus}), amplamente empregada nos estudos desta tese. A sua construção, realizada de forma sistêmica, é descrita nas equações (2.1) e (2.2) [8][54]:

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

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

Em que:

\mathbf{Y}_{ii} Elementos da diagonal principal

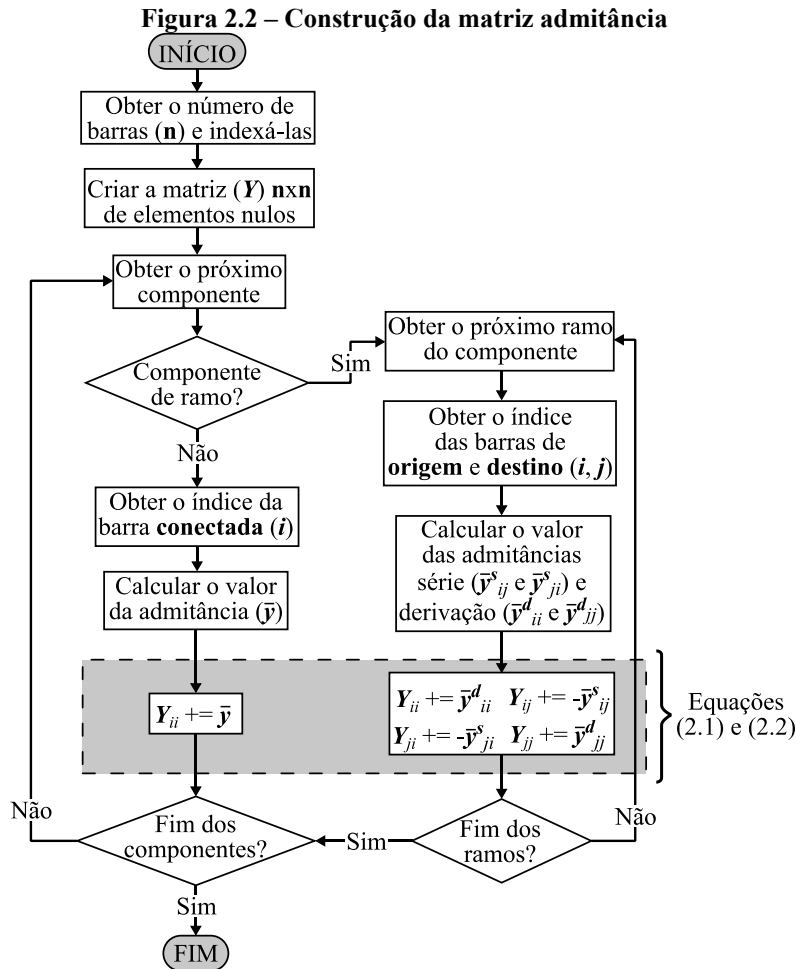
\mathbf{Y}_{ij} Elementos fora da diagonal principal

\bar{y}_{ii} Admitância dos elementos shunt e dos parâmetros shunt de elementos de ramos

\bar{y}_{ij} Admitância dos parâmetros série de elementos de ramos

Constituem elementos de ramos aqueles que conectam duas ou mais barras do sistema (por exemplo, linhas de transmissão, transformadores de dois e três enrolamentos, etc.) e elementos shunt (ou de derivação) são aqueles que derivam de um único nó (por exemplo, banco de reatores e capacitores, cargas de impedância constante, etc.).

A construção da matriz admitância realizada no programa é ilustrada pela Figura 2.2:



Fonte: Autoria própria.

A formação da matriz admitância apresentada é genérica para qualquer tipo de elemento representado em sua forma estática, sendo necessário o desenvolvedor definir duas particularidades de um novo componente elétrico: o tipo (ramo ou derivação) e o cálculo das admitâncias utilizando seus parâmetros.

Algumas propriedades da matriz admitância: é quadrada com ordem igual ao número de barras do sistema; geralmente é simétrica, salvo a presença de transformadores defasadores; complexa, uma vez que as admitâncias originadas dos componentes elétricos são parâmetros

complexos; elementos fora da diagonal principal são os valores negativos da admitância série dos ramos e é frequentemente zero; cada elemento da diagonal principal é a soma da admitância série e derivação dos ramos, além dos componentes shunt; devido à topologia das redes elétricas de potência, a matriz admitância é altamente esparsa (abundância de elementos nulos) [8].

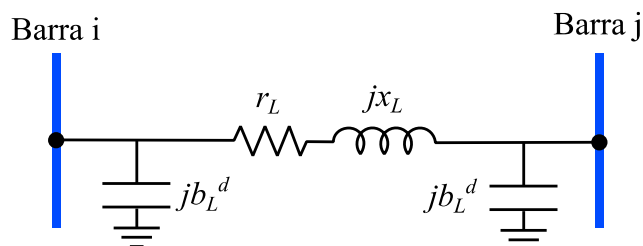
As indutâncias e capacitâncias presentes no sistema de transmissão e distribuição para os estudos dinâmicos aqui postos são considerados estáticos, ou seja, não possuem variação de seu valor no tempo e são inseridos na matriz admitância. Tal aproximação é apropriada devido ao fato das constantes de tempo envolvidas serem pequenas. Por exemplo, um reator com as seguintes características: frequência de $f = 60\text{Hz}$, $x_L = \omega L = 5,0\Omega$ e resistência série de $r = 2,0\Omega$; possui uma constante de tempo de aproximadamente $\tau_R = 6,63 \cdot 10^{-3}\text{s}$, valor suficientemente pequeno para considerar a corrente como uma variável algébrica no cálculo da estabilidade transitória, como pode ser observado na Figura 2.1.

Na sequência são apresentados os modelos de elementos elétricos fundamentais constituintes de uma rede de potência para a criação da matriz admitância. Uma vez que essa matriz é consequência dos modelos de cada tipo de estudo, as particularidades dos componentes para as diferentes ferramentas de cálculo implementadas nesse trabalho são explanadas posteriormente.

2.2.1 Linhas de transmissão e distribuição

Um sistema de potência é uma complexa rede de elementos passivos e ativos, o qual sua maioria consiste em linhas e transformadores. As linhas de transmissão e distribuição 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^d) nos extremos da linha [56]. 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 2.3:

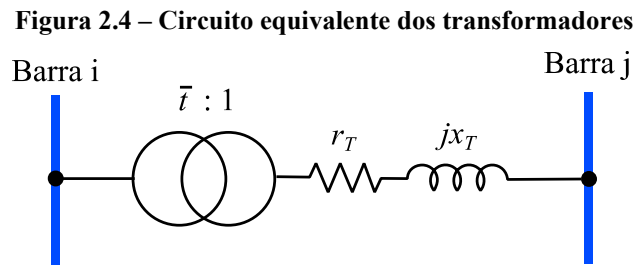
Figura 2.3 – Circuito equivalente π das linhas de transmissão e distribuição



Fonte: Autoria própria.

2.2.2 Transformadores

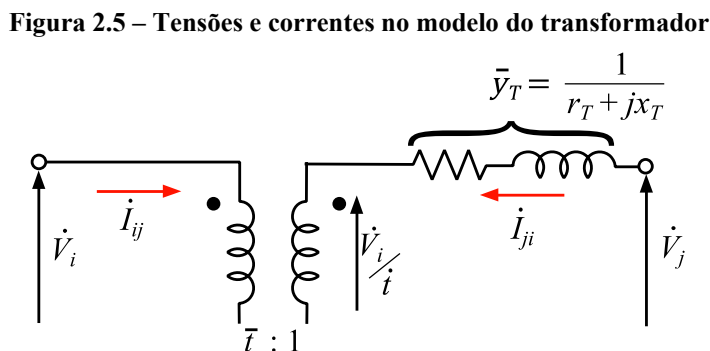
Os transformadores devem ser modelados representando seu tap (t) e defasagem (φ) [56]. Para isso utiliza-se um transformador ideal de relação de transformação $\bar{t}:1$ em série com sua impedância, em que \bar{t} é um número complexo ($t\angle\varphi$). A Figura 2.4 representa a modelagem utilizada:



Fonte: Autoria própria.

Para transformadores com tap nominal e defasagem zero, ou seja, $\bar{t} = 1\angle 0^\circ$ empregam-se as equações (2.1) e (2.2) diretamente, obtendo o valor da admitância pela inversão de seus parâmetros série. Caso exista defasagem e/ou valor do tap diferente de 1, deve-se considerar esse efeito na matriz admitância. Para isso desenvolve-se outro equacionamento, apresentado na sequência.

A Figura 2.5 evidencia as tensões e correntes do modelo apresentado:



Fonte: Autoria própria.

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:

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

Em que:

\dot{V}_i Tensão complexa da barra i

\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 a equação (2.3), tem-se:

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

A corrente complexa da barra j para a barra i em função das tensões do transformador, pode ser encontrada por:

$$\dot{I}_{ji} = \left(\dot{V}_j - \frac{\dot{V}_i}{\bar{t}} \right) \cdot \bar{y}_T \quad (2.5)$$

Substituindo (2.4) em (2.5), obtém-se a corrente no sentido inverso:

$$\dot{I}_{ij} = \left(\frac{\dot{V}_i}{|\bar{t}|^2} - \frac{\dot{V}_j}{\bar{t}^*} \right) \cdot \bar{y}_T \quad (2.6)$$

As equações (2.5) e (2.6) unidas na forma matricial pode ser observada em (2.7):

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

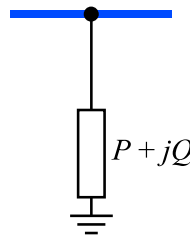
As admitâncias contidas na matriz da equação (2.7) são inseridas na \mathbf{Y}_{bus} do sistema. Salienta-se que essa representação permite a inserção de um transformador genérico, cuja defasagem e tap podem assumir quaisquer valores em uma concepção unifilar.

2.2.3 Elementos shunt

Os elementos shunt, como reatores, banco de capacitores e cargas de impedância constante, são representados simplesmente por suas admitâncias em derivação. Como os parâmetros de entrada geralmente se constituem de suas potências ativa (P) e reativa (Q) nominais (no caso de reatores e capacitores, $P = 0$), deve-se, portanto, encontrar sua admitância com a equação (2.8) para inseri-la na matriz admitância.

$$\bar{y} = \frac{P - jQ}{\hat{V}^2} \quad (2.8)$$

Figura 2.6 – Circuito equivalente de elementos shunt



Fonte: Autoria própria.

2.3 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 (em uma barra de índice i) [57]:

- 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 definidos 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 [57].

2.3.1 Equações 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 um barramento serem igual à soma dos fluxos correspondentes que a deixam por meio das linhas de transmissão, transformadores, elementos shunt, etc. [57], ou seja:

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

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

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^d Componente da injeção de potência reativa devido aos elementos shunts na barra i

P_{ij} Fluxo de potência ativa entre as barras i e j

Q_{ij} Fluxo de potência reativa entre as barras i e 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):

$$\dot{I} = Y_{bus}\dot{V} \quad (2.11)$$

Em que:

\dot{I} Vetor das correntes injetadas nas barras

Y_{bus} Matriz admitância de barras
 \dot{V} Vetor das tensões nas barras

Reescrevendo a equação (2.11) para um sistema de n barras, obtém-se:

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

Em que:

\dot{I}_i Corrente complexa injetada na barra i
 \bar{Y}_{ij} Elemento da matriz admitância (i, j)
 \dot{V}_j Tensão complexa na barra j

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

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

Em que:

\dot{V}_i^* Conjugado da tensão complexa na barra i

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

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

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

Em que:

θ_i Ângulo da tensão da barra i
 θ_j Ângulo da tensão da barra j
 γ_{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, primeiramente deve-se encontrar a corrente que flui entre as barras conforme a equação (2.16):

$$\dot{I}_{ij} = \bar{y}_L(\dot{V}_i - \dot{V}_j) + jb_L^d \dot{V}_i \quad (2.16)$$

Em que:

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

\bar{y}_L Admitância formada pela inversão da impedância série ($r_L + jx_L$) da linha

b_L^d Susceptância capacitiva shunt de um dos extremos da linha de transmissão

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

$$S_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = \dot{V}_i^* \dot{I}_{ij} = \bar{y}_L \dot{V}_i^* (\dot{V}_i - \dot{V}_j) + jb_L^d \dot{V}_i^* \dot{V}_i \quad (2.17)$$

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

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

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_L + b_L^d) + V_i V_j b_L \cos \theta_{ij} - V_i V_j g_L \sin \theta_{ij} \quad (2.19)$$

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 (componente real da admitância série)

b_L Susceptância série da linha (componente imaginária da admitância série)

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

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

$$Q_{ji} = -V_j^2 (b_L + b_L^d) + V_j V_i b_L \cos \theta_{ij} + V_j V_i g_L \sin \theta_{ij} \quad (2.21)$$

Nos transformadores com tap nominal e defasagem zero, os fluxos de potência são obtidos por meio das equações (2.18) a (2.21) (substituindo g_L e b_L por g_T e b_T e fazendo $b_L^d =$

0). Para taps diferentes de 1,0 e/ou defasagens não nulas, o desenvolvimento do equacionamento inicia-se encontrando os fluxos de potência complexos utilizando (2.5) e (2.6):

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

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

Extraindo a potência ativa e reativa das expressões acima, tem-se:

$$P_{ij} = V_i^2 g_T - t V_i V_j g_T \cos(\theta_{ij} - \varphi) - t V_i V_j b_T \sin(\theta_{ij} - \varphi) \quad (2.24)$$

$$Q_{ji} = -V_i^2 b_T + t V_i V_j b_T \cos(\theta_{ij} - \varphi) - t V_i V_j g_T \sin(\theta_{ij} - \varphi) \quad (2.25)$$

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

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

Em que:

- g_T Condutância do transformador
- b_T Susceptância do transformador
- t tap do transformador
- φ Defasagem do transformador

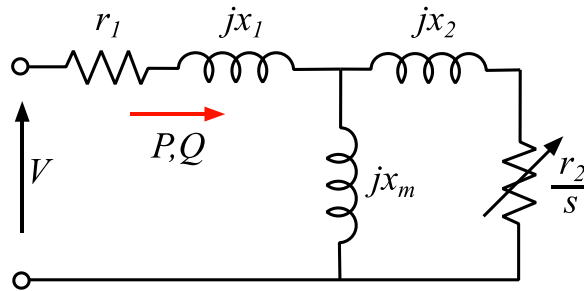
Como pode-se observar, as equações apresentadas são não-lineares e a solução analítica não é prática. As soluções dessas equações seguem processos iterativos, em que são atribuídos valores estimados (ou iniciais) para as barras com tensões desconhecidas e, baseado na potência ativa e reativa e módulo da tensão especificados, calcula-se por meio das equações previamente apresentadas as novas tensões complexas em cada nó do sistema. Na sequência, esse conjunto de valores para as tensões em cada barra é utilizado para novamente calcular outro grupo de tensões. 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 [54].

Os métodos implementados no programa para solução do problema de fluxo de carga são Gauss-Seidel e Newton-Raphson.

2.3.1.1 Motor de indução trifásico no cálculo do fluxo de carga

A Figura 2.7 apresenta o modelo do motor de indução trifásico (MIT) de gaiola simples [56]:

Figura 2.7 – Circuito equivalente do motor de indução



Fonte: Autoria própria.

O modelo da Figura 2.7 possui as seguintes características:

- r_1 e x_1 Resistência e reatância do estator, respectivamente
- r_2 e x_2 Resistência e reatância do rotor referidas ao estator, respectivamente
- V Módulo da tensão terminal do motor
- P e Q Potência ativa e reativa do motor
- s Escorregamento do motor

As potências ativas e reativa podem ser calculadas em relação às variáveis e parâmetros do motor em p.u. como [58]:

$$P = \frac{V^2 \left\{ \left(\frac{r_2}{s} \right) \left[\left(\frac{r_2}{s} \right) r_1 - x_1 K_1 - x_2 x_m \right] + K_1 \left[\left(\frac{r_2}{s} \right) (x_m + x_1) + r_1 K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{r_2}{s} \right) r_1 - x_1 K_1 - x_2 x_m \right]^2 + \left[\left(\frac{r_2}{s} \right) (x_m + x_1) + r_1 K_1 \right]^2} \quad (2.28)$$

$$Q = \frac{-V^2 \left\{ K_1 \left[\left(\frac{r_2}{s} \right) r_1 - x_1 K_1 - x_2 x_m \right] - \left(\frac{r_2}{s} \right) \left[\left(\frac{r_2}{s} \right) (x_m + x_1) + r_1 K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{r_2}{s} \right) r_1 - x_1 K_1 - x_2 x_m \right]^2 + \left[\left(\frac{r_2}{s} \right) (x_m + x_1) + r_1 K_1 \right]^2} \quad (2.29)$$

Em que:

$$K_1 = x_2 + x_m \quad (2.30)$$

Como pode ser observado nas equações (2.28) e (2.29), existem quatro variáveis e somente duas equações. Na prática, as variáveis podem ser reduzidas a três, uma vez que o módulo da tensão (V) é obtido nos resultados do fluxo de potência. Para resolver as equações é necessário definir uma variável adicional. A variável escolhida como fixa é a potência ativa (P), por fornecer resultados numericamente corretos e adequados para motores em situações de estabilidade [58].

Portanto, nesse modelo estático, a potência ativa é mantida constante durante o cálculo do fluxo de carga e o escorregamento (s) é atualizado em cada iteração. A equação (2.28) pode ser reescrita em relação ao escorregamento [58]:

$$\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 A + \left(\frac{r_2}{s}\right) B + C = 0 \quad (2.31)$$

Em que:

$$A = P(r_1^2 + K_3^2) - V^2 r_1 \quad (2.32)$$

$$B = 2P(r_1 K_2 + K_3 K_4) - V^2 (K_2 + K_1 K_3) \quad (2.33)$$

$$C = P(K_2^2 + K_4^2) - V^2 K_1 K_4 \quad (2.34)$$

$$K_2 = -x_1 K_1 - x_2 x_m \quad (2.35)$$

$$K_3 = x_m + x_1 \quad (2.36)$$

$$K_4 = r_1 K_1 \quad (2.37)$$

Esse modelo pode ser inserido na solução do fluxo de potência seguindo os seguintes passos:

1. As constantes K_1 a K_4 são inicialmente calculadas pelas equações (2.30) e (2.35) a (2.37). Esses valores são mantidos constantes durante toda a solução;
2. Em cada iteração são calculados os coeficientes A , B e C utilizando o valor atualizado de V e as equações (2.32) a (2.34);
3. A equação (2.31) é resolvida e dois valores de r_2/s são obtidos, em que o maior deles é escolhido por estar na região estável da característica toque-escorregamento do motor [58];
4. Utilizando o novo valor de r_2/s , a potência reativa (Q) é obtida pela equação (2.29). O vetor de potências é então atualizado e os procedimentos convencionais de solução do fluxo de potência são realizados.

Os passos de 2 a 4 são repetidos até que se obtenha a convergência.

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

O método de Gauss-Seidel tem sido bastante utilizado nas últimas décadas para solução do problema de fluxo de carga, uma vez que não há a necessidade de fatorar a matrizes, reduzindo o esforço computacional. Atualmente, restrições computacionais são menos problemáticas e outros métodos são normalmente escolhidos, porém o Gauss-Seidel ainda possui valor didático [1] e, visto que o programa desenvolvido nesse trabalho possui fins educacionais, optou-se pela implementação desse método.

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:

$$\frac{P_i - jQ_i}{\dot{V}_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \dot{V}_j \quad (2.38)$$

Extraindo do somatório presente na equação (2.38) a tensão em um barramento genérico i de um sistema de n barras, a seguinte equação é obtida:

$$\dot{V}_i^{(v+1)} = \frac{1}{\bar{Y}_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{\dot{V}_i^{(v)*}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \bar{Y}_{ij} \dot{V}_j^{(v)} \right) \quad (2.39)$$

O índice $(v + 1)$ da equação (2.39) representa a tensão que será obtida na iteração atual e o índice (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 diferença da magnitude da tensão entre iterações em cada barra seja menor do que uma precisão previamente estabelecida. 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 [54].

Nas barras do tipo PV os módulos das tensões são conhecidos, porém as potências reativas não, e para que seja aplicada a equação (2.39) é necessário calcular Q_i anteriormente. Para isso calcula-se a componente imaginária da equação (2.13):

$$Q_i = -Im \left\{ \dot{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \dot{V}_j \right\} \quad (2.40)$$

Utilizando as equações (2.40) e em seguida (2.39), 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 do método são necessários valores iniciais para as tensões (\dot{V}_i^0) que devem ser calculadas. 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.], em que V_i^{esp} é o módulo da tensão especificada para a barra PV. A barra de referência tem o módulo e ângulo de tensão fixos e não participam 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. Essa operação amplia o valor da correção, trazendo a tensão para mais perto do valor 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 inadequada pode resultar em uma convergência mais lenta ou torná-la impossível. Normalmente é utilizado um fator de aceleração igual a 1,6 [54], valor definido como padrão no programa. A utilização do fator de aceleração é realizada por meio da equação (2.41):

$$\dot{V}_{iAC}^{(v+1)} = \alpha \left(\dot{V}_i^{(v+1)} - \dot{V}_{iAC}^{(v)} \right) + \dot{V}_{iAC}^{(v)} \quad (2.41)$$

Em que:

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

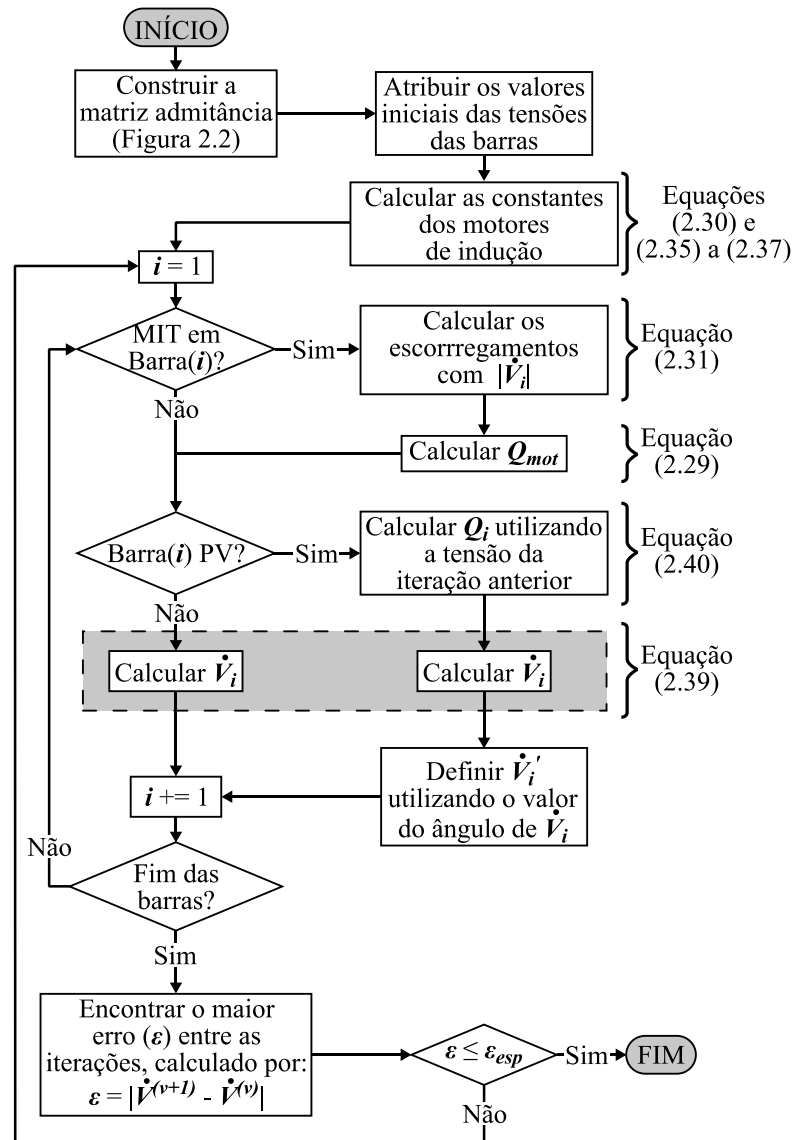
$\dot{V}_i^{(v+1)}$ Tensão complexa da iteração atual

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

α Fator de aceleração

A Figura 2.8 demonstra como o método de Gauss-Seidel foi implementado:

Figura 2.8 – Método numérico de Gauss-Seidel para fluxo de carga



Fonte: Autoria própria.

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

O método de Newton-Raphson (também conhecido como método de Newton ou Newton-Fourier) para solução do fluxo de carga é descrito em vários livros e artigos [1][8][54][57][59]. Atualmente é o algoritmo mais utilizado para solução do fluxo de carga [1]. Para casos bem condicionados, esse método geralmente converge em 4 a 5 iterações, porém existe a possibilidade da técnica contornar o ponto da solução sem nunca atingi-la [1], o que também justifica implementação do método de Gauss-Seidel no *software*.

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 [54]. A série de Taylor

fornece um método simples de aproximação de uma função ($f(x)$) em um polinômio e pode ser definida como (2.42) conforme [60]:

$$f(x) = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})(x - x^{(0)}) + \frac{f''(x^{(0)})}{2!}(x - x^{(0)})^2 + \frac{f^{(3)}(x^{(0)})}{3!}(x - x^{(0)})^3 + \dots + \frac{f^{(n)}(x^{(0)})}{n!}(x - x^{(0)})^n \quad (2.42)$$

Em que:

$x^{(0)}$ Representa o centro, ou estimativa inicial, da série

Considerando duas funções de duas variáveis (x_1 e x_2) iguais às constantes (K_1 e K_2), tem-se [54]:

$$f_1(x_1, x_2) = K_1 \quad (2.43)$$

$$f_2(x_1, x_2) = K_2 \quad (2.44)$$

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 (2.45) e (2.46):

$$K_1 = f_1(x_1, x_2) = f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) \quad (2.45)$$

$$K_2 = f_2(x_1, x_2) = f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) \quad (2.46)$$

Fazendo a expansão em série de Taylor, utilizando (2.42) nas equações (2.45) e (2.46), sem listar as derivadas parciais maiores que 1, obtêm-se:

$$K_1 = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{(0)} \quad (2.47)$$

$$K_2 = f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{(0)} \quad (2.48)$$

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 (2.47) e (2.48) em uma forma matricial:

$$\begin{bmatrix} K_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \\ K_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

A matriz quadrada da equação (2.49) 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 [54]. 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:

$$\begin{bmatrix} \Delta K_1^{(0)} \\ \Delta K_2^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Com a equação (2.50) 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 (2.50), o qual será feito determinando novas estimativas $x_1^{(1)}$ e $x_2^{(1)}$, em que:

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \quad (2.51)$$

$$x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \quad (2.52)$$

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.

Assim 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 (2.49). Os valores estimados do módulo e ângulo da tensão correspondem aos

valores estimados para x_1 e x_2 na equação (2.49). 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:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i^{calc} \quad (2.53)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i^{calc} \quad (2.54)$$

Os valores de ΔP_i e ΔQ_i calculados pelas equações (2.53) e (2.54) correspondem ao ΔK da equação (2.50), os quais formam duas matrizes coluna: $\Delta \mathbf{P}$ com a dimensão igual à soma do número de barras PQ e PV; $\Delta \mathbf{Q}$ 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 (2.50) 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:

$$\begin{array}{l}
 NPQ + NPV \left\{ \begin{array}{l} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{array} \right\} \\
 NPQ \left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{array} \right\}
 \end{array}
 =
 \begin{bmatrix}
 \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_n} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\
 \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

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 (\mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{M} e \mathbf{L}), definidas pelas soluções das derivadas parciais das equações (2.14) e (2.15) em relação ao ângulo e módulo da tensão na barra:

$$\mathbf{H} \begin{cases} H_{ij} = \partial P_i / \partial \theta_j = V_i V_j (g_{ij} \sen \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ H_{ii} = \partial P_i / \partial \theta_i = -V_i^2 b_{ii} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (g_{ij} \sen \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.56)$$

$$\mathbf{N} \begin{cases} N_{ij} = \partial P_i / \partial V_j = V_i (g_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij} \sen \theta_{ij}) \\ N_{ii} = \partial P_i / \partial V_i = V_i g_{ii} + \sum_{j=1}^n V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij} \sen \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.57)$$

$$\mathbf{M} \begin{cases} M_{ij} = \partial Q_i / \partial \theta_j = -V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sen \theta_{ij}) \\ M_{ii} = \partial Q_i / \partial \theta_i = -V_i^2 g_{ii} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sen \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.58)$$

$$\mathbf{L} \begin{cases} L_{ij} = \partial Q_i / \partial V_j = V_i (g_{ij} \sen \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ L_{ii} = \partial Q_i / \partial V_i = -V_i b_{ii} + \sum_{j=1}^n V_j (g_{ij} \sen \theta_{ij} + b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2.59)$$

Em que:

g_{ij} Condutância de elementos fora da diagonal principal da matriz admitância

g_{ii} Condutância de elementos da diagonal principal da matriz admitância

b_{ij} Susceptância de elementos fora da diagonal principal da matriz admitância

b_{ii} Susceptância de elementos da diagonal principal da matriz admitância

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

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

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 ($\Delta \mathbf{P}$ e $\Delta \mathbf{Q}$) por meio de (2.53) e (2.54), as quais são inseridas na equação (2.60).

O passo seguinte é a formação da matriz jacobiana por meio das submatrizes calculadas com as equações (2.56) a (2.59). 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 (2.60). Para tanto utilizou-se o método de eliminação Gaussiana e em sequência a substituição regressiva,

cujos algoritmos utilizados são descritos na seção 2.3.3.1. Esse procedimento diminui o esforço computacional, uma vez que a inversão da matriz jacobiana em todas as iterações é evitada.

Com as correções de módulo e ângulo das tensões das barras calculadas, aplicam-se as seguintes equações (semelhantes às equações (2.51) e (2.52)):

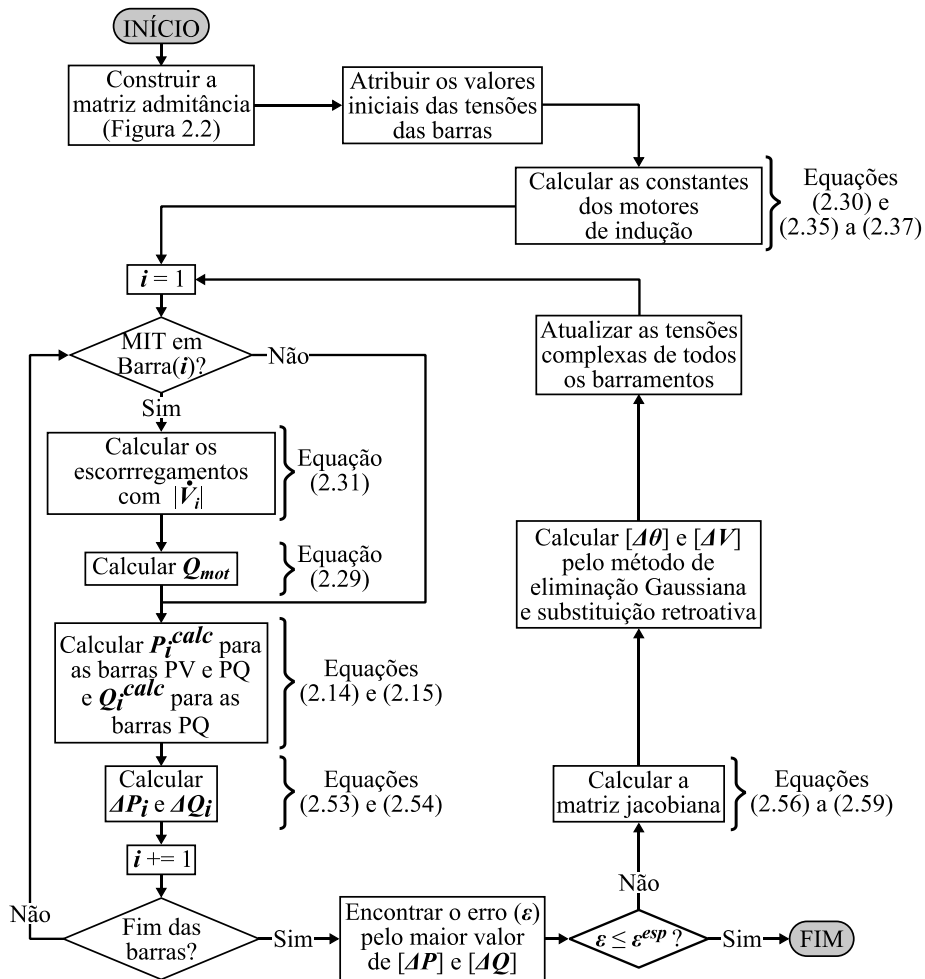
$$\theta_i^{(v+1)} = \theta_i^{(v)} + \Delta\theta_i^{(v)} \quad (2.61)$$

$$V_i^{(v+1)} = V_i^{(v)} + \Delta V_i^{(v)} \quad (2.62)$$

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

A Figura 2.9 mostra o fluxograma do método de Newton-Raphson para solução do fluxo de carga implementado.

Figura 2.9 – Método numérico de Newton-Raphson para fluxo de carga



Fonte: Autoria própria.

2.3.3.1 Algoritmo de eliminação Gaussiana

O método de eliminação Gaussiana é uma técnica que possibilita a solução de equações de sistemas lineares pela eliminação de variáveis desconhecidas e redução do sistema a ordens menores [60].

Para resolver o sistema de equações na forma $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, reduz-se no equivalente $\mathbf{Ux} = \mathbf{g}$, em que \mathbf{U} é uma matriz triangular superior. Esse sistema pode, então, ser facilmente resolvido por um processo de substituição regressiva.

Um sistema linear original é indicado por $\mathbf{A}^{(1)}\mathbf{x} = \mathbf{b}^{(1)}$, em que:

$$\mathbf{A}^{(1)} = [\mathbf{a}_{ij}^{(1)}] \quad (2.63)$$

$$\mathbf{b}^{(1)} = [b_1^{(1)}, \dots, b_n^{(1)}]^T \quad (2.64)$$

Em que:

n Ordem do sistema

Passo 1: Se $a_{11}^{(1)} \neq 0$, definem-se os multiplicadores de linha, por:

$$m_{i1} = \frac{a_{i1}^{(1)}}{a_{11}^{(1)}} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.65)$$

Isso é usado na eliminação dos termos x_1 das equações de 2 a n , utilizando as seguintes equações:

$$a_{ij}^{(2)} = a_{ij}^{(1)} - m_{i1}a_{1j}^{(1)} \quad i, j = 2, 3, \dots, n \quad (2.66)$$

$$b_i^{(2)} = b_i^{(1)} - m_{i1}b_1^{(1)} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.67)$$

Com isso a primeira linha se mantém inalterada e a primeira coluna de $\mathbf{A}^{(1)}$, abaixo da diagonal principal, é definida como zero. O sistema $\mathbf{A}^{(2)}\mathbf{x} = \mathbf{b}^{(2)}$ ficará da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & \cdots & a_{1n}^{(1)} \\ 0 & a_{22}^{(2)} & \cdots & a_{2n}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & a_{2n}^{(2)} & \cdots & a_{nn}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{(1)} \\ b_2^{(2)} \\ \vdots \\ b_n^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

As eliminações são realizadas sucessivamente nas colunas seguintes até n . Esse processo é expressado de forma genérica na sequência:

Passo k : Se $1 \leq k \leq n - 1$, assume-se que $\mathbf{A}^{(k)} \mathbf{x} = \mathbf{b}^{(k)}$ foi construído, em que $\mathbf{A}^{(k)}$ possui a seguinte forma:

$$\mathbf{A}^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & \cdots & a_{1n}^{(1)} \\ 0 & a_{22}^{(1)} & & a_{2n}^{(1)} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_{kk}^{(k)} \cdots a_{kn}^{(k)} \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & a_{nk}^{(k)} \cdots a_{nn}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

Se $a_{kk}^{(1)} \neq 0$, definem-se os multiplicadores:

$$m_{ik} = \frac{a_{ik}^{(k)}}{a_{kk}^{(k)}} \quad i = k + 1, \dots, n \quad (2.70)$$

Isso é usado na eliminação dos termos x_k das equações de $k + 1$ a n , utilizando as seguintes equações:

$$a_{ij}^{(k+1)} = a_{ij}^{(k)} - m_{ik} a_{kj}^{(k)} \quad i, j = k + 1, \dots, n \quad (2.71)$$

$$b_i^{(k+1)} = b_i^{(k)} - m_{ik} b_k^{(k)} \quad i = k + 1, \dots, n \quad (2.72)$$

Os valores das linhas de 1 a k são mantidas inalteradas e zeros são inseridos na coluna k abaixo da diagonal principal.

Continuando dessa forma até o passo $n - 1$, o seguinte sistema é obtido:

$$\begin{bmatrix} a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & \cdots & a_{1n}^{(1)} \\ 0 & a_{22}^{(2)} & \cdots & a_{2n}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{nn}^{(n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1^{(1)} \\ b_2^{(2)} \\ \vdots \\ b_n^{(n)} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Com isso, inicia-se o processo de substituição regressiva, em que $\mathbf{U} = \mathbf{A}^{(n)}$ e $\mathbf{g} = \mathbf{b}^{(n)}$. Primeiramente encontra-se o último elemento (x_n), por:

$$x_n = \frac{g_n}{u_{nn}} \quad (2.74)$$

E então:

$$x_k = \frac{1}{u_{kk}} \left[g_k - \sum_{j=k+1}^n u_{kj} x_j \right] \quad k = n-1, n-2, \dots, 1 \quad (2.75)$$

Finalizando, assim, o algoritmo.

2.3.4 Controles e limites em um problema de fluxo de carga

Nas barras de geração e também naquelas em que se encontra um compensador síncrono conectados, o controle da magnitude da tensão no barramento é realizado por meio do ajuste da corrente de campo das máquinas síncronas, as quais podem operar sobreexcitadas (injetando reativos) ou subexcitadas (absorvendo reativos) [57]. Os valores limites de potência reativa que podem ser injetadas ou absorvidas dependem da máquina síncrona em estudo. Esses limites são incluídos no fluxo de carga com a criação de dois novos parâmetros, a potência reativa máxima ($Q_i^{máx}$) e potência reativa mínima (Q_i^{min}), sendo esses valores a soma dos limites individuais das máquinas em uma mesma barra genérica i .

A manutenção da potência reativa dentro dos limites é realizada pela troca do tipo de barra, ou seja, as barras violadoras que controlam a tensão (PV), passam a ser barras de carga (PQ), cuja potência é fixada como o limite que seria ultrapassado ($Q_i^{máx}$ ou Q_i^{min}) e a tensão deixa de ser controlada.

A verificação de violação e troca de tipo de barra pode ser realizada a cada iteração, como é explanado em [57], ou ao final da convergência do cálculo. No programa foi

implementada a última estratégia, uma vez que separa os conceitos de cálculo e de verificação de limites, tornando mais fácil o desenvolvimento de novos métodos numéricos e limites. Nessa abordagem, ao ajustar o sistema para a nova situação não violadora o cálculo iterativo deve ser retomado até que obtenha novamente a convergência.

2.4 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.

Atualmente, o *software* desenvolvido 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).

Como já foi apresentado anteriormente, as faltas que ocorrem com maior frequência em sistemas de potência são assimétricas [54]. 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 [10].

2.4.1 Método das componentes simétricas

Esse método proposto por C. L. Fortescue [55], permite definir um sistema de n fasores desbalanceados em $n - 1$ sistemas de n fases balanceados 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 [54]:

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:

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \quad (2.76)$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2} + \dot{V}_{b0} \quad (2.77)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2} + \dot{V}_{c0} \quad (2.78)$$

Em que:

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

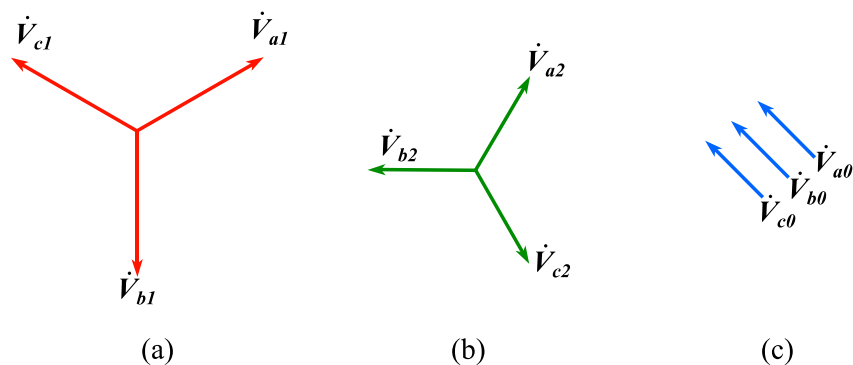
$\dot{V}_{a1}, \dot{V}_{b1}$ e \dot{V}_{c1} Tensões de sequência positiva

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

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

Essas tensões são representadas em diagramas fasoriais na Figura 2.10:

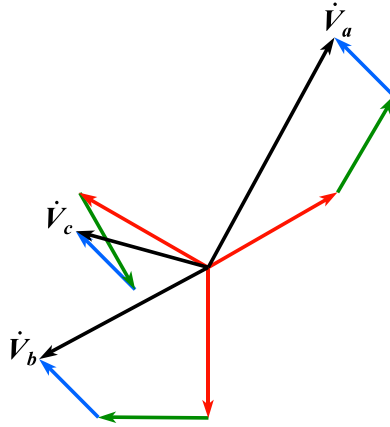
Figura 2.10 – Componentes simétricas: (a) Sequência positiva; (b) Sequência negativa; (c) Sequência zero



Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN, D. [54].

A soma das componentes de sequência é apresentada na Figura 2.11:

Figura 2.11 – Soma das três componentes de sequência da Figura 2.10



Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN, D. [54].

Para simplificar os cálculos adota-se um operador “ \bar{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 [54][61]:

$$\bar{a} = 1 \angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0,5 + j0,866 \quad (2.79)$$

Se o operador “ \bar{a} ” for aplicado a um fasor duas vezes fará o fasor girar 240° . Três aplicações resultará em um giro de 360° [54].

Com isso pode-se utilizar as equações (2.76) a (2.78) em conjunto com o operador “ \bar{a} ” (2.79) para construir a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix}}^{[A]} \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

Considerando a matriz quadrada da equação (2.80) sendo $[A]$, pode-se encontrar as componentes simétricas pré-multiplicando ambos os lados dessa mesma equação por $[A]^{-1}$:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

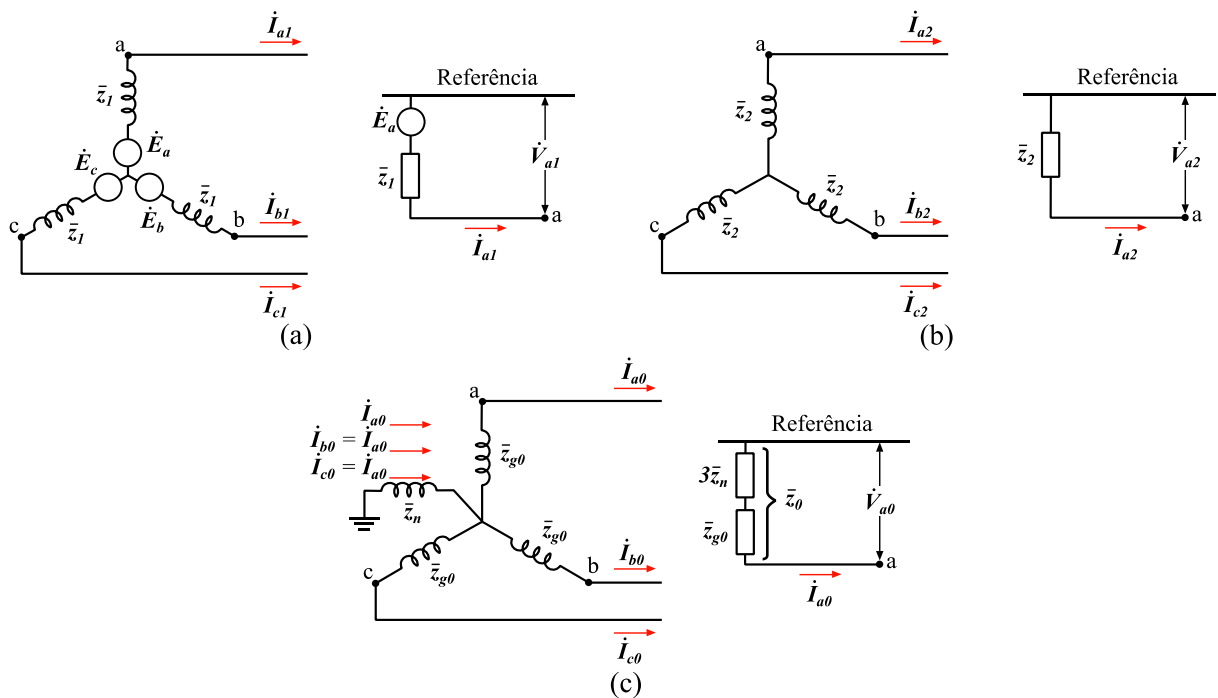
2.4.2 Modelo dos elementos para estudo de curto-circuito

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

2.4.2.1 Geradores

Enquanto os geradores no estudo de fluxo de carga são modelados somente por correntes injetadas nas barras, para o curto-circuito utiliza-se uma tensão atrás de uma impedância. A Figura 2.12 mostra o caminho da corrente e o circuito equivalente de cada sequência nos geradores.

Figura 2.12 – Caminho das correntes e circuito equivalente: (a) sequência positiva; (b) sequência negativa; (c) sequência zero



Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN, D. [54].

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 atrás de uma impedância de sequência positiva. As redes de sequência negativa e zero não contêm forças eletromotrizes, porém incluem as impedâncias do gerador de sequência negativa e zero [54].

A corrente que circula na impedância \bar{z}_n entre o neutro e a terra é $3\dot{I}_{a0}$. Pela Figura 2.12c, observa-se que a queda de tensão de sequência zero do ponto a para terra (\dot{V}_{a0}) é:

$$\dot{V}_{a0} = -3\dot{I}_{a0}\bar{z}_n - \dot{I}_{a0}\bar{z}_{g0} \quad (2.82)$$

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

$$\bar{z}_0 = 3\bar{z}_n + \bar{z}_{g0} \quad (2.83)$$

As equações para os componentes da queda de tensão do ponto “a” para a referência são (como pode ser deduzido da Figura 2.12) [54]:

$$\dot{V}_{a1} = \dot{E}_a - \dot{I}_{a1}\bar{z}_1 \quad (2.84)$$

$$\dot{V}_{a2} = -\dot{I}_{a2}\bar{z}_2 \quad (2.85)$$

$$\dot{V}_{a0} = -\dot{I}_{a0}\bar{z}_0 \quad (2.86)$$

2.4.2.2 Linha de transmissão e distribuição

As linhas são modeladas da mesma forma que aquela apresentada na seção 2.2.1 para a sequência positiva, negativa e zero, as quais devem ser utilizado os parâmetros correspondentes.

2.4.2.3 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 [62]. Com isso, a

matriz que representa as admitâncias da equação (2.7) deve ser substituída pela seguinte expressão:

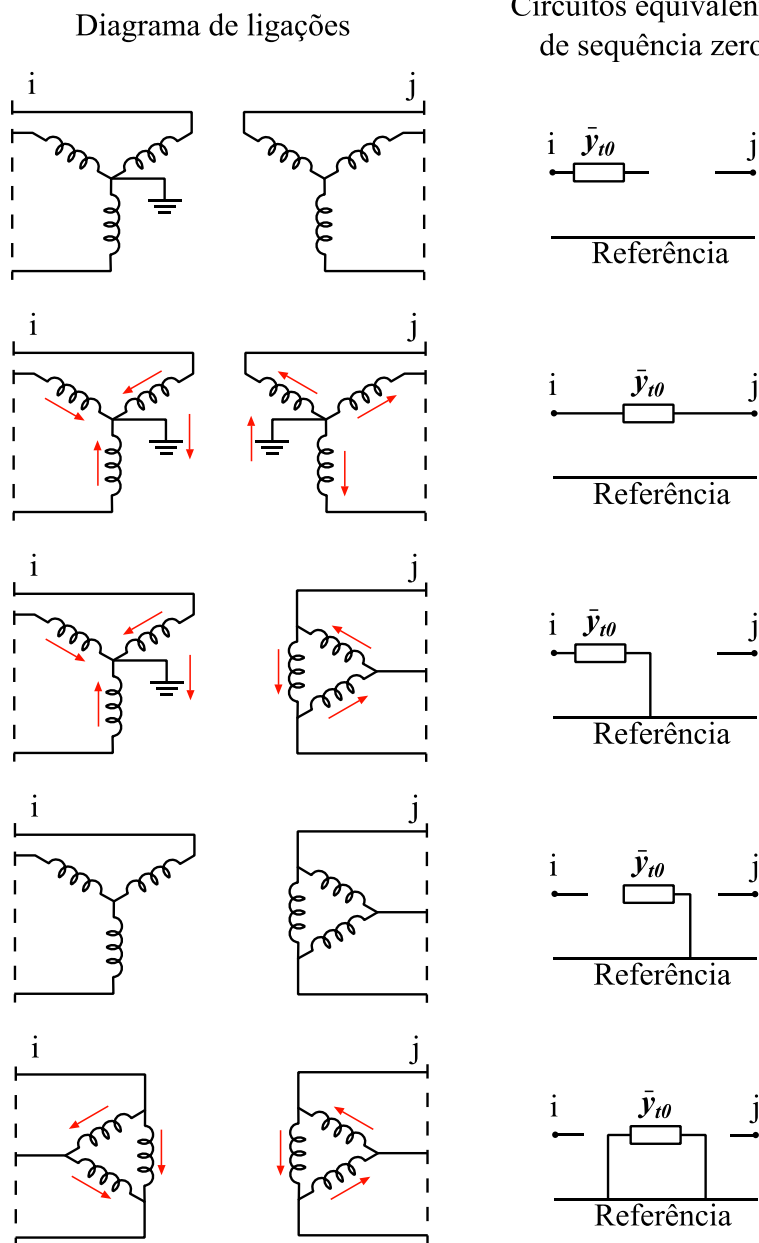
$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_{ii} & \bar{Y}_{ij} \\ \bar{Y}_{ji} & \bar{Y}_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{y}_t}{t^2} & -\frac{\bar{y}_t}{t} \\ -\frac{\bar{y}_t}{t^*} & \bar{y}_t \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

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 de sequência zero. Lembramos 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) [54].

Na Figura 2.13 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 2.13 – Circuitos equivalentes de sequência zero dos transformadores.



Fonte: Adaptado de STEVENSON JR.; WILLIAN D. [54].

Para os transformadores com conexão estrela aterrado, se a ligação do neutro para a terra apresentar uma impedância \hat{z}_n , o circuito equivalente de sequência zero deve ter impedância de $3\hat{z}_n$ em série com a resistência e reatância equivalentes do transformador [54].

2.4.3 Matriz impedância nos estudos de curto-circuito

Utilizando-se dos modelos apresentados, pode-se formar as três matrizes admitância de sequência e invertê-las para obter as matrizes impedância de sequência positiva (\mathbf{Z}_{bus}^1), negativa (\mathbf{Z}_{bus}^2) e zero (\mathbf{Z}_{bus}^0). O cálculo de curto-circuito não possui processos iterativos e a inversão é realizada somente uma vez para cada sequência.

A inversão da matriz é feita com o reaproveitamento do código da implementação do algoritmo de Eliminação Gaussiana, apresentado na seção 2.3.3.1. Encontrar uma matriz inversa \mathbf{A}^{-1} é equivalente a resolver o sistema $\mathbf{AX} = \mathbf{I}$, em que \mathbf{X} é a matriz $n \times n$ desconhecida e \mathbf{I} é a matriz identidade [60]. Se as matrizes \mathbf{X} e \mathbf{I} forem escritas em função de suas colunas:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n)}] \quad (2.88)$$

$$\mathbf{I} = [\mathbf{i}^{(1)}, \dots, \mathbf{i}^{(n)}] \quad (2.89)$$

Portanto, resolver $\mathbf{AX} = \mathbf{I}$ é equivalente a resolver os n sistemas lineares, todos utilizando os menos coeficientes da matriz \mathbf{A} :

$$\mathbf{Ax}^{(1)} = \mathbf{i}^{(1)}, \dots, \mathbf{Ax}^{(n)} = \mathbf{i}^{(n)} \quad (2.90)$$

Logo, ao final dos cálculos, a recomposição dos vetores resolvidos $[\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(n)}]$ em formato de matriz será a inversa de \mathbf{A} .

2.4.4 Equações 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.

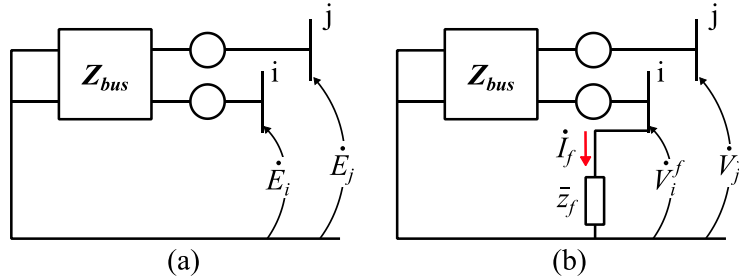
2.4.4.1 Faltas balanceadas

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

$$\hat{\mathbf{V}} = \mathbf{Z}_{bus}\hat{\mathbf{I}} \quad (2.91)$$

Essa equação permite a utilização do equivalente Thevenin do circuito, como é ilustrado na Figura 2.14a, em que são destacadas duas barras genéricas i e j .

Figura 2.14 – Equivalente de Thevenin de um sistema pré-falta (a) e durante a falta (b)



Fonte: Adaptado de ARRILLAGA, J.; WATSON N. R. [8].

A tensão durante a falta na barra i da Figura 2.14b, é:

$$\dot{V}_i^f = \bar{z}_f \dot{I}_f \quad (2.92)$$

Em que:

\bar{z}_f Impedância de falta

\dot{I}_f Corrente de falta

A tensão pré-falta na barra i (\dot{E}_i) para um sistema de n barras, pode ser obtido por meio da expansão da equação (2.91):

$$\dot{E}_i = \bar{z}_{i1} \dot{I}_1 + \bar{z}_{i2} \dot{I}_2 + \dots + \bar{z}_{ii} \dot{I}_i + \dots + \bar{z}_{in} \dot{I}_n \quad (2.93)$$

Durante a falta a corrente \dot{I}_f sai da barra i . Inserindo essa corrente na equação (2.92) e utilizando a equação (2.92), tem-se:

$$\dot{V}_i^f = \bar{z}_f \dot{I}_f = \bar{z}_{i1} \dot{I}_1 + \bar{z}_{i2} \dot{I}_2 + \dots + \bar{z}_{ii} \dot{I}_i + \dots + \bar{z}_{in} \dot{I}_n - \bar{z}_{ii} \dot{I}_f \quad (2.94)$$

Ou

$$\bar{z}_f \dot{I}_f = \dot{E}_i - \bar{z}_{ii} \dot{I}_f \quad (2.95)$$

Portanto,

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_i}{\bar{z}_{ii} + \bar{z}_f} \quad (2.96)$$

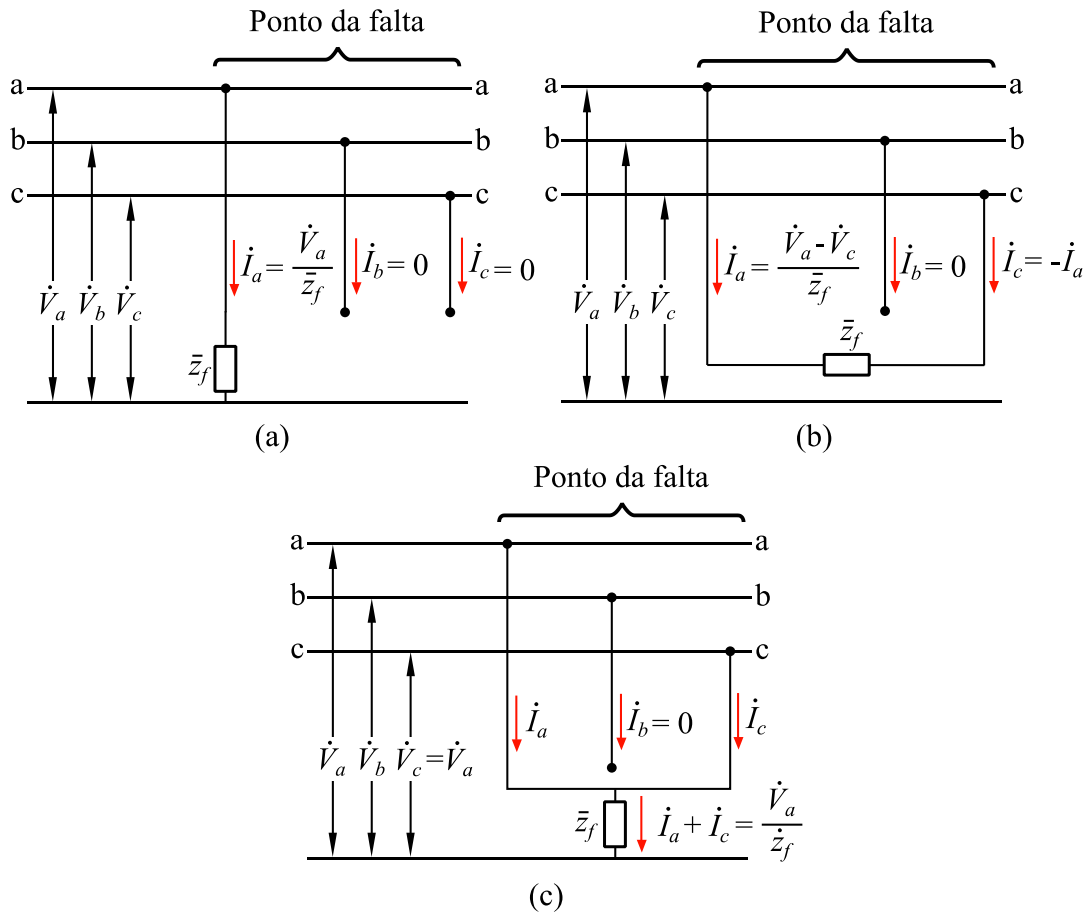
2.4.4.2 Faltas desbalanceadas

O desenvolvimento das equações do cálculo de curto-circuito para faltas desbalanceadas é realizado seguindo o seguinte procedimento [61]:

1. Definir os diagramas no ponto da falta, mostrando as conexões de todas fases para a falta. 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 da equação (2.81);
4. Encontrar a corrente do curto-circuito em estudo utilizando as equações (2.84) a (2.86).

Os diagramas representativos das faltas assimétricas, assim como suas condições de contorno são evidenciadas na Figura 2.15:

Figura 2.15 – Falhas assimétricas e suas condições de contorno: (a) fase-terra; (b) fase-fase; (c) fase-fase-terra



Fonte: Autoria própria

Na sequência são apresentadas as equações para cálculo de cada tipo de falha em todas as fases, utilizando (2.81) para conversão das correntes e tensões em $a-b-c$ para $0-1-2$, além das equações (2.84) a (2.86) e as condições de contorno da Figura 2.15.

Falha fase-terra em A:

$$i_f^1 = i_f^2 = i_f^0 = \frac{\dot{E}_i}{\bar{z}_{ii}^1 + \bar{z}_{ii}^2 + \bar{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_f} \quad (2.97)$$

Em que:

\bar{z}_{ii}^1 , \bar{z}_{ii}^2 e \bar{z}_{ii}^0 Elementos correspondentes ao barramento i , onde se encontra a falha, da diagonal da matriz das impedâncias de sequência positiva (\mathbf{Z}_{bus}^1), negativa (\mathbf{Z}_{bus}^2) e zero (\mathbf{Z}_{bus}^0), respectivamente.

De forma análoga às condições de contorno da Figura 2.15a, podem-se desenvolver as equações de falta *shunt* para as fases B e C.

Falta fase-terra em B:

$$i_f^1 = \frac{\dot{E}_i}{\bar{z}_{ii}^1 + \bar{z}_{ii}^2 + \bar{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_f}, \quad i_f^2 = \bar{a}i_f^1, \quad i_f^0 = \bar{a}^2i_f^1 \quad (2.98)$$

Falta fase-terra em C:

$$i_f^1 = \frac{\dot{E}_i}{\bar{z}_{ii}^1 + \bar{z}_{ii}^2 + \bar{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_f}, \quad i_f^2 = \bar{a}^2i_f^1, \quad i_f^0 = \bar{a}i_f^1 \quad (2.99)$$

Nas faltas fase-fase, representadas pela Figura 2.15b, a componente de sequência zero é nula, uma vez que não há conexão com o terra.

Falta fase-fase entre A e B:

$$i_f^1 = \frac{\dot{E}_i}{\bar{z}_{ii}^1 + \bar{z}_{ii}^2 + \bar{z}_f}, \quad i_f^2 = -\bar{a}^2i_f^1 \quad (2.100)$$

Falta fase-fase entre B e C:

$$i_f^1 = \frac{\dot{E}_i}{\bar{z}_{ii}^1 + \bar{z}_{ii}^2 + \bar{z}_f}, \quad i_f^2 = -i_f^1 \quad (2.101)$$

Falta fase-fase entre C e A:

$$i_f^1 = \frac{\dot{E}_i}{\bar{z}_{ii}^1 + \bar{z}_{ii}^2 + \bar{z}_f}, \quad i_f^2 = -\bar{a}i_f^1 \quad (2.102)$$

Finalmente, as faltas fase-fase-terra, representados pela Figura 2.15c, são apresentadas na sequência. Para as faltas nas fases BC e CA, utiliza-se a mesma equação para a corrente de sequência positiva, apresentada na equação (2.103).

Falta fase-fase-terra entre A e B:

$$i_f^1 = \frac{\dot{E}_i(\bar{z}_{ii}^2 + \bar{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_f)}{\bar{z}_{ii}^1 \dot{z}_{ii}^2 + 3\bar{z}_{ii}^2 z_f + \bar{z}_{ii}^2 \dot{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_{ii}^1 \dot{z}_f + \bar{z}_{ii}^1 \bar{z}_{ii}^0} \quad (2.103)$$

$$i_f^2 = -\bar{a}^2 \frac{\dot{E}_i - \bar{z}_{ii}^1 i_f^1}{\bar{z}_{ii}^2}, \quad i_f^0 = -\bar{a} \frac{\dot{E}_i - \bar{z}_{ii}^1 i_f^1}{\bar{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_f} \quad (2.104)$$

Falta fase-fase-terra entra B e C:

$$i_f^2 = -\frac{\dot{E}_i - \bar{z}_{ii}^1 i_f^1}{\bar{z}_{ii}^2}, \quad i_f^0 = -\frac{\dot{E}_i - \bar{z}_{ii}^1 i_f^1}{\bar{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_f} \quad (2.105)$$

Falta fase-fase-terra entra C e A:

$$i_f^2 = -\bar{a} \frac{\dot{E}_i - \bar{z}_{ii}^1 i_f^1}{\bar{z}_{ii}^2}, \quad i_f^0 = -\bar{a}^2 \frac{\dot{E}_i - \bar{z}_{ii}^1 i_f^1}{\bar{z}_{ii}^0 + 3\bar{z}_f} \quad (2.106)$$

Após o cálculo das correntes de sequência calculam-se as tensões durante a falta em todos os barramentos do sistema por meio da forma matricial das equações (2.84) a (2.86):

$$\dot{V}_f^1 = \dot{E} - Z_{bus}^1 i_f^1 \quad (2.107)$$

$$\dot{V}_f^2 = Z_{bus}^2 i_f^2 \quad (2.108)$$

$$\dot{V}_f^0 = Z_{bus}^0 i_f^0 \quad (2.109)$$

Em que:

\dot{E} Matriz coluna de tensões pré-falta, obtidos no estudo de fluxo de carga

\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

i_f^1 , i_f^2 , e i_f^0 Matrizes coluna corrente de falta de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente

Para obter os valores em $a-b-c$ é usada a equação (2.81), encerrando o cálculo de curto-circuito.

2.5 Estabilidade

A estabilidade de um SEP é um problema dinâmico e necessita de modelos mais elaborados de elementos de potência comparados àqueles apresentados nas seções anteriores. A condição inicial é obtida por meio do cálculo de fluxo de carga, já explanado na seção 2.3.

Como já mencionado anteriormente, o estudo de estabilidade para sistemas elétricos de potência pode ser dividido em dois tipos de estudo: estabilidade transitória e estabilidade dinâmica.

A recuperação do sistema após um grande distúrbio é chamada de estabilidade transitória e sua solução é obtida no domínio do tempo. O período sob investigação pode variar de uma fração de segundos, quando a primeira equação de oscilação é obtida, até algumas dezenas de segundo, quando o período transitório de múltiplas oscilações são determinados [1][7][8].

A estabilidade dinâmica corresponde à resposta de um sistema frente a pequenas perturbações, normalmente quando há a presença de controles automáticos nos geradores [7], podendo ser resolvido tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência [8]. Assim como é feito em [8], o estudo de estabilidade dinâmica é realizado como uma extensão da estabilidade transitória, portanto é resolvido no domínio do tempo, em que efeitos de pequenas constantes de tempo são ignoradas.

Os modelos dinâmicos para a análise no domínio do tempo são na forma de um sistema de equações algébrico-diferenciais (EADs), descritas a seguir:

$$px = f(x, y, u) \quad (2.110)$$

$$g = f(x, y) \quad (2.111)$$

Em que:

x Variáveis de estado

y Variáveis de algébricas

u Variáveis de entrada

p Indicador do operador diferencial d/dt

As variáveis de entrada são inseridas pelo usuário e permanecem constantes durante todo o processo de cálculo. Para o problema de estabilidade, as variáveis algébricas iniciais

correspondem às tensões e ângulos das barras calculadas no fluxo de carga. As variáveis de estado iniciais são estimadas após a convergência do fluxo de potência.

2.5.1 Máquinas síncronas

As máquinas síncronas são importantes objetos de estudo em estabilidade transitória, uma vez que geradores síncronos são a principal fonte de energia elétrica em sistemas de potência, além da presença de compensadores síncronos (motores síncronos a vazio) para compensação de reativos e controle de tensão [12].

Máquinas síncronas são normalmente construídas com três enrolamentos no estator e um enrolamento de excitação (conhecido como enrolamento de campo). Além disso, o rotor dessa máquina possui caminhos em que correntes podem circular durante o transitório. Esses caminhos podem estar intencionalmente presentes, como por exemplo, enrolamentos amortecedores; ou são intrínsecas desses elementos, como correntes induzidas no corpo do rotor sólido de turbogeradores [63].

No desenvolvimento de técnicas para análises da máquina síncrona, foi reconhecido que é obtida uma grande simplificação se for considerado um eixo de referência girante juntamente com o rotor [63]. Essa metodologia é amplamente empregada nas publicações que envolvem estudos de estabilidade transitória: [1], [8] a [13], [63] e [64], e consiste na aplicação da transformada de Park [9], ou $d-q-0$. Tal operação transforma as tensões e correntes da armadura em duas variáveis ortogonais: uma alinhada com o eixo magnético do enrolamento de campo, chamada de eixo direto (d); e outra a 90 graus elétricos do eixo magnético do enrolamento de campo, chamado de eixo em quadratura (q). A simplificação dessa metodologia está associada principalmente a duas de suas características [63]:

- No regime permanente, todas as correntes, fluxos magnéticos (incluindo aqueles gerados nos enrolamentos do rotor) e os enrolamentos transformados da armadura, possuem valores constantes;
- Devido à ortogonalidade da transformada, fluxos produzidos por correntes em um eixo não produzem fluxo mútuo no outro eixo. Isso simplifica muito a relação fluxo-corrente do modelo, em que sua estrutura se dá por dois circuitos independentes, um para o eixo direto e outro para o eixo em quadratura.

A transformação entre os eixos de referência $a-b-c$ e $d-q-0$ é obtida pelas equações (2.112) e (2.113):

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.112)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (2.113)$$

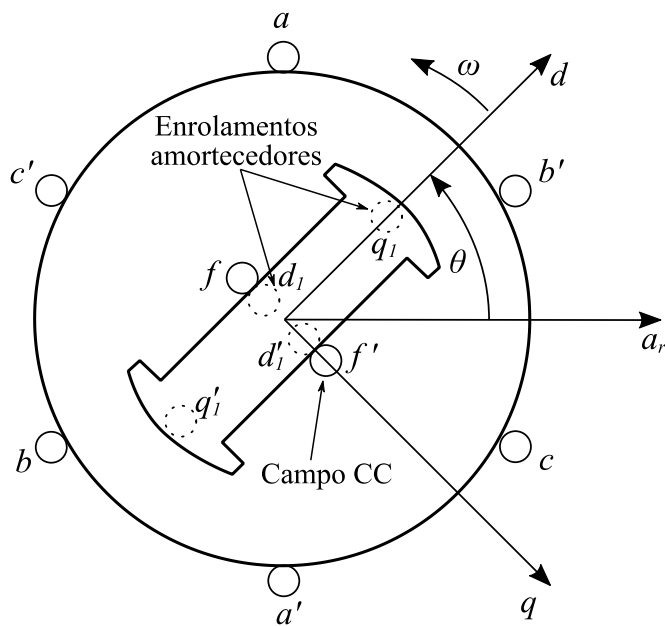
Em que:

f Variável em estudo (corrente ou tensão)

θ Ângulo entre o eixo direto (d) e o eixo da fase a (a_r), ver Figura 2.16

O diagrama da máquina síncrona considerada nesse trabalho é apresentado na Figura 2.16. Essa máquina possui polos salientes com um enrolamento de campo (ff') e os enrolamentos trifásicos do estator (aa' , bb' e cc'). Os efeitos do enrolamento amortecedor são modelados como dois enrolamentos concentrados de eixo direto (d_1d_1') e eixo em quadratura (q_1q_1').

Figura 2.16 – Diagrama esquemático da máquina síncrona



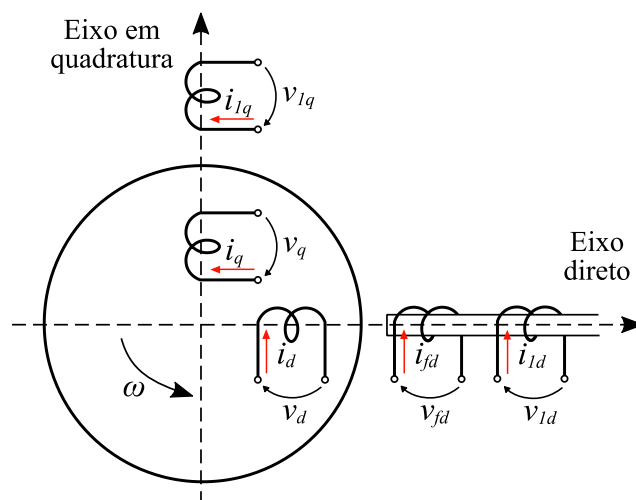
Fonte: Adaptado de MILANO, F. [1].

As equações da tensão dos enrolamentos da máquina síncrona são obtidas por meio da aplicação da transformada de Park, utilizando a equação (2.112). Para tal, algumas premissas devem ser adotadas:

1. Todas as indutâncias são independentes da corrente;
2. Todas as indutâncias próprias e mútuas podem ser representadas como constantes adicionado a uma variação senoidal do ângulo do rotor, ou seja, não há presença de harmônicos espaciais [65];
3. Enrolamentos distribuídos podem ser representados como concentrados [65];
4. Não são considerados os efeitos causados por histerese e correntes de Foucault.

Na operação em sistemas balanceados, os valores zero da transformada (i_0 e v_0) possuem valores nulos [65]. Tal modelo permite que a máquina síncrona representada pela Figura 2.16 possa ser substituída pela Figura 2.17 [65][66]:

Figura 2.17 – Representação da máquina síncrona com cinco enrolamentos



Fonte: Adaptado de GUIMARÃES, G. C. [66].

O modelo da Figura 2.17 possui cinco enrolamentos, o qual inclui um enrolamento amortecedor em cada eixo. Esse modelo se mostra preciso para a maioria dos problemas de estabilidade transitória [65][66]. O número de enrolamentos amortecedores pode ser incrementado para uma maior precisão no resultado, cujos procedimentos de cálculo para obtenção dos parâmetros da máquina são semelhantes aos quais serão apresentados na sequência, apesar de mais complexos.

Aplicando a transformada de Park para obter a relação das tensões e correntes assinaladas na Figura 2.17, assumindo indutância mútua entre o campo, enrolamento amortecedor e armadura iguais, tem-se [10][65]:

$$\begin{bmatrix}
 r_a + (l_l + l_{md})p & (l_l + l_{mq})\omega & l_{md}p & l_{md}p & l_{mq}\omega \\
 -(l_l + l_{md})\omega & r_a + (l_l + l_{mq})p & -l_{md}\omega & -l_{md}\omega & -l_{mq}p \\
 l_{md}p & 0 & r_{fd} + (l_{fd} + l_{md})p & l_{md}p & 0 \\
 l_{md}p & 0 & l_{md}p & r_{1d} + (l_{1d} + l_{md})p & 0 \\
 0 & l_{md}p & 0 & 0 & r_{1q} + (l_{1q} + l_{mq})p
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 v_d \\
 v_q \\
 v_{fd} \\
 v_{1d} = 0 \\
 v_{1q} = 0
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 i_d \\
 i_q \\
 i_{fd} \\
 i_{1d} \\
 i_{1q}
 \end{bmatrix}
 \quad (2.114)$$

Em que:

- r_a, r_{fd}, r_{1d} e r_{1q} Resistências de armadura, de campo, amortecedor de eixo direto e amortecedor de eixo em quadratura, respectivamente
- l_l, l_{fd}, l_{1d} e l_{1q} Indutâncias de dispersão de armadura, de campo, amortecedor de eixo direto e amortecedor de eixo em quadratura, respectivamente
- l_{md} Indutância mútua de eixo direto entre os enrolamentos de campo, amortecedor e armadura
- l_{mq} Indutância mútua de eixo em quadratura entre os enrolamentos amortecedor e armadura
- ω Velocidade, originada da derivada de θ ($\omega = p\theta$)

A definição de fluxo concatenado (ψ) é dada por:

$$\psi = l \cdot i \quad (2.115)$$

Partindo de (2.115), o fluxo concatenado pelos enrolamentos de armadura da Figura 2.17, podem ser definido pela seguinte equação:

$$\psi_d = (l_l + l_{md})i_d + l_{md}i_{fd} + l_{md}i_{1d} \quad (2.116)$$

$$\psi_q = (l_l + l_{mq})i_q + l_{md}i_{1q} \quad (2.117)$$

Aplicando o operador diferencial p nas equações (2.116) e (2.117) e utilizando as equações das tensões nos enrolamentos de campo e amortecedores (2.114):

$$p\psi_d = (l_l + l_{md})pi_d + l_{md}pi_{fd} + l_{md}pi_{1d} \quad (2.118)$$

$$v_{fd} = [r_{fd} + (l_{fd} + l_{md})p]i_{fd} + l_{md}pi_d + l_{md}pi_{1d} \quad (2.119)$$

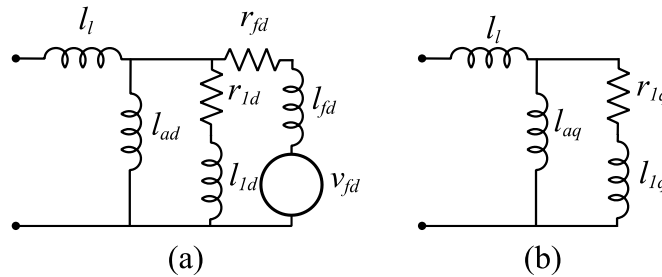
$$0 = [r_{1d} + (l_{1d} + l_{md})p]i_{1d} + l_{md}pi_d + l_{md}pi_{fd} \quad (2.120)$$

$$p\psi_q = (l_l + l_{mq})pi_q + l_{md}pi_{1q} \quad (2.121)$$

$$0 = [r_{1q} + (l_{1q} + l_{md})p]i_{1q} + l_{md}pi_q \quad (2.122)$$

As equações de (2.118) a (2.122) podem ser representadas pelo circuito equivalente da Figura 2.18:

Figura 2.18 – Circuito equivalente da máquina síncrona: (a) Eixo direto; (b) Eixo em quadratura

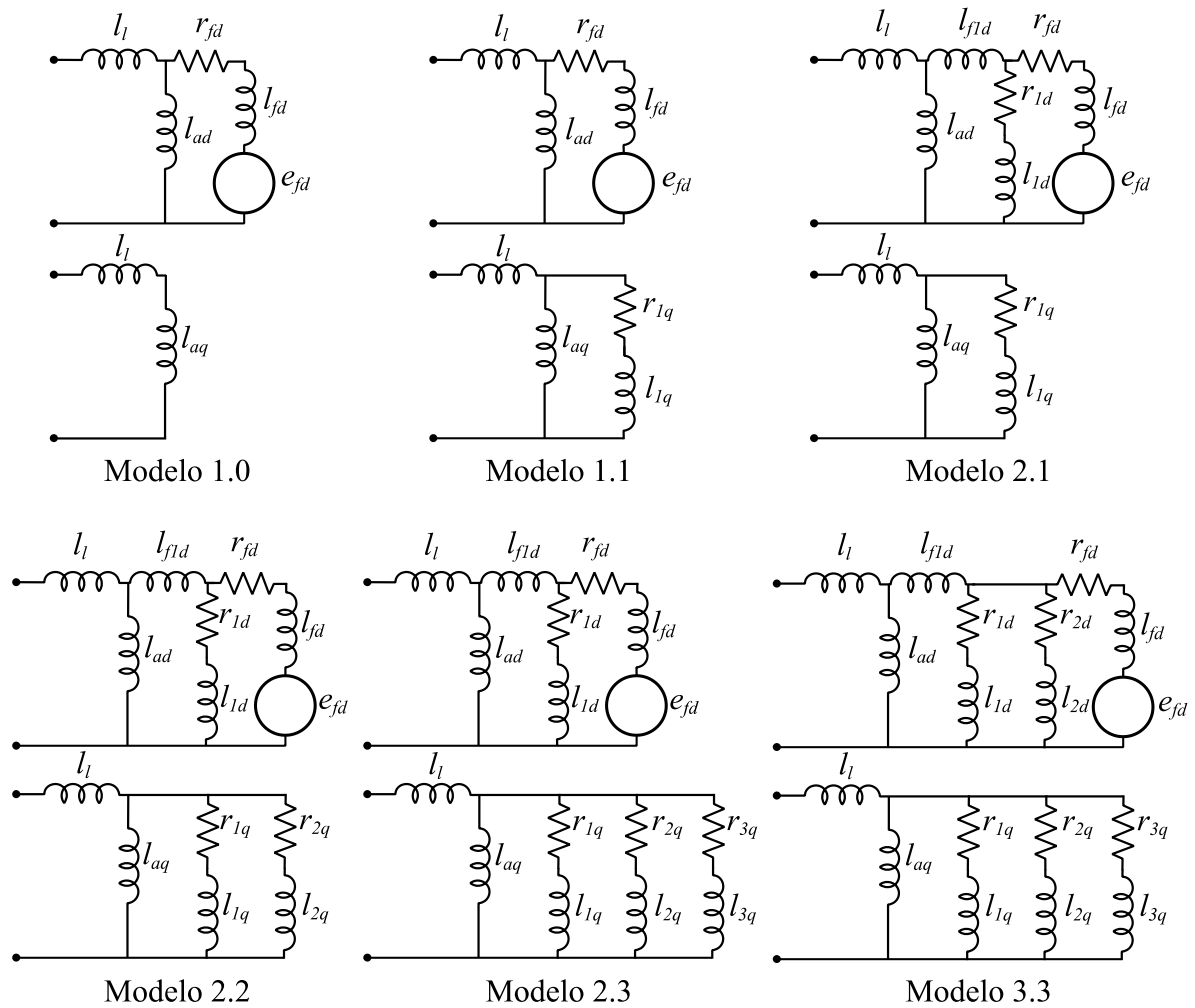


Fonte: Adaptado de ADKINS, B.; HARLEY R. G. [65].

A título de ilustração, a Figura 2.19 aponta os modelos mais comumente utilizados e categorizados pelo IEEE Std. 1110-2002 [63], os quais são evidenciados os dois circuitos independentes de eixo direto e quadratura. A numeração dos modelos é apresentada na forma “Modelo N.M”, em que “N” representa o número de enrolamentos equivalentes do rotor de eixo direto e “M” é o número de enrolamentos equivalentes do rotor de eixo em quadratura.

O modelo da Figura 2.18 é semelhante ao Modelo 2.1, com exceção de l_{f1d} , a qual reflete a diferença de acoplamento mútuo entre a armadura, o campo e o enrolamento amortecedor. A omissão dessa variável leva a erros consideráveis no cálculo da corrente do campo, porém traz bons resultados nas correntes da armadura [65]. A inclusão de tal variável é apresentada na seção 2.5.1.2.

Figura 2.19 – Modelos de máquinas síncronas de diferentes complexidades



Fonte: Adaptado de IEEE Std 1110 - 2002 [63].

2.5.1.1 Modelos subtransitório e transitório

As variáveis das máquinas síncronas apresentadas até então são chamadas parâmetros básicos ou fundamentais e, apesar de definirem corretamente as características elétricas da máquina, eles não podem ser determinados diretamente por medições de suas respostas [12]. Portanto, a relação de valores observados em testes adequados (definidos em IEEE Std. 115-2009 [67]), denominados parâmetros padrões [12], com os parâmetros fundamentais é necessária.

Os parâmetros da máquina síncrona que influenciam rapidamente no decaimento de valores são chamados **subtransitórios**, aqueles que influenciam lentamente são chamados **transitórios** e, finalmente, aqueles que influenciam continuamente são chamados de parâmetros **síncronos**.

Para obtenção desses parâmetros no eixo direto utiliza-se a transformada de Laplace nas equações (2.118) a (2.120). Em vários problemas as correntes de campo e enrolamentos amortecedores não são necessárias e podem ser eliminadas utilizando essa transformada [65]. Com isso, obtém-se a relação entre ψ_d , i_d e v_{fd} (no domínio da frequência, representadas por seus símbolos em letra maiúscula) na forma da equação (2.123), como definido em [65].

$$\Psi_d = \frac{x_d(p)}{\Omega_b} I_d + \frac{g(p)}{\Omega_b} V_{fd} \quad (2.123)$$

O fator Ω_b (velocidade ou frequência base, em rad/s, 376,99rad/s para 60Hz) foi inserido na equação (2.123) para dar $x_d(p)$ a dimensão de impedância, o qual é denominado impedância operacional de eixo direto [66].

A impedância operacional de eixo em quadratura ($x_q(p)$) é obtida da mesma forma após a eliminação da corrente do enrolamento amortecedor em quadratura das equações (2.121) e (2.122), relacionando ψ_q e i_q transformadas no domínio da frequência:

$$\Psi_q = \frac{x_q(p)}{\Omega_b} I_q \quad (2.124)$$

Os valores operacionais $x_d(p)$, $g(p)$ e $x_q(p)$ podem ser calculados utilizando as seguintes expressões aproximadas [65]:

$$x_d(p) = \frac{(1 + T'_d p)(1 + T''_d p)}{(1 + T'_{d0} p)(1 + T''_{d0} p)} x_d \quad (2.125)$$

$$g(p) = \frac{1 + T_{1d} p}{(1 + T'_{d0} p)(1 + T''_{d0} p)} \quad (2.126)$$

$$x_q(p) = \frac{1 + T''_q p}{1 + T''_{q0} p} x_d \quad (2.127)$$

$$x_d = \Omega_b (l_l + l_{md}) = \Omega_b l_d \quad (2.128)$$

$$x_q = \Omega_b (l_l + l_{mq}) = \Omega_b l_q \quad (2.129)$$

Em que:

x_d e x_q Reatâncias síncronas de eixo direto e em quadratura, respectivamente

T'_d e T''_d Constantes de tempo de curto-circuito de eixo direto transitória e subtransitória, respectivamente

- T'_{d0} e T''_{d0} Constantes de tempo de circuito aberto de eixo direto transitória e subtransitória, respectivamente
- T''_q e T''_{q0} Constantes de tempo de curto-circuito e circuito aberto de eixo em quadratura subtransitória, respectivamente
- T_{1d} Constante de tempo de dispersão do amortecedor de eixo direto

Novos parâmetros podem ser definidos utilizando as expressões das impedâncias operacionais, uma vez que o operador p é zero em regime permanente e durante rápidos transitórios tende ao infinito. Portanto, novas reatâncias podem ser definidas para cada uma das seguintes condições [12][65][66]:

1. Durante transitórios rápidos quando o efeito dos enrolamentos amortecedores é dominante:

$$x_d(p) = x''_d = \frac{T'_d T''_d}{T'_{d0} T''_{d0}} x_d = x_l + \frac{x_{md} x_{fd} x_{1d}}{x_{md} x_{fd} + x_{md} x_{1d} + x_{fd} x_{1d}} \quad (2.130)$$

$$x_q(p) = x''_q = \frac{T''_q}{T''_{q0}} x_q = x_l + \frac{x_{mq} x_{1q}}{x_{mq} + x_{1q}} \quad (2.131)$$

Em que:

- x''_d e x''_q Reatâncias subtransitórias de eixo direto e em quadratura

2. Durante transitórios rápidos quando o efeito dos enrolamentos amortecedores é dominante e os enrolamentos de campo são dominantes:

$$x_d(p) = x'_d = \frac{T'_d}{T'_{d0}} x_d = x_l + \frac{x_{md} x_{fd}}{x_{md} + x_{fd}} \quad (2.132)$$

$$x_q(p) = x'_q = x_q \quad (2.133)$$

Em que:

- x'_d e x'_q Reatâncias transitórias de eixo direto e em quadratura

3. Durante o regime permanente (sem transitórios e $p = 0$):

$$x_d(p) = x_d \quad (2.134)$$

$$x_q(p) = x_q \quad (2.135)$$

Os valores das constantes de tempo em relação aos parâmetros fundamentais, originados da transformação de Laplace das equações (2.118) a (2.122), são definidos a seguir [66]:

$$T'_{d0} = \frac{1}{\Omega_b r_{fd}} (x_{fd} + x_{md}) \quad (2.136)$$

$$T'_d = \frac{1}{\Omega_b r_{fd}} \left(x_{fd} + \frac{x_l x_{md}}{x_l + x_{md}} \right) \quad (2.137)$$

$$T''_{d0} = \frac{1}{\Omega_b r_{1d}} \left(x_{1d} + \frac{x_{fd} x_{md}}{x_{fd} + x_{md}} \right) \quad (2.138)$$

$$T''_d = \frac{1}{\Omega_b r_{1d}} \left(x_{1d} + \frac{x_l x_{fd} x_{md}}{x_l x_{fd} + x_l x_{md} + x_{fd} x_{md}} \right) \quad (2.139)$$

$$T''_{q0} = \frac{1}{\Omega_b r_{1q}} (x_{1q} + x_{mq}) \quad (2.140)$$

$$T''_q = \frac{1}{\Omega_b r_{1d}} \left(x_{1q} + \frac{x_{fd} x_{md}}{x_{fd} + x_{md}} \right) \quad (2.141)$$

$$T_{1d} = \frac{1}{\Omega_b r_{1d}} x_{1q} \quad (2.142)$$

As novas tensões produzidas pelos fluxos concatenados devem ser definidas usando os novos parâmetros da máquina (x_d , x'_d , x''_d , x_q , x'_q e x''_q). Infelizmente não se observa na literatura um consenso nas funções transferência que relacionam os fluxos do estator com as correntes e a tensão de campo [1]. Em [1] são apontados três distintos conjuntos de equações algébrico-diferenciais que descrevem esse comportamento da máquina síncrona: modelo de Sauer-Pai [11], modelo de Marconato[68] e modelo de Anderson-Fouad [10][8][66]. Nesse trabalho foi utilizado o modelo de Anderson-Fouad por ser bem estabelecido na literatura [1][8][10][13][66] e bastante empregado em programas de estabilidade transitória [1][23][30][43][49], além de possuir um menor número de dados de entrada. Na sequência são apresentadas as equações algébrico-diferenciais de tal modelo.

Para o regime permanente, estado o qual são calculadas as condições iniciais das variáveis internas impostas pelo resultado do fluxo de carga, representam-se as máquinas somente por um conjunto de equações algébricas:

$$E_i - V_q = r_a I_q - x_d I_d \quad (2.143)$$

$$-V_d = r_a I_d - x_q I_q \quad (2.144)$$

Em que:

E_i Tensão interna (ou de circuito aberto) da máquina síncrona

V_q e V_d Tensão terminal de eixo em quadratura e direto, respectivamente

A tensão interna do gerador em regime permanente, desconsiderando o efeito da saturação magnética, é proporcional à tensão aplicada ao campo do rotor (V_{fd}). Como as variáveis tratadas nesse trabalho são consideradas normalizadas no sistema por unidade (p.u.), considera-se, neste caso, que $V_{fd0} = E_i$.

As máquinas síncronas de polos salientes são aqui consideradas, uma vez que máquinas com polos lisos podem ser representados como sua reatância síncrona de eixo direto igual ou muito próxima à reatância de eixo em quadratura por efeito de sua simetria no rotor cilíndrico, ou seja $x_d = x_q$ [8]. Isso torna a máquina de polos lisos um caso específico do modelo das máquinas de polos salientes.

Devido à “inércia” na alteração dos fluxos concatenados, as mudanças que ocorrem nos terminais da máquina não propagam instantaneamente no modelo. Portanto é necessário criar tensões fictícias E'_d e E'_q , as quais representam os fluxos concatenados nos enrolamentos do rotor [8]. Essas tensões transitórias são representadas atrás das reatâncias transitórias [1][8][10], pelas seguintes equações algébricas:

$$E'_q - V_q = r_a I_q - x'_d I_d \quad (2.145)$$

$$E'_d - V_d = r_a I_d - x'_q I_q \quad (2.146)$$

As mudanças no fluxo concatenado entre o estator e rotor devido ao seu decaimento ou mudança na tensão no enrolamento de campo são refletidas pelas seguintes equações diferenciais:

$$pE'_q = \frac{V_{fd} - E_q}{T'_{d0}} = \frac{V_{fd} + (x_d - x'_d)I_d - E'_q}{T'_{d0}} \quad (2.147)$$

$$pE'_d = -\frac{E_d}{T'_{q0}} = \frac{-(x_q - x'_q)I_q - E'_d}{T'_{q0}} \quad (2.148)$$

Quando são representados os enrolamentos amortecedores ou outros circuitos no rotor, um modelo mais exato se faz necessário. Para isso são consideradas tensões subtransitórias de eixo direto e em quadratura (E''_d e E''_q), calculadas pelo seguinte sistema de EAD:

$$E_q'' - V_q = r_a I_q - x_d'' I_d \quad (2.149)$$

$$E_d'' - V_d = r_a I_d - x_q'' I_q \quad (2.150)$$

$$pE_q'' = \frac{E_q' + (x_d' - x_d'')I_d - E_q''}{T_{d0}''} \quad (2.151)$$

$$pE_d'' = \frac{E_d' + (x_q' - x_q'')I_q - E_d''}{T_{q0}''} \quad (2.152)$$

Nota-se pelas equações algébricas (2.145), (2.146), (2.149) e (2.150) que os transitórios eletromagnéticos do estator são desconsiderados. Isso se deve ao fato desse fenômeno ser relativamente rápido comparado a um problema de estabilidade transitória, cujas constantes de tempo envolvidas na resposta transitória do estator para sistemas de 50Hz e 60Hz estão na faixa de 10^{-3} s [1]. Outra aproximação observada nessas equações é que a velocidade do rotor é suficientemente próxima de 1,0 p.u. ($\omega \approx 1,0$) e pode ser considerada constante [8]. Tal aproximação também leva uma simplificação no cálculo da potência elétrica (P_e), a qual será utilizada nas equações mecânicas da máquina, apresentadas na seção 2.5.1.4:

$$T_e = P_e = I_d V_d + I_q V_q + (I_d^2 + I_q^2) r_a \quad (2.153)$$

Essa formulação em sua configuração completa se mostra adequada para representação do Modelo 2.2, apresentado na Figura 2.19, com quatro enrolamentos no rotor [8]. Em [69] é apontado que, para sistemas multimáquinas, a utilização de dados padrão em modelos mais complexos não levam necessariamente a resultados mais precisos, contudo modificações adequadas nos parâmetros do modelo com quatro enrolamentos rotóricos podem gerar melhores resultados.

2.5.1.2 Inclusão de efeitos de acoplamentos mútuos diferentes

Em [12] e [65] é proposta uma modificação do circuito equivalente, em que é inserido o parâmetro l_{f1d} , chamado de indutância de “dispersão diferencial” [63]. A presença de tal parâmetro no circuito é necessária devido ao fato da indutância mútua entre os enrolamentos de campo e armadura serem diferentes daquela entre o campo e o amortecedor.

Uma vez que essa adequação é realizada apenas no eixo direto, somente as equações (2.118) a (2.120) serão alteradas, as quais ficarão na seguinte forma:

$$p\psi_d = (l_l + l_{md})pi_d + l_{md}pi_{fd} + l_{md}pi_{1d} \quad (2.154)$$

$$v_{fd} = [r_{fd} + (l_{fd} + l_{md} + l_{f1d})p]i_{fd} + l_{md}pi_d + (l_{md} + l_{f1d})pi_{1d} \quad (2.155)$$

$$0 = [r_{1d} + (l_{1d} + l_{md} + l_{f1d})p]i_{1d} + l_{md}pi_d + (l_{md} + l_{f1d})pi_{fd} \quad (2.156)$$

Com isso, o circuito equivalente se torna idêntico ao Modelo 2.1 do IEEE Std. 1110-2002 [63], apresentado na Figura 2.19. Os parâmetros transitórios e subtransitórios de eixo direto (já na forma de impedâncias) são agora calculados pelas seguintes expressões [65]:

$$x_d = x_l + x_{md} \quad (2.157)$$

$$x'_d = x_l + \frac{x_{md}(x_{fd} + x_{f1d})}{x_{md} + x_{fd} + x_{f1d}} \quad (2.158)$$

$$x''_d = x_l + \frac{x_{md}x_{fd}x_{1d} + x_{md}x_{f1d}x_{1d} + x_{md}x_{fd}x_{f1d}}{x_{md}x_{fd} + x_{md}x_{1d} + x_{fd}x_{1d} + x_{fd}x_{f1d} + x_{1d}x_{f1d}} \quad (2.159)$$

$$T'_d = \frac{1}{\Omega_b r_{fd}} \left(x_{fd} + x_{f1d} + \frac{x_l x_{md}}{x_l + x_{md}} \right) \quad (2.160)$$

$$T''_d = \frac{1}{\Omega_b r_{1d}} \left(x_{1d} + \frac{x_l x_{fd} x_{md} + x_l x_{f1d} x_{md} + x_l x_{fd} x_{f1d}}{x_l x_{fd} + x_l x_{md} + x_{fd} x_{md} + x_{f1d} x_{md} + x_{f1d} x_l} \right) \quad (2.161)$$

$$T'_{d0} = \frac{1}{\Omega_b r_{fd}} (x_{fd} + x_{md} + x_{f1d}) \quad (2.162)$$

$$T''_{d0} = \frac{1}{\Omega_b r_{1d}} \left(x_{1d} + \frac{x_{fd}(x_{md} + x_{f1d})}{x_{f1d} + x_{fd} + x_{md}} \right) \quad (2.163)$$

Para turbogeradores l_{f1d} é geralmente positivo, enquanto em máquinas de polos salientes esse valor é negativo. Isso se deve ao fato das diferenças físicas de acoplamento entre o enrolamento de campo e os circuitos do corpo do rotor em turbogeradores comparados aos hidrogeradores [63].

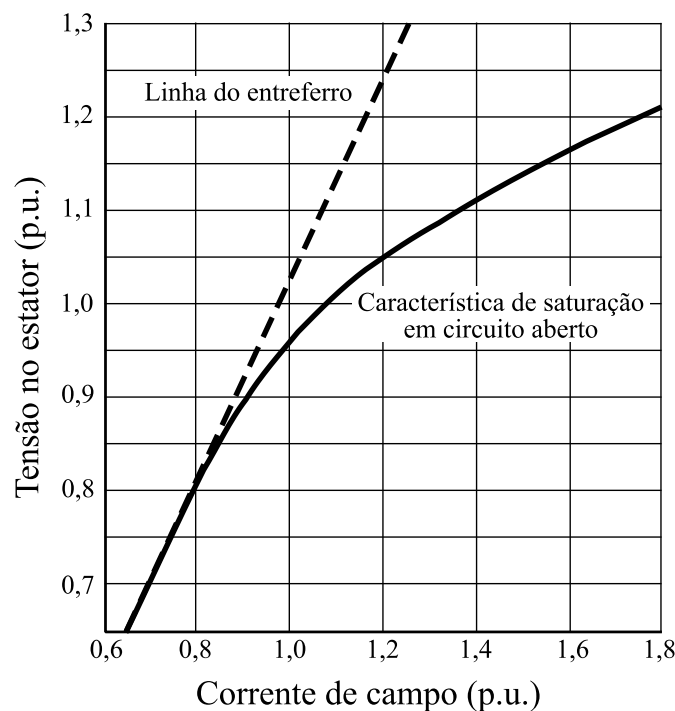
Nota-se que as indutâncias mútuas entre a armadura ao campo e ao enrolamento amortecedor possuem o mesmo valor (l_{md}). Caso esses acoplamentos fossem considerados diferentes na modelagem, a aquisição dos dados para seu cálculo seria obtida pelo oscilograma da corrente no enrolamento amortecedor, porém tal medição não é possível na prática. Entretanto, o erro obtido assumindo essas indutâncias mútuas de mesmo valor é originado principalmente na corrente do enrolamento amortecedor, a qual não é uma variável tão importante e, portanto, a premissa é razoável [65].

2.5.1.3 Saturação

A relação entre a força magneto-motriz (f.m.m.) da excitação da máquina síncrona e o fluxo gerado não é linear, causada pela saturação magnética. A Figura 2.20 apresenta uma curva de saturação típica de uma máquina síncrona com seus terminais em aberto. Essa característica não foi levada em consideração nas formulações das máquinas apresentadas nas seções anteriores.

Para representar matematicamente o efeito da saturação nas equações das máquinas síncronas são introduzidos “fatores de saturação” que modificam as impedâncias do circuito equivalente, os quais dependem, no contexto desse trabalho, de uma reatância de dispersão efetiva, chamada de reatância de Potier (x_p). Tal reatância pode ser obtida por meio de ensaios (utilizando curvas de saturação de circuito aberto e carga de fator de potência zero [64]) ou estimadas de forma aproximada por outros parâmetros da máquina [8][66]. A reatância de dispersão (x_l), aqui substituída de forma aproximada por x_p , representa a parcela da reatância da máquina originados do fluxo magnético que percorrem o ar na maioria de seu caminho e, portanto, é independente da saturação [12].

Figura 2.20 – Curva típica de saturação em circuito aberto para um gerador de 2,4 MVA



Fonte: Adaptado de IEEE Std. 1110 - 2009 [67].

Em [67] são apresentadas três distintas representações: uso de um único fator de saturação (ou incremento) no eixo direto (s_d); uso de dois fatores de saturação, sendo um no eixo direto (s_d) e outro no eixo em quadratura (s_q); e a representação do fenômeno da magnetização cruzada, que considera um acoplamento entre os dois fatores de saturação de eixo direto e em quadratura. Nesse trabalho utilizou-se o segundo método, visto que não são encontradas divergências na representação ou não da magnetização cruzada em grandes geradores [67].

O método implementado no programa, descrito em [8] e em [67], permite reproduzir a saturação em ambos os eixos, diferindo entre si devido à divergência no tamanho do entreferro. É assumido que a soma vetorial das duas componentes do fluxo magnético saturado está em fase com a f.m.m. e proporcional à Tensão de Potier (E_p , a qual é a tensão atrás da reatância de Potier) [8]. Portanto as reatâncias saturadas, que devem ser inseridas nas equações algébricas da máquina, são definidas pelas seguintes equações:

$$x_{ds} = \frac{x_d - x_p}{s_d} + x_p \quad (2.164)$$

$$x_{qs} = \frac{x_q - x_p}{s_q} + x_p \quad (2.165)$$

As equações (2.164) e (2.165) também são utilizadas para as reatâncias transitórias e subtransitórias, visto que o valor da reatância de Potier (ou de dispersão) não são alteradas. Com isso, as equações (2.145) a (2.152) com a inclusão do efeito da saturação, ficarão na seguinte forma:

$$E'_q - V_q = r_a I_q - x'_{ds} I_d \quad (2.166)$$

$$E'_d - V_d = r_a I_d - x'_{qs} I_q \quad (2.167)$$

$$E''_q - V_q = r_a I_q - x''_{ds} I_d \quad (2.168)$$

$$E''_d - V_d = r_a I_d - x''_{qs} I_q \quad (2.169)$$

$$pE'_q = \frac{V_{fd} + (x_d - x'_d) I_d - s_d E'_q}{T'_{d0}} \quad (2.170)$$

$$pE'_d = \frac{-(x_q - x'_q) I_q - s_q E'_d}{T'_{q0}} \quad (2.171)$$

$$pE''_q = \frac{s_d E'_q + (x'_d - x''_d) I_d - s_d E''_q}{T''_{d0}} \quad (2.172)$$

$$pE''_d = \frac{s_q E'_d - (x'_q - x''_q) I_q - s_q E''_d}{T''_{q0}} \quad (2.173)$$

O valor de s_d é obtido de uma curva de saturação semelhante àquela apresentada na Figura 2.20, da seguinte forma:

$$s_d = \frac{I_{fd}}{I_{fd0}} \quad (2.174)$$

Em que:

I_{fd} É a corrente de campo dada pela curva de saturação

I_{fd0} É a corrente de campo fictícia dada pela linha de entreferro

Nesse sentido vários métodos de representar tal curva em um programa de estabilidade transitórias são descrita na literatura. Em [1] e [12] é apresentada a função de saturação de Piece-Wise, a qual separa a curva em três segmentos: uma primeira parte sem saturação, seguido de um segmento não linear e finalmente um segmento completamente saturado e linear. Já em [8] a representação da curva é feita por meio de uma função polinomial de alto grau (normalmente 7 ou 9), uma vez que em um sistema multimáquinas, onde as máquinas são representadas no máximo por seus parâmetros subtransitórios e utiliza-se a aproximação pela reatância de Potier, uma representação mais elaborada da curva de saturação não se justifica. Nesse trabalho utilizou-se essa última abordagem.

Portanto, a curva de saturação implementada no programa desenvolvido está na seguinte forma:

$$I_{fd} = E_p + C \times E_p^7 \quad (2.175)$$

Essa abordagem permite definir a curva de saturação utilizando somente um ponto da curva. A constante C , na implementação realizada, é determinada pela razão entre a corrente de campo que resulta em uma tensão com o valor de 1,2 p.u. obtida da curva de saturação em circuito aberto e a linha de entreferro. Pelas equações (2.174) e (2.175) é obtido o valor do fator de saturação para a curva apresentada:

$$s_d = 1 + C \times E_{pq}^6 \quad (2.176)$$

Uma vez que a saturação no eixo em quadratura é obtida pela diferença na saliência da máquina, tem-se:

$$C_q = \frac{x_q}{x_d} C \quad (2.177)$$

$$s_q = 1 + C_q \times E_{pd}^6 \quad (2.178)$$

Finalmente, as tensões de Potier em cada eixo são obtidas pelas seguintes expressões:

$$E_{pq} = V_q + r_a I_q - x_p I_d \quad (2.179)$$

$$E_{pd} = V_d + r_a I_d + x_p I_q \quad (2.180)$$

Os fatores de saturação em um programa de estabilidade transitória devem ser calculados em cada instante de tempo e tal processo é realizado de forma iterativa. A grande vantagem da representação da curva de saturação em uma forma polinomial é a possibilidade de calcular esses fatores por meio de um método numérico para acelerar a obtenção do resultado, como, por exemplo, o método de Newton, cuja solução normalmente é encontrada em uma ou duas iterações [8].

2.5.1.4 Equações mecânicas

As equações mecânicas ou equações de oscilação das máquinas síncronas são bem estabelecidas na literatura [1][8][10][11][12][64][65] e são definidas por duas equações diferenciais:

$$p\omega = \frac{\omega_r}{2H} (P_m - P_e - D_a(\omega - \omega_r)) \quad (2.181)$$

$$p\delta = \Omega_b(\omega - \omega_r) \quad (2.182)$$

Em que:

ω Velocidade da máquina, em rad/s

H Constante de inércia, em segundos

P_m Potência mecânica, em p.u., suprida pela máquina primária ou absorvida pela carga mecânica

P_e Potência elétrica, em p.u.

D_a Fator de amortecimento, em p.u.

ω_r Velocidade de referência da máquina, em p.u.

δ Ângulo do rotor em relação a um eixo de rotação de referência, em radianos

Na equação (2.181) assumiu-se que a velocidade da máquina não varia muito ($\omega \approx 1,0 p.u.$) e, portanto, o torque mecânico e elétrico são iguais às potências mecânicas e elétricas, respectivamente.

O fator de amortecimento (D_a) é introduzido na equação (2.181) para representar as correntes de Foucault induzidas no ferro do rotor e efeitos dos enrolamentos amortecedores (caso os efeitos subtransitórios dos enrolamentos amortecedores tenham sido desprezados), os quais se opõem às variações de velocidade da máquina.

Normalmente utiliza-se a velocidade de referência como sendo a síncrona e portanto, nesse caso, $\omega_r = \Omega_b = 1,0 p.u.$ Essa abordagem, adotada por vários livros de estabilidade [7][8][10][12][65], considera como referência uma máquina fictícia girando sempre na velocidade síncrona independente das perturbações aplicadas no sistema. Em [1] é apresentado o conceito de centro de inércia (COI, do inglês, *Center of Inertia*), que constitui uma soma ponderada das velocidades das máquinas presentes no sistema:

$$\omega_r = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (2.183)$$

Em que:

n É o número de máquinas síncronas conectadas no sistema

A aplicação do COI resulta em dados de saída, como o ângulo do rotor, mais fáceis de serem analisados. Na implementação realizada no programa a utilização ou não desse recurso é opcional e pode ser definida pelo usuário.

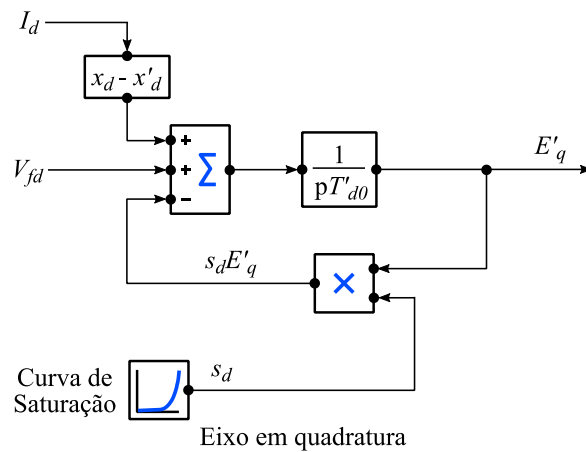
2.5.1.5 Modelos das máquinas síncronas

Utilizando as equações transitórias e subtransitórias apresentadas nas seções anteriores podem-se definir cinco modelos de distintas complexidades. O modelo é selecionado automaticamente de acordo com os dados fornecidos ao programa. Na sequência são apresentados tais modelos, incluídos os efeitos da saturação magnética, em conjunto com seus diagramas de blocos:

Modelo 1: Corresponde a uma tensão constante atrás de uma reatância transitória de eixo direto (x'_d), não exigindo equações diferenciais, portanto não são apresentados diagramas de bloco. São utilizadas somente as equações algébricas (2.166) e (2.167);

Modelo 2: São representados os efeitos transitórios de eixo direto, sendo necessária a solução de uma equação diferencial (pE'_q), cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 2.21. São utilizadas as equações (2.166), (2.167) e (2.170);

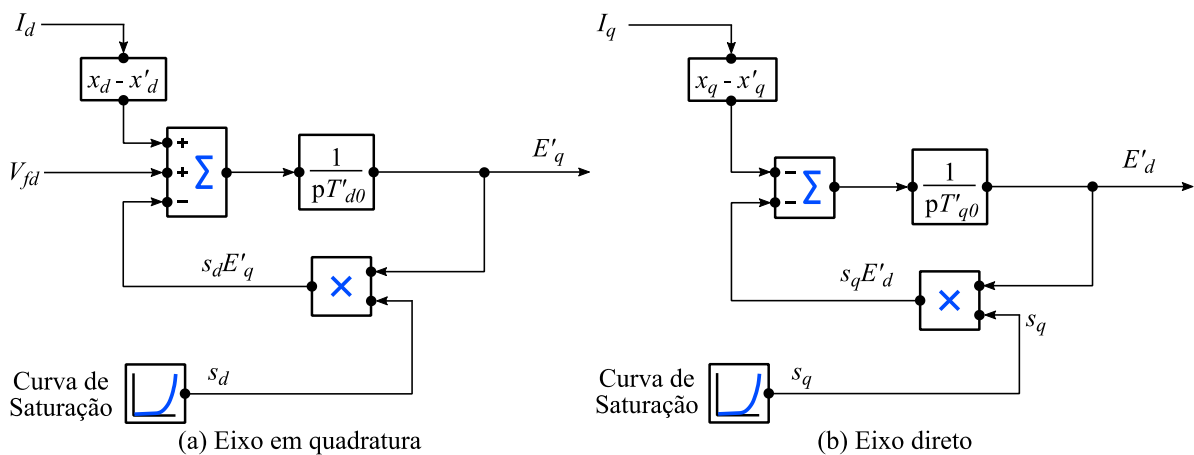
Figura 2.21 – Diagrama de blocos do Modelo 2 das máquinas síncronas



Fonte: Autoria própria.

Modelo 3: São representados os efeitos transitórios de eixo direto e em quadratura, exigindo duas equações diferenciais (pE'_q e pE'_d), cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 2.22. São usadas as equações (2.166), (2.167), (2.170) e (2.171);

Figura 2.22 – Diagrama de blocos do Modelo 3 das máquinas síncronas

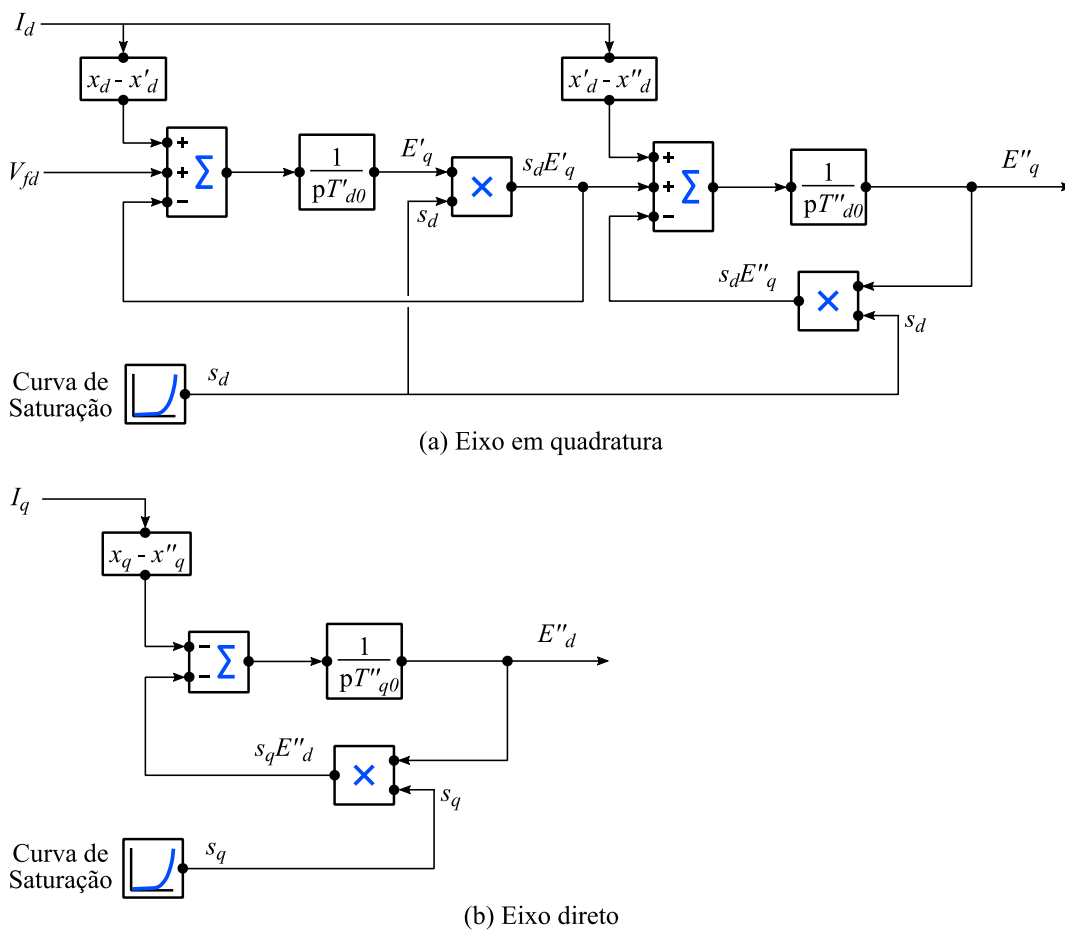


Fonte: Autoria própria.

Modelo 4: São representados os efeitos subtransitórios de eixo direto e em quadratura, sendo necessária a solução de três equações diferenciais (pE'_q , pE''_q e pE''_d), cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 2.23. São utilizadas as equações(2.168), (2.169), (2.170), (2.172), e:

$$pE''_d = \frac{-(X'_q - X''_q)I_q - E'_d}{T''_{q0}} \tag{2.184}$$

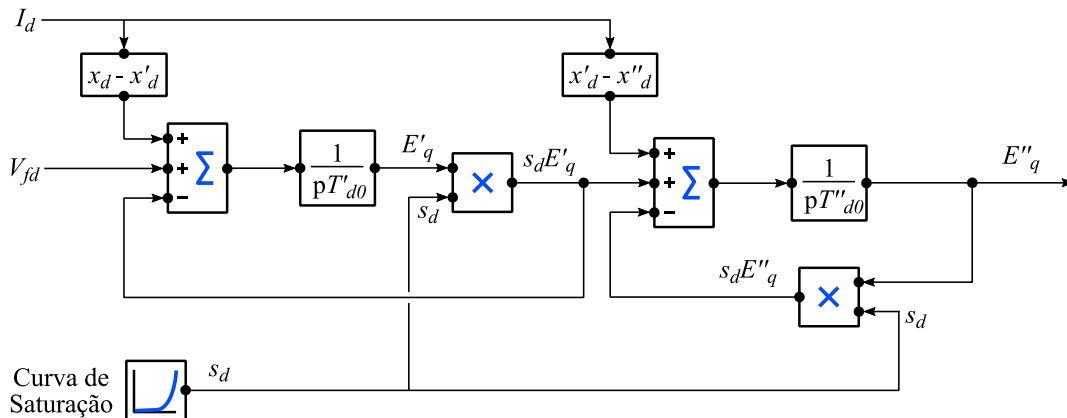
Figura 2.23 – Diagrama de blocos do Modelo 4 das máquinas síncronas



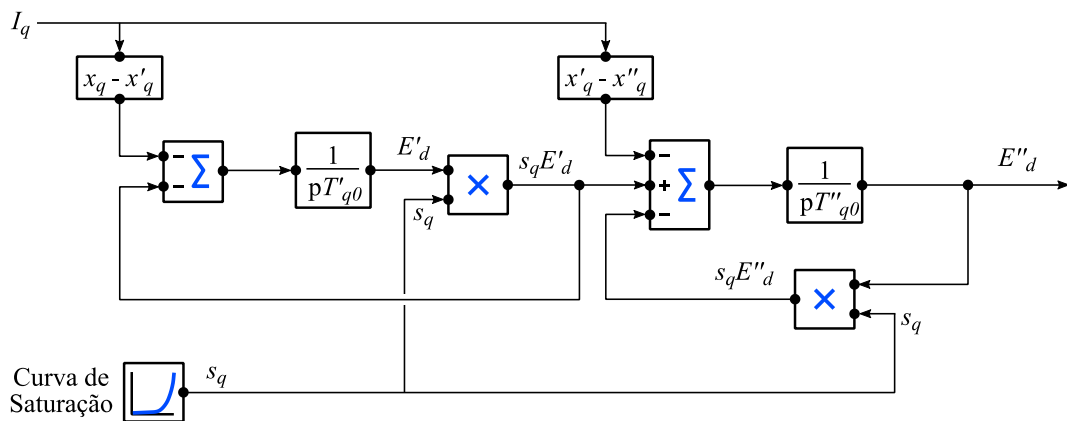
Fonte: Autoria própria.

Modelo 5: São representados os efeitos subtransitórios de eixo direto e em quadratura, sendo necessária a solução de quatro equações diferenciais (pE'_q , pE'_d , pE''_q e pE''_d), cujo diagrama de blocos é apresentado na Figura 2.24. São utilizadas as equações (2.168), (2.169), (2.171) e (2.172).

Figura 2.24 – Diagrama de blocos do Modelo 5 das máquinas síncronas



(a) Eixo em quadratura



(b) Eixo direto

Fonte: Autoria própria.

Para todos os modelos apresentados devem ser resolvidas as equações de oscilação das máquinas síncronas, representadas por (2.181) e (2.182), portanto é necessário resolver de duas a seis equações diferenciais por máquina síncrona. Algumas referências, a exemplo de [8], incluem um modelo sem equações diferenciais, em que a máquina é somente representada por uma tensão constante atrás de uma reatância transitória de eixo direto. Tal é utilizado na representação de um barramento infinito, o qual é normalmente constituído de um subsistema muito maior àquele simulado. No *software* desenvolvido tal comportamento pode ser obtido por meio da utilização de uma máquina representada pelo Modelo 1 cujo valor da constante de inércia (H) é infinito ou muito grande em relação às demais máquinas do sistema.

2.5.2 Cargas

A modelagem das cargas do sistema de forma exata se torna impraticável em um programa de estabilidade, visto à grande quantidade e variedade dos componentes envolvidos, além de apresentar modificações em suas composições causado por vários fatores, como tempo, condições climáticas e economia [12]. Portanto várias aproximações devem ser utilizadas na formulação de um modelo de carga nos estudos aqui postos.

2.5.2.1 Carga ZIP

Uma forma interessante de se representar cargas dependentes da tensão são as cargas ZIP, as quais são funções quadráticas, possuindo três parcelas: impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P). As potências ativa e reativa são obtidas pelas seguintes equações:

$$P_L = P_{Z0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^2 + P_{I0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right) + P_{P0} \quad (2.185)$$

$$Q_L = Q_{Z0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right)^2 + Q_{I0} \left(\frac{V_i}{V_{i0}} \right) + Q_{P0} \quad (2.186)$$

Em que:

P_L e Q_L Potências ativa e reativa da carga ZIP, respectivamente, conectadas em uma barra genérica i

V_i Tensão atual de uma barra genérica i

V_{i0} Tensão inicial de uma barra genérica i , obtida do estudo de fluxo de carga

P_{Z0} e Q_{Z0} Parcela de impedância constante para potências ativa e reativa, respectivamente

P_{I0} e Q_{I0} Parcela de corrente constante para potências ativa e reativa, respectivamente

P_{P0} e Q_{P0} Parcela de potência constante para potências ativa e reativa, respectivamente

Os valores das parcelas de potência da carga ZIP são obtidos utilizando as potências da carga após a convergência do cálculo do fluxo de carga (P_{L0} , para a potência ativa e Q_{L0} , para a potência reativa), utilizando as seguintes expressões:

$$P_{Z0} = \frac{k_{PZ} P_{L0}}{100 V_{i0}^2} \quad P_{I0} = \frac{k_{PI} P_{L0}}{100 V_{i0}} \quad P_{P0} = \frac{k_{PP}}{100} P_{L0} \quad (2.187)$$

$$Q_{Z0} = \frac{k_{QZ} Q_{L0}}{100 V_{i0}^2} \quad Q_{I0} = \frac{k_{QI} Q_{L0}}{100 V_{i0}} \quad Q_{P0} = \frac{k_{QP}}{100} Q_{L0} \quad (2.188)$$

Os valores de k_{PZ} , k_{PI} e k_{PP} representam a composição em impedância, corrente e potência constantes, respectivamente, da parcela ativa da carga, os quais são inseridos pelo usuário na forma de porcentagem, sendo a soma desses três valores necessariamente igual a 100%. Os parâmetros k_{QZ} , k_{QI} e k_{QP} podem ser interpretados de forma análoga, porém compõe a parcela reativa da carga.

2.5.2.2 Motor de indução

Uma importante carga dinâmica são os motores de indução, uma vez que correspondem a uma parcela significativa das cargas presentes no sistema elétrico [12]. O modelo da máquina de indução apresentado na Figura 2.7, a qual pode ser utilizada tanto como motor quanto como gerador, é bem estabelecida na literatura [1][8][12][65][66].

Como descrito na seção 2.3.1.1, a inicialização dessa máquina é realizada em conjunto com o fluxo de potência, visto que a potência reativa exigida pela máquina de indução é dependente dos parâmetros do motor, assim como a tensão do seu barramento. Essa abordagem é necessária, pois métodos convencionais conduzem a resultados errôneos em sistemas altamente carregados [70].

É necessário expressar a equação de movimento da máquina de indução em termos de torque e não potência, como é realizado com as máquinas síncronas. A simetria do rotor também faz com que a posição angular não seja importante e o escorregamento (s) é utilizado no lugar da velocidade (ω), em que:

$$s = \frac{\Omega_0 - \omega}{\Omega_0} \quad (2.189)$$

Desprezando as perdas por atrito e ventilação e a potência no eixo suave, a equação mecânica é [8]:

$$ps = \frac{(T_m - T_e)}{2H} \quad (2.190)$$

Em que:

H Constante de inércia, em segundos

T_m Torque mecânico, em p.u., absorvida pela carga mecânica

T_e Torque elétrico, em p.u.

O torque mecânico normalmente varia com a velocidade, podendo ser expressa proporcionalmente com a seguinte equação quadrática:

$$T_m \propto a + b\omega + c\omega^2 \quad (2.191)$$

Em termos de escorregamento, a equação (2.205) pode ser expressa como:

$$T_m = A - Bs + Cs^2 \quad (2.192)$$

Em que:

$$\begin{cases} A \propto a + b + c \\ B \propto b + 2c \\ C \propto c \end{cases}$$

Os valores das constantes A, B e C são calculadas de forma exata utilizando os valores iniciais do escorregamento e do torque elétrico, como é exposto na seção 2.5.7.1.

O torque elétrico (T_e) está relacionado à potência elétrica no entreferro:

$$T_e = \frac{Re\{\dot{E}i^*\}}{\Omega_b} \quad (2.193)$$

Em que:

\dot{E} Tensão interna do motor de indução

i Corrente do motor de indução

As equações elétricas do motor de indução de gaiola simples são baseadas no circuito equivalente da Figura 2.7. De forma semelhante ao modelo transitório da máquina síncrona, o motor de indução pode ser modelado pelo circuito equivalente de Thevenin de tensão transitória E' atrás de uma resistência do estator r_1 e uma reatância transitória x' . A reatância transitória aparente de rotor bloqueado é dada por:

$$x' = x_1 + \frac{x_2 x_m}{x_2 + x_m} \quad (2.194)$$

A taxa de mudança da tensão transitória é calculada por:

$$p\dot{E}' = -j\Omega_b s \dot{E}' - \frac{\dot{E}' - j(x_0 - x')\dot{I}}{T_0'} \quad (2.195)$$

Em que, a constante de tempo de circuito aberto do rotor (T_0') é:

$$T_0' = \frac{x_2 + x_m}{\Omega_b r_2} \quad (2.196)$$

E a reatância de circuito aberto é:

$$x_0 = x_1 + x_m \quad (2.197)$$

Uma vez que as reatâncias não são afetadas pela posição do rotor, as EADs do motor de indução podem ser expressar diretamente por componentes reais (r) e imaginárias (m). Portanto, a descrição completa desse modelo é representada pelo seguinte sistema de equações algébrico-diferenciais:

$$V_r - E_r' = r_1 I_r - x' I_m \quad (2.198)$$

$$V_m - E_m' = r_1 I_m - x' I_r \quad (2.199)$$

$$pE_r' = \Omega_b s E_m' - \frac{E_r' + (x_0 - x') I_m}{T_0'} \quad (2.200)$$

$$pE_m' = \Omega_b s E_r' - \frac{E_m' - (x_0 - x') I_r}{T_0'} \quad (2.201)$$

Finalmente, o torque elétrico pode ser calculado como:

$$T_e = \frac{E'_r I_r + E'_m I_m}{\Omega_b} \quad (2.202)$$

2.5.3 Rede elétrica

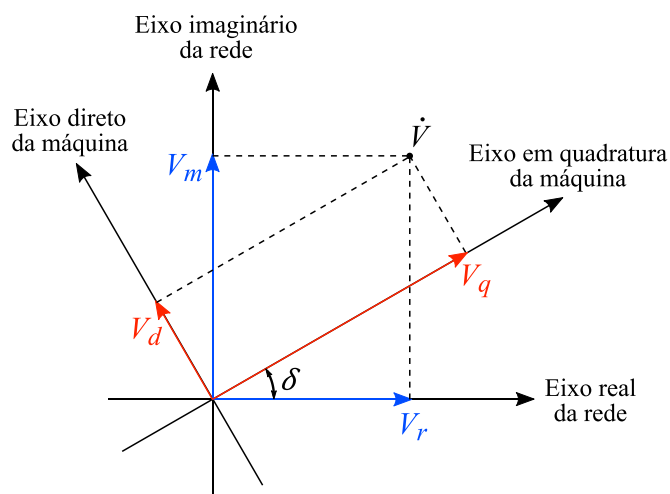
A representação dos demais componentes do sistema elétrico: linhas de transmissão, transformadores e elementos shunt (com exceção de cargas de impedância constante), que formam a rede de transmissão ou distribuição balanceado, é realizada utilizando os mesmos modelos apresentados na seção 2.2. Assim como no fluxo de carga, a relação entre as tensões nodais e correntes são expressas pela equação matricial (2.11).

2.5.3.1 Máquinas síncronas na rede elétrica

As equações das máquinas síncronas, definidas na seção 2.5.1, são dadas na forma de tensões de Thevenin atrás de impedâncias, entretanto isso deve ser modificado em uma corrente em paralelo com uma admitância (equivalente de Norton) para que a máquina possa ser utilizada na equação matricial da rede elétrica (2.11). A admitância é, então, adicionada à matriz admitância de barras (\mathbf{Y}_{bus}) e a corrente inserida no vetor das correntes injetadas nas barras ($\dot{\mathbf{I}}$).

Como já foi dito anteriormente, as equações da máquina síncrona foram desenvolvidas com referência ao eixo de rotação do seu rotor. Os eixos de referência do rotor e da rede são mostrados na Figura 2.25 e a transformação dos parâmetros são obtidos pelas equações (2.203) e (2.204) (também válidas para as correntes).

Figura 2.25 – Eixos de referência da máquina síncrona e da rede



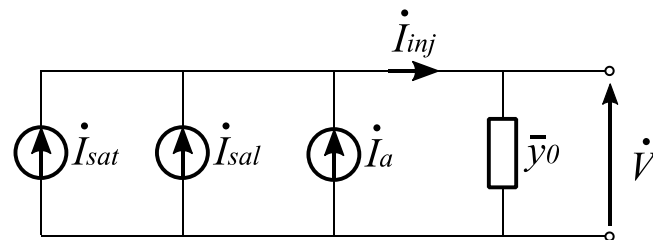
Fonte: Autoria própria.

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\text{sen}\delta \\ \text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} \quad (2.203)$$

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \text{sen}\delta \\ -\text{sen}\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.204)$$

Quando a máquina possui polos salientes, os valores de x_d'' e x_q'' e/ou x_d' e x_q' das equações algébricas (2.166) a (2.169) são distintos. Logo, a admitância presente no circuito equivalente de Norton terá valores diferentes em cada eixo e, portanto, quando transformadas para o eixo de referência da rede terão componentes variantes no tempo [8]. Entretanto, pode-se usar uma admitância fictícia constante e não saturada (\dot{y}_0), desde que a corrente injetada pela máquina seja ajustada de forma iterativa para manter a precisão do equivalente de Norton [8][13]. Com isso, o circuito equivalente da máquina síncrona, representado pela Figura 2.26, possui três correntes: corrente sem ajuste de saliência e não saturada (\dot{I}_a), corrente de ajuste devido à presença da saliência (\dot{I}_{sal}) e corrente de ajuste devido a saturação magnética (\dot{I}_{sat}).

Figura 2.26 – Equivalente de Norton da máquina síncrona



Fonte: Adaptado de ARRILLAGA, J.; WATSON N. R. [8].

Um valor adequado para a admitância fictícia, a qual deve ser inserida na matriz admitância, é proposto em [13] e definido pela equação (2.205). A utilização desse valor acelera e facilita a convergência dos cálculos [13].

$$\dot{y}_0 = \frac{r_a - j0,5(x_d'' + x_q'')}{r_a^2 + x_d''x_q''} \quad (2.205)$$

Nota-se que tal admitância utiliza os parâmetros subtransitórios, portanto é apropriada para os modelos 4 e 5, apresentados na seção 2.5.1.5. Para os demais modelos são usados os parâmetros transitórios (x_d' e x_q'). Essa notação deve ser levada em conta no restante desta seção.

Pelo circuito equivalente, representado pela Figura 2.26, tem-se a corrente injetada no barramento pela máquina síncrona:

$$\dot{I}_{inj} = \dot{I}_a + \dot{I}_{sal} + \dot{I}_{sat} = \dot{I}_a + (\dot{y}_{ts} - \dot{y}_0)(\dot{E}'' - \dot{V}) \quad (2.206)$$

Em que:

\dot{y}_{ts} Admitância saturada variante no tempo, a qual é substituída pelas correntes de ajuste

\dot{E}'' Tensão subtransitória da máquina no eixo de referência da rede. Para os modelos 1, 2 e 3, utiliza-se a tensão transitória transformada (\dot{E}')

\dot{V} Tensão terminal da máquina no eixo de referência da rede

A corrente de ajuste de saturação é calculada utilizando os valores de reatância de eixo direto e em quadratura saturados, calculados pelas equações (2.164) e (2.165), utilizando o mesmo formato da admitância fictícia:

$$\dot{I}_{sat} = \frac{r_a - j0,5(x''_{ds} + x''_{qs})}{r_a^2 + x''_{ds}x''_{qs}} (\dot{E}'' - \dot{V}) \quad (2.207)$$

Utilizando as equações (2.206) e (2.208) em conjunto com equações algébricas da máquina síncrona (2.168) e (2.169), além da transformada para o eixo de referência da rede, tem-se:

$$\dot{I}_{sal} = \left[-0,5j \frac{x''_{qs} - x''_{ds}}{r_a^2 + x''_{ds}x''_{qs}} (\dot{E}''^* - \dot{V}^*) \right] [\cos(2\delta) + j\sin(2\delta)] \quad (2.208)$$

Em que:

\dot{E}''^* Conjugado da tensão subtransitória da máquina no eixo de referência da rede

\dot{V}^* Conjugado da tensão terminal da máquina no eixo de referência da rede

Nota-se que ambas as equações de corrente de ajuste são variantes no tempo caso ocorram perturbações no sistema, visto que os fatores de saturação presentes nas reatâncias saturadas são modificados (de acordo com a alteração do ponto de operação da máquina síncrona), além da oscilação do ângulo do rotor. Portanto tais correntes devem ser calculadas a cada passo de integração.

Uma vez que \bar{y}_0 é inserida diretamente na matriz admitância, a corrente sem ajuste é calculada como sendo meramente àquela que percorre tal admitância [8]:

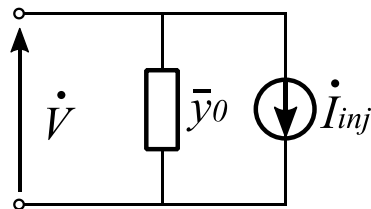
$$\dot{I}_a = \bar{y}_0 \dot{V} \quad (2.209)$$

Caso \dot{y}_0 não seja inserida na matriz admitância o cálculo da corrente sem ajuste não é necessário, porém isso pode levar a problemas numéricos em alguns sistemas [8].

2.5.3.2 Motor de indução na rede elétrica

Da mesma maneira que as máquinas síncronas, o modelo do motor de indução é realizado por meio de seu equivalente de Norton, ou seja, são consideradas correntes em paralelo com uma admitância fixa, como mostra a Figura 2.27.

Figura 2.27 – Equivalente de Norton do motor de indução



Fonte: Autoria própria.

Modificando as equações (2.198) e (2.199), pode-se encontrar a corrente que deve ser adicionada no vetor de correntes:

$$\dot{I}_{inj} = \bar{y}(\dot{V} - \dot{E}') \quad (2.210)$$

E a admitância fixa (\bar{y}), adicionada na matriz de admitâncias, é definida por:

$$\bar{y} = \frac{1}{r_1 + jx'} \quad (2.211)$$

2.5.3.3 Cargas ZIP na rede elétrica

A forma adequada de representar as cargas, incluindo a carga ZIP (seção 2.5.2.1), é por meio de um modelo equivalente de Norton, semelhante à máquina síncrona. Uma admitância de regime permanente (\dot{y}_0) é então calculada utilizando o valor da tensão inicial (\dot{V}_0) e potência, obtidos no resultado do fluxo de carga, e incluída na matriz admitância. Durante a solução do

problema de estabilidade, calcula-se o valor da nova admitância da carga dada uma nova tensão no barramento i (\dot{V}_i):

$$\dot{y} = \frac{\dot{S}_i^*}{|\dot{V}_i|^2} \quad (2.212)$$

Em que:

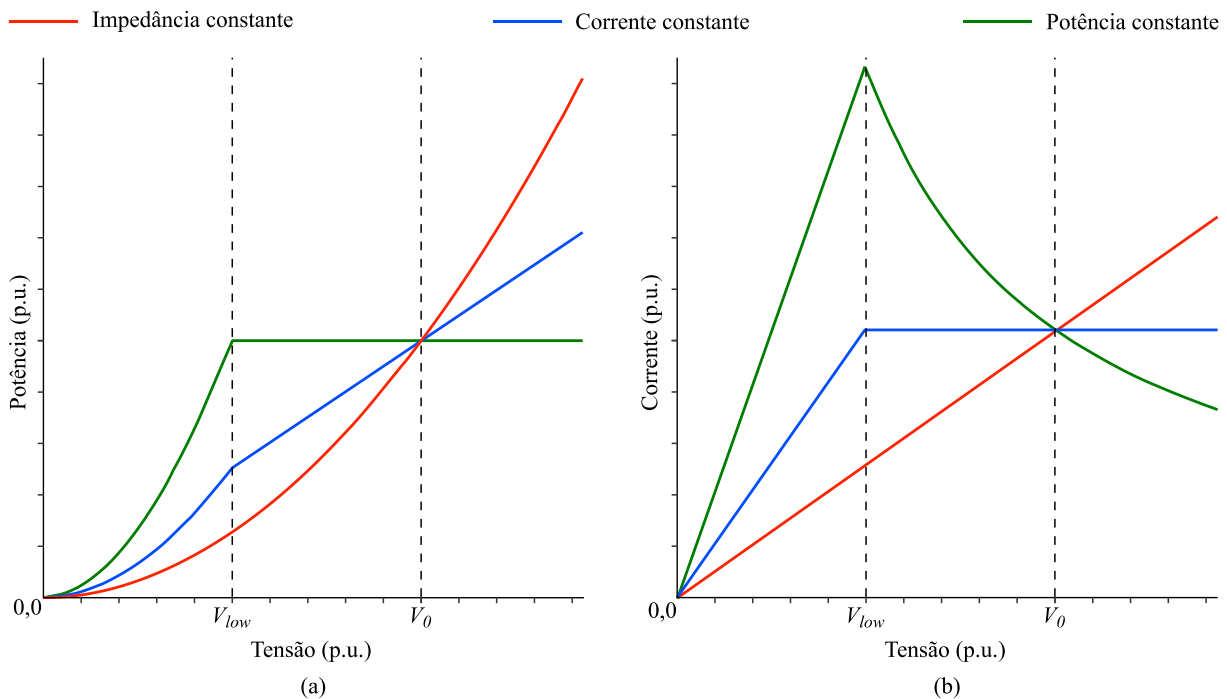
\dot{S}_i^* Conjugado da potência aparente da carga, obtida das equações (2.185) e (2.186) ($P_L - jQ_L$)

A corrente injetada pela carga é calculada pelo desvio da característica da carga em relação à sua impedância característica:

$$\dot{I}_{inj} = (\dot{y}_0 - \dot{y})\dot{V}_i \quad (2.213)$$

O comportamento das potências, retiradas de simulações no PSP-UFU, de cada parcela que compõe a carga ZIP são evidenciadas na Figura 2.28a.

Figura 2.28 – Comportamento da carga ZIP implementada no *software*: (a) curva de Tensão x Potência; (b) Curva de Tensão x Corrente



Fonte: Autoria própria.

Cargas de corrente e potência constantes possuem problemas em tensões muito baixas. À medida que a tensão diminui as correntes dessas cargas não reduz, como pode ser observado na Figura 2.28b, resultando em perda de precisão e problemas na convergência de processos iterativos [8]. Para contornar esse problema utiliza-se uma tensão pré-definida pelo usuário (V_{low}), a qual as cargas (ou parcelas) de corrente e potência constantes são modeladas como impedância constante, resultando no comportamento de potência e corrente apresentados na Figura 2.28.

2.5.4 Faltas e chaveamentos

Os distúrbios mais comuns aplicados em estudos de estabilidade transitória são faltas e chaveamentos. Tais operações são facilmente realizadas no programa:

- **Faltas:** Curtos-circuitos trifásicos podem ser inseridos nos barramentos do sistema por meio da inclusão da impedância de falta na matriz admitância de barras da mesma maneira realizada em um elemento shunt. Tal valor é definido pelo usuário e caso seja um curto-circuito franco, um valor não nulo, mas suficientemente próximo de zero, é aplicado, de forma que a tensão no barramento é levada a zero durante o distúrbio. A remoção dessa perturbação do sistema se dá pela exclusão da impedância de falta de Y_{bus} .
- **Chaveamento de ramo:** Da mesma forma que as faltas, o chaveamento de ramos é realizado por meio da alteração na matriz admitância, removendo ou inserindo os parâmetros do elemento a ser chaveado.
- **Chaveamento de máquinas:** A remoção de uma máquina síncrona é efetivada com a retirada de sua participação no vetor de correntes da equação (2.11), além da remoção de sua admitância fictícia (equação (2.205)). Mesmo que removida da barra, os parâmetros da máquina síncrona continuam a ser calculados com a corrente do estator nula, podendo fornecer resultados em uma eventual reconexão [8].

2.5.5 Integração numérica

Para resolver as equações diferenciais da máquina é necessário um método de integração numérica. Tais métodos são classificados em dois grupos: métodos explícitos e métodos implícitos. Os métodos explícitos, devido à sua formulação, calculam diretamente o estado do

sistema em um instante de tempo posterior, enquanto métodos implícitos envolvem estados atuais e posteriores em suas equações, exigindo, portanto, um processo iterativo.

As constantes de tempo presentes no estudo de estabilidade têm uma grande variação em seu valor, como pode ser observado na Figura 2.1. Isso torna o sistema de equações diferenciais da máquina síncrona como um sistema rígido [1]. Caso a análise da estabilidade numérica tanto das equações diferenciais rígidas quanto do método de integração obtenham o mesmo comportamento, o método é chamado de absolutamente estável, ou A-estável.

Métodos de integração numérica explícitos, como por exemplo o Runge-Kutta de quarta ordem, não podem ser A-estáveis e, portanto, normalmente possuem comportamento ruim em problemas com equações diferenciais rígidas. Por outro lado, métodos implícitos podem ser A-estáveis [1]. Um método implícito adequado para solução do comportamento dinâmico de sistemas elétricos é o Trapezoidal Implícito, por possuir as seguintes vantagens:

- É numericamente estável (A-estável) [1][8];
- É bastante rápida [13];
- Possui boa precisão (dependendo somente do passo de integração utilizado) [8].

Tal método foi implementado no programa tanto para solução das equações diferenciais da máquina síncrona quanto nas funções transferência do sistema de controle (seção 2.7). Sua formulação é dada pela seguinte expressão:

$$y_{n+1} = y_n + 0,5h(py_{n+1} + py_n) \quad (2.214)$$

Em que:

- h Passo de integração ($h = t_{n+1} - t_n$)
- y_n Valor do estado no passo anterior (instante t_n)
- y_{n+1} Valor do estado no passo atual (instante t_{n+1})
- py_n Equação diferencial no passo anterior
- py_{n+1} Equação diferencial no passo atual

Nota-se na equação (2.214), que o método é implícito devido ao termo $n + 1$ aparecer em ambos os lados da equação, por isso é necessário um processo iterativo para sua solução.

2.5.5.1 Aplicação do método Trapezoidal Implícito nas equações das máquinas síncronas

Ao aplicar a equação (2.214) nas equações diferenciais da máquina, pode-se obter constantes de integração (c e m), as quais dependem somente de valores calculados no passo anterior e não necessitam de serem atualizadas no processo iterativo, acelerando o processo de solução [8].

As quatro equações diferenciais associadas à mudança do fluxo na máquina síncrona, dadas por (2.170) a (2.173) e aplicadas no método Trapezoidal Implícito, são exibidas na sequência, onde são evidenciadas as constantes de integração.

Aplicando (2.214) em (2.170):

$$E'_{q_{n+1}} = \frac{1}{1 + m_q(s_d - 1)} \{c_q + m_q[V_{fd_{n+1}} + (x_d - x'_d)I_{d_{n+1}}]\} \quad (2.215)$$

Em que:

$$c_q = [1 - m_q(1 + s_d)]E'_{q_n} + m_q[V_{fd_n} + (x_d - x'_d)I_{d_n}]$$

$$m_q = \frac{h}{2T'_{d0} + h} \quad (2.216)$$

Aplicando (2.214) em (2.171):

$$E'_{d_{n+1}} = \frac{1}{1 + m_d(s_q - 1)} \{c_d + m_d[-(x_q - x'_q)I_{q_{n+1}}]\} \quad (2.217)$$

Em que:

$$c_d = [1 - m_d(1 + s_q)]E'_{d_n} + m_d[-(x_q - x'_q)I_{q_n}]$$

$$m_d = \frac{h}{2T'_{q0} + h} \quad (2.218)$$

Aplicando (2.214) em (2.172):

$$E''_{q_{n+1}} = \frac{1}{1 + m_{qq}(s_d - 1)} \{c_{qq} + m_{qq}[s_d E'_{q_{n+1}} + (x'_d - x''_d)I_{d_{n+1}}]\} \quad (2.219)$$

Em que:

$$c_{qq} = [1 - m_{qq}(1 + s_q)]E''_{q_n} + m_{qq}[s_d E'_{q_n} + (x'_d - x''_d)I_{d_n}]$$

$$m_{qq} = \frac{h}{2T''_{q0} + h} \quad (2.220)$$

Aplicando (2.214) em (2.173):

$$E''_{d_{n+1}} = \frac{1}{1 + m_{dd}(s_q - 1)} \{c_{dd} + m_{dd}[s_q E'_{d_{n+1}} - (x'_q - x''_q)I_{q_{n+1}}]\} \quad (2.221)$$

Em que:

$$c_{dd} = [1 - m_{dd}(1 + s_q)]E''_{d_n} + m_{dd}[s_q E'_{d_n} - (x'_q - x''_q)I_{q_n}]$$

$$m_{dd} = \frac{h}{2T''_{d0} + h} \quad (2.222)$$

De forma análoga, as equações mecânicas da máquina, apresentadas na seção 2.5.1.4, são apresentadas na sequência:

Aplicando (2.214) em (2.181):

$$\omega_{n+1} = c_\omega + m_\omega(P_{m_{n+1}} - P_{e_{n+1}}) \quad (2.223)$$

Em que:

$$c_\omega = \omega_n \left(1 - \frac{4HD_a}{\omega_r}\right) + m_\omega(P_{m_n} - P_{e_n} + 2\omega_r)$$

$$m_\omega = \frac{h}{\frac{4H}{\omega_r} + D_a h} \quad (2.224)$$

Aplicando (2.214) em (2.182):

$$\delta_{n+1} = c_\delta + m_\delta \omega_{n+1} \quad (2.225)$$

Em que:

$$c_\delta = \delta_n + m_\delta(\omega_n - 2\omega_r)$$

$$m_\delta = \frac{h}{2} \quad (2.226)$$

2.5.5.2 Aplicação do método Trapezoidal Implícito nas equações das máquinas de indução

De forma semelhante à aplicação do método trapezoidal implícito nas máquinas síncronas, as equações das máquinas de indução são manipuladas de forma a separar as constantes de integração para otimizar o algoritmo de solução.

Substituindo a equação do torque mecânico (2.192) na equação diferencial do escorregamento (2.190), a seguinte equação diferencial é obtida:

$$ps = \frac{(A - Bs + Cs^2 - T_e)}{2H} \quad (2.227)$$

Aplicando (2.214) em (2.227), obtém-se:

$$s_{n+1} = c_s + m_s(Cs_{n+1}^2 - T_{e_{n+1}}) \quad (2.228)$$

Em que:

$$c_s = s_n(1 - 2Bm_s) + m_s(2A + Cs_n^2 - T_{e_n})$$

$$m_s = \frac{h}{4H + Bh} \quad (2.229)$$

Como pode ser observado, a equação (2.227) não é linear, sendo necessário um método numérico para sua solução. O método iterativo de Newton para solução do escorregamento no instante de tempo atual (s_{n+1}) pode ser representado da seguinte forma:

$$s_{n+1}^{k+1} = s_{n+1}^k - \frac{f(s_{n+1}^k)}{f'(s_{n+1}^k)} \quad \text{ou} \quad s_{n+1}^{k+1} = s_{n+1}^k + \Delta s^k \quad (2.230)$$

Em que:

k Representa o número da iteração no processo de solução

Aplicando (2.228) em (2.230), obtém-se:

$$s_{n+1}^{k+1} = s_{n+1}^k + \frac{c_s + m_s [C(s_{n+1}^k)^2 - T_{e_{n+1}}] - s_{n+1}^k}{1 - 2m_s C(s_{n+1}^k)^2} \quad (2.231)$$

A equação (2.231) é resolvida até que se obtenha a convergência (quando Δs^k é menor que uma tolerância pré-estipulada), normalmente obtida em duas ou três iterações.

As equações diferenciais elétricas da máquina de indução de gaiola simples definidas na seção 2.5.2.2 são apresentadas na sequência:

Aplicando (2.214) em (2.200):

$$E'_{r_{n+1}} = c_r + m_r [\Omega_b T'_0 s_{n+1} E'_{m_{n+1}} - (x_0 - x') I_{m_{n+1}}] \quad (2.232)$$

Em que:

$$c_r = E'_{r_n}(1 - 2m_r) + m_r[\Omega_b T'_0 s_n E'_{m_n} - (x_0 - x')I_{m_n}]$$

$$m_r = \frac{h}{2T'_0 + h} \quad (2.233)$$

Aplicando (2.214) em (2.201):

$$E'_{m_{n+1}} = c_m - m_m[\Omega_b T'_0 s_{n+1} E'_{r_{n+1}} - (x_0 - x')I_{r_{n+1}}] \quad (2.234)$$

Em que:

$$c_m = E'_{m_n}(1 - 2m_m) - m_m[\Omega_b T'_0 s_n E'_{r_n} - (x_0 - x')I_{r_n}]$$

$$m_m = \frac{h}{2T'_0 + h} \quad (2.235)$$

2.5.6 Método para solução de equações lineares na ferramenta de estabilidade

Após os cálculos das correntes injetadas pelas máquinas síncronas, motores de indução e cargas, como é mostrado na seção 2.5.3, calculam-se as tensões nodais pela equação matricial (2.11). A solução desses sistemas lineares pode ser realizada pela inversão da matriz admitância, porém tal método possui alto custo computacional. Outro método convencional que pode ser aplicado é a Eliminação Gaussiana, exposto na seção 2.3.3.1, porém como o problema de estabilidade, empregando o método Trapezoidal Implícito como procedimento de integração numérica, exige cálculos iterativos em que a solução da equação (2.11) é necessária, a utilização desse método deve ser realizada um número excessivo de vezes.

Com o intuito de otimizar o processo de solução de equações lineares no cálculo de estabilidade, foi implementado um algoritmo de fatoração LU (inferior-superior, do inglês *lower-upper*) da matriz admitância, a qual é capaz de dividir uma matriz em duas: uma inferior, cujos elementos acima da diagonal principal (unitária) são nulos; e uma superior, cujos elementos da diagonal principal e abaixo dela são nulos. Portanto, a decomposição de uma matriz A em LU, ficará na seguinte forma: $A = L \cdot U$. Tal implementação é bastante vantajosa, pois a fatoração é realizada somente no início dos cálculos e caso a matriz admitância seja modificada por eventos no sistema (seção 2.5.4), sendo que o resultado do sistema linear, necessário nos cálculos iterativos, é obtido por substituições progressivas e regressivas, cálculo menos oneroso computacionalmente comparado à Eliminação Gaussiana [71].

O algoritmo para decomposição da matriz admitância utilizado foi o método de Doolittle. As equações gerais necessárias para determinar as duas matrizes são descritas na sequência, dada uma matriz A de ordem n [71]:

$$u_{ij} = a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} u_{ki} \quad , i \leq j \quad (2.236)$$

$$l_{ij} = \frac{a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} u_{kj}}{u_{jj}} \quad , i > j \quad (2.237)$$

Com isso, o sistema linear ficará na forma $\mathbf{LUx} = \mathbf{b}$. Assim, dois sistemas são solucionados:

- $\mathbf{Ly} = \mathbf{b}$, por substituição progressiva, obtendo o vetor \mathbf{y} , em que $\mathbf{y} = \mathbf{Ux}$:

$$y_i = \frac{1}{l_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=i+1}^n l_{ij} y_j \right) \quad (2.238)$$

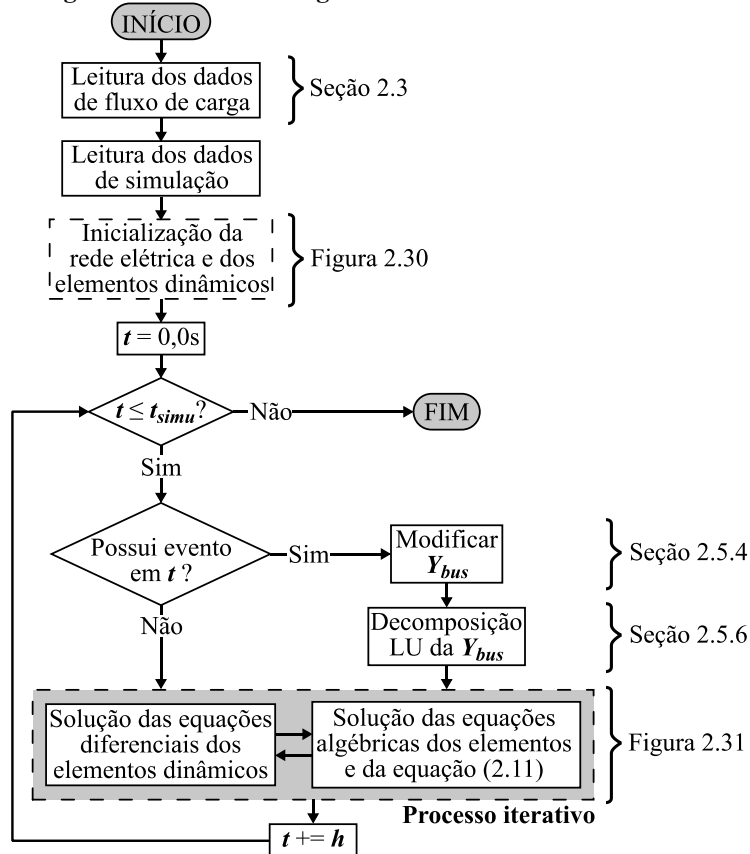
- $\mathbf{Ux} = \mathbf{y}$, por substituição regressiva, obtendo a resposta do sistema linear \mathbf{x} .

$$x_i = \frac{1}{u_{ii}} \left(y_i - \sum_{j=i+1}^n u_{ij} x_j \right) \quad (2.239)$$

2.5.7 Estrutura da ferramenta de estabilidade

Essa seção visa concentrar os conceitos explanados nas seções anteriores na forma de fluxogramas, evidenciando, assim, a estrutura do módulo de estabilidade implementado no *software*. A Figura 2.29 mostra a estrutura geral da ferramenta de estabilidade transitória:

Figura 2.29 – Estrutura geral da ferramenta de estabilidade

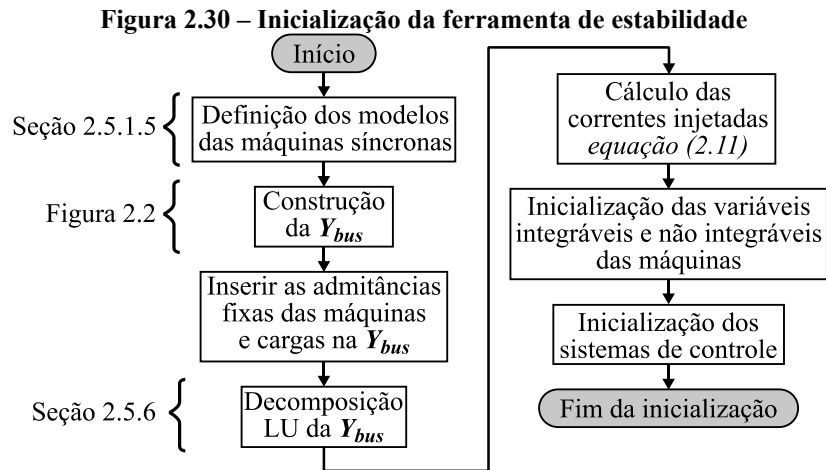


Fonte: Autoria própria.

As variáveis presentes na Figura 2.29: t é o tempo atual; t_{simu} é o tempo total de simulação e h é o passo de integração.

2.5.7.1 Inicialização da rede elétrica e dos elementos dinâmicos

A inicialização da rede elétrica e dos elementos dinâmicos (máquinas síncronas e de indução) é apresentada na Figura 2.30:



Fonte: Autoria própria.

A inicialização das variáveis não integráveis das máquinas síncronas é realizada utilizando as equações de regime permanente. O cálculo do ângulo de potência inicial (δ_0), é obtido pela equação (2.240):

$$\delta_0 = \text{arg}\{\dot{V}_t + (r_a + jx_q)\dot{I}_a\} \quad (2.240)$$

Em que:

\dot{V}_t Tensão terminal da máquina, obtido no resultado do fluxo de carga

\dot{I}_a Corrente de armadura da máquina, obtida no resultado do fluxo de carga ($\dot{I}_a = \frac{P-jQ}{\dot{V}_t^*}$)

Devido à presença da saturação é necessário ajustar o valor de δ_0 e s_{q0} e, para isso, faz-se um cálculo iterativo, em que é determinado o ângulo para um valor saturado da reatância síncrona de eixo em quadratura (x_{qs}), utilizando as equações (2.165) e (2.180), além da curva de saturação para obtenção do valor do fator de saturação. A convergência é alcançada quando o erro do ângulo de potência entre as iterações é menor que uma tolerância pré-estipulada. Em caso de um número excessivo de iterações o programa irá encerrar o cálculo com erro.

Uma vez ajustado o valor do ângulo de potência, calculam-se as outras variáveis não integráveis: tensão de campo inicial (V_{fd0}), pela equação (2.143), utilizando valores saturados; correntes e tensões de eixo direto e em quadratura ($V_{d0}, V_{q0}, I_{d0}, I_{q0}$) pela transformada (2.204); potências elétrica e mecânica iniciais (P_{e0} e P_{m0}), utilizando a equação (2.153) e fazendo $P_{m0} = P_{e0}$; e os fatores de saturação (s_{d0} e s_{q0}) obtidos pela curva de saturação e tensões de Potier (2.179) e (2.180).

As variáveis integráveis iniciais das máquinas síncronas são obtidas pelas equações diferenciais com seus termos que possuem operador de derivada levados a zero, visto que é um estado estacionário. Portanto as tensões transitórias e subtransitórias das equações (2.170) a (2.173), são calculadas da seguinte forma:

$$E'_{q0} = \frac{V_{fd0} + (x_d - x'_d)I_{d0}}{s_{d0}} \quad (2.241)$$

$$E'_{d0} = -\frac{(x_q - x'_q)I_{q0}}{s_{q0}} \quad (2.242)$$

$$E''_{q0} = E'_{q0} + \frac{(x'_d - x''_d)I_{d0}}{s_{d0}} \quad (2.243)$$

$$E''_{d0} = E'_{d0} - \frac{(x'_q - x''_q)I_{q0}}{s_{q0}} \quad (2.244)$$

Da mesma forma que nas máquinas síncronas, a inicialização das variáveis não integráveis dos motores de indução é realizada utilizando as equações de regime permanente. O valor da potência ativa inicial (P_{m0}) é definida pelo usuário, enquanto a potência reativa inicial (Q_{m0}) e a tensão terminal inicial (\dot{V}_{m0}) é resultado do fluxo de carga (seção 2.3.1.1). Com isso, é possível calcular a corrente inicial do motor (\dot{I}_{m0}), a tensão de Thevenin inicial (\dot{E}_{m0}) e o torque elétrico inicial (T_{e0}), como mostra as equações na sequência:

$$\dot{I}_{m0} = \frac{P_{m0} - Q_{m0}}{\dot{V}_{m0}^*} \quad (2.245)$$

$$\dot{E}_{m0} = \dot{V}_{m0} - (r_1 + jx'_1)\dot{I}_{m0} \quad (2.246)$$

$$T_{e0} = \frac{Re\{\dot{E}_{m0}\dot{I}_{m0}^*\}}{\Omega_b} \quad (2.247)$$

O escorregamento inicial (s_0) também é resultado do fluxo de carga, calculado por (2.31). Com isso é possível calcular as constantes A, B e C que definem o torque mecânico em relação ao escorregamento, conforme mostra a equação (2.192).

Os valores a , b e c da equação (2.191) são inseridos pelo usuário e representam a proporção do torque mecânico constante (a), linearmente dependente da velocidade (b) e dependente da velocidade ao quadrado (c). A soma de seus valores deve ser sempre unitária.

Para um valor de velocidade inicial $\omega_0 = \Omega_b(1 - s_0)$, tem-se:

$$A = T_{e0} \left(a + \frac{b\Omega_b}{\omega_0} + \frac{c\Omega_b^2}{\omega_0^2} \right) \quad (2.248)$$

$$B = T_{e0} \left(\frac{b\Omega_b}{\omega_0} + 2 \frac{c\Omega_b^2}{\omega_0^2} \right) \quad (2.249)$$

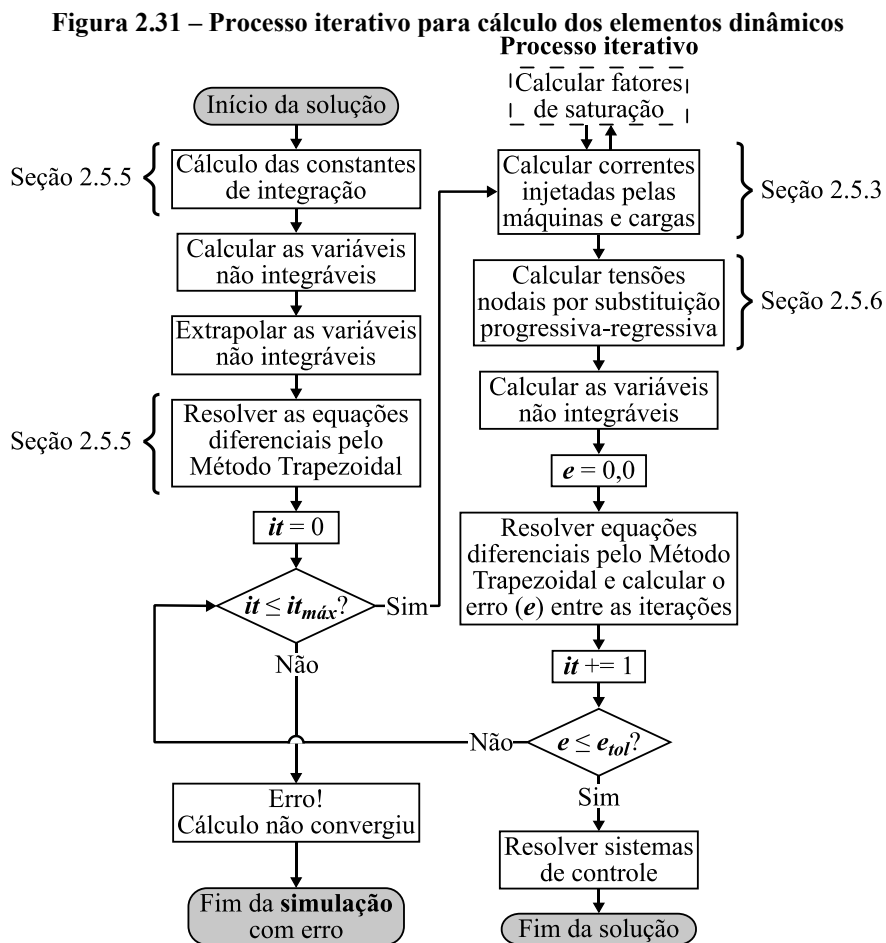
$$C = T_{e0} \frac{c\Omega_b^2}{\omega_0^2} \quad (2.250)$$

A tensão transitória inicial (\dot{E}'_0) da máquina de indução é definida levando a derivada da equação (2.195) a zero, resultando em:

$$\dot{E}'_0 = E'_{r0} + jE'_{m0} = \frac{j(x_0 - x')I_{m0}}{1 + j\Omega_b s_0 T'_0} \quad (2.251)$$

2.5.7.2 Solução iterativa dos elementos dinâmicos

A Figura 2.31 descreve o processo iterativo para solução dos elementos dinâmicos:



Fonte: Autoria própria.

Variáveis presentes na Figura 2.31: it é número de iterações; $it_{máx}$ é o número máximo de iterações; e é o erro calculado pelo módulo da maior diferença das variáveis integráveis entre as iterações e e_{tol} é a tolerância na qual a convergência é alcançada caso o erro calculado seja menor que seu valor.

Utilizando a extrapolação das variáveis não integráveis de primeira ordem (ou linear), definida pela equação (2.252), observou-se um aumento significativo no desempenho no programa.

$$y_{n+1} = y_{n-1} + \frac{t_{n+1} - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}(y_n - y_{n-1}) \quad (2.252)$$

Observa-se em (2.252) a necessidade de armazenar os valores do tempo anterior para realizar a extrapolação. Extrapolação de ordens superiores pode ser realizada, porém a aplicação de tais métodos leva a pouco ou nenhum benefício em programas de estabilidade [66].

Durante o processo de solução da máquina síncrona a computação dos fatores de saturação deve ser realizada em dois momentos, como pode ser observado na Figura 2.31: durante o cálculo das variáveis não integráveis e no cálculo das correntes injetadas. Tal processo é realizado de forma iterativa, cujo ponto de operação é alcançado com a convergência dos cálculos das correntes de eixo direto e em quadratura (equações (2.166) e (2.167) para os Modelos 1, 2 e 3; equações (2.168) e (2.169) para os Modelos 4 e 5) e o fator de saturação obtida pela curva de saturação. Como já foi dito anteriormente, a representação da curva de saturação em uma forma polinomial acelera esse processo iterativo, uma vez que é permitido a utilização de um método numérico, alcançando a convergência em poucas iterações.

A inicialização e solução no tempo dos sistemas de controle presentes nas máquinas síncronas, exibidas em Figura 2.30 e Figura 2.31, são apresentados na seção 2.7.

2.6 Harmônicos

Duas ferramentas relacionadas a harmônicos foram desenvolvidas no programa:

- Cálculo das Tensões Harmônicas e Distorção Harmônica Total de Tensão (THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*);
- Resposta na Frequência.

Ambos cálculos são realizados a partir da seguinte equação matricial [72]:

$$\mathbf{i}^h = \mathbf{Y}_{bus}^h \mathbf{V}^h \quad (2.253)$$

Em que:

\mathbf{i}^h Vetor das correntes harmônicas injetadas nas barras

\mathbf{Y}_{bus}^h Matriz admitância harmônica de barras

\mathbf{V}^h Vetor das tensões harmônicas nas barras

h Ordem harmônica

O vetor das correntes harmônicas injetadas é definido no programa utilizando um elemento de potência, chamado “fonte de corrente harmônica”, em que o usuário pode criar uma lista de correntes injetadas (em A e/ou p.u.) em um barramento.

O programa define automaticamente as ordens harmônicas na simulação analisando todas as listas de fontes de corrente harmônicas previamente aos cálculos. Com isso são calculadas as admitâncias harmônicas necessárias de cada elemento pela multiplicação das reatâncias indutivas (x_l^1) e susceptâncias capacitivas (b_c^1) fundamentais de cada elemento pelas ordens harmônicas:

$$x_l^h = h \times x_l^1 \quad (2.254)$$

$$b_c^h = h \times b_c^1 \quad (2.255)$$

Uma vez calculadas as admitâncias harmônicas, são utilizados os mesmos modelos e algoritmos apresentados na seção 2.2 para construção da \mathbf{Y}_{bus}^h .

A equação (2.253) é resolvida usando o método de eliminação gaussiana para evitar a inversão de cada matriz de admitância harmônica. Este procedimento torna o cálculo das tensões harmônicas computacionalmente eficiente.

Uma vez calculadas as tensões harmônicas, a THD em uma barra genérica i pode ser definida por [72]:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n V_i^h}}{V_i^1} \quad (2.256)$$

A ferramenta de Resposta na Frequência (ou análise de varredura de frequência) envolve a variação da impedância da rede em um espectro de frequências observado a partir de um certo

barramento. Uma corrente senoidal é injetada na barra em uma faixa de frequências e o conjunto de equações (2.253) é usado para calcular a resposta da tensão. Este cálculo é repetido em etapas discretas cobrindo o espectro de frequência especificado [72].

O programa usa a matriz admitância de sequência positiva e uma corrente injetada de 1,0 p.u. também de sequência positiva na equação (2.253) para calcular diretamente as impedâncias em p.u.

A análise de varredura de frequência é amplamente usada no projeto de filtros harmônicos [72].

Na versão atual do programa não são consideradas as alterações das resistências do sistema causado pelo efeito pelicular. Versões futuras irão contemplar tal característica.

2.7 Sistemas de controle

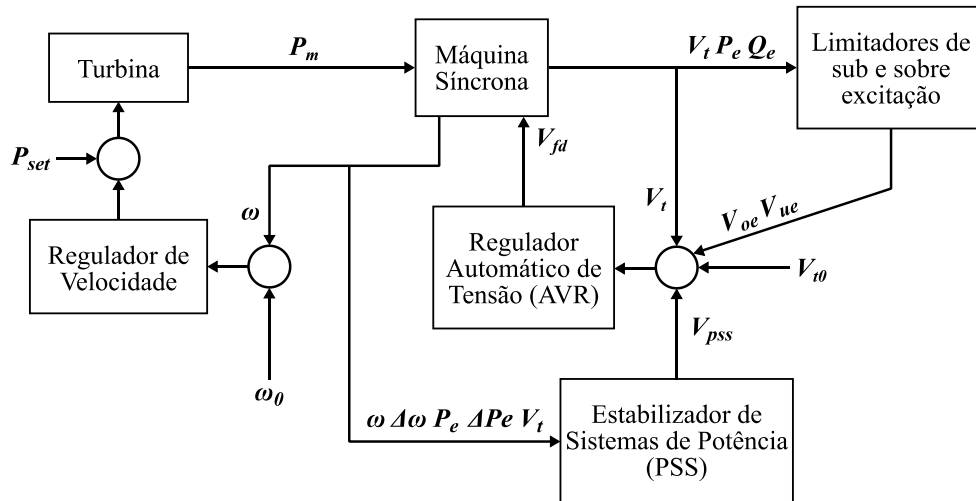
Os componentes do sistema de controle implementados no programa foram desenvolvidos de forma genérica e são resolvidos de forma modular, cuja solução de um elemento é realizada e seu resultado propagado para os próximos blocos de controle conectados. Isso permite ao usuário criar qualquer tipo de controle, dependendo somente dos blocos fundamentais disponíveis. Nessa seção são explorados tais blocos, estrutura do algoritmo de solução e inicialização.

Os blocos fundamentais implementados são: Entrada/Saída de variáveis, Função Transferência, Somador, Multiplicador, Divisor, Ganho, Constante, Limitador, Limitador de taxa, Função Exponencial e Expressão Matemática. A implementação dos blocos de operadores matemáticos (Somador, Multiplicador e Divisor) é trivial e não serão contemplados nessa seção, assim como os blocos Constante (cujo valor de saída é invariante), Ganho (que se comporta como um multiplicador, cujo seu valor de saída é igual à entrada multiplicada por uma constante) e Exponencial. Mais detalhes sobre esses blocos elementares são apresentados na seção 3.4.2.

O bloco de **Entrada/Saída** possibilita obter variáveis da máquina síncrona e utilizá-los no controle de parâmetros: tensão aplicada ao campo (V_{fd}) e potência mecânica (P_m). As seguintes entradas dos sistemas de controle, obtidas durante a execução da simulação, são disponibilizadas: Tensão terminal (V_t), Velocidade (ω), Potência ativa elétrica (P_e), Potência reativa (Q_e), Tensão terminal inicial (V_{t0}), Velocidade inicial (ω_0), Variação de velocidade ($\Delta\omega$) e Variação de potência ativa (ΔP_e). Com essas entradas e saídas os seguintes elementos

relacionados às máquinas síncronas podem ser modelados: Regulador de Velocidade (RV), Turbina, Regulador Automático de Tensão (AVR, do inglês, *Automatic Voltage Regulator*), Excitatriz, Estabilizador de Sistemas de Potência (PSS, do inglês, *Power System Stabilizer*) e Limitadores de sub e sobre excitação. A Figura 2.32 apresenta um diagrama esquemático com os reguladores das máquinas síncronas, cujas variáveis de controle são destacadas.

Figura 2.32 – Diagrama esquemático dos reguladores da máquina síncrona



Fonte: Adaptado de MILANO, F. [1].

As restrições máximas e mínimas de valores dos sistemas de controle são modeladas utilizando um **Limitador**, cuja implementação é bastante simples e segue a seguinte expressão:

$$y_n = \begin{cases} L_{sup}, & \text{se } u_n > L_{sup} \\ u_n, & \text{se } L_{inf} \leq u_n \leq L_{sup} \\ L_{inf}, & \text{se } u_n < L_{inf} \end{cases} \quad (2.257)$$

Em que:

y_n É o valor de saída atual do bloco

L_{sup} e L_{inf} São os limites superior e inferior, respectivamente

u_n Valor de entrada atual do bloco

O **Limitador de taxa** tem a função de restringir a taxa de crescimento ou decaimento de um sinal de controle. A taxa (r) é calculada de acordo com a equação (2.258):

$$r = \frac{u_n - y_{n-1}}{h} \quad (2.258)$$

Em que:

- u_n É a entrada atual do bloco
 y_{n-1} Valor de saída anterior do bloco
 h Passo de integração

Obtida a taxa, o bloco irá resultar em um valor calculado pelas seguintes condições:

$$y_n = \begin{cases} h \cdot R_{cre} + y_{n-1}, & \text{se } r > R_{cre} \\ u_n, & \text{se } R_{dec} \leq r \leq R_{cre} \\ h \cdot R_{dec} + y_{n-1}, & \text{se } r < R_{dec} \end{cases} \quad (2.259)$$

Em que:

R_{cre} e R_{dec} São as taxas de crescimento e decaimento, respectivamente

A **Função Transferência** é um importante bloco elementar e essencial em um sistema de controle, visto que esse componente possibilita a representação de sistemas dinâmicos por meio de equações algébricas no domínio da frequência [73]. Após a inserção da função transferência pelo usuário, o programa a transforma na representação em espaço de estado, visto que sua solução é sistemática tornando-a, assim, mais eficiente computacionalmente.

Dada uma função transferência genérica abaixo:

$$\frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_0 p^k + b_1 p^{k-1} + \dots + b_{k-1} p + b_k}{p^k + a_1 p^{k-1} + \dots + a_{k-1} p + a_k} \quad (2.260)$$

A transformação em espaço de estado na forma canônica controlável ficará da seguinte forma [73]:

$$\begin{bmatrix} p x_1 \\ p x_2 \\ \vdots \\ p x_{k-1} \\ p x_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_k & -a_{k-1} & -a_{k-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{k-1} \\ x_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_n \quad (2.261)$$

$$y_n = [(b_n - a_n b_0) \quad (b_{n-1} - a_{n-1} b_0) \quad \dots \quad (b_1 - a_1 b_0)] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} + b_0 u_n \quad (2.262)$$

A equação diferencial matricial (2.261) é resolvida pelo método Trapezoidal Implícito, utilizando a equação (2.214). Um processo iterativo é realizado até que o erro entre os cálculos se torne menor que uma tolerância pré-estipulada e caso as iterações se tornem excessivas, ultrapassando um número máximo definido pelo usuário, o processo é interrompido com erro. Com os valores do vetor de estado (\mathbf{x}) calculados obtém-se o valor da saída do bloco (y_n) por (2.262).

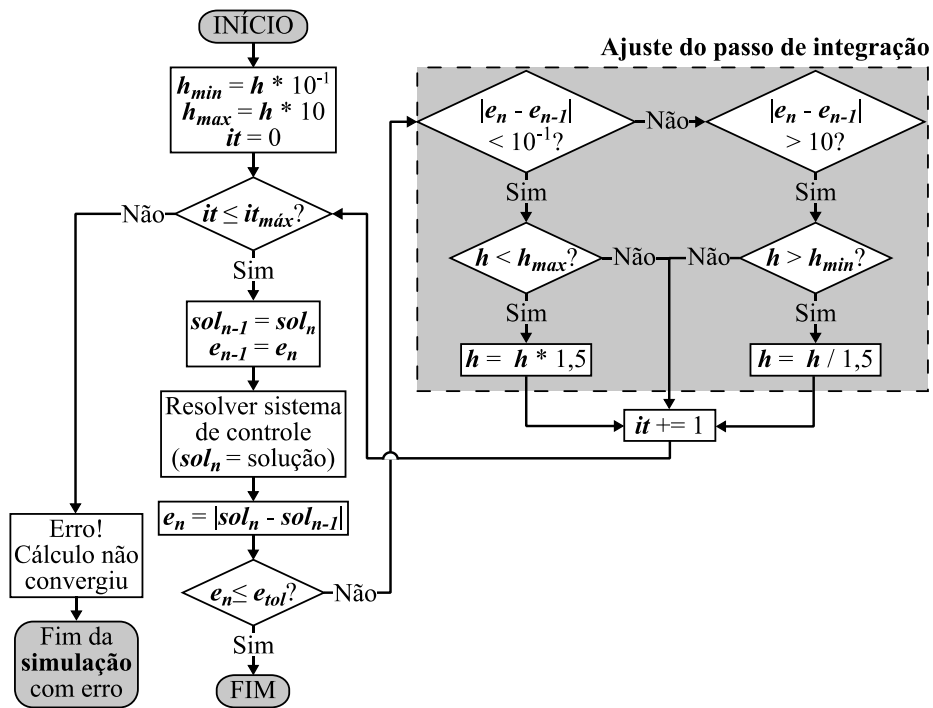
2.7.1 Inicialização

Caso as entradas do sistema de controle apresentem valores diferentes de zero ou a primeira operação entre elas não resulte em uma saída nula, o sistema necessita de inicialização, de forma a adequar os valores de entradas e saída dos blocos elementares e dos vetores de estado das funções transferências presentes. Tal procedimento é realizado por meio da solução de toda rede de controle até que se obtenha sua convergência, ou seja, a diferença absoluta entre as mesmas saídas de uma solução anterior e uma atual deve ser nula ou muito próxima de zero.

Para otimizar e melhorar a estabilidade do processo de inicialização utilizou-se um passo de integração variável dentro de limites, de forma que o passo aumenta em condições de diferenças menores entre as soluções do sistema de controle e diminui caso essa diferença se torne elevada. A implementação dessa abordagem reduziu significativamente o encerramento do processo com erro causado pela instabilidade numérica, além de acelerar a inicialização.

A Figura 2.33 evidencia o processo de inicialização implementado no *software*.

Figura 2.33 – Estrutura da inicialização do sistema de controle



Fonte: Autoria própria.

3 O PROGRAMA PSP-UFU

3.1 Considerações iniciais

O programa desenvolvido nesse trabalho foi batizado de Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia (PSP-UFU), o qual proporciona ao usuário uma aplicação integrada para estudos de fluxo de carga, curto-circuito e estabilidade transitória. O *software* tem a intuito de servir como ferramenta para **educação, pesquisa** e a **engenharia prática**.

Para isso várias características necessárias foram consideradas durante o desenvolvimento do programa, dentre elas são destacadas:

- **Software livre e de código aberto**, em que todo o código fonte é disponibilizado de maneira pública com a possibilidade de sua modificação e inclusão de novos estudos e ferramentas. Tal característica é importante na pesquisa acadêmica e desenvolvimento de novas tecnologias, como foi discutido na seção 1.3.2. Também se preocupou com a utilização de uma licença compatível com tal filosofia, além da utilização de um *framework*, ferramentas e bibliotecas que compartilham a mesma ideologia.
- **Interface gráfica intuitiva e amigável**, com a disponibilidade de criação de redes elétricas de potência e diagramas de controle genéricos por meio de ferramentas CAD. Foram desenvolvidos, além dos formulários de inserção e dados, mecanismos para modificação, inclusão e exclusão dos elementos gráficos, como: inserir, remover, mover, girar, editar dados, desfazer/refazer, copiar, colar, etc. Os dados de saída dos cálculos estáticos, como fluxo de carga e curto-circuito, são apresentados em formulários tabulares e em elementos gráficos na tela de construção da rede de potência; e para resultados no domínio do tempo foi implementado um visualizador de gráficos integrado.
- **Multiplataforma**, proporcionando aos usuários a utilização do *software* nos principais sistemas operacionais: Windows, Linux e macOS. Atualmente já existem versões totalmente funcionais para Windows e distribuições Linux

baseadas em Debian (ex.: Debian, Ubuntu, Mint), ainda com a possibilidade de compilação para macOS com poucas ou nenhuma alteração no código fonte. Logo, utilizou-se um *framework* de criação de GUIs livre, denominado wxWidgets [74][75], que possibilita a criação de interfaces gráficas nativas utilizando o mesmo código fonte.

- **Arquitetura de *Software* padrão**, imprescindível no desenvolvimento de projetos complexos e interdisciplinares, com o objetivo, no contexto desse trabalho, de definir e separar conceitos, permitindo a reutilização do código de forma eficiente e desenvolvimento simultâneo por vários programadores. O padrão MVC (Modelo-Visão-Controlador, do inglês *Model-View-Controller*) foi escolhido nessa aplicação, uma vez que é bem estabelecido e desenvolvido para programas com a presença de interface gráfica [76]. Essa abordagem também facilita a inclusão de novos desenvolvedores no projeto.
- **Independência de programas de terceiros**, característica necessária em um FOSS, permitindo a modificação de qualquer aspecto do programa.
- **Desenvolvimento em camadas de abstração**, ou seja, não é necessário necessariamente alterar o código fonte para desenvolver novos elementos. Por meio da interface gráfica, principalmente pela utilização do editor de elementos de controle, é possível modelar elementos dinâmicos no estudo de estabilidade. Atualmente, o desenvolvimento de novos elementos sem alteração do código existe somente com a utilização de variáveis relacionadas às máquinas síncronas, porém, como trabalho futuro, será implementado um elemento genérico cujo comportamento dinâmico é implementado em diagrama de blocos.

Nas seções seguintes são apresentadas tais características em detalhes.

3.2 Ferramentas computacionais

Nessa seção são apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas no desenvolvimento do *software*. Um grande número de ferramentas de código aberto e publicadas sob licenças que permitem o seu livre acesso foram desenvolvidas e continuam a ser mantidas por programadores. Durante a criação do *software* diversas dessas ferramentas foram utilizadas, visto que tal prática poupa tempo de desenvolvimento, além de tais códigos serem otimizados,

aperfeiçoados e exaustivamente testados, evitando comportamentos inesperados no programa (*bugs*).

3.2.1 Linguagem de programação

A linguagem de programação escolhida foi o C++, a qual possui as seguintes características principais [77]: grande número de referências em livros e *online*; biblioteca padrão (std) livre e bem estabelecida; possui paradigma de programação orientada a objetos (POO), utilizado no desenvolvimento do PSP-UFU; abstração de dados; programação genérica e permite o desenvolvimento multiplataforma, uma vez que suporta compiladores em vários sistemas operacionais.

A padronização do C++ é periodicamente atualizada, sendo atualmente definida pela norma ISO/IEC 14882:2017 [78], padrão conhecido informalmente como C++17. Com isso a linguagem de programação não se torna obsoleta, uma vez que novas soluções são implementadas na biblioteca std.

Sua biblioteca padrão amplia bastante as funcionalidades dessa linguagem, uma vez que oferece várias facilidades ao programador, como: suporte às características de linguagem, por exemplo o gerenciamento de memória, estruturas especiais de repetição e informação de tipo em tempo de execução (RTTI, do inglês *Run-Time Type Information*); operações primitivas que não são eficientemente implementadas utilizando C++; tipos de dados abstratos (*containers*) e métodos que os manipulam (STL, do inglês *Standard Template Library*); formas de generalização da linguagem, entre outras [77]. Em especial as STL e RTTI foram amplamente utilizadas nesse trabalho.

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 se tem o conceito de herança, o que permite a uma classe herdar comportamentos (métodos) e características (atributos) de outra classe.

Esse paradigma de programação permite o desenvolvimento de programas grandes e complexos, que podem ser combinados, modificados ou ampliados facilmente e, ainda, possibilita a reutilização de códigos preexistentes no desenvolvimento de novas aplicações [20]. Em sistemas de potência, alguns modelos de projetos orientados a objetos são sugeridos na literatura, a exemplo de [79], cujo padrão de organização modular inspirou a estrutura do PSP-

UFU, explanado na seção 3.3.1. Ainda em [79] realizou-se o desenvolvimento do cálculo de fluxo de carga em C++ utilizando POO e os resultados de tempo de processamento foram comparados à implementações em linguagens de paradigmas procedurais Pascal e FORTRAN, em que foi observada uma equivalência ou melhora na eficiência computacional.

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 “Máquina síncrona”, que possui um atributo “Dados elétricos” (onde estão presentes todos os parâmetros e estados da máquina síncrona organizados em uma estrutura de dados) modificada somente pelo método “Definir dados elétricos” e também herda atributos e métodos comuns de outros componentes da rede elétrica por meio de uma classe-mãe chamada “Elementos de potência”.

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 (STL *container*).

3.2.2 Framework e bibliotecas utilizadas

Um *framework* é um conjunto de classes cooperativas que implementam mecanismos essenciais em um domínio específico, provendo uma funcionalidade genérica. Para o desenvolvimento da interface gráfica utilizou-se o *framework* wxWidgets, além do OpenGL, API (Interface de Programação de Aplicações, do inglês *Application Programming Interface*) gráfica 2D e 3D mais comumente utilizada na indústria [80].

Outras bibliotecas, além da std do C++, desenvolvidas por terceiros, também foram empregadas no PSP-UFU para diversas outras aplicações: o RapidXml [81], analisador de arquivos no padrão XML (*eXtensible Markup Language*); o Function Parser [82], que analisa e calcula funções matemáticas a partir de uma cadeia de caracteres (*string*); e o wxMathPlot [83], que é uma biblioteca para adicionar funcionalidade de plotagem científica 2D ao wxWidgets.

Todas as ferramentas computacionais utilizadas são distribuídas utilizando a licença GNU GPL v2 ou licenças compatíveis [84].

3.2.2.1 wxWidgets

Com seu desenvolvimento iniciado em 1992, o 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 [74][75].

Como foi dito anteriormente, o wxWidgets tem natureza multiplataforma, permitindo ao desenvolvedor publicar aplicações em vários sistemas operacionais utilizando o mesmo código fonte com pouca ou nenhuma modificação. 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 [75].

O *framework* é distribuído sob a licença “wxWindows Library” versão 3.1, compatível com a GNU GPL v2 [74].

3.2.2.2 OpenGL

O *Open Graphics Library* (OpenGL) é uma API (Interface de Programação de Aplicativos, do inglês *Application Programming Interface*) multiliguagem e multiplataforma para renderização elementos gráficos vetoriais 2D e 3D [80]. Essa API permite a interação do *software* com a GPU (Unidade de Processamento Gráfico, do inglês *Graphical Processing Unity*), otimizando significativamente a renderização gráfica em computadores com tal unidade, chamada de aceleração de *hardware*.

Um API é um conjunto de métodos, padrões e ferramentas para construção de uma aplicação de forma mais simples, abstraindo a implementação básica e somente expondo ao desenvolvedor os objetos e ações que ele necessita.

No *software* desenvolvido nesse trabalho, o OpenGL foi utilizado para renderização dos elementos e ferramentas CAD (elementos elétricos e de controle, além das ferramentas de edição). De forma geral esses elementos gráficos são vetoriais, com exceção dos textos, os quais são renderizados como texturas.

Desenvolvedores de programas são livres de requisitos de licenças, uma vez que o código fonte do OpenGL é disponibilizado somente aos desenvolvedores de *hardware* (AMD/ATI, Intel, Nvidia, etc.), os quais fornecem as bibliotecas compiladas juntamente com os *drivers* das unidades gráficas [80].

3.2.2.3 RapidXml

Segundo seus desenvolvedores [81], a biblioteca RapidXml é uma tentativa de criar o analisador de arquivos XML mais rápido possível, enquanto mantém usabilidade, portabilidade e razoável compatibilidade com o W3C (*World Wide Web Consortium*, um consórcio internacional que trabalha no desenvolvimento de padrões na Web). O RapidXml é um analisador *in-situ*, ou seja, não são realizadas cópias das *strings* do arquivo, e sim são alocados ponteiros no interior do texto fonte, permitindo uma análise muito rápida.

O XML é uma linguagem de marcação, padronizada pelo W3C, para codificar documentos em um formato que pode ser lido tanto por humanos quanto por máquina. Além dos metadados, três estruturas básicas são presentes no arquivo XML:

- Tag, marcação de construção que inicia com `<` e termina com `>`. Existem três tipos de tags:
 - tag de início, por exemplo o início das propriedades elétricas de um componente de potência: `<ElectricalProperties>`;
 - tag de fim, por exemplo o fim da definição das propriedades elétricas de um componente de potência: `</ElectricalProperties>`;
 - tag vazia, por exemplo um sistema de potência sem capacitores cadastrados em uma lista: `<CapacitorList />`;
- Elemento, estrutura que inicia e termina com tags, por exemplo o nome de uma linha elétrica: `<Name>Linha_1</Name>`. Um elemento pode conter outros elementos aninhados, chamados de elementos filho;
- Atributo, que consiste no formato nome e valor inseridos na tag de início, o qual normalmente consistem em metadados da sua tag. Por exemplo, informação sobre resistência e a identificação de sua unidade na forma de atributo:
`<Resistance UnitID="1">0.08</Resistance>`.

No PSP-UFU, o RapidXml é usado para gravar e carregar todos os dados de um projeto no disco no padrão XML: metadados do projeto, propriedades gráficas e de simulação, dados

gráficos e elétricos dos elementos de potência e dados gráficos e específicos dos elementos de controle. A seguir é apresentado um exemplo de como um elemento elétrico (capacitor) é gravado no disco utilizando o RapidXml:

```
<Capacitor ID="6">
  <CADProperties>
    <Position>
      <X>679.000000000000</X>
      <Y>438.750000000000</Y>
    </Position>
    <Size>
      <Width>40.000000000000</Width>
      <Height>30.000000000000</Height>
    </Size>
    <Angle>0.000000000000</Angle>
    <NodePosition>
      <X>785.000000000000</X>
      <Y>338.750000000000</Y>
    </NodePosition>
    <ParentID>5</ParentID>
  </CADProperties>
  <ElectricalProperties>
    <IsOnline>1</IsOnline>
    <Name>Capacitor</Name>
    <ReactivePower UnitID="13">100.000000000000</ReactivePower>
    <SwitchingList/>
  </ElectricalProperties>
</Capacitor>
```

O RapidXml é distribuído com duas licenças, escolhida a critério do usuário e ambas compatíveis com GNU GPL v2: *Boost Software License* - versão 1.0 e *MIT License* [81].

3.2.2.4 Function parser

O Function parser, ou fparser, tem a finalidade de calcular funções matemáticas a partir de uma *string* durante a execução do programa, cuja sintaxe da função é similar a expressões matemáticas escritas em C/C++. Essa biblioteca visa ser rápida na avaliação e cálculo, além de manter a portabilidade. Diferentes tipos numéricos são suportados: **double**, **float**, **long double**, **long int**, **std::complex**, entre outros. Outro aspecto interessante da biblioteca é a possibilidade do programa apontar o tipo de erro de sintaxe (falta de parênteses, identificadores desconhecidos, ausência de operadores, etc.) na expressão inserida pelo usuário, além de indicar o local próximo ao erro, auxiliando na sua correção [82].

No PSP-UFU, essa biblioteca é utilizada no bloco de controle chamado “Expressão Matemática”, que permite ao usuário inserir expressões matemáticas genéricas de qualquer complexidade combinadas a estruturas condicionais em um diagrama de controle, aumentando significativamente a capacidade de generalização do programa para construção de diagramas de bloco.

As sintaxes das operações (para expressões A e B) são apresentadas na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Operadores da biblioteca fparser utilizados no bloco de controle de Expressão Matemática

Operador	Descrição
()	Expressão em parênteses primeiro
$A \text{ unit}$	Um multiplicador de unidade (se um estiver sido adicionado)
A^B	Exponenciação (A elevado à potência B)
$-A$	Operação unária de oposto
$!A$	Operação lógica unária de negação (resulta em 1 se $\text{int}(A)$ é 0, senão 0)
$A*B$ A/B $A\%B$	Multiplicação, divisão e módulo
$A+B$ $A-B$	Adição e subtração
$A=B$ $A<B$ $A<=B$ $A!=B$ $A>B$ $A>=B$	Comparação entre A e B (resulta em 1 ou 0)
$A\&B$	Resulta em 1 se $\text{int}(A)$ e $\text{int}(B)$ forem diferentes de 0, senão 0
$A B$	Resulta em 1 se $\text{int}(A)$ ou $\text{int}(B)$ forem diferentes de 0, senão 0

Fonte: NIEMINEN, J.; YLILUOMA, J. [82].

As funções matemáticas suportadas pela biblioteca, as quais podem ser utilizadas na construção de diagrama de blocos, são descritas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Funções da biblioteca `fparsner` utilizados no bloco de controle de Expressão Matemática

Expressão	Descrição
<code>abs(A)</code>	Valor absoluto de A . Para números reais, se A é negativo, retorna $-A$, senão retorna A . Para números complexos a expressão é equivalente a <code>hypot(real(x), imag(x))</code> .
<code>acos(A)</code>	Arco cosseno de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>acosh(A)</code>	O mesmo que <code>acos()</code> mas para cosseno hiperbólico
<code>arg(A)</code>	Ângulo de fase de um número complexo A .
<code>asin(A)</code>	Arco seno de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>asinh(A)</code>	Mesmo que <code>asin()</code> mas para seno hiperbólico
<code>atan(A)</code>	Arco tangente de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>atan2(A, B)</code>	Arco tangente de A/B , a qual os sinais dos dois argumentos para determinar o quadrante do resultado. Retorna a solução de do seguinte sistema: <code>hypot(A, B) * sin(x) = A</code> , <code>hypot(A, B) * cos(x) = B</code> . O valor retornado varia de $-\pi$ a π .
<code>atanh(A)</code>	Mesmo que <code>atan()</code> mas para tangente hiperbólica.
<code>cbrt(A)</code>	Raiz cúbica de A .
<code>conj(A)</code>	Conjugado complexo de A .
<code>ceil(A)</code>	Teto de A . Arredonda para o próximo maior inteiro.
<code>cos(A)</code>	Cosseno de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>cosh(A)</code>	Mesmo que <code>cos()</code> mas para cosseno hiperbólico
<code>cot(A)</code>	Cotangente de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>csc(A)</code>	Cossecante de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>exp(A)</code>	Exponencial de A . Retorna o valor de e elevado a potência A .
<code>exp2(A)</code>	Exponencial de A na base 2.
<code>floor(A)</code>	Piso de A . Arredonda para o próximo menor inteiro.
<code>hypot(A, B)</code>	Função de distância Euclidiana.
<code>if(A, B, C)</code>	Se <code>int(A)</code> é diferente de 0, retorna o valor de B , senão retorna C .
<code>imag(A)</code>	Retorna a parte imaginária do número complexo A .
<code>int(A)</code>	Arredonda A para o inteiro mais próximo.
<code>log(A)</code>	Logaritmo natural (base e) de A .
<code>log2(A)</code>	Logaritmo na base 2 de A .
<code>log10(A)</code>	Logaritmo na base 10 de A .
<code>max(A, B)</code>	Se $A > B$, o resultado é A , senão é B .
<code>min(A, B)</code>	Se $A < B$, o resultado é A , senão é B .
<code>polar(A, B)</code>	Retorna o número complexo de magnitude A e ângulo de fase B (em radianos).
<code>pow(A, B)</code>	Exponenciação (A elevado à potência B)
<code>real(A, B)</code>	Retorna a parte real do número complexo A .
<code>sec(A)</code>	Secante de A .
<code>sin(A)</code>	Seno de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>sinh(A)</code>	Mesmo que <code>sin()</code> mas para seno hiperbólico.
<code>sqrt(A)</code>	Raiz quadrada de A .
<code>tan(A)</code>	Tangente de A . Retorna o ângulo em radianos.
<code>tanh(A)</code>	Mesmo que <code>tan()</code> mas para tangente hiperbólica.
<code>trunc(A)</code>	Valor truncado de A . Retorna o número inteiro de A sem a parcela fracionada.

Fonte: NIEMINEN, J.; YLILUOMA, J. [82].

O `fparser` permite, ainda, atribuir novas variáveis utilizando a seguinte sintaxe:

```
“<nome da variável> := <expressão>; <função>”.
```

Por exemplo:

```
“comprimento := sqrt(x*x+y*y); 2*comprimento*sin(comprimento)”.
```

A biblioteca é distribuída sob a *Lesser General Public License* (LGPL) versão 3 [82].

3.2.2.5 *wxMathPlot*

Essa biblioteca permite inserir a funcionalidade de impressão de funções matemáticas, dados de amostra e genéricos ao `wxWidgets`, possuindo ferramentas de edição, navegação e exportação dos gráficos [83]. Devido a sua simplicidade e documentação extensa foi possível modificar a biblioteca para atender aos requisitos do PSP-UFU, permitindo ao usuário uma fácil visualização dos resultados das simulações dinâmicas desenvolvidas no programa.

Assim como o `wxWidgets`, o `wxMathPlot` é publicado sob a licença “`wxWindows Library`”.

3.3 Arquitetura de *software*

Arquitetura de *software* é um nível de *design* que vai além dos algoritmos das estruturas de dados, em que as seguintes questões são envolvidas: organização total e estrutura de controle global; protocolos de comunicação, sincronização e acesso a dados; atribuição das funcionalidades de elementos do projeto; distribuição física dos arquivos; a conciliação entre os elementos de *design*; e seleção das alternativas do projeto [85].

Uma arquitetura de projeto de *software* padrão fornece soluções genéricas para problemas de *design* recorrentes, oferecendo materiais de referência, os quais permitem aos desenvolvedores acesso ao conhecimento sistemático no campo de estudo [86]. A utilização dessa estratégia facilita a compreensão das estruturas do código fonte e permite o seu desenvolvimento e solução de problemas realizada simultaneamente por vários programadores.

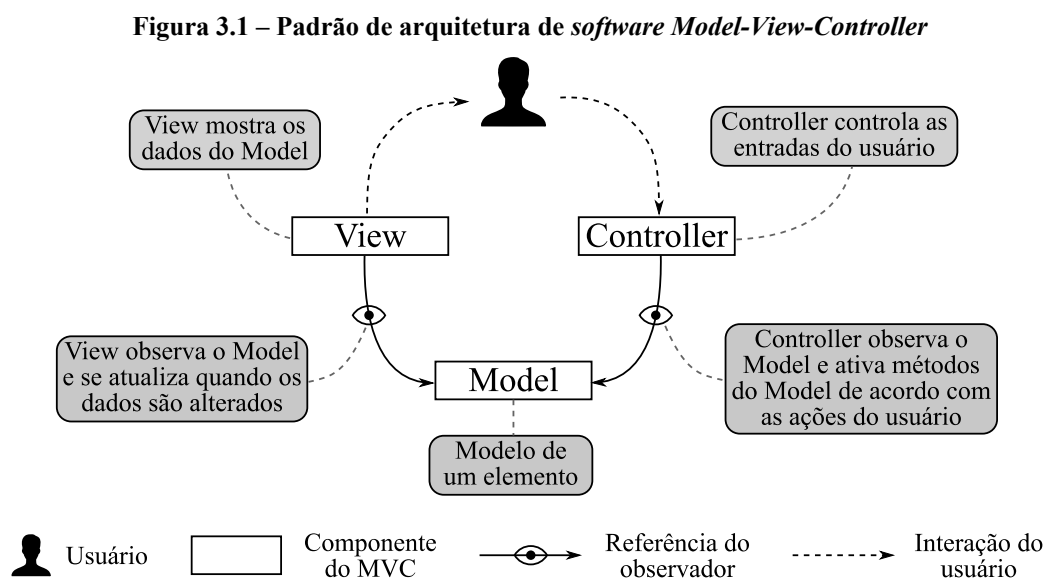
Em [87] são descritos alguns padrões de projeto para programas que necessitam de interface gráfica, baseados na filosofia de separação de conceitos: MVC (*Model-View-Controller*), MVVM (*Model-View-View Model*) e MVP (*Model-View-Presenter*). O MVC foi

escolhido como padrão para o PSP-UFU pela sua clara separação de conceitos, originalmente desenvolvida para aplicações *desktop* com rica interface gráfica e vasta documentação disponível.

Documentado no final da década de 80 e originalmente desenvolvido para o *software* Smalltalk, o MVC define três conceitos distintos [87]:

- *Model* que consiste nos dados do elemento de *design* e os métodos que os manipula;
- *View* são as saídas de representação dos dados exibidas ao usuário, como formulários, tabelas, diagramas e gráficos;
- *Controller* processa a interação do usuário com o programa.

A Figura 3.1 ilustra a interação entre os conceitos acima apresentados e o usuário:



Fonte: Adaptado de SYROMIATNIKOV, A.; WEYNS, D [87].

Seguindo a filosofia do MVC e o paradigma de programação de orientação a objetos, foi criada a arquitetura do PSP-UFU, cuja sua estrutura é exibida na sequência.

3.3.1 Estrutura do PSP-UFU

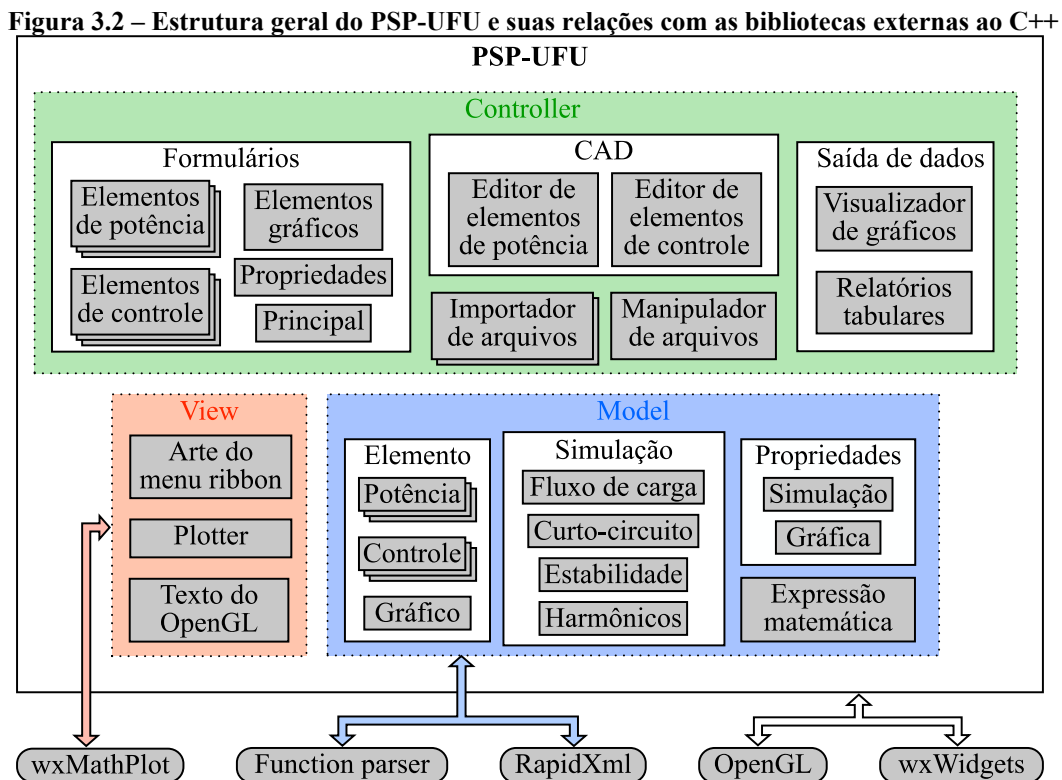
O programa é dividido de uma forma geral seguindo a estratégia MVC, além da criação de submódulos dentro de cada um dos módulos principais e organizados de acordo com classes com objetivos similares.

Em *Model* estão as classes relativas aos elementos elétricos, de controle e gráfico, cálculos elétricos e o analisador de expressões matemáticas (utilizando o *fparser*). Esse módulo define o comportamento de seus componentes frente às ações do *Controller*.

O *Controller*, responsável por obter as entradas dos usuários e ativar os métodos do *Model*, reúne os formulários para edição de dados dos elementos elétricos, de controle, gráfico, propriedades, além do formulário principal do programa e saída de dados (visualizador de gráficos e relatórios tabulares). Também possui os editores CAD de elementos de potência e controle, importadores de arquivos gravados por outros programas e o manipulador dos arquivos de projeto do PSP-UFU.

No *software* desenvolvido nesse trabalho o módulo *View* é implementado em quase sua totalidade utilizando as APIs de criação de GUI do *wxWidgets* (os quais não são evidenciados na Figura 3.2, pois estão inseridas no *framework*), porém algumas classes auxiliares foram desenvolvidas: arte do menu *ribbon*, a implementação do *wxMathPlot* no programa (*Plotter*) e uma API de texto em para ser utilizado em *OpenGL*.

A Figura 3.2 resume a estrutura geral do PSP-UFU destacando os módulos do MVC e os principais submódulos, além da interação com as bibliotecas externas, APIs e *framework*.



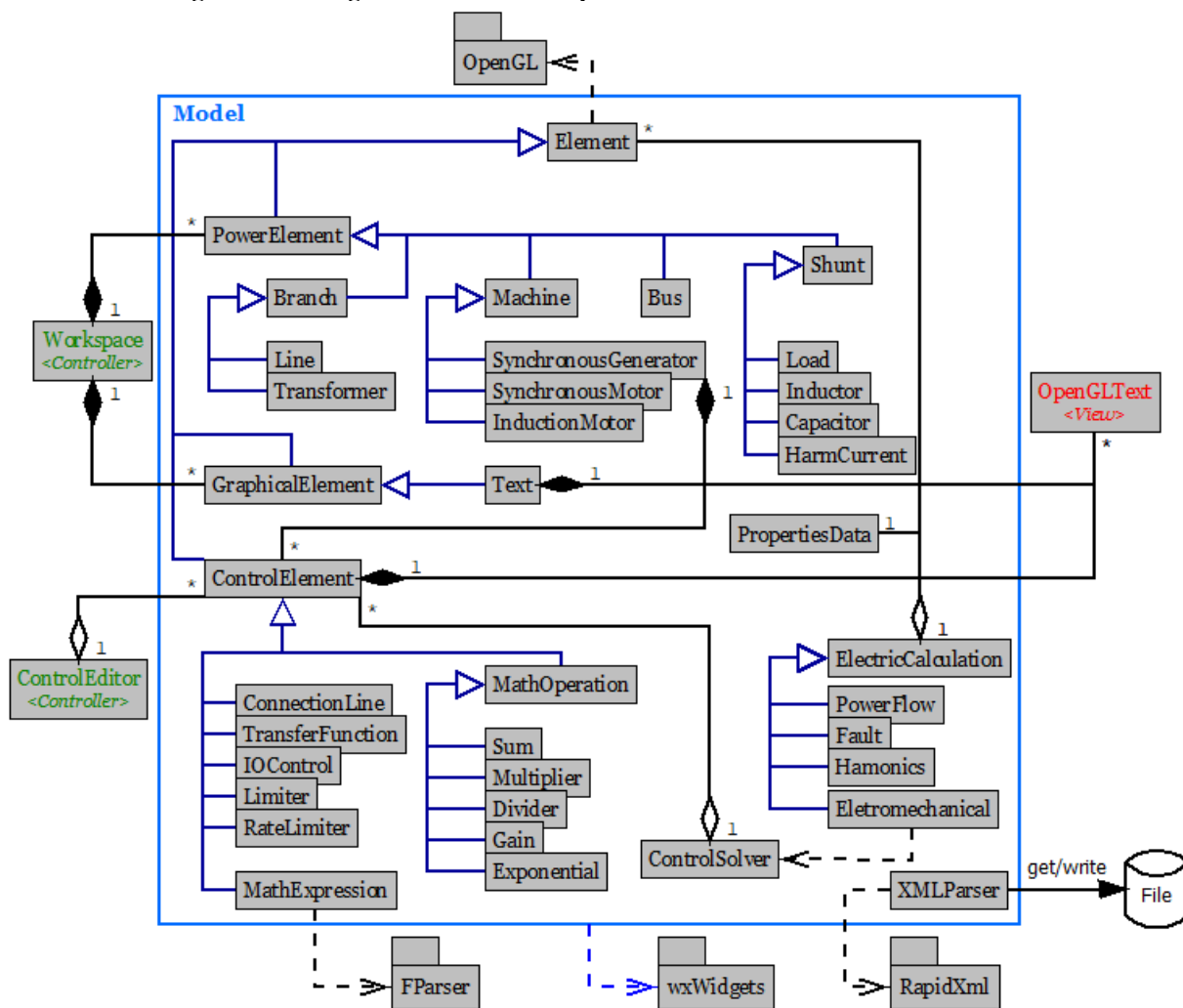
Fonte: Autoria própria.

Nota-se pela Figura 3.2 que o *framework* wxWidgets e o API OpenGL são utilizados por todos os módulos do programa. Com exceção do *View*, os demais módulos possuem um número maior de classes e são melhor explanados na sequência.

3.3.1.1 Módulo Model

Um diagrama de classes simplificado desse módulo é apresentado na Figura 3.3:

Figura 3.3 – Diagrama de classes simplificado do módulo *Model* do PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

As classes foram criadas de forma a agrupar as características comuns, visto que o paradigma de orientação a objetos permite a herança de métodos e atributos de classes mães e tal estratégia facilita na inserção de novos códigos e a sua reutilização. Um desenvolvedor pode

explorar essa estratégia para a incorporação de um novo código no programa, por exemplo: para a inclusão de uma nova classe ainda não existente que determina as características de um gerador de indução é necessário seguir alguns passos simples: a nova implementação herdaria a classe *Machine*, a qual já lida com todas as ações do usuário por meio do módulo *Controller* (clicar, arrastar, deletar, etc.), a nova classe deve conter somente os dados elétricos de um gerador de indução e o símbolo gráfico que deverá aparecer na tela; o comportamento estático nas simulações do novo componente é definido nas classes *Fault* e *PowerFlow*, enquanto o comportamento dinâmico deve ser implementado em *Eletromechanical*. Além disso vários outros métodos já implementados podem ser facilmente utilizados (no caso do exemplo de classes como *Element* e *ElectricCalculation*), uma vez que o programa dispõe de uma documentação bem estruturada (seção 3.3.2).

Na sequência são descritas as principais classes do módulo:

PowerElement

Classe responsável por gerenciar todos os elementos de potência do sistema: barramento, linhas, transformador, carga, indutor, capacitor, geradores e motores síncronos e motores de indução. Ela herda os métodos e atributos da classe base abstrata *Element*, a qual define o comportamento geral de um componente do PSP-UFU. Em suas classes filhas são implementadas as particularidades desse tipo de elemento, como propriedades gráficas (como o elemento será exibido ao usuário) e atributos elétricos. Essa classe abstrata compõe todos os elementos CAD do diagrama unifilar de potência.

GraphicalElement

Classe abstrata, também derivada de *Element*, dos elementos gráficos exibidos em conjunto com o diagrama unifilar de potência, auxiliando na exibição de informações adicionais, como resultados do fluxo de carga e de falta. Atualmente a sua única implementação por meio de *Text* utiliza um elemento do módulo *View* (*OpenGLText*) para exibir no contexto do OpenGL sequências de caracteres em forma de texturas.

ControlElement

Assim como *PowerElement* e *GraphicalElement*, essa classe é derivada de *Element* e tem como função o gerenciamento dos elementos de controle do programa: função transferência, entradas e saídas (*IOControl*), limitador de valor e limitador de taxa, somadores,

multiplicador, divisos, ganho, função exponencial, expressão matemática (utilizando *FParser*) e linhas de conexão, componente que associa as entradas e saídas desses elementos derivados. Assim como a *Text*, essa classe utiliza o elemento do módulo *View OpenGLText* para exibir dados essenciais no diagrama de controle, como a função transferência, valores de ganhos e constantes, além de texto para identificação das entradas e saídas.

ControlSolver

Para resolver a rede de controle genérica criada pelo usuário desenvolveu-se essa classe. Ela lida com a inicialização e gerenciamento da solução (a solução de cada componente é realizada por métodos implementados nos elementos de controle). É possível resolver qualquer rede de controle genérica com múltiplas entradas e múltiplas saídas, ou sistema MIMO (do inglês, *Multi-Input Multi-Output*), flexibilizando o programa para criação de sistemas mais complexos.

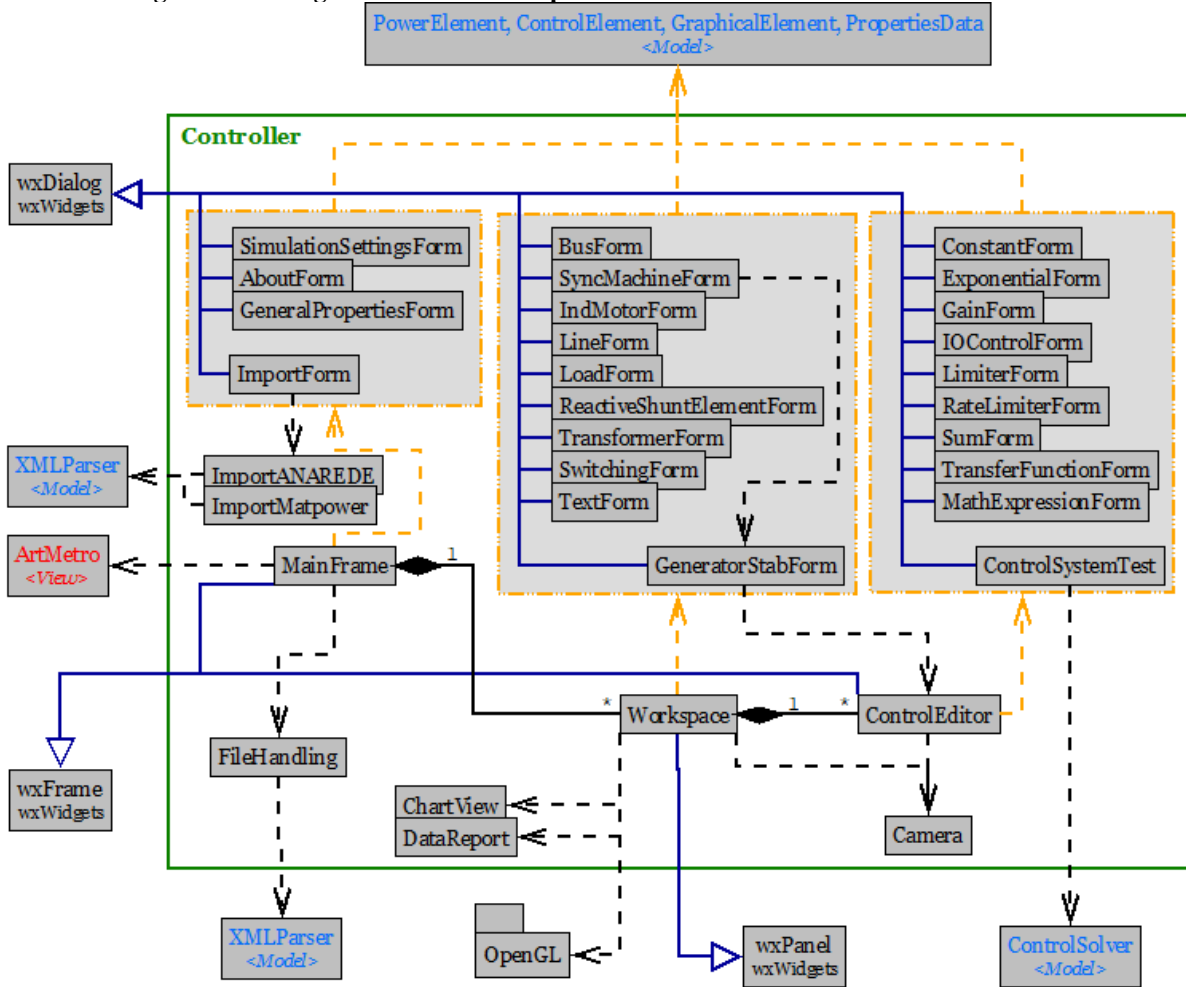
ElectricCalculation

Essa classe é responsável pelas simulações do PSP-UFU: fluxo de carga, curto-circuito, harmônicos e estabilidade. Foram aqui implementadas as modelagens matemáticas e soluções numéricas apresentadas no capítulo 2. Ela utiliza os dados dos elementos de potência e controle, além das propriedades elétricas do sistema inseridos pelo usuário para a realização dos cálculos. Além disso é utilizada a classe *ControlSolver* no cálculo de estabilidade (*Eletromechanical*) para solução no tempo dos regulares de tensão e velocidade dos geradores síncronos.

3.3.1.2 Módulo Controller

O diagrama de classes simplificado do módulo *Controller* é apresentado na Figura 3.4, cujas associações não representadas nesse diagrama são apresentadas no diagrama do módulo *Model*.

Figura 3.4 – Diagrama de classes simplificado do módulo *Controller* do PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

As principais classes do módulo *Controller* são descritas na sequência:

MainFrame

O *MainFrame*, como o próprio nome sugere, é a janela principal do programa, a qual permite ao usuário o acesso às ferramentas de criação, edição e modificação dos projetos, além dos recursos de simulação. Essa classe pode conter várias instâncias de projeto (*Workspace*), exibidas ao usuário por meio de abas e/ou janelas. As configurações gerais e propriedades de simulação são acessadas por essa janela, além de informações gerais sobre o *software* (*AboutForm*) e acesso à importação de arquivos originados de outros programas, apresentados na forma de formulários de dados.

Workspace

Essa classe é responsável por gerenciar os elementos gráficos e de potência exibidos, capturando as ações do usuário por eventos de mouse e teclado, os quais ativam os métodos das classes do *Model* necessários para concretizar tais ações e, conseqüentemente, altera os dados e visualização dos elementos. Ela permite a inserção, edição, manipulação e exclusão desses componentes, além da interação do usuário com o restante do programa, acessando os formulários de edição de dados e, portanto, administrando todo o projeto criado.

Uma classe auxiliar, denominada *Camera*, foi desenvolvida com o intuito de modular as ações do usuário de controle da visualização do circuito com algoritmos bem elaborados e otimizados, como arrastar e escalar. Essa estratégia se mostrou eficiente, uma vez que o código implementado pode ser reutilizado por qualquer classe de coordenação de objetos gráficos, como foi empregado no editor de elementos de controle do PSP-UFU (*ControlEditor*).

Todos os elementos são exibidos em uma tela gerenciada pelo wxWidgets utilizando o OpenGL (*wxGLCanvas*), permitindo explorar todas as vantagens promovidas por esse API gráfico.

Formulários

Todas as classes com o sufixo “*Form*” em seu nome são formulários de edição de dados. São estruturas pertencentes à GUI, com objetivo de validar e editar os dados dos elementos do programa, propriedades gerais e de simulação, além de parametrizar testes de sistemas de controle.

ImportForm

É possível importar os dados de outros programas no *software* desse trabalho com a utilização dessa classe em conjunto com outras classes auxiliares.

Os dados dos circuitos criados no Anarede [21] podem ser importados com auxílio da classe *ImportAnarede*. São analisados os dados dos dois arquivos gerados pelo programa do Cepel: os arquivos de dados gráficos *.lst* e dados elétricos *.pwf*, e então são adaptados para o PSP-UFU. Uma vez que alguns elementos existentes no Anarede ainda não foram implementados no PSP-UFU, alguns arquivos serão importados de forma incompleta, porém a portabilidade se mostrou satisfatória, pois grande parte dos componentes elétricos já foram criadas.

Também é possível importar qualquer arquivo de dados, criado ou convertido, do programa Matpower [44] no PSP-UFU. Como o Matpower não possui recursos GUI, o diagrama de potência é gerado automaticamente no PSP-UFU com bons resultados, usando técnicas de teoria de grafos iterativas. Maiores detalhes são apresentados na seção 3.4.1.2.

SwitchingForm

Esse formulário permite editar o chaveamento de elementos no cálculo de estabilidade, possibilitando ao usuário inserir, remover e editar quaisquer quantidades de chaveamentos daquele componente de potência.

ControlEditor

De forma similar a *Workspace*, essa classe gerencia os elementos de controle observando os eventos de mouse e teclado acionados pelo usuário. O *ControlEditor* possui as mesmas ferramentas de gerenciamento dos elementos de potência, permitindo a inserção, edição, manipulação e exclusão de cada componente do sistema de controle. Como já mencionado, a solução da rede criada é realizada pela classe *ControlSolver*.

Ainda nesse editor, testes no sistema de controle podem ser processados por meio de um formulário chamado *ControlSystemTest*, cujas entradas do sistema são definidas (tipo e magnitude), além do tempo de simulação e passo de integração. Os resultados finais são exibidos em gráficos no tempo.

FileHandling

Os projetos criados pelos usuários são gravados e resgatados no disco em arquivos estruturados no formato XML, analisados por essa classe. Ela utiliza de uma API criada da implementação da biblioteca RapidXML no PSP-UFU (*XMLParser*) para realizar suas funções.

Seus métodos também foram modulados, permitindo tanto gravar todo o projeto no disco, no formato *.psp*, quanto de forma parcial, contemplando somente os elementos de controle, no formato *.ctl*. Isso propiciou ao programa a exportação de sistemas de controle criados, os quais podem ser compartilhados entre elementos do mesmo projeto ou de projetos distintos.

ChartView e DataReport

Essas duas classes são as saídas dos dados do programa na forma de gráficos no tempo (*ChartView*) e relatórios tabulares (*DataReport*).

O *ChartView* utiliza a biblioteca wxMathPlot na exibição dos gráficos escolhidos pelo usuário. As curvas podem ser editadas pela alteração de cor, tipo de linha e espessura. Também estão presentes ferramentas de inserção e exclusão de curvas; zoom; deslocamento; alteração dos eixos x e y (limites e valores); inserção de: título, rótulos, legendas, coordenadas e linhas de grade; mudança de tema e exportação no formato csv (*Comma Separated Value*) e imagem (nos formatos BMP, PNG ou JPEG).

Os relatórios de dados apresentados na classe *DataReport* são os resultados dos cálculos de fluxo de carga e curto-circuito. Nesse formulário especial, os dados são acessados através de abas combinadas cujas unidades dos dados podem ser alteradas e seus valores copiados para outros programas, como editores de texto ou planilhas.

3.3.2 Documentação

A documentação de um *software* é de suma importância para os desenvolvedores, visto que as classes e métodos criados são sumarizados e descritos de forma clara, facilitando a compreensão do código e possibilitando uma fácil modificação e inclusão de novos recursos ao programa.

Para isso utilizou-se no PSP-UFU o Doxygen [88], ferramenta que possibilita a geração da documentação a partir do código fonte em C++. Todas as descrições são extraídas de comentários especiais realizados no código e exportadas como documentação online (em HTML) e/ou off-line, por meio de um manual de referência (em LaTeX). O Doxygen possui suporte para Markdown, tabelas e fórmulas (utilizando LaTeX ou MathJax [89]), além de gerar automaticamente diagramas de classes e de dependência utilizando Graphviz [90].

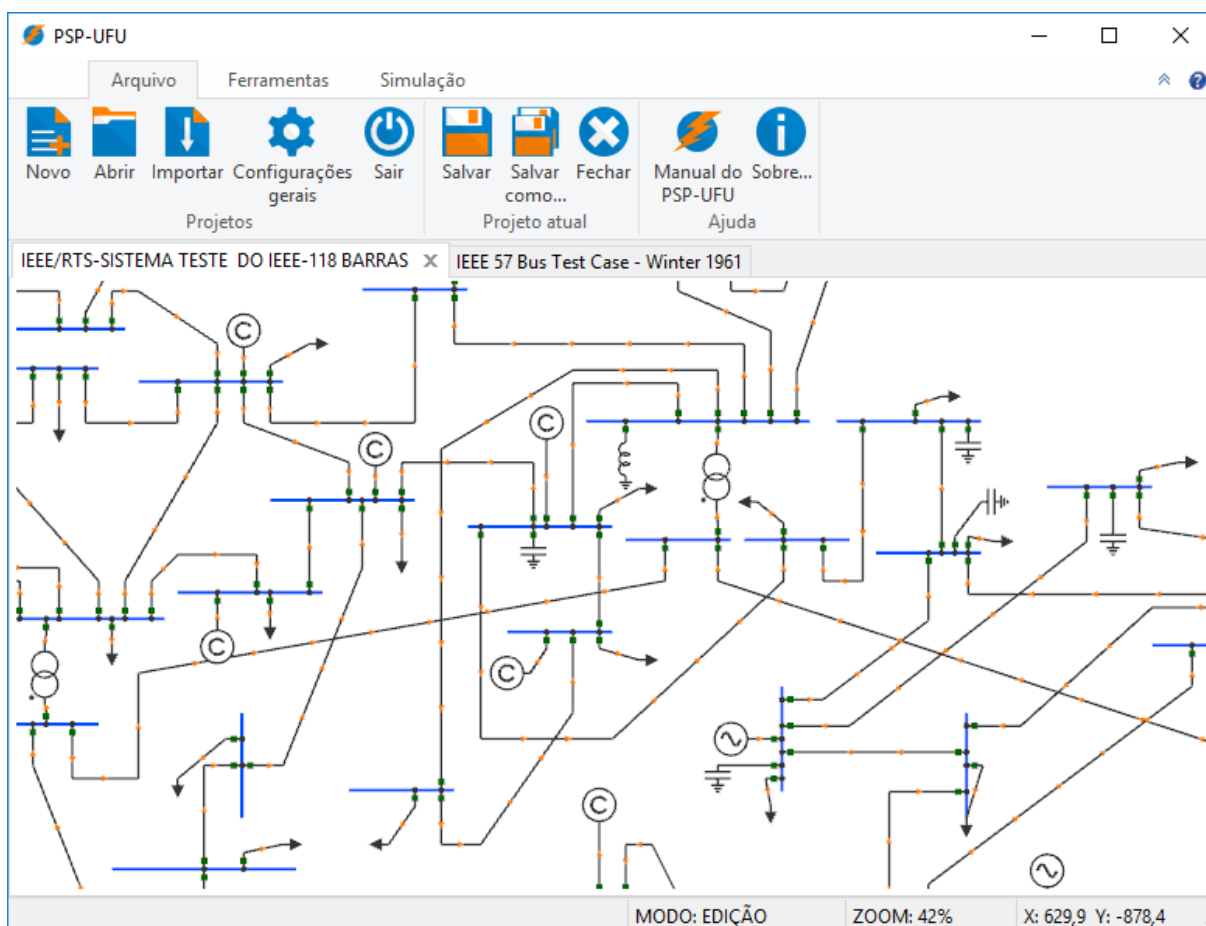
Todas essas ferramentas foram utilizadas na documentação do PSP-UFU, as quais possuem licença compatível com GNU GPL v2. A documentação, ainda em desenvolvimento, está disponível online no endereço: <https://thales1330.github.io/PSP/doxygen/html/index.html>.

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 “Simulação”. 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 e importar arquivos de outros programas. Esse submenu também possui opções gerais dos projetos e acesso a informações sobre o programa. Em “Ferramentas” estão presentes os itens específicos, os quais estão relacionados à criação e manipulação da rede elétrica de potência, relatórios tabulares de saída de dados e acesso ao formulário de criação de gráficos no tempo. Finalmente, o submenu “Simulação” proporciona o acesso do usuário aos cálculos realizados pelo *software* e suas configurações, além da ferramenta de “solução contínua”, a qual resolve os cálculos estáticos (fluxo de potência, curto-circuito e harmônicos) após quaisquer mudanças na rede de potência, como remoção de componente ou alteração de seus dados.

Figura 3.5 – Tela principal do programa PSP-UFU no sistema operacional Windows.



Fonte: Autoria própria.

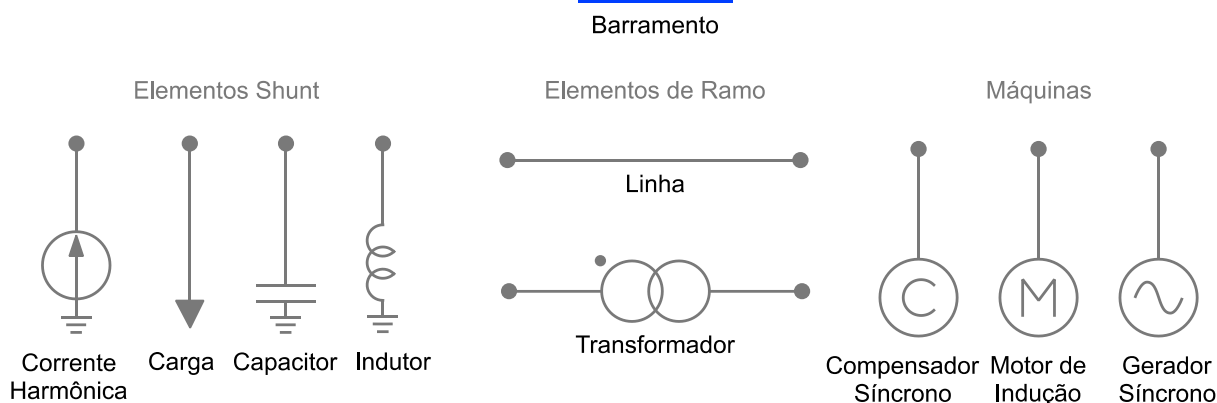
Na área de trabalho estão presentes os projetos em execução, os quais são divididos por abas identificadas pelo nome do projeto (caso já esteja gravado no disco). É nessa área que são inseridos e excluídos os elementos elétricos, cujas ferramentas são acessadas por meio do menu Ribbon. As edições gráficas dos elementos, como posição, conexão e tamanho dos barramentos, são realizadas por meio da ação drag-and-drop (arrastar e soltar) 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 Editor de elementos 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 por meio do submenu “Ferramentas”. No caso de inserção de um barramento, o usuário deve apenas clicar na posição desejada, já para os outros componentes será solicitado que o usuário selecione em uma ou duas barras, o qual o novo componente será conectado. 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 estabilidade.

Figura 3.6 – Elementos elétricos de potência do PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Barra

O barramento deve ser o primeiro elemento elétrico a ser inserido no diagrama de potência, uma vez que os demais componentes de potência são conectados nele. A Figura 3.7 apresenta o formulário de inserção/alteração de dados das barras:

Figura 3.7 – Formulário dos barramentos no PSP-UFU.

The figure displays three overlapping windows of the 'Barra' (Bar) dialog box. The top-left window shows the 'Geral' (General) tab with fields for 'Nome' (Barra 1), 'Tensão nominal' (230,0 kV), 'Tensão controlada' (1,05 p.u.), and a checked 'Barra de referência' option. The top-right window shows the 'Falta' (Fault) tab with a checked 'Inserir falta na barra' option, 'Tipo de falta' (Fase-terra), 'Local da falta' (Fase A), 'Resistência da falta (R)' (0,0 p.u.), and 'Reatância da falta (XI)' (0,12 p.u.). The bottom window shows the 'Estabilidade' (Stability) tab with a checked 'Imprimir dados da barra' option, a checked 'Inserir falta na barra' option, 'Tempo' (1,0 s), 'Duração da falta' (0,15 s), 'Resistência da falta (R)' (0,0 p.u.), and 'Reatância da falta (XI)' (0,12 p.u.).

Fonte: Autoria própria.

Esse formulário é subdividido em três contextos distintos: Geral, no qual são inseridas informações gerais da barra e informações do fluxo de carga; Falta, local onde o curto-circuito shunt deve ser inserido; Estabilidade, contendo opções de visualização de dados da barra em gráficos no tempo e inserção de faltas trifásicas no cálculo de estabilidade transitória. A Tabela 3.3 apresenta a descrição detalhada dos parâmetros presentes nos formulários dos barramentos.

Tabela 3.3 – Descrição dos parâmetros do formulário das barras no PSP-UFU.

Parâmetro	Descrição
Nome	Identificação do elemento elétrico. Todos os componentes de potência do PSP-UFU possuem esse campo.
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. A modificação desse parâmetro irá alterar toda a tensão do trecho conectado por linhas elétricas, sendo emitido um alerta ao usuário.
Tensão controlada	Caracteriza o barramento como barra de tensão controlada (barra PV), caso alguma máquina síncrona esteja conectado, caso contrário esse valor será ignorado. O valor poderá ser inserido em p.u. ou em volts (ou kV caso a tensão nominal esteja nesta unidade).
Barra de referência	Caracteriza o barramento como barra de referência (de oscilação). Essa opção é somente válida caso esteja conectado um gerador síncrono, caso contrário uma mensagem de erro será exibida ao usuário ao realizar algum dos cálculos do programa.
Inserir falta (Falta)	Indica se existe um curto-circuito na barra. Nota-se que essa opção irá inserir uma falta no cálculo de curto-circuito (descrito na seção 2.4) e não será considerado no estudo de estabilidade.
Tipo de falta	Seleciona o tipo de falha shunt da barra: trifásico para a terra, fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra.
Local da falta	Seleciona a fase em que se situa a falta (ou combinação delas no caso de falha entre duas fases), sendo essa opção desabilitada para o tipo de falta trifásica.
Resistência e reatância de falta (Falta)	Representam a impedância da falta. Curtos-circuitos francos (sem impedância de falta) são representados inserindo valor zero em ambos os campos.
Imprimir dados	Mostra os dados da barra editada no gráfico gerado pelo estudo de estabilidade transitória. Os seguintes dados são exibidos: módulo e ângulo da tensão do barramento.
Inserir falta (Estabilidade)	Inserir uma falta trifásica na barra no cálculo de estabilidade.
Tempo	Instante no tempo (t_{falta}) em que ocorre a falta durante os estudos de estabilidade. Esse campo e os próximos são somente acessados caso seja inserida uma falta na barra.
Duração da falta	Duração da falta inserida (Δt_{falta}) no estudo de estabilidade. A falta irá iniciar no instante t_{falta} e será interrompida em $t_{falta} + \Delta t_{falta}$.
Resistência e reatância de falta (Estabilidade)	Impedância de falta nos estudos de estabilidade. Uma falta franca é representada pela inserção de um valor de impedância shunt muito baixo ($j10^{-5} p.u.$).

Fonte: Autoria própria.

Carga

As cargas são os elementos de potência consumidores de potência genéricos. Nos estudos de fluxo de carga é possível modelar a carga como potência ou impedância constante e em estabilidade pode-se compor a carga na proporção desejada em três tipos (carga ZIP): potência constante, impedância constante e corrente constante, como descrito na seção 2.5.2. A Figura 3.8 apresenta o formulário para edição de dados desse elemento.

Figura 3.8 – Formulário das cargas no PSP-UFU.

Fonte: Autoria própria.

O formulário é dividido em dados gerais e de fluxo de carga presentes na aba Geral e dados de estabilidade encontrados na aba de mesmo nome. A modelagem da carga para faltas é realizada exclusivamente como impedância constante. A Tabela 3.4 apresenta a descrição detalhada dos parâmetros presentes nos formulários das cargas.

Tabela 3.4 – Descrição dos parâmetros do formulário das cargas no PSP-UFU.

Parâmetro	Descrição
Potência ativa	Parcela de potência ativa da carga. Pode ser inserido em MW, kW W ou p.u. (na base do sistema).
Potência reativa	Parcela de potência reativa da carga. Pode ser inserido em Mvar, kvar var ou p.u. (na base do sistema).
Tipo de carga (fluxo de carga)	Tipo da carga para o estudo de fluxo de carga, podendo ser selecionado dois tipos: Potência constante e Impedância constante. As cargas de potência constantes são inseridas nos vetores de potência e permanecem invariantes no cálculo, enquanto que para as cargas de impedância constante determina-se o valor da impedância utilizando a potência e tensão nominal, a qual é inserida na matriz admitância.
Imprimir dados	Exibe os dados da carga nos gráficos no tempo. Os seguintes dados são exibidos: módulo da tensão, corrente e potências ativa e reativa.
Utilizar composição de carga ZIP	Permite compor a carga ZIP para estudos de estabilidade. Caso essa opção não esteja selecionada é usada a composição global definida nas configurações de simulação.
Composição de potência ativa e reativa	Valores da composição da carga ZIP, inseridas para potência ativa e reativa separadamente, em porcentagem. A soma da composição deve ser igual a 100%, caso contrário será exibida uma mensagem de erro ao usuário.

Fonte: Autoria própria.

O botão “Chaveamento”, exibido na Figura 3.8, permite ao usuário a edição de chaveamentos para estudos no tempo, como é mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Formulário de edição de chaveamentos.

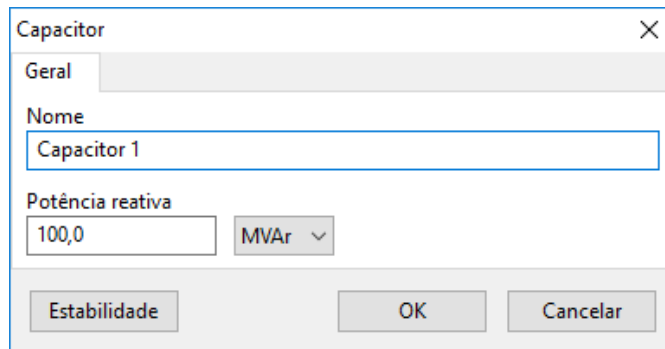
Fonte: Autoria própria.

Nesse formulário é possível inserir, remover e organizar os chaveamentos de inclusão e retirada do elemento do sistema, sendo utilizado por vários componentes do diagrama de potência, acessados também pelo botão “Estabilidade”.

Capacitor e Indutor

Os capacitores e reatores exigem somente sua potência reativa como parâmetro, inserida em Mvar, kvar, var ou p.u. (na base de potência do sistema). Esses elementos passivos são somente inseridos na matriz admitância cuja impedância é calculada a partir de sua potência e tensão nominais. A Figura 3.10 apresenta o formulário de edição dos elementos shunt de potência reativa.

Figura 3.10 – Formulário dos capacitores e indutores no PSP-UFU.



O formulário, intitulado "Capacitor", possui uma aba "Geral" e um campo de texto para o nome, preenchido com "Capacitor 1". Abaixo, há um campo de entrada para a "Potência reativa" com o valor "100,0" e um menu suspenso para a unidade, atualmente em "MVar". Na base do formulário, há três botões: "Estabilidade", "OK" e "Cancelar".

Fonte: Autoria própria.

Fonte de corrente harmônica

As fontes de corrente harmônica são responsáveis pela injeção de correntes harmônicas e são utilizadas pela ferramenta de cálculo de distorções harmônicas, como é apresentado na seção 3.4.3. Uma lista de correntes harmônicas pode ser inserida em um mesmo elemento, conforme é exibido na Figura 3.11:

Figura 3.11 – Formulário da fonte de corrente harmônica no PSP-UFU.

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3.5 são apresentados os principais parâmetros das fontes de corrente harmônica:

Tabela 3.5 – Descrição dos parâmetros do formulário da fonte de corrente harmônica no PSP-UFU.

Parâmetro	Descrição
Ordem	Especifica a ordem harmônica a ser inserida na lista de correntes harmônicas do elemento. Caso a ordem harmônica já exista na lista, ela será substituída pelos novos parâmetros.
Corrente	Módulo da corrente harmônica.
Unidade	Unidade do módulo de corrente harmônica, em A ou p.u.
Ângulo	Ângulo da corrente harmônica, em graus.
Adicionar / Remover	Inserir ou modificar a nova ordem harmônica ao clicar em “Adicionar”. Retira a ordem harmônica selecionada da lista ao clicar em “Remover”.

Fonte: Autoria própria.

Linha

A linha elétrica deve ser adicionada entre dois barramentos previamente inseridos no diagrama, os quais necessitam conter os mesmos valores de tensões nominais, caso contrário o programa retornará uma mensagem de erro. O formulário de entrada de dados desse componente é evidenciado na Figura 3.12.

Figura 3.12 – Formulário das linhas elétricas no PSP-UFU.

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros necessários para construção da linha segundo seu modelo π são inseridos na aba Geral, utilizados para construção da matriz admitância. Dados adicionais de impedâncias de sequência zero necessário para o cálculo de curtos-circuitos desbalanceados são editados na aba Falta, utilizados na construção da matriz admitância de sequência zero. Na Tabela 3.6 são descritos os campos desse formulário.

Tabela 3.6 – Descrição dos parâmetros do formulário das linhas elétricas no PSP-UFU.

Parâmetro	Descrição
Potência nominal	Potência nominal da linha, inserida em MVA, kVA ou VA.
Parâmetros do modelo π	Resistência (r_L) e Reatância indutiva (x_L) série e Susceptância capacitiva shunt total ($2b_L^d$) presentes no modelo π da linha (Figura 2.3). Esses parâmetros são inseridos em p.u., Ω ou Ω/km (S ou S/km para b_L^d).
Comprimento da linha	Utilizado para calcular o valor dos parâmetros da linha inseridos em Ω/km (ou S/km). Esse dado é ignorado caso não sejam utilizadas tais unidades.
Utilizar potência nominal como base	Caso essa opção seja marcada, o programa irá utilizar a potência nominal da linha como base para a conversão das unidades, caso contrário será usada a potência base do sistema.
Parâmetros do modelo π de sequência zero	Esses parâmetros são necessários para o correto cálculo das correntes de falta desbalanceadas (fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra).

Fonte: Autoria própria.

Transformador

Assim como nas linhas de transmissão, o transformador de dois enrolamentos deve ser inserido entre barras, porém não há a necessidade das tensões nominais desses barramentos serem idênticas. 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 3.13 será exibido.

Figura 3.13 – Formulário dos transformadores no PSP-UFU.

The figure displays two side-by-side screenshots of the 'Transformador' dialog box in the PSP-UFU software. The left window shows the 'Geral' (General) tab, and the right window shows the 'Falta' (Fault) tab. Both windows have a title bar with 'Transformador' and a close button. The 'Geral' tab includes fields for 'Nome' (Transformador 1), 'Tensão nominal' (16,5 kV / 230,0 kV), 'Tensão base' (16,5 kV), 'Potência nominal' (100,0 MVA), 'Resistência (R)' (0,0 p.u.), 'Reatância indutiva (XI)' (0,0576 p.u.), 'Conexão' (Delta - Estrela aterrado), 'TAP' (0,985), and 'Defasagem' (-30,0 graus). A checkbox 'Utilizar a potência do transformador como base' is checked. The 'Falta' tab includes sections for 'Impedâncias de sequência zero (p.u.)' with 'Resistência (R0)' (0,0) and 'Reatância indutiva (X0)' (0,0576), and 'Impedância de aterramento (p.u.)' with 'Resistência do primário' (0,0), 'Reatância do primário' (0,0), 'Resistência do secundário' (0,0), and 'Reatância do secundário' (0,0). Both windows have buttons for 'Estabilidade', 'OK', and 'Cancelar' at the bottom.

Fonte: Autoria própria.

Também dividido em duas abas (Geral e Falta), os dados inseridos nos campos desses formulários permite a modelagem do transformador apresentados nas seções 2.2.2 e 2.4.2.3. Os parâmetros desse elemento são detalhados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Descrição dos parâmetros do formulário dos transformadores no PSP-UFU.

Parâmetro	Descrição
Tensão base	Tensão utilizada para converter os parâmetros de impedância inseridos em ohms. As tensões selecionadas por uma caixa de escolha são editadas nos formulários barramentos conectados.
Potência nominal	Potência nominal da linha, inserida em MVA, kVA ou VA.
Impedância do transformador	Impedância série do transformador (resistência e reatância indutiva), inserida em p.u. ou Ω . Caso as impedâncias sejam inseridas em ohms será utilizada a tensão base selecionada para conversão para p.u.
Conexão	Conexão do transformador utilizada para cálculo das correntes de sequência zero nas faltas desbalanceadas com presença de terra (fase-terra e fase-fase-terra). As seguintes conexões estão disponíveis: $Y_{aterrado} - Y_{aterrado}$, $Y - Y_{aterrado}$, $Y_{aterrado} - Y$, $Y - Y$, $\Delta - Y_{aterrado}$, $\Delta - Y$, $Y_{aterrado} - \Delta$, $Y - \Delta$ e $\Delta - \Delta$.
TAP	Tap do transformador em relação ao primário.
Defasagem	Defasagem do transformador em relação ao primário, em graus. Esse valor independe do tipo de conexão, portanto para conexões diferentes de $Y - Y$ (aterrado ou não) e $\Delta - \Delta$, deve-se inserir o ângulo de defasagem correto.
Utilizar potência nominal como base	Caso essa opção seja marcada, o programa irá utilizar a potência nominal do transformador como base para a conversão das unidades, caso contrário será usada a potência base do sistema.
Impedância de sequência zero do transformador	Esses parâmetros são necessários para o correto cálculo das correntes de falta desbalanceadas (fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra). As impedâncias de aterramento são somente utilizadas para conexão $Y_{aterrado}$.

Fonte: Autoria própria.

Gerador síncrono

Os geradores síncronos são a fonte de potência para o cálculo do fluxo de carga e estabilidade, além de serem um dos principais contribuintes para as correntes de falta.

Somente barramentos que possuem esse elemento conectado podem ser considerados barras de referência. Barras do tipo PV devem conter um gerador síncrono ou um motor síncrono (compensador síncrono).

O formulário de dados é dividido em dois, sendo o primeiro responsável pelos dados gerais, de fluxo de carga e de falta (Figura 3.14) e um segundo pelos dados de estabilidade (Figura 3.15). Esse último também permite o acesso aos controles das máquinas síncronas manipulados pelo editor de controle.

Figura 3.14 – Formulário dos geradores síncronos no PSP-UFU.

Fonte: Autoria própria.

Figura 3.15 – Formulário de estabilidade dos geradores síncronos no PSP-UFU

Fonte: Autoria própria.

Os campos desses dois formulários do gerador síncrono são apresentados em Tabela 3.8 e Tabela 3.9.

Tabela 3.8 – Descrição dos parâmetros do formulário geral dos geradores síncronos no PSP-UFU

Parâmetro	Descrição
Potências ativa e reativa	Potências ativa (inserida em W, kW, MW ou p.u.) e reativa (inserida em var, kvar, Mvar ou p.u.) do gerador. Caso a barra conectada seja PV o valor de potência reativa será ignorado e caso seja de referência ambos os valores inseridos serão desprezados. Caso mais de um gerador esteja conectado na mesma barra, os valores de potência reativa (nas barras de referência e PV) e ativa (nas barras de referência) são igualmente distribuídas, respeitando os limites individuais de potência reativa.
Potências reativas máxima e mínima	Limites de potência reativa máxima e mínima do gerador para controle de tensão em barras PV. Caso esses valores sejam ultrapassados, o reativo gerado pela unidade será limitado ao valor inserido e a barra conectada será transformada em PQ, não controlando a tensão estabelecida.
Utilizar potência nominal como base	Caso essa opção seja marcada, o programa irá utilizar a potência nominal do gerador como base para a conversão das unidades, inclusive aqueles no formulário de estabilidade, caso contrário será usada a potência base do sistema.
Impedâncias de sequência	Valores de resistência e reatância para cálculo das correntes de falta. São inseridos dados de sequência positiva, negativa e zero.
Impedância de aterramento	Valores utilizados para o cálculo das correntes de falta do tipo fase-terra e fase-fase-terra. Caso o neutro do gerador não seja aterrado, o valor inserido nesse campo é ignorado.
Neutro aterrado	Indica se o neutro do gerador é aterrado.
Estabilidade	Abre as opções de estabilidade do gerador síncrono (Figura 3.15).

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.9 – Descrição dos parâmetros do formulário de estabilidade dos geradores síncronos no PSP-UFU

Parâmetro	Descrição
Imprimir dados da máquina síncrona	Exibe os dados do gerador síncrono nos gráficos no tempo. Os seguintes dados são exibidos: tensão terminal, potências ativa e reativas, potência mecânica, frequência, tensão de campo e ângulo δ .
Utilizar AVR e regulador de velocidade	Esses campos acionam ou inibem os controles da máquina síncrona, assim como modelos de turbina e excitatrizes. Caso selecionadas os controles podem ser inseridos e modificados pelos botões “Editar AVR” e “Editar regulador de velocidade”, os quais acessam o editor de controle do PSP-UFU.
Resistência de armadura	Resistência de armadura da máquina síncrona, em p.u.
Reatância de Potier	Reatância de Potier para cálculo da saturação da máquina, em p.u.
Fator de saturação	Valor utilizado no cálculo da curva de saturação. Representa o valor (em p.u.) de corrente de campo necessária para atingir 1,2 p.u. de tensão terminal, portanto esse valor deve ser maior que 1,2, ou irá gerar erros na simulação. Caso não seja informado a saturação da máquina não é considerada nos cálculos.
Reatâncias síncronas	Valores de reatância síncrona (regime permanente) da máquina. Os valores de eixo direto e em quadratura devem ser iguais ou muito próximos para representação de uma máquina de polos lisos, enquanto para polos salientes esses valores são distintos.
Reatâncias e constantes de tempo transitórias	Parâmetros transitórios da máquina síncrona em p.u. ou segundos. O valor da reatância transitória de eixo direto deve ser diferente de zero ou levará o programa a erro. De acordo com a quantidade de parâmetros inseridos é definido internamente pelo programa qual o modelo a ser utilizado.
Reatâncias e constantes de tempo subtransitórias	Parâmetros subtransitórios da máquina síncrona em p.u. ou segundos, representando em detalhes a presença de enrolamentos amortecedores. Assim como os dados transitórios, esses parâmetros definem o modelo da máquina.
Chaveamento	Abre o formulário de chaveamentos para estudos no tempo (Figura 3.9).

Fonte: Autoria própria.

Compensador síncrono

Esses elementos são motores síncronos e, portanto, seus formulários de entrada de dados geral são idênticos aos geradores síncronos (Figura 3.14), com a ressalva da potência ativa inserida ser consumida e não gerada.

Motor de indução

Os motores de indução são contemplados nos estudos de fluxo de carga e no estudo de estabilidade. Como já foi dito anteriormente, os dados de estabilidade da máquina de indução são utilizados em conjunto com o fluxo de carga, calculando de forma correta a potência reativa das máquinas e conseqüentemente a tensão no barramento conectado. A Figura 3.14 e Figura 3.15 apresentam os formulários de edição de dados dos motores de indução.

Figura 3.16 – Formulário dos motores de indução no PSP-UFU.

Motor

Geral Estabilidade

Nome
Motor de indução

Potência nominal
100,0 MVA

Potência ativa
50,0 MW

Potência reativa
36,0 MVA

Calcular a potência reativa no fluxo de carga (utilizando dados de estabilidade)

Utilizar potência nominal da máquina como base

Chaveamento OK Cancelar

Fonte: Autoria própria.

Figura 3.17 – Formulário de estabilidade dos motores de indução no PSP-UFU

Motor

Geral Estabilidade

Imprimir dados da máquina de indução

Inércia
1,0 s

Resistência do estator
0,05 p.u.

Reatância do estator
0,1 p.u.

Resistência do rotor
0,03 p.u.

Reatância do rotor
0,07 p.u.

Reatância de magnetização
3,0 p.u.

Utilizar fator de gaiola
5,0

Característica da carga
0,15 + (-1,0) ω + 1,85 ω^2

Chaveamento OK Cancelar

Fonte: Autoria própria.

Os campos desses dois formulários do gerador síncrono são apresentados em Tabela 3.8 e Tabela 3.9.

Tabela 3.10 – Descrição dos parâmetros do formulário geral dos motores de indução no PSP-UFU

Parâmetro	Descrição
Potências ativa e reativa	Potências ativa (inserida em W, kW, MW ou p.u.) e reativa (inserida em var, kvar, Mvar ou p.u.) do motor. Caso a opção “Calcular a potência reativa no fluxo de carga” esteja ativada, os campos de potência reativa são desativados para edição.
Calcular a potência reativa no fluxo de carga	Caso essa opção seja marcada, o programa irá utilizar os dados fornecidos no formulário de estabilidade para calcular a potência reativa do motor durante o processo iterativo do fluxo de carga.
Utilizar potência nominal como base	Caso essa opção seja marcada, o programa irá utilizar a potência nominal do gerador como base para a conversão das unidades, inclusive aqueles no formulário de estabilidade, caso contrário será usada a potência base do sistema.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.11 – Descrição dos parâmetros de estabilidade dos motores de indução no PSP-UFU

Parâmetro	Descrição
Imprimir dados da máquina de indução	Exibe os dados do gerador síncrono nos gráficos no tempo. Os seguintes dados são exibidos: tensão terminal, potências ativa e reativas, corrente, torque elétrico, torque mecânico, velocidade e escorregamento.
Inércia	Inércia do conjunto motor-carga, em s.
Resistência e reatância do estator	Resistência e reatância do estator do motor de indução, em p.u.
Resistência e reatância do rotor	Resistência e reatância do rotor do motor de indução, em p.u.
Reatância de magnetização	Reatância do ramo de magnetização do motor de indução, em p.u.
Utilizar fator de gaiola	Permite a inserção de um fator de gaiola (K_g) no motor de indução. Tal fator eleva o valor da resistência do rotor em condições de grande escorregamento, como ocorre em motores de gaiola dupla ou gaiola profunda. A resistência do rotor segue a seguinte equação: $r_2 = r_{2_0}(1 + K_g s)$ Em que r_{2_0} é a resistência do rotor inserida no formulário.
Característica da carga	Descreve a característica do torque da carga mecânica no eixo do motor seguindo a equação (2.191). A soma dos coeficientes deve ser unitária.
Chaveamento	Abre o formulário de chaveamentos para estudos no tempo (Figura 3.9).

Fonte: Autoria própria.

3.4.1.1 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, 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 pelo contorno em azul do objeto. 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”, movendo todos os componentes selecionados à medida que a posição do mouse é alterada. 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”, girando o objeto no sentido horário, ou “Shift + R”, para o sentido anti-horário (essa opção irá afetar todos os objetos selecionados). Ao utilizar essa ferramenta os objetos irão girar 45° a partir do seu ponto de origem. 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 mantendo pressionada o *scroll* do mouse, 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”.

Dois 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 no mesmo projeto ou em um projeto distinto, utilizando o mesmo submenu ou pressionando a combinação das teclas “Ctrl + V”.

Qualquer objeto poderá ser excluído do projeto por meio da ferramenta deletar, presente no menu Ribbon, ou pela tecla de atalho Delete.

3.4.1.2 Geração automática do layout de diagramas unifilares

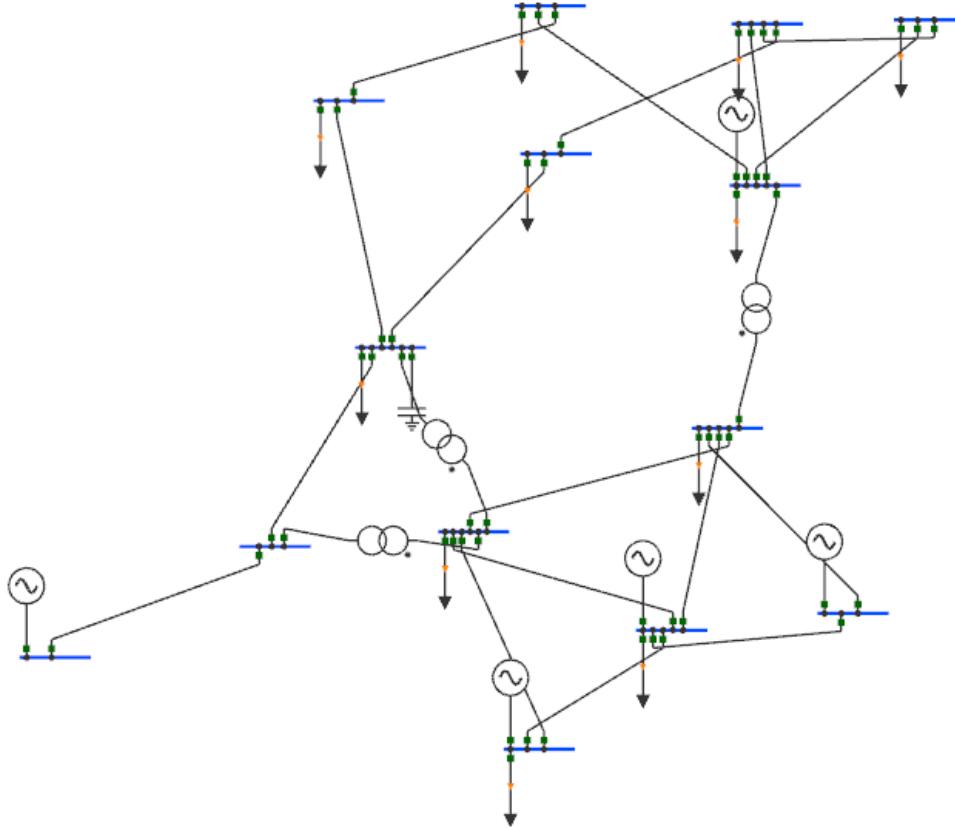
Esse recurso é atendido por duas classes, chamadas de *ImportMatpower* e *GraphAutoLayout*. A primeira usa uma API desenvolvida nesse trabalho para importar arquivos de outros programas. Já a segunda gera automaticamente um *layout* do diagrama unifilar baseado apenas nos dados dos barramentos e suas conexões (fornecidos pelos dados de ramos), sem quaisquer dados de posicionamento ou tamanho dos elementos.

Para criar o *layout* automático, utilizou-se a teoria dos grafos baseada no posicionamento direcionado à força [91] e aplicação de grafos com arestas ponderadas [92]. De acordo com a teoria dos grafos, o sistema é modelado como vértices e arestas. Nesse contexto, os barramentos são os vértices e os ramos do sistema (linhas e transformadores) são as arestas. As localizações de elementos de derivação, assim como os nós dos elementos, são automaticamente controladas pelo PSP-UFU.

Para exemplificar esse recurso e o algoritmo desenvolvido, dois casos foram importados para o PSP-UFU usando os arquivos *.m* de dados fornecidos pela versão atual do Matpower (versão 7.0b1). Nenhuma modificação gráfica foi realizada para verificar o comportamento do

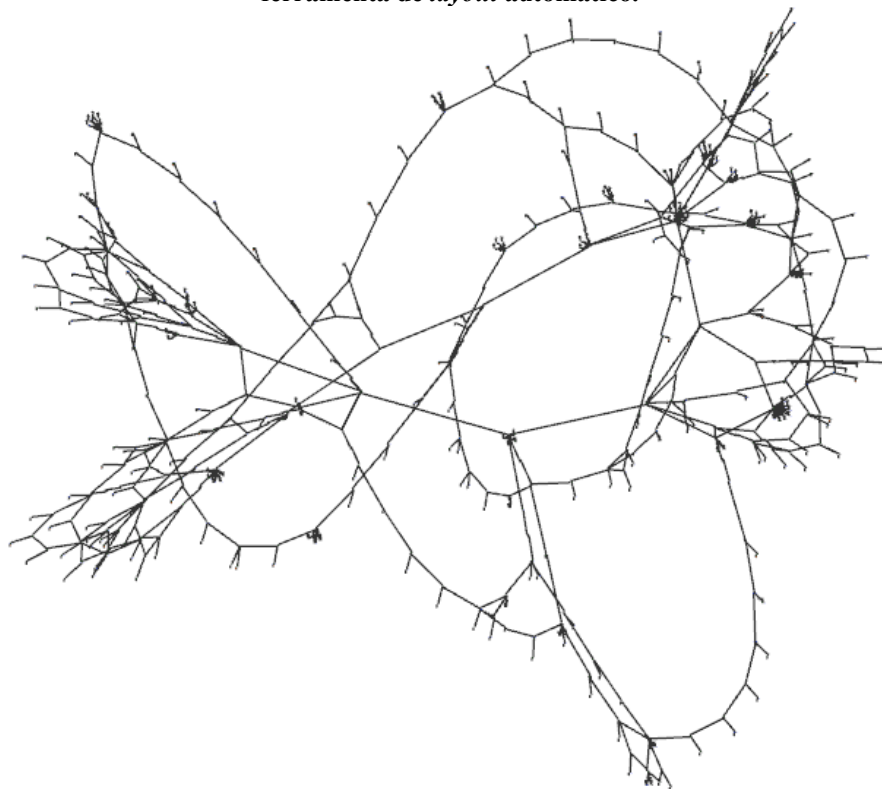
algoritmo de *layout* automático. O primeiro é o sistema teste do IEEE de 14 barras, mostrado na Figura 3.18, e o segundo é o modelo sintético de 500 barras da Carolina do Sul, mostrado na Figura 3.19.

Figura 3.18 – Sistema teste IEEE 14 barras importado para o PSP-UFU utilizando a ferramenta de *layout* automático.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.19 – Modelo sintético de 500 barras da Carolina do Sul importado para o PSP-UFU utilizando a ferramenta de *layout* automático.



Fonte: Autoria própria.

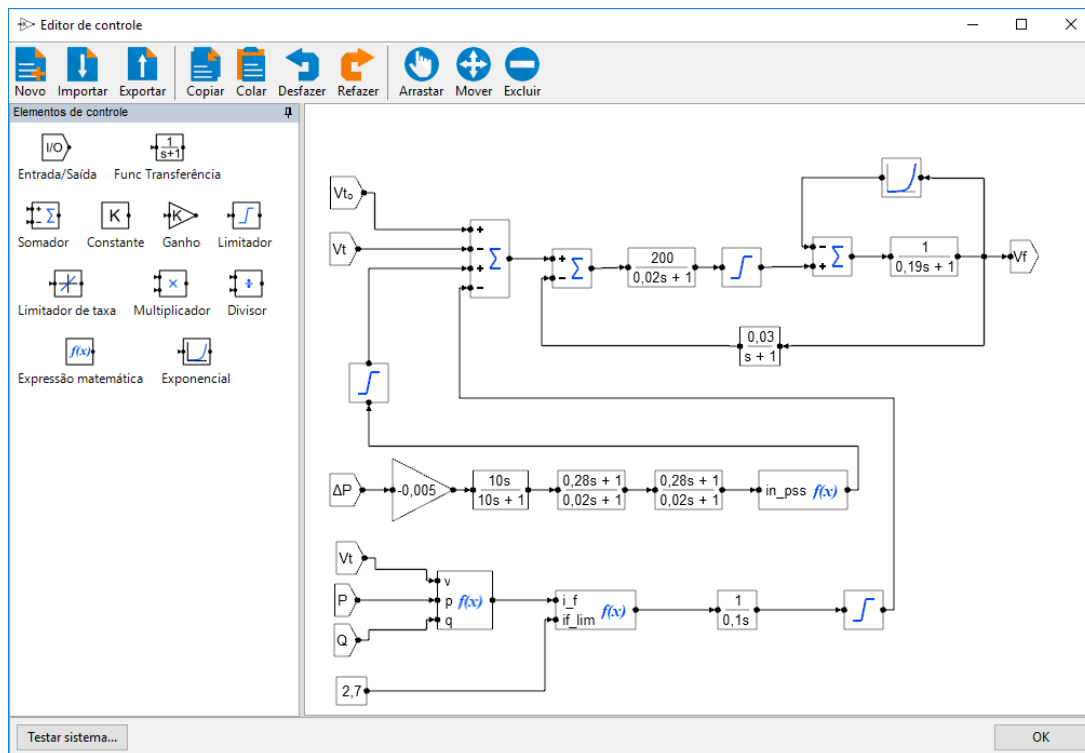
A ferramenta de *layout* automático é composta por um processo iterativo e os resultados são mais refinados com um número maior de iterações. Os melhores resultados são obtidos utilizando o número de iterações igual ou superior a cinco vezes o número de barramentos do sistema. A Figura 3.18 foi gerada com 70 iterações e a Figura 3.19 foi gerada com 2500. O tempo de processamento depende da configuração de cada sistema de potência, assim como o número de iterações, mas normalmente leva alguns segundos para os casos com menos de 1000 barras. O *layout* automático ainda está em desenvolvimento e algumas melhorias podem ser feitas para evitar cruzamentos e sobreposições, porém, em seu estado atual, é totalmente funcional e satisfatório.

Uma vez que o Matpower pode converter os formatos CDF (*Common Data Format*) e PSS/E RAW para arquivos *.m* [44], estes podem ser importados de forma indireta para o PSP-UFU.

3.4.2 Editor de elementos de controle

Os controles das máquinas síncronas são criados, modificados, importados e exportados em um editor distinto dos elementos de potência, apresentado na Figura 3.20.

Figura 3.20 – Editor de elementos de controle do PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

O acesso aos elementos de controle é realizado em uma janela (removível e encaixável) por meio de ícones relacionados. Uma vez que o usuário clicar no ícone desejado, o elemento de controle acompanhará o ponteiro do mouse até ser efetivamente inserido na posição desejada ao clicar novamente na área de trabalho. Os elementos são então conectados por “linhas de conexão” inseridas ao clicar nos nós dos componentes previamente adicionados, permitindo a construção da rede de controle genérica.

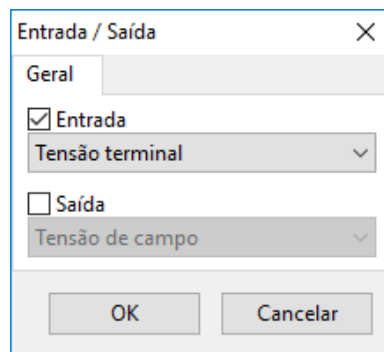
As ferramentas de manipulação e navegação, como arrastar, mover e excluir são herdadas do editor de elementos de potência apresentado na seção anterior, possuindo comportamento idêntico. A edição dos dados dos componentes inseridos também é realizada com duplo clique sobre o elemento inserido, exibindo um formulário de edição de dados.

Na sequência são apresentados os principais blocos de controle desse editor.

Entrada/Saída

As entradas e saídas do sistema de controle são definidas por esses blocos, os quais são distintos para cada tipo de escopo. A Figura 3.21 apresenta um exemplo de um formulário de edição das entradas e saídas de um AVR:

Figura 3.21 – Formulário de edição de entradas e saídas de sistemas de controle de um AVR.



Fonte: Autoria própria.

O usuário deve sinalizar o tipo de bloco entre entrada e saída e, então, selecionar em uma lista a variável desejada. As seguintes variáveis de controle estão atualmente disponíveis no programa:

- Tensão terminal (entrada: AVR): Módulo da tensão no barramento da máquina síncrona, em p.u., variável no tempo. Essa variável é normalmente utilizada no cálculo do erro da tensão de referência do AVR;
- Velocidade (entrada: AVR e RV): Velocidade da máquina síncrona, em rad/s, variável no tempo. Normalmente utilizada no cálculo do erro de velocidade nos reguladores de velocidade, além de entrada do PSS em AVRs;
- Potência ativa e reativa (entrada: AVR): Potência ativa fornecida pela máquina síncrona, em p.u., variável no tempo. Normalmente utilizada como entrada do PSS (potência ativa) e controle de sub e sobrecorrente de excitação nos AVRs;
- Tensão terminal inicial (entrada: AVR): Módulo da tensão no barramento da máquina síncrona prévia ao estudo dinâmico originado do fluxo de carga, em p.u., fixo no tempo. Essa variável está normalmente associada à referência de tensão do AVR;
- Velocidade inicial (entrada: AVR e RV): Velocidade do sistema ($2\pi f_{ref}$), definida nas opções de simulação, em rad/s, fixa no tempo. Normalmente utiliza-

se essa variável como referência de velocidade em RVs e normalização da velocidade;

- Potência mecânica inicial (entrada: RV): Potência mecânica inicial, calculada após a inicialização das máquinas síncronas com os dados originados do fluxo de carga, em p.u., fica no tempo. Normalmente é utilizada como referência de potência mecânica nos reguladores de velocidade;
- Variação de velocidade e potência ativa (entrada: AVR): Cálculo da variação dessas entradas entre os passos de integração normalizada, conforme a equação (3.1):

$$\Delta x = \frac{x_n - x_{n-1}}{h} \quad (3.1)$$

Em que:

- Δx Variação da entrada (velocidade ou potência ativa);
 x_n e x_{n-1} Variável no passo atual e anterior, respectivamente;
 h Passo de integração.

A normalização é necessária para a correta utilização da razão de passo de controle, definida nas configurações de simulação.

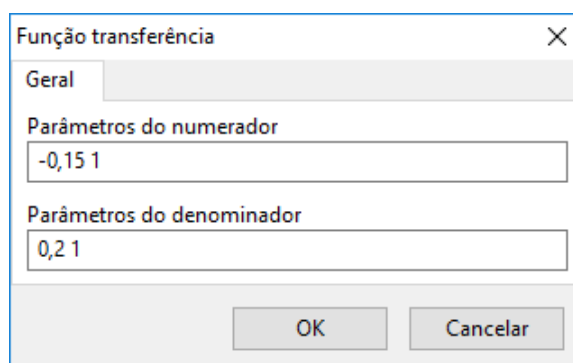
- Tensão de campo (saída: AVR): Define a tensão aplicada ao campo na máquina síncrona, em p.u. Utilizada como saída dos AVRs, controlando principalmente tensão no barramento conectado e/ou fator de potência da máquina;
- Potência mecânica (saída: RV): Define qual a potência mecânica aplicada no eixo da máquina síncrona. Utilizada como saída dos reguladores de velocidade, controlando principalmente a potência ativa injetada pela máquina e sua frequência.

Função transferência

Como já foi dito anteriormente, a função transferência é um importante bloco elementar e essencial em um sistema de controle, visto que esse componente possibilita a representação de sistemas dinâmicos por meio de equações algébricas no domínio da frequência [73]. Nesses blocos é utilizado a letra “s” para representação no domínio da frequência, pois essa é a terminologia mais utilizada em sistemas de controle.

A Figura 3.22 apresenta o formulário de edição de dados da função transferência:

Figura 3.22 – Formulário de edição de dados da função transferência no PSP-UFU.



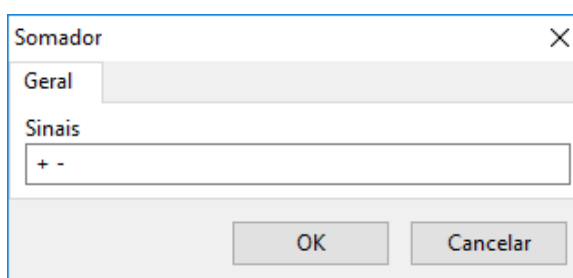
Fonte: Autoria própria.

A função transferência é definida pelos coeficientes do numerador e denominador, separados por espaço. Os elementos não presentes são representados como coeficientes de valor zero. Por exemplo, um parâmetro inserido igual a “1 0,5 0 2” irá gerar: “ $s^3 + 0,5s^2 + 2$ ”.

Somador

Como o próprio nome sugere, os somadores são elementos de controle capazes de somar qualquer quantidade de valores reais. A quantidade de entradas, assim como seus sinais são definidas pelo usuário, como mostra a Figura 3.23.

Figura 3.23 – Formulário de edição de dados do somador no PSP-UFU



Fonte: Autoria própria.

No seu único campo “Sinais” é inserida uma lista de sinais separados por espaços contendo os símbolos “+” para uma entrada positiva e “-” para negativa. O usuário pode inserir duas ou mais entradas de sinais no bloco.

Uma vez inseridas novas entradas, nós correspondentes serão incluídos no elemento gráfico do somador, o qual poderá ser conectado por meio das linhas de conexão. De forma semelhante, o usuário poderá excluir entradas de sinais pré-existentes, as quais serão removidas no ícone gráfico pela remoção do nó e da linha (caso exista alguma conectada).

Constante, Ganho e Exponencial

As constantes são valores numéricos reais que permanecem inalteradas em todo o período de simulação. Esses elementos possuem somente um nó de saída, o qual poderá ser conectado a qualquer outro nó de entrada de outros elementos de controle. Esse elemento pode, por exemplo, ser utilizado para definir valores alvos ou deslocamentos de sinal.

O bloco de ganho multiplica o valor de entrada por uma constante definida pelo usuário, possuindo comportamento idêntico à combinação de uma constante e um bloco multiplicador. Esse valor de ganho permanece fixo durante todo o tempo de simulação e é identificado no elemento gráfico exibido no editor de elementos de controle.

A função exponencial dos elementos de controle realiza essa operação com uma entrada real, obedecendo a expressão (3.2):

$$y_n = Ae^{Bu_n} \quad (3.2)$$

Em que:

u_n e y_n Entrada de Saída do bloco exponencial, respectivamente;

A e B Constantes definidas pelo usuário.

Esse bloco não linear é definido pelas constantes A e B , inseridas pelo usuário. Tais blocos são úteis na representação de não linearidades, como, por exemplo, modelagem da saturação de máquinas de corrente contínuas presentes em reguladores automáticos de tensão.

Limitadores

Atualmente existem dois limitadores no PSP-UFU: absolutos e de taxa. As expressões matemáticas que definem o comportamento de tais elementos não lineares foram apresentados na seção 2.7.

Os blocos de limite absoluto cumprem a função de restringir os valores de entrada de acordo com os limites máximos e mínimos inseridos pelo usuário. Caso a entrada ultrapasse algum dos limites impostos, a saída será igual a esse valor limite até que a entrada retorne para

a faixa permitida. Tais blocos são bastante encontrados nos sistemas de controle para limitar a atuação do controlador, além de representar limites físicos de modelos implementados, como, por exemplo, valores máximos de corrente de excitação ou potência mecânica fornecida pelas turbinas.

Já os blocos de limite de taxa têm como objetivo conter a taxa de crescimento ou decrescimento da sua entrada a valores inseridos pelo usuário. A taxa de variação é calculada a partir dos valores de entrada atual e passado e, caso seja violada, será definida uma saída que respeite essas taxas (de crescimento ou decrescimento). Esses blocos são úteis para limitar variações bruscas na entrada que possam comprometer o controle ou limites físicos de modelos de turbina, por exemplo.

Multiplicador e Divisor

Esses elementos são bastante simples e cumprem com as funções matemáticas de seus nomes. Ambos possuem duas entradas de valores reais e sua saída é computada na sequência do nó superior pelo inferior, ou seja, a saída será o valor presente no nó 1 multiplicado ou dividido pelo nó 2.

Nós não conectados no multiplicador são assumidos com o valor unitário e para o divisor é considerado valor nulo. Caso a divisão possua numerador zero, o valor da saída é definida como sendo 10^{15} .

Expressão matemática

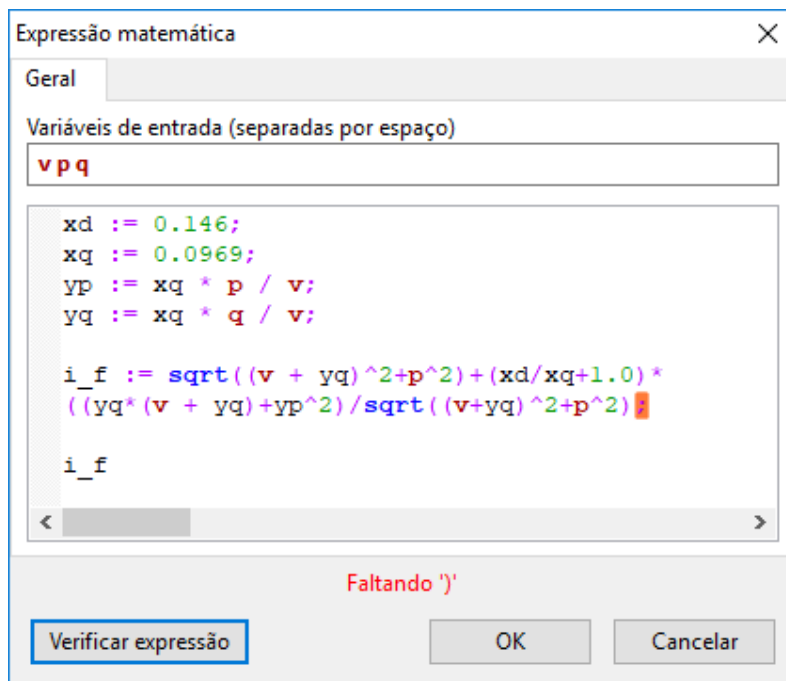
Como já foi dito anteriormente, esse bloco utiliza a biblioteca externa “fparser” e permite ao usuário inserir expressões matemáticas genéricas de qualquer complexidade combinadas a estruturas condicionais em um diagrama de controle, aumentando significativamente a capacidade de generalização do programa. A sintaxe dessas expressões foi apresentada na seção 3.2.2.4 e possui várias funções, descritas com detalhes na Tabela 3.2. O formulário de inserção e edição das entradas do bloco e da expressão matemática genérica, assim como ferramentas de auxílio de sua construção é apresentado na Figura 3.24.

No campo de “Variáveis de entrada” é inserida uma lista com os nomes das entradas separados por espaços. Um número qualquer de entrada pode ser definido nessa lista esses nomes são apresentados no ícone gráfico presente no editor de controle, além de serem destacados na expressão inserida pelo usuário. O número de entradas e saídas se comporta de forma semelhante aos blocos somadores.

Abaixo do campo das variáveis de entrada está presente o local para inserção da expressão matemática. A sintaxe da expressão inserida pelo usuário possui realce (por meio de diferentes formas e cores da fonte) para números, operadores, variáveis de entrada, funções e constantes, facilitando a criação, manipulação e identificação de erros de digitação e lógica.

Como ferramenta de auxílio ao usuário foi desenvolvida uma verificação da expressão inserida. Tal ferramenta irá encontrar erros e indicará ao usuário qual o tipo do erro, além da sua localização, destacando-o. A Figura 3.24 exemplifica a identificação automática do erro pelo PSP-UFU, assim como sua posição na expressão inserida.

Figura 3.24 – Formulário de edição de dados das expressões matemáticas, com destaque ao realce de erro.



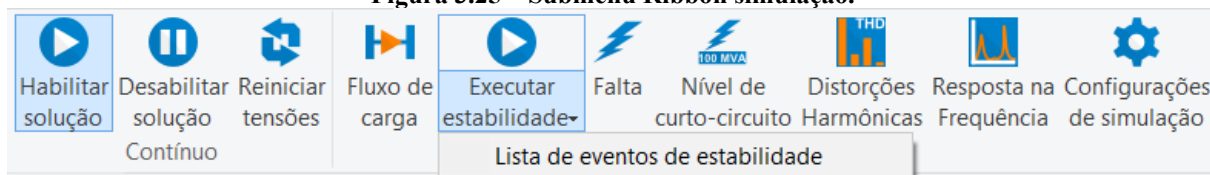
Fonte: Autoria própria.

No botão “Testar sistema...”, exposto na Figura 3.20, é possível aplicar três tipos de entradas: degrau, rampa e quadrática, além de inserir o tempo da perturbação e sua magnitude, passo de integração e tempo total de simulação. Isso permite o usuário testar a correta parametrização e comportamento do sistema de controle criado ou importado.

3.4.3 Simulação

As ferramentas de simulação, assim como seus parâmetros são acessados no submenu Ribbon “Simulação”, como mostra a Figura 3.25:

Figura 3.25 – Submenu Ribbon simulação.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, as ferramentas de simulações descritas no capítulo 2 são divididas em cinco tipos:

- **Fluxo de carga:** Calcula o fluxo de potência do sistema pelos métodos de Newton-Raphson, Gauss-Seidel ou Híbrido Gauss-Newton;
- **Falta:** Calcula os curtos-circuitos balanceados ou desbalanceados inseridos nos barramentos do sistema;
- **Nível de curto-circuito:** Calcula o valor das correntes de curto-circuito trifásicas em todos os barramentos do sistema;
- **Distorções Harmônicas:** Calcula as tensões harmônicas causadas por fontes de corrente harmônicas, assim como o THD de todos os barramentos do sistema;
- **Resposta na Frequência:** Abre um formulário para estudos de análise da impedância vista pelos barramentos em relação a uma barra específica para um espectro de frequência;

A “Lista de eventos de estabilidade” exibe uma tabela em ordem cronológica de eventos no tempo para o estudo de estabilidade, como mostra a Figura 3.26:

Figura 3.26 – Lista de eventos de estabilidade.

Lista de eventos de estabilidade		
Instante do evento	Tipo	Descrição
1,0 s	Falta	Inserção de falta em "Barra-01--HV" ($Z_f = 0,0 + j0,0$ p.u.)
1,15 s	Falta	Remoção da falta em "Barra-01--HV" ($Z_f = 0,0 + j0,0$ p.u.)
5,0 s	Chaveamento	Remoção de "Carga 6"

Fonte: Autoria própria.

A opção “Configurações de simulação” exibe um formulário de edição de dados relativos às ferramentas de simulação, como é apresentado na Figura 3.27:

Figura 3.27 – Configurações de simulação.

The figure displays four screenshots of the 'Opções de simulação' (Simulation Options) dialog box, arranged in a 2x2 grid. Each screenshot shows a different tab selected in the 'Opções de simulação' dialog box.

- Top-left screenshot (Geral tab):** Shows 'Potência base' (100,0 MVA), 'Frequência do sistema' (60,0 Hz), and three checked options under 'Cálculo contínuo': 'Calcular falta após o fluxo de carga', 'Calcular o nível de curto-circuito após o fluxo de carga', and 'Calcular as distorções harmônicas após o fluxo de carga'.
- Top-right screenshot (Fluxo de carga tab):** Shows 'Método de solução' (Hybrid Gauss-Newton), 'Fator de aceleração' (1,0), 'Tolerância' (1e-007), 'Iterações máx' (5000), 'Ângulo da barra de referência' (0,0 graus), 'Inércia do Newton' (1,0), and 'Tolerância do Gauss' (0,01).
- Bottom-left screenshot (Estabilidade tab):** Shows 'Passo de integração' (0,01 s), 'Tempo de simulação' (10,0 s), 'Tolerância' (1e-008), 'Iterações máx' (100), 'Razão do passo dos controles' (10), 'Tempo de impressão' (0,01 s), and a checked option 'Utilizar centro de inércia como referência'.
- Bottom-right screenshot (Carga ZIP tab):** Shows a checked option 'Utilizar composição geral para todas as cargas do sistema' and a table of load composition parameters:

Subtensão a qual as cargas serão modeladas como impedância constante:	Corrente constante (%)	Potência constante (%)
	30,0	30,0
	20,0	20,0
	50,0	50,0
	70,0	70,0

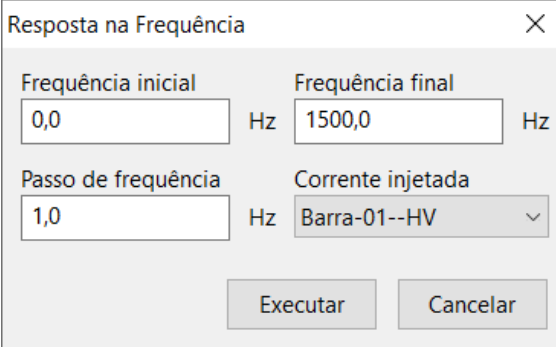
Fonte: Autoria própria.

O método de solução de fluxo de potência híbrido Gauss-Newton utiliza ambos os métodos apresentados no capítulo 2. Uma vez que o Newton-Raphson é consideravelmente sensível às condições iniciais, as primeiras iterações são calculadas utilizando o Gauss-Seidel até que o erro fique menor que a tolerância especificada no campo "Tolerância do Gauss". A partir desse ponto o cálculo é realizado utilizando o método de Newton-Raphson até que se obtenha a convergência com um erro menor que a tolerância estipulada no campo "Tolerância". Tal

opção auxilia na convergência de sistemas impossíveis de resolver utilizando Newton-Raphson convencional.

Finalmente, a Figura 3.28 mostra o formulário para varredura das impedâncias vistas a partir de um barramento especificado no campo “Corrente injetada”:

Figura 3.28 – Formulário da ferramenta de resposta na frequência.



Resposta na Frequência

Frequência inicial	0,0	Hz	Frequência final	1500,0	Hz
Passo de frequência	1,0	Hz	Corrente injetada	Barra-01--HV	

Executar Cancelar

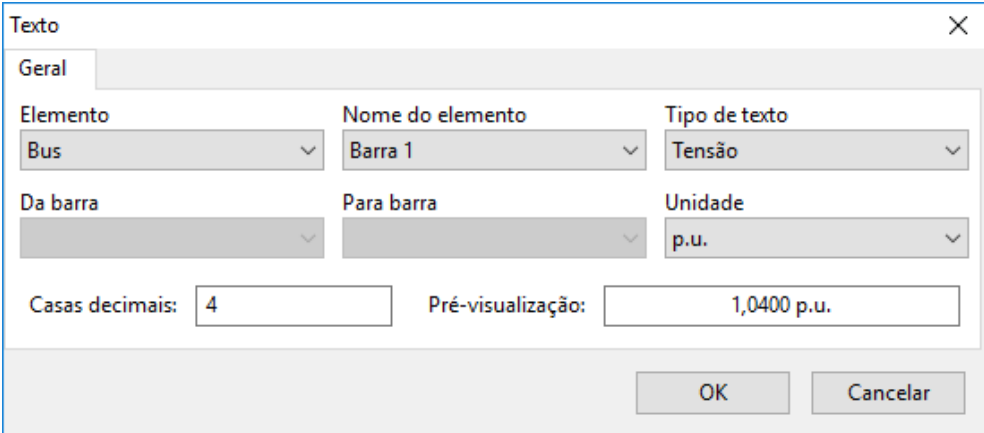
Fonte: Autoria própria.

3.4.4 Saída de dados

Elementos gráficos e visualizadores foram desenvolvidos no PSP-UFU para exibição e exportação dos parâmetros e resultados dos cálculos no projeto.

Implementou-se um elemento de texto vinculado ao elemento de potência, o qual pode ser inserido no editor de elementos de potência. A Figura 3.29 apresenta o formulário de edição de dados desse componente gráfico.

Figura 3.29 – Formulário de edição de dados de texto vinculado no PSP-UFU.



Texto

Geral

Elemento	Nome do elemento	Tipo de texto
Bus	Barra 1	Tensão
Da barra	Para barra	Unidade
		p.u.

Casas decimais: 4 Pré-visualização: 1,0400 p.u.

OK Cancelar

Fonte: Autoria própria.

Esse elemento é útil para identificação e análise dos resultados de elementos de potência. Outra aplicação importante é a atualização de seu valor ao aplicar a “solução contínua” no projeto, auxiliando na visualização das mudanças de estado da rede elétrica. Também pode-se utilizar os resultados apresentados por esses elementos juntamente com o diagrama unifilar na criação de relatórios do projeto.

Sua parametrização é realizada por campos que associam o componente aos elementos elétricos de potência, além do formato dos resultados numéricos. Os campos são liberados a medida que os dados anteriores são inseridos e uma mensagem de erro é apresentada ao usuário caso algum parâmetro necessário não seja preenchido.

O processo de associação se inicia na escolha do tipo de elemento de potência será vinculado ao texto. Em seguida é exibida uma lista com o nome de todos os componentes previamente inseridos no editor de elementos de potência do tipo definido no campo anterior, associando, assim, o texto ao elemento.

Em “Tipo de texto” define-se qual será a saída apresentada. Tal campo depende do tipo de elemento selecionado, como mostra a Tabela 3.12. Alguns outros dados são necessários para os elementos de ramo, como barra de origem e destino, com o intuito de representar o fluxo correto de potência e corrente. Finalmente o usuário deve inserir a quantidade de casas decimais para dados numéricos. A pré-visualização pode ser observada no formulário.

Tabela 3.12 – Campos de texto no PSP-UFU.

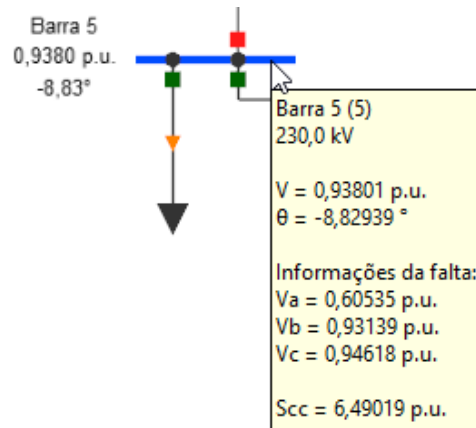
Elemento de potência	Tipo de texto	Unidades disponíveis
Barra	Nome	-
	Tensão	p.u., V, kV
	Ângulo	Graus, Radianos
	Corrente de falta	p.u., A, kA
	Tensão de falta	p.u., V, kV
	Nível de curto-circuito	p.u., VA, kVA, MVA
	TDH de tensão	%
Gerador	Nome	-
	Potência ativa	p.u., W, kW, MW
	Potência reativa	p.u., var, kvar, Mvar
	Corrente de falta	p.u., A, kA
Linha e transformador	Nome	-
	Fluxo de potência ativo	p.u., W, kW, MW
	Fluxo de potência reativo	p.u., var, kvar, Mvar
	Perdas	p.u., W, kW, MW
	Corrente	p.u., A, kA
	Corrente de falta	p.u., A, kA
Carga, Motor de indução e Compensador síncrono	Nome	-
	Potência ativa	p.u., W, kW, MW
	Potência reativa	p.u., var, kvar, Mvar
Capacitor e Indutor	Nome	-
	Potência reativa	p.u., var, kvar, Mvar

Fonte: Autoria própria.

Uma vez inseridos, esses elementos de texto podem ser manipulados da mesma forma que os elementos de potência, como é apresentado na seção 3.4.1.1.

Outra forma de visualização dos dados e resultados diretamente do editor dos componentes de potência é por meio da caixa de informações, a qual é exibida ao permanecer com o ponteiro do mouse sobre um elemento durante alguns segundos. Tal caixa apresenta dados de forma semelhante aos campos de textos vinculados, porém são temporários e são desfeitos ao movimento do mouse. A Figura 3.30 exemplifica uma caixa de informações instantânea, além de campos de textos.

Figura 3.30 – Exemplo de campos de textos e caixa de informações instantâneas no PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Para visualização de todos os resultados dos cálculos de fluxo de carga e curto-circuito, desenvolveu-se um visualizador tabular, apresentado na Figura 3.31.

Figura 3.31 – Visualizador de dados tabulados no PSP-UFU.

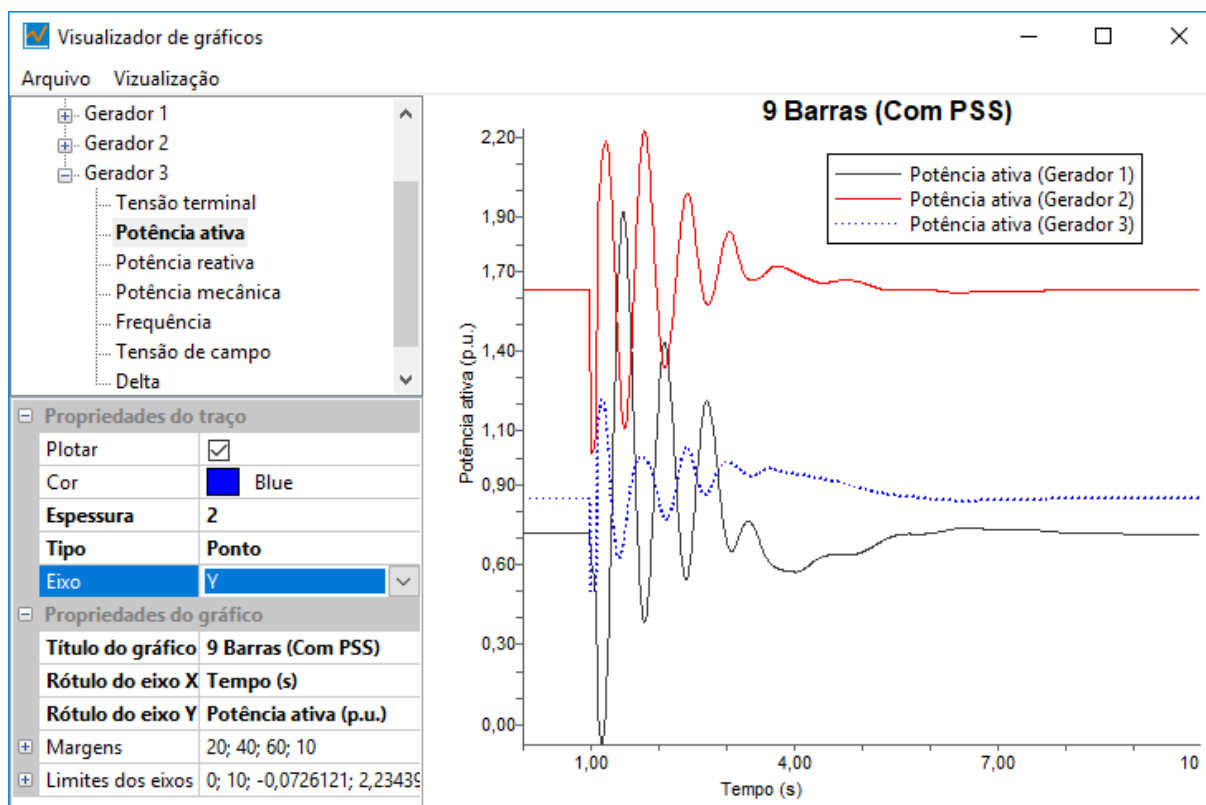
Relatório de dados							
Dados de fluxo de carga							
Dados da falta							
	Tipo	Nome	De	Para	Potência ativa (MW)	Potência reativa (MV)	Conectado
Fluxo de carga	Linha	Line 1	Barra 7	Barra 8	162,9996825292909	Potência reativa (p.u.)	Sim
	Linha	Line 1	Barra 8	Barra 7	-160,8030660029274	Potência reativa (VAR)	Sim
Barras	Linha	Line 2	Barra 8	Barra 9	60,8029904173775	Potência reativa (kVAR)	Sim
	Linha	Line 2	Barra 9	Barra 8	-60,3011984818099	Potência reativa (MVA)	Sim
Ramos	Linha	Line 3	Barra 7	Barra 5	0,0	0,0	Não
	Linha	Line 3	Barra 5	Barra 7	0,0	0,0	Não
	Linha	Line 4	Barra 5	Barra 4	-124,9999984222761	-50,000000975858	Sim
	Linha	Line 4	Barra 4	Barra 5	126,9787842349516	50,3543143252813	Sim
	Linha	Line 5	Barra 4	Barra 6	-46,7699756946437	24,6171842431277	Sim
	Linha	Line 5	Barra 6	Barra 4	47,3257149682823	-36,9471537236752	Sim
Linha	Line 6	Barra 6	Barra 9	-137,3257518134902	6,9471738032818	Sim	
Linha	Line 6	Barra 9	Barra 6	145,3010556245971	-7,7751313786814	Sim	

Fonte: Autoria própria.

Tal visualizador pode ser acessado no menu Ribbon “Ferramentas” e então no botão “Relatório de dados”, sendo exibido o formulário organizado em abas. As unidades de alguns dados desse relatório podem ser modificadas, sendo selecionadas no cabeçalho da tabela, como mostra a Figura 3.31. Os valores podem ser exportados para editores de texto e tabelas externos, selecionando e copiando para a área de transferência.

Para exibição dos resultados originados dos cálculos de estabilidade transitória, desenvolveu-se um visualizador de gráficos, apresentado na Figura 3.32.

Figura 3.32 – Visualizador de gráficos do PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Tal visualizador utiliza a biblioteca wxMathPlot, apresentada na seção 3.2.2.5, e permite ao usuário imprimir todas as curvas no tempo originadas dos resultados de estabilidade, acessados em dados hierárquicos em forma de árvore, identificados pelo tipo e nome do elemento de potência, além do tipo de curva. Os gráficos impressos podem ser caracterizados pela edição de suas propriedades do traço, ou seja, pode-se alterar a cor, espessura e tipo de traço (seis tipos disponíveis). Por padrão o eixo vertical é o tempo, porém o usuário pode alterar para qualquer curva disponível.

Várias propriedades gerais do gráfico podem ser editadas: título do gráfico, rótulos dos eixos x e y, margens e limites inferiores e superiores de ambos os eixos. O menu “Visualização” permite a inserção de exibição de legenda, linhas de grade e coordenadas do ponteiro do mouse (utilizada para destacar pontos na curva), além da possibilidade de alternar o tema de impressão entre escuro e claro, facilitando a visualização ou exportação do gráfico. No menu “Arquivo”,

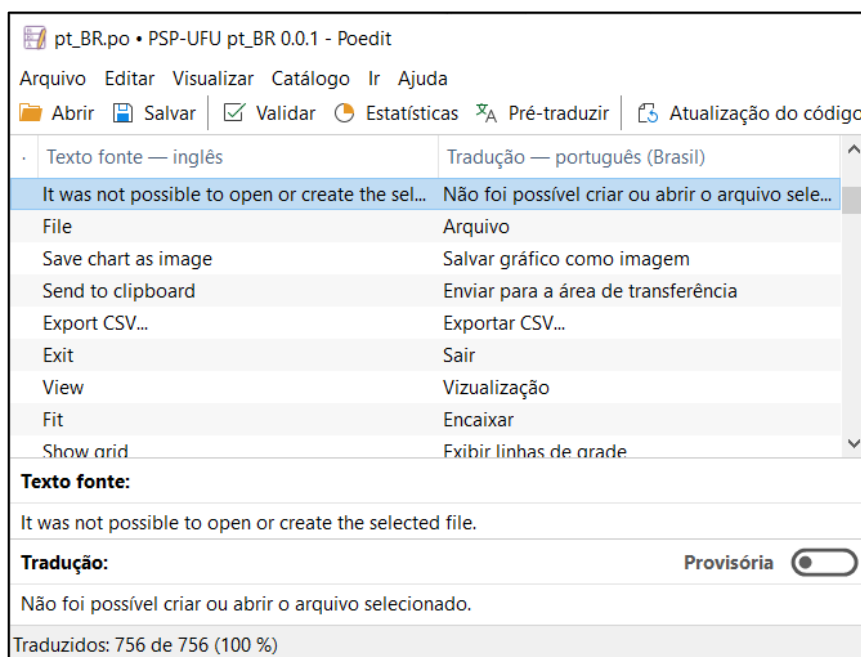
pode-se salvar o gráfico na forma de imagem (*.png*, *.jpg* ou *.bmp*) ou enviá-lo diretamente para a área de transferência. No mesmo menu também é permitido a exportação no formato *csv*, o qual poderá ser utilizado em outros visualizadores de gráficos.

A área de plotagem permite a navegação utilizando ferramentas de zoom, por área de seleção e comandos de mouse, e arrasto das curvas impressas.

3.4.5 Internacionalização

Com o intuito de possibilitar que o PSP-UFU seja o mais acessível possível a desenvolvedores e usuários finais, todo o programa, incluindo comentários do código fonte, documentação e elementos de interface gráfica, foram desenvolvidos em inglês. Porém idiomas diferentes do inglês podem ser selecionados nas propriedades gerais do programa, acessado no menu Ribbon “Arquivo” e botão “Configurações gerais”.

A filosofia de internacionalização do programa é baseada em catálogos de idiomas que estão presentes na distribuição do *software* e são carregados ao inicia-lo. Atualmente está disponível a tradução para português, desenvolvido nesse trabalho. Tais catálogos são gerados pela extração das cadeias de caracteres a serem traduzidas diretamente do código fonte (os quais foram previamente preparados) utilizando um *software* editor compatível com o GNU gettext [93]. Para a tradução em português utilizou-se o Poedit [94], apresentado na Figura 3.33.

Figura 3.33 – Exemplo de tradução do PSP-UFU para português utilizando o *software* livre Poedit.

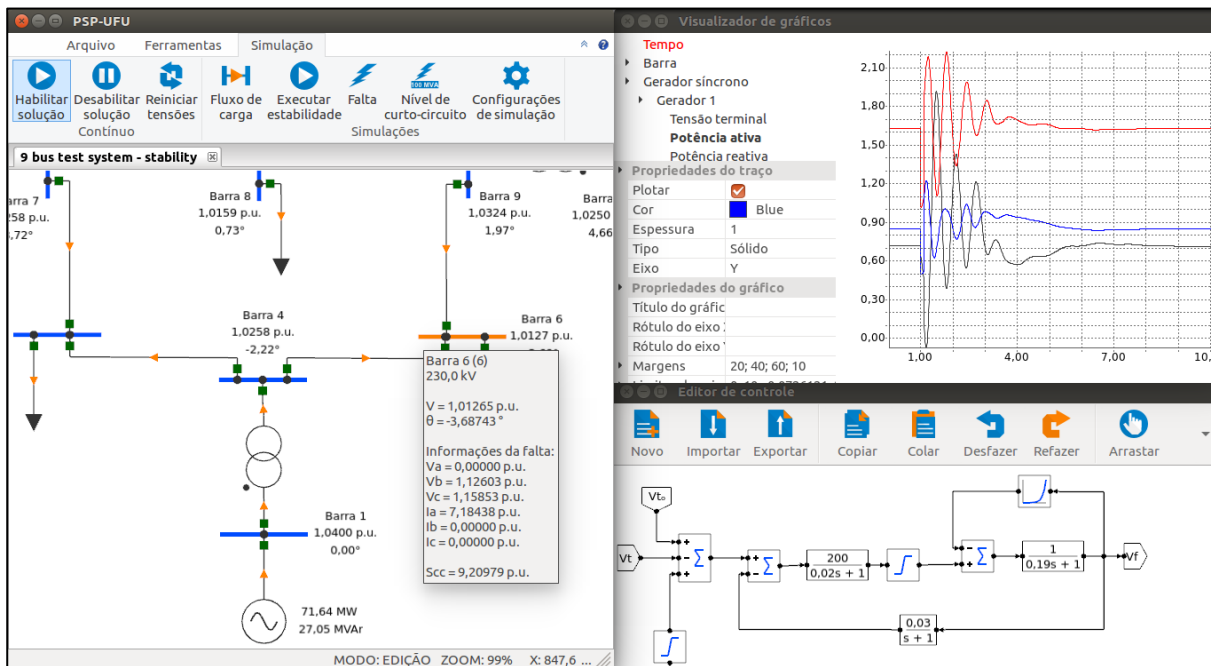
Fonte: Autoria própria.

As sentenças são traduzidas uma a uma e o catálogo é gerado automaticamente pelo Poedit. Tal catálogo pode ser então lido pelo programa, que irá apresentar as *strings* traduzidas. Com essa metodologia, a localização do programa realizada por outros desenvolvedores é bastante facilitada.

3.5 Multiplataforma

Como já foi dito anteriormente, o PSP-UFU é multiplataforma, ou seja, pode ser executado em múltiplos sistemas operacionais. Atualmente o programa está disponível para Windows e distribuições Linux baseadas em Debian (as distribuições mais conhecidas são Debian, Ubuntu e Mint). A Figura 3.34 mostra o PSP-UFU no Ubuntu.

Figura 3.34 – PSP-UFU no sistema operacional Ubuntu.



Fonte: Autoria própria.

Como pode-se observar, as telas são nativas aos sistemas operacionais. Isso se deve ao fato da utilização do wxWidgets.

3.6 Licença do PSP-UFU

O objetivo fundamental do licenciamento de código aberto é negar a qualquer um o direito de explorar exclusivamente um trabalho. Normalmente para que um trabalho alcance um público amplo, os criadores são obrigados a entregar seus direitos autorais a entidades que são capazes de distribuir e, conseqüentemente, explorar esse trabalho. Essas publicadoras de *software*, para proteger seus interesses de exploração, exigem dos consumidores ao adquirir um de seus produtos, que não copie o trabalho, não faça trabalhos derivados e não autorize ninguém que faça nenhuma dessas duas coisas. A eliminação dessas três restrições é o fundamento do licenciamento de código aberto [95].

Um *software* adquirido sob licença de código aberto permite sua livre distribuição de cópias (em troca de pagamento ou não), livre modificação e customização, além de distribuição de trabalhos derivados (novamente, sob pagamento ou não). A utilização de tais licenças trazem três grandes benefícios: **Inovação**, devido à possibilidade de programadores trabalharem em um projeto simultaneamente, com distintas áreas de conhecimento; **Confiabilidade**, por meio

do acesso livre ao código, além da quantidade maior de desenvolvedores e usuários; e **Longevidade**, uma vez que o *software* pode ser sempre adaptado e reescrito [95].

A licença escolhida para o PSP-UFU foi a GNU GLP, versão 2 [84]. Tal licença garante o direito autoral é adequada para um *software* livre, se baseando em três princípios propósitos [95]:

- O primeiro, e mais importante, é manter o *software* livre, no sentido de que ele pode ser distribuído e modificado sem a permissão adicional dos autores originais. Isso impõe uma restrição de imagem espelhada aos terceiros: embora tenha-se acesso livre ao trabalho licenciado, outros autores devem distribuir todos os trabalhos derivados sujeitos às mesmas limitações e restrições do trabalho original, ou seja, trabalhos derivados devem ser distribuídos sob a GPL ou licenças compatíveis.
- A segunda finalidade da GPL é garantir que os licenciados estejam cientes de que o *software* sob a licença é distribuído “como está” e sem garantia. Este propósito não é exclusivo da GPL, sendo presente na maioria das licenças de *copyleft*.
- O terceiro propósito, variante do primeiro, é que o *software* licenciado não possui patentes restritivas: na medida em que uma patente se aplica ao *software* licenciado, ele deve ser licenciado em paralelo com o código.

4 TESTES COMPARATIVOS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

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 [21], para os casos de fluxo de carga; Anafas [96], para curto-circuito; HarmZs [97] para análises harmônicas; MATLAB/Simulink [98] para sistemas de controle e finalmente com o Anatem [23], no estudo de estabilidade. Nos programas do Cepel (Anarede, Anafas e Anatem) utilizaram-se suas licenças acadêmicas, as quais são limitados a um número máximo de 120 barras [22].

No estudo de fluxo de carga são comparados quatro sistemas teste do IEEE: 14 barras, 30 barras, 57 barras e 118 barras [99]. Os sistemas são construídos no PSP-UFU e no Anarede e seus resultados de módulos e ângulos das tensões nodais, além de potências injetadas e absorvidas são comparados. Tais sistemas foram escolhidos para demonstrar a capacidade de realização dos cálculos corretamente pelo programa desenvolvido nesse trabalho para distintos tipos de sistemas.

Na análise de faltas são contemplados todos os tipos de curto-circuito desenvolvidos até então no sistema de 14 barras. Para garantir a correta implementação de todos componentes desse tipo de estudo, parâmetros como tap, defasagem e conexão de transformadores são considerados. O sistema é construído no Anarede e os resultados pré-falta originados do cálculo de fluxo de carga são exportados para o Anafas por meio do utilitário Anaana [96]. Os resultados das faltas: trifásica, fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra são então comparados entre o PSP-UFU e o Anafas.

Utilizando a ferramenta de teste dos sistemas de controle desenvolvida, apresentada na seção 3.4.2, são aplicadas entradas de degrau e oscilatória em um regulador automático de tensão do tipo DC1C em conjunto com o PSS do tipo PSS1A, pertencentes do padrão IEEE Std. 421.5-2016 [100]. Os resultados no tempo são comparados àqueles calculados pelo

MATLAB/Simulink, com o intuito de verificar a correta operação dos elementos e do algoritmo de solução do sistema de controle genérico criado.

As duas ferramentas relacionados a harmônicos descritas na seção 2.6 e desenvolvidas no PSP-UFU são objetos de comparação com o programa HarmZs para o sistema teste de 14 barras. Na ferramenta de distorções harmônicas são injetadas correntes harmônicas e observadas os THDs em todos os barramentos. Já para a resposta na frequência são comparados os resultados de impedância vistos de uma barra em um espectro de frequências especificado.

Finalmente, para investigar a correta operação da ferramenta de estabilidade criada no PSP-UFU em conjunto com a ferramenta de criação de controles genéricos serão simuladas perturbações no sistema de 14 barras e comparados aos resultados do Anatem. Os modelos dos geradores e controles utilizados no Anatem são os mais próximos possíveis daqueles implementados no PSP-UFU.

Todos os dados utilizados nas simulações estão presentes no Apêndice A.

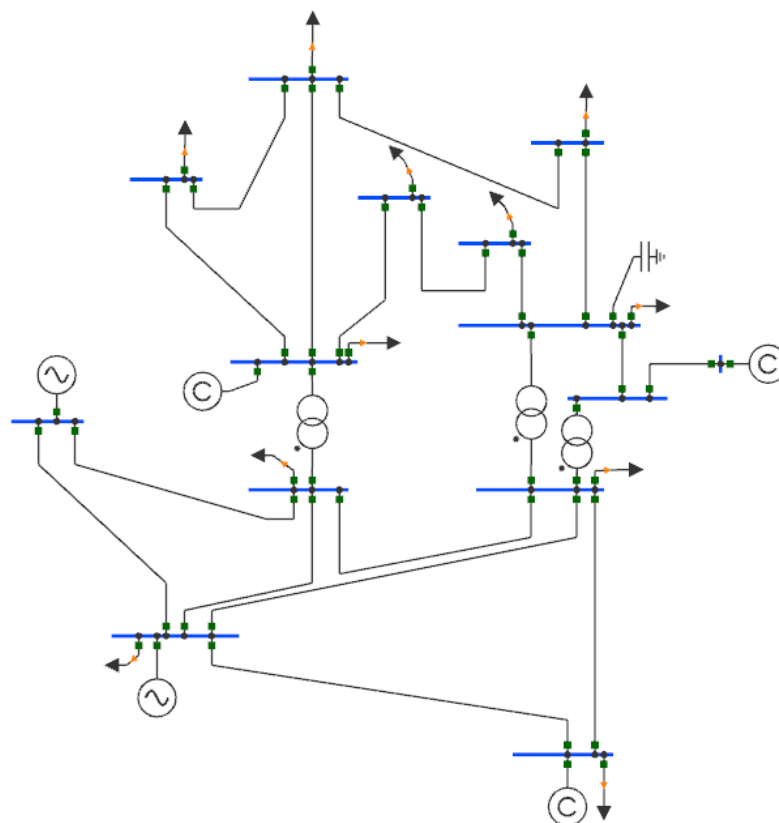
4.2 Fluxo de carga

Nos estudos de fluxo de carga foram criados os sistemas de 14, 30, 57 e 118 barras no PSP-UFU e no Anarede. São apresentados os resultados de barras do PSP-UFU e o desvio relativo àqueles produzidos pelo Anarede. A tolerância utilizada para convergência foi de 10^{-7} p.u.

4.2.1 Sistema teste de 14 barras

A Figura 4.1 apresenta o sistema teste do IEEE de 14 barras criado no PSP-UFU.

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



Fonte: Autoria própria.

Os resultados de barras calculados pelo PSP-UFU são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 14 barras gerado pelo PSP-UFU.

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Barra 01	Referência	1,0600	0,00	232,3933	-16,5493
Barra 02	PV	1,0450	-4,98	18,3000	30,8571
Barra 03	PV	1,0100	-12,73	-94,2000	6,0753
Barra 04	PQ	1,0177	-10,31	-47,8000	3,9000
Barra 05	PQ	1,0195	-8,77	-7,6000	-1,6000
Barra 06	PV	1,0700	-14,22	-11,2000	5,2309
Barra 07	PQ	1,0615	-13,36	0,0000	0,0000
Barra 08	PV	1,0900	-13,36	0,0000	17,6235
Barra 09	PQ	1,0559	-14,94	-29,5000	-16,6000
Barra 10	PQ	1,0510	-15,10	-9,0000	-5,8000
Barra 11	PQ	1,0569	-14,79	-3,5000	-1,8000
Barra 12	PQ	1,0552	-15,08	-6,1000	-1,6000
Barra 13	PQ	1,0504	-15,16	-13,5000	-5,8000
Barra 14	PQ	1,0355	-16,03	-14,9000	-5,0000

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 4.2 são apresentados os desvios relativos dos resultados acima, comparados ao Anarede.

Tabela 4.2 – Desvio do resultado de barras do sistema de 14 barras do estudo de fluxo de carga.

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
Barra 01	0,0000%	0,0000%	0,0014%	0,0042%
Barra 02	0,0000%	0,0430%	0,0000%	0,0003%
Barra 03	0,0000%	0,0023%	0,0000%	0,0057%
Barra 04	0,0323%	0,0033%	0,0000%	0,0000%
Barra 05	0,0477%	0,0213%	0,0000%	0,0000%
Barra 06	0,0000%	0,0009%	0,0000%	0,0011%
Barra 07	0,0452%	0,0131%	0,0000%	0,0000%
Barra 08	0,0000%	0,0131%	0,0000%	0,0026%
Barra 09	0,0065%	0,0101%	0,0000%	0,0000%
Barra 10	0,0015%	0,0010%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0088%	0,0175%	0,0000%	0,0000%
Barra 12	0,0179%	0,0071%	0,0000%	0,0000%
Barra 13	0,0364%	0,0102%	0,0000%	0,0000%
Barra 14	0,0454%	0,0143%	0,0000%	0,0000%

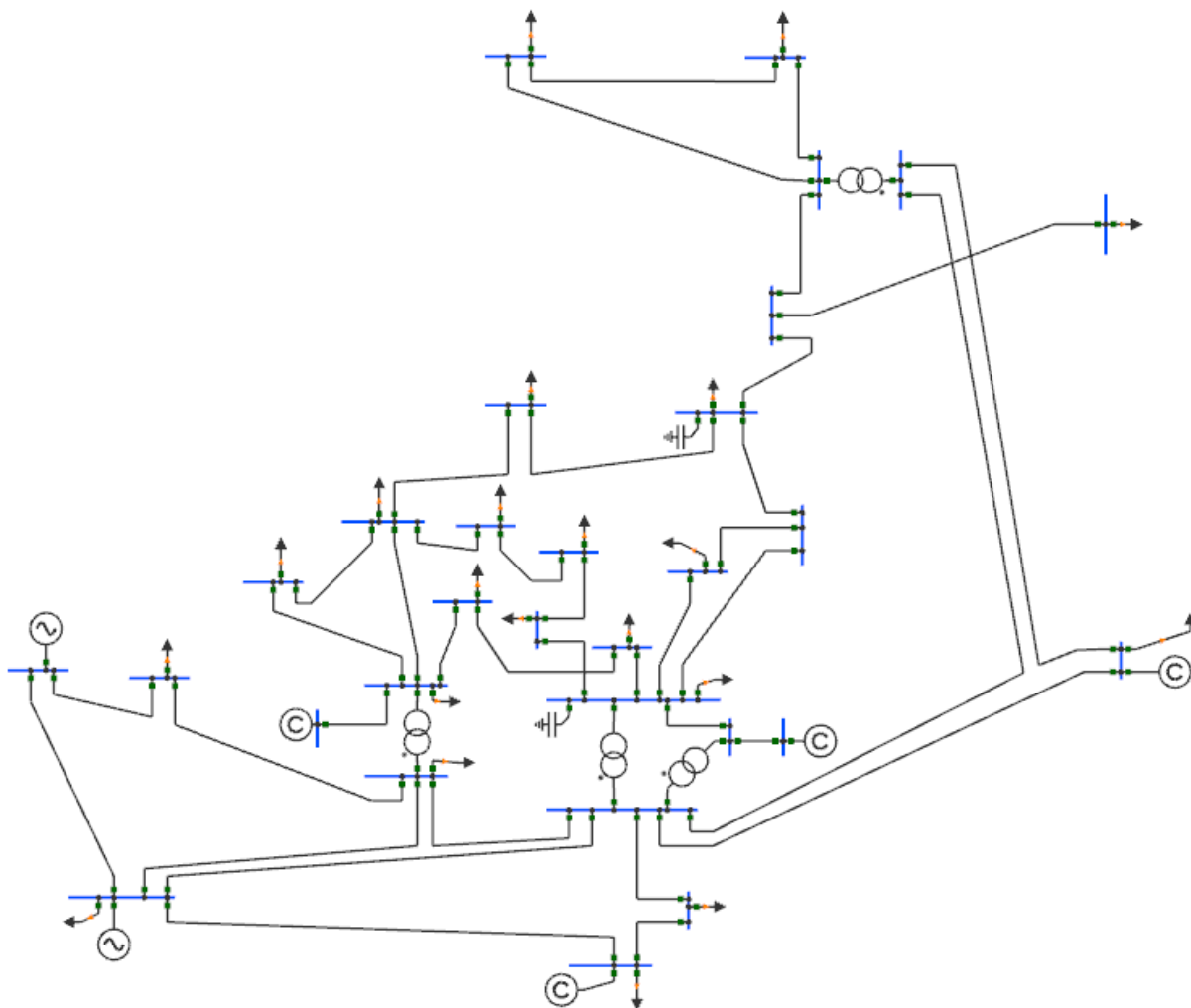
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que o maior desvio encontrado entre os programas foi de 0,0477% (no módulo da tensão da barra 5, com uma divergência absoluta de 0,0005 p.u.), ou seja, os resultados são praticamente idênticos. Tal divergência é ocasionada pela precisão na quantidade de casas decimais nos resultados de saída dos programas, uma vez que esse número é limitado a três no Anarede (ao exportar com precisão estendida), enquanto no PSP-UFU esse valor é de treze casas decimais. No PSP-UFU, os métodos numéricos de Gauss-Seidel e Newton Raphson geraram resultados idênticos, sendo que o Gauss-Seidel necessitou de 171 iterações e o Newton-Raphson 34 iterações. O tempo necessário para o cálculo do fluxo de carga para esse sistema é desprezível ($< 500 \mu s$) para ambos os métodos.

4.2.2 Sistema teste de 30 barras

A Figura 4.2 apresenta o sistema teste do IEEE de 30 barras criado no PSP-UFU.

Figura 4.2 – Sistema teste do IEEE de 30 barras criado no PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados de barras desse sistema calculados pelo PSP-UFU são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 30 barras gerado pelo PSP-UFU.

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Barra 14	PQ	1,0423	-15,84	-6,2000	-1,6000
Barra 15	PQ	1,0377	-15,93	-8,2000	-2,5000
Barra 16	PQ	1,0444	-15,53	-3,5000	-1,8000
Barra 17	PQ	1,0399	-15,86	-9,0000	-5,8000
Barra 18	PQ	1,0281	-16,54	-3,2000	-0,9000
Barra 19	PQ	1,0256	-16,72	-9,5000	-3,4000
Barra 20	PQ	1,0297	-16,52	-2,2000	-0,7000
Barra 21	PQ	1,0327	-16,14	-17,5000	-11,2000

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Barra 22	PQ	1,0332	-16,13	0,0000	0,0000
Barra 23	PQ	1,0272	-16,32	-3,2000	-1,6000
Barra 24	PQ	1,0216	-16,50	-8,7000	-6,7000
Barra 25	PQ	1,0173	-16,07	0,0000	0,0000
Barra 26	PQ	0,9996	-16,49	-3,5000	-2,3000
Barra 29	PQ	1,0034	-16,77	-2,4000	-0,9000
Barra 30	PQ	0,9919	-17,66	-10,6000	-1,9000
Blaine	PQ	1,0024	-12,87	-22,8000	-10,9000
Claytor	PV	1,0430	-5,35	18,3000	36,8648
Cloverdle 1	PQ	1,0068	-11,69	0,0000	0,0000
Cloverdle 2	PQ	1,0232	-15,54	0,0000	0,0000
Fieldale	PV	1,0100	-14,17	-94,2000	17,9360
Glen-Lyn	Referência	1,0600	0,00	260,9518	-16,5265
Hancock 1	PQ	1,0117	-9,28	-7,6000	-1,6000
Hancock 2	PV	1,0710	-14,94	0,0000	10,6306
Hancock 3	PQ	1,0571	-14,94	-11,2000	-7,5000
Kumis	PQ	1,0207	-7,53	-2,4000	-1,2000
Reusens	PV	1,0100	-11,81	-30,0000	7,2186
Roanoke 1	PQ	1,0509	-14,11	0,0000	0,0000
Roanoke 2	PV	1,0820	-14,11	0,0000	16,1798
Roanoke 3	PQ	1,0102	-11,07	0,0000	0,0000
Roanoke 4	PQ	1,0451	-15,70	-5,8000	-2,0000

Fonte: Autoria própria.

Tais resultados foram obtidos igualmente nos para o método de Gauss-Seidel (414 iterações em 3,0 ms) e Newton-Raphson (96 iterações em 51,0 ms). Novamente, são apresentados os resultados comparativos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Desvio do resultado de barras do sistema de 30 barras do estudo de fluxo de carga.

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
Barra 14	0,0254%	0,0015%	0,0000%	0,0000%
Barra 15	0,0322%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
Barra 16	0,0358%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Barra 17	0,0111%	0,0177%	0,0000%	0,0000%
Barra 18	0,0132%	0,0079%	0,0000%	0,0000%
Barra 19	0,0356%	0,0153%	0,0000%	0,0000%
Barra 20	0,0272%	0,0086%	0,0000%	0,0000%
Barra 21	0,0282%	0,0165%	0,0000%	0,0000%
Barra 22	0,0232%	0,0018%	0,0000%	0,0000%
Barra 23	0,0160%	0,0069%	0,0000%	0,0000%
Barra 24	0,0426%	0,0008%	0,0000%	0,0000%
Barra 25	0,0313%	0,0125%	0,0000%	0,0000%

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
Barra 26	0,0040%	0,0140%	0,0000%	0,0000%
Barra 29	0,0388%	0,0170%	0,0000%	0,0000%
Barra 30	0,0014%	0,0133%	0,0000%	0,0000%
Blaine	0,0361%	0,0194%	0,0000%	0,0000%
Claytor	0,0000%	0,0268%	0,0000%	0,0007%
Cloverdle 1	0,0202%	0,0081%	0,0000%	0,0000%
Cloverdle 2	0,0223%	0,0063%	0,0000%	0,0000%
Fieldale	0,0000%	0,0151%	0,0000%	0,0002%
Glen-Lyn	0,0000%	0,0000%	0,0007%	0,0211%
Hancock 1	0,0271%	0,0280%	0,0000%	0,0000%
Hancock 2	0,0000%	0,0093%	0,0000%	0,0036%
Hancock 3	0,0098%	0,0093%	0,0000%	0,0000%
Kumis	0,0284%	0,0279%	0,0000%	0,0000%
Reusens	0,0000%	0,0013%	0,0000%	0,0049%
Roanoke 1	0,0098%	0,0152%	0,0000%	0,0000%
Roanoke 2	0,0000%	0,0152%	0,0000%	0,0012%
Roanoke 3	0,0228%	0,0142%	0,0000%	0,0000%
Roanoke 4	0,0104%	0,0097%	0,0000%	0,0000%

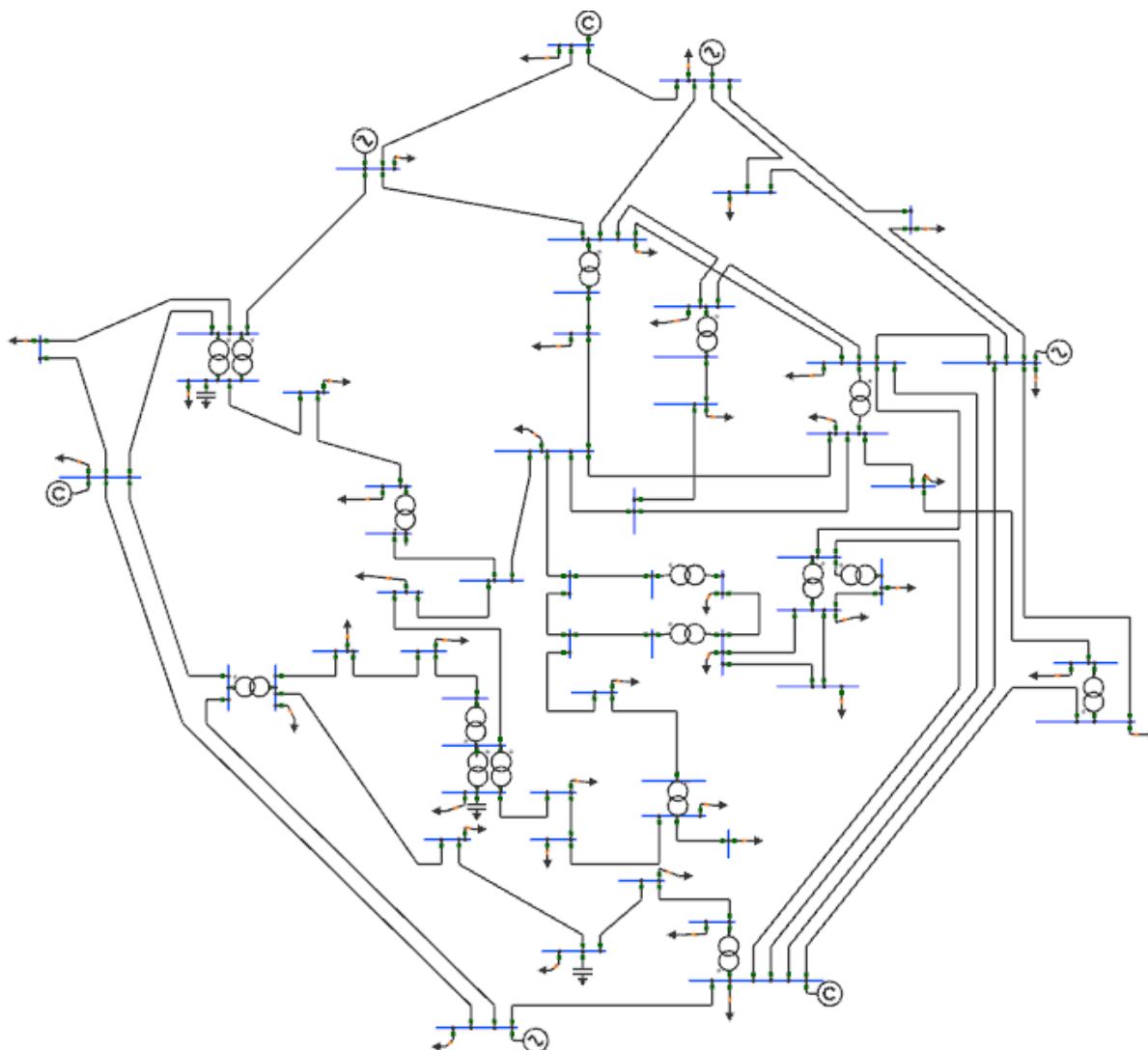
Fonte: Autorial própria.

De forma semelhante ao sistema anterior, a divergência encontrada foi mínima com um desvio máximo de 0,0426% (no módulo da tensão da barra 24, com uma divergência de 0,0004 p.u.).

4.2.3 Sistema teste de 57 barras

A Figura 4.3 apresenta o sistema teste do IEEE de 57 barras criado no PSP-UFU.

Figura 4.3 – Sistema teste do IEEE de 57 barras criado no PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Tal sistema calculado pelo PSP-UFU é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 57 barras gerado pelo PSP-UFU.

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Barra 10	PQ	0,9862	-11,45	-5,0000	-2,0000
Barra 13	PQ	0,9789	-9,80	-18,0000	-2,3000
Barra 14	PQ	0,9702	-9,35	-10,5000	-5,3000
Barra 15	PQ	0,9880	-7,19	-22,0000	-5,0000
Barra 16	PQ	1,0134	-8,86	-43,0000	-3,0000
Barra 17	PQ	1,0175	-5,40	-42,0000	-8,0000
Barra 19	PQ	0,9702	-13,23	-3,3000	-0,6000

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Barra 20	PQ	0,9638	-13,44	-2,3000	-1,0000
Barra 21	PQ	1,0085	-12,93	0,0000	0,0000
Barra 22	PQ	1,0097	-12,87	0,0000	0,0000
Barra 23	PQ	1,0083	-12,94	-6,3000	-2,1000
Barra 24	PQ	0,9992	-13,29	0,0000	0,0000
Barra 25	PQ	0,9825	-18,17	-6,3000	-3,2000
Barra 26	PQ	0,9588	-12,98	0,0000	0,0000
Barra 27	PQ	0,9815	-11,51	-9,3000	-0,5000
Barra 28	PQ	0,9967	-10,48	-4,6000	-2,3000
Barra 29	PQ	1,0102	-9,77	-17,0000	-2,6000
Barra 30	PQ	0,9627	-18,72	-3,6000	-1,8000
Barra 31	PQ	0,9359	-19,38	-5,8000	-2,9000
Barra 32	PQ	0,9499	-18,51	-1,6000	-0,8000
Barra 33	PQ	0,9476	-18,55	-3,8000	-1,9000
Barra 34	PQ	0,9592	-14,15	0,0000	0,0000
Barra 35	PQ	0,9662	-13,91	-6,0000	-3,0000
Barra 36	PQ	0,9758	-13,63	0,0000	0,0000
Barra 37	PQ	0,9849	-13,45	0,0000	0,0000
Barra 38	PQ	1,0128	-12,73	-14,0000	-7,0000
Barra 39	PQ	0,9828	-13,49	0,0000	0,0000
Barra 40	PQ	0,9728	-13,66	0,0000	0,0000
Barra 42	PQ	0,9665	-15,53	-7,1000	-4,4000
Barra 44	PQ	1,0168	-11,86	-12,0000	-1,8000
Barra 45	PQ	1,0360	-9,27	0,0000	0,0000
Barra 46	PQ	1,0598	-11,12	0,0000	0,0000
Barra 47	PQ	1,0333	-12,51	-29,7000	-11,6000
Barra 48	PQ	1,0274	-12,61	0,0000	0,0000
Barra 49	PQ	1,0362	-12,94	-18,0000	-8,5000
Barra 50	PQ	1,0233	-13,41	-21,0000	-10,5000
Barra 51	PQ	1,0523	-12,53	-18,0000	-5,3000
Barra 52	PQ	0,9804	-11,50	-4,9000	-2,2000
Barra 53	PQ	0,9709	-12,25	-20,0000	-10,0000
Barra 54	PQ	0,9963	-11,71	-4,1000	-1,4000
Barra 56	PQ	0,9684	-16,07	-7,6000	-2,2000
Barra 57	PQ	0,9648	-16,58	-6,7000	-2,0000
Barra 5	PQ	0,9765	-8,55	-13,0000	-4,0000
Barra 7	PQ	0,9842	-7,60	0,0000	0,0000
Beaver-Ck	PV	0,9800	-8,67	-75,0000	-1,1286
Clinch-Rv	PV	1,0050	-4,48	300,0000	40,0996
Glen-Lyn	PV	1,0150	-10,47	-67,0000	104,6309
Kanawha	Referência	1,0400	0,00	423,6638	111,8496
Logan	PV	0,9850	-5,99	-1,0000	-21,9049
Saltville 1	PV	0,9800	-9,58	-121,0000	-23,7116

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Saltville 2	PQ	1,0308	-10,80	-6,8000	-3,4000
Sprigg 1	PQ	0,9808	-7,34	0,0000	0,0000
Sprigg 2	PQ	1,0007	-11,73	-27,2000	-9,8000
Tazewell 1	PQ	0,9740	-10,19	0,0000	0,0000
Tazewell 2	PQ	0,9962	-14,08	-6,3000	-3,0000
Tazewell 3	PQ	1,0096	-11,35	-2,0000	-1,0000
Turner	PV	1,0100	-1,19	-3,0000	-88,7550

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados comparativos ao Anarede.

Tabela 4.6 – Desvio do resultado de barras do sistema de 57 barras do estudo de fluxo de carga.

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
Barra 10	0,0043%	0,0171%	0,0000%	0,0000%
Barra 13	0,0013%	0,0021%	0,0000%	0,0000%
Barra 14	0,0024%	0,0039%	0,0000%	0,0000%
Barra 15	0,0032%	0,0063%	0,0000%	0,0000%
Barra 16	0,0364%	0,0114%	0,0000%	0,0000%
Barra 17	0,0447%	0,0254%	0,0000%	0,0000%
Barra 19	0,0043%	0,0200%	0,0000%	0,0000%
Barra 20	0,0010%	0,0202%	0,0000%	0,0000%
Barra 21	0,0494%	0,0205%	0,0000%	0,0000%
Barra 22	0,0253%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
Barra 23	0,0327%	0,0168%	0,0000%	0,0000%
Barra 24	0,0033%	0,0038%	0,0000%	0,0000%
Barra 25	0,0021%	0,0055%	0,0000%	0,0000%
Barra 26	0,0019%	0,0151%	0,0000%	0,0000%
Barra 27	0,0042%	0,0246%	0,0000%	0,0000%
Barra 28	0,0022%	0,0211%	0,0000%	0,0000%
Barra 29	0,0218%	0,0292%	0,0000%	0,0000%
Barra 30	0,0040%	0,0060%	0,0000%	0,0000%
Barra 31	0,0035%	0,0033%	0,0000%	0,0000%
Barra 32	0,0027%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
Barra 33	0,0020%	0,0020%	0,0000%	0,0000%
Barra 34	0,0000%	0,0186%	0,0000%	0,0000%
Barra 35	0,0012%	0,0036%	0,0000%	0,0000%
Barra 36	0,0029%	0,0116%	0,0000%	0,0000%
Barra 37	0,0014%	0,0104%	0,0000%	0,0000%
Barra 38	0,0185%	0,0175%	0,0000%	0,0000%
Barra 39	0,0023%	0,0157%	0,0000%	0,0000%
Barra 40	0,0011%	0,0079%	0,0000%	0,0000%
Barra 42	0,0027%	0,0006%	0,0000%	0,0000%

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
Barra 44	0,0198%	0,0166%	0,0000%	0,0000%
Barra 45	0,0005%	0,0039%	0,0000%	0,0000%
Barra 46	0,0191%	0,0062%	0,0000%	0,0000%
Barra 47	0,0243%	0,0144%	0,0000%	0,0000%
Barra 48	0,0341%	0,0011%	0,0000%	0,0000%
Barra 49	0,0237%	0,0101%	0,0000%	0,0000%
Barra 50	0,0329%	0,0017%	0,0000%	0,0000%
Barra 51	0,0249%	0,0224%	0,0000%	0,0000%
Barra 52	0,0032%	0,0148%	0,0000%	0,0000%
Barra 53	0,0047%	0,0225%	0,0000%	0,0000%
Barra 54	0,0019%	0,0137%	0,0000%	0,0000%
Barra 56	0,0032%	0,0042%	0,0000%	0,0000%
Barra 57	0,0027%	0,0139%	0,0000%	0,0000%
Barra 5	0,0001%	0,0248%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0002%	0,0230%	0,0000%	0,0000%
Beaver-Ck	0,0000%	0,0053%	0,0000%	0,0001%
Clinch-Rv	0,0000%	0,0584%	0,0000%	0,0010%
Glen-Lyn	0,0000%	0,0235%	0,0000%	0,0008%
Kanawha	0,0000%	0,0000%	0,0009%	0,0003%
Logan	0,0000%	0,0120%	0,0000%	0,0000%
Saltville 1	0,0000%	0,0095%	0,0000%	0,0001%
Saltville 2	0,0208%	0,0081%	0,0000%	0,0000%
Sprigg 1	0,0021%	0,0303%	0,0000%	0,0000%
Sprigg 2	0,0340%	0,0102%	0,0000%	0,0000%
Tazewell 1	0,0039%	0,0032%	0,0000%	0,0000%
Tazewell 2	0,0017%	0,0063%	0,0000%	0,0000%
Tazewell 3	0,0432%	0,0144%	0,0000%	0,0000%
Turner	0,0000%	0,1805%	0,0000%	0,0000%

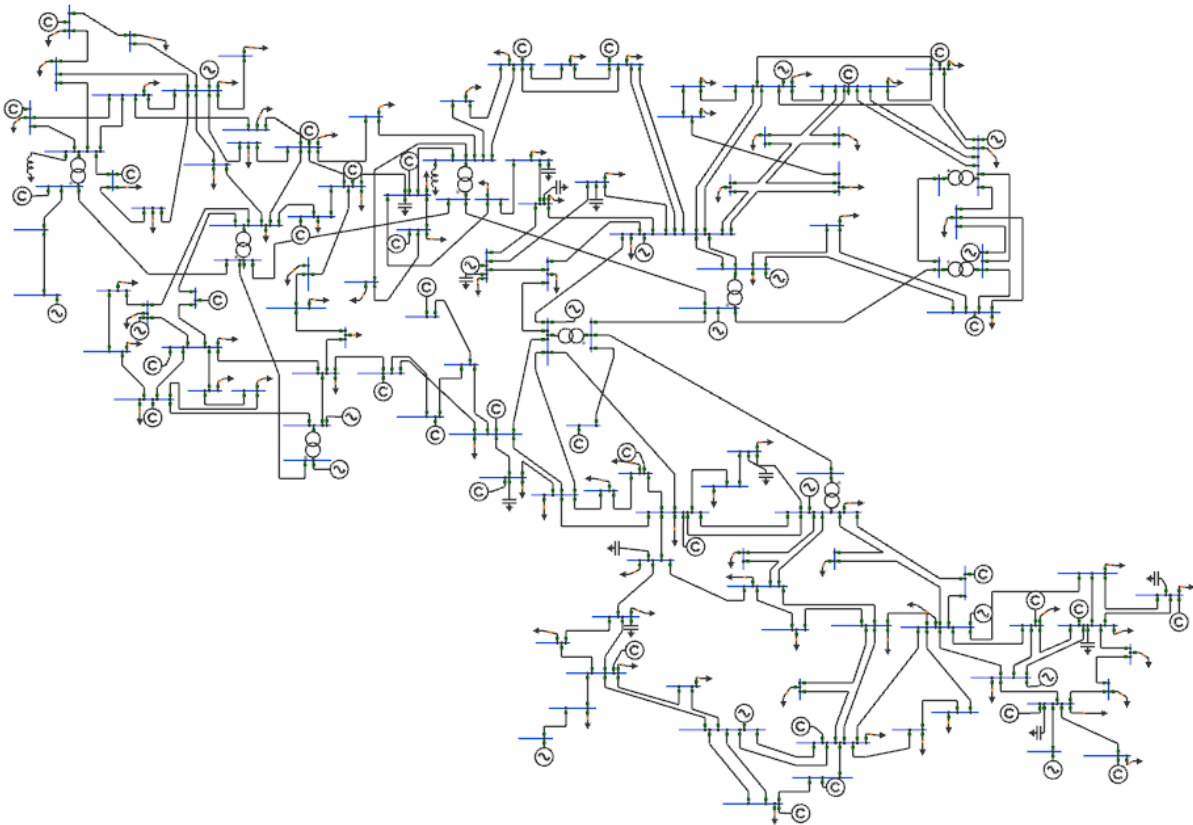
Fonte: Autoria própria.

Na tabela acima observa-se que o maior desvio calculado é de 0,1805% (ângulo da tensão da barra Turner) que, apesar de ser um desvio mais elevado comparado às outras simulações, ainda é um desvio pequeno, uma vez que o desvio absoluto é de 0,0021°. Da mesma forma que as simulações anteriores, os métodos de Gauss-Seidel (517 iterações, 16 ms) e Newton-Raphson (224 iterações, 490 ms) resultaram nos mesmos valores.

4.2.4 Sistema teste de 118 barras

Finalmente, um último sistema foi construído no PSP-UFU, representado pela Figura 4.4.

Figura 4.4 – Sistema teste do IEEE de 118 barras criado no PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados desse sistema são apresentados pela Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados de barras do estudo de fluxo de carga do sistema IEEE 118 barras gerado pelo PSP-UFU.

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Adams	PQ	0,9578	12,19	-18,0000	-3,0000
Baileysv	PQ	0,9928	27,55	-38,0000	-15,0000
BeaverCk	PV	0,9850	32,55	-24,0000	-20,8224
Bellefnt	PV	0,9580	21,67	-68,0000	-32,6272
Bequine	PQ	1,0429	28,30	0,0000	0,0000
BetsyLne	PQ	0,9798	31,00	-11,0000	-7,0000
Blaine	PQ	0,9662	19,43	-2,0000	-1,0000
Bradley	PQ	1,0235	27,45	-34,0000	-8,0000
Breed	PV	1,0500	35,88	450,0000	-51,0422
CabinCrk	PV	1,0400	29,00	347,0000	78,9012
Caldwell	PQ	0,9811	27,72	-42,0000	-31,0000
CapitlHl	PQ	1,0092	26,75	-39,0000	-32,0000
Chemical	PQ	1,0034	26,45	-71,0000	-26,0000
Claytor	PV	1,0010	24,48	17,0000	25,6894

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
ClinchRv	PV	1,0050	39,73	607,0000	-13,6611
Cloverdl	PQ	0,9611	20,38	-43,0000	-16,0000
CollCmr	PQ	0,9997	21,25	-7,0000	-3,0000
Concord	PQ	0,9683	11,64	-34,0000	-16,0000
Corey	PQ	0,9738	10,96	-20,0000	-8,0000
Crooksvl	PQ	1,0171	20,80	-34,0000	0,0000
DanRiver	PV	0,9800	19,78	36,0000	-1,8438
Danville	PV	0,9750	15,04	-68,0000	28,5117
Darrah	PV	0,9430	21,80	-68,0000	-30,7310
DeerCrk 1	PV	0,9670	13,01	-36,0000	4,5656
DeerCrk 2	PV	0,9930	14,00	-6,0000	6,1084
Delaware	PV	0,9640	15,05	-59,0000	-35,3383
EastLima 1	PQ	0,9620	17,11	0,0000	0,0000
EastLima 2	PQ	0,9921	11,97	0,0000	0,0000
Fieldale	PV	0,9730	18,14	-39,0000	-24,7430
Franklin	PQ	0,9670	18,98	-8,0000	-3,0000
Fremont	PQ	0,9875	35,68	-48,0000	-10,0000
FtWayne	PV	0,9700	11,49	-90,0000	-25,9337
GlenLyn	PV	1,0170	28,08	215,0000	90,8732
GoshenJt	PQ	0,9836	11,78	-14,0000	-1,0000
Grant	PQ	0,9632	12,90	-24,0000	-4,0000
Hancock	PV	0,9710	21,74	-38,0000	-16,9991
Haviland	PQ	0,9716	10,86	-23,0000	-9,0000
Hazard	PQ	0,9867	31,18	-21,0000	-10,0000
HickryCk	PQ	0,9677	11,87	-39,0000	-10,0000
Hillsbro	PV	0,9800	21,11	-12,0000	-11,1302
Hinton	PV	1,0100	27,08	-42,0000	-17,5370
HolstonT	PV	0,9800	33,35	-10,0000	-15,4040
Holston	PV	0,9850	33,33	-163,0000	17,2971
Howard	PV	0,9850	8,67	-96,0000	18,0029
JacksnRd	PQ	0,9893	12,86	-19,0000	-2,0000
Jay	PQ	0,9584	13,78	-14,0000	-8,0000
Kammer	PQ	0,9837	24,60	0,0000	0,0000
Kanawha	PQ	0,9968	28,15	0,0000	0,0000
Kankakee	PV	0,9900	13,30	-52,0000	-6,0703
KygerCrk	PV	1,0050	27,17	-184,0000	51,3237
Lincoln	PV	0,9630	11,31	-45,0000	-35,1727
Logan	PQ	0,9888	27,28	-54,0000	-27,0000
Madison	PV	0,9680	15,61	-71,0000	-10,9696
McKinley	PV	0,9730	11,79	-60,0000	-7,6348
Medford	PQ	0,9605	14,72	-22,0000	-7,0000
Mullin	PQ	0,9616	13,89	-17,0000	-7,0000
Muskngum 1	PV	1,0050	27,72	391,0000	80,7584

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Muskngum 2	PV	1,0500	27,56	353,0000	-19,9506
N.E.	PQ	0,9839	12,20	-25,0000	-10,0000
N.Newark	PQ	0,9867	15,78	-53,0000	-22,0000
Natrium	PV	0,9980	23,51	-77,0000	-12,7412
Newcmrst	PQ	0,9669	16,37	-17,0000	-8,0000
NPortsmt	PQ	0,9868	22,21	0,0000	0,0000
NwCarlsl	PV	0,9980	15,58	-39,0000	-27,0057
NwLibrty	PQ	0,9705	8,60	-27,0000	-11,0000
Olive 1	PV	1,0150	21,05	-28,0000	62,7287
Olive 2	PQ	1,0020	16,03	0,0000	0,0000
Philo	PV	1,0250	21,03	117,0000	85,6341
Pinevllle	PV	1,0150	31,44	4,0000	11,0216
Pokagon	PQ	0,9714	11,52	-20,0000	-9,0000
Portsmth	PV	0,9840	22,62	-66,0000	-10,3363
Randolph	PQ	0,9695	16,33	-10,0000	-5,0000
Reusens	PV	0,9520	17,58	-50,0000	-5,4369
Riversde	PV	0,9550	10,98	-51,0000	-30,1039
Roanoke	PV	0,9650	20,63	-31,0000	-38,8862
Rockhill	PV	0,9860	11,51	-59,0000	-32,8339
S.Kenton	PQ	0,9786	11,46	-18,0000	-7,0000
S.Tiffin	PQ	0,9668	7,08	-37,0000	-10,0000
Saltvllle	PV	0,9930	33,84	-65,0000	-9,5147
Sargents	PV	0,9910	22,00	-6,0000	9,6513
SCoshoct	PQ	0,9568	15,42	-18,0000	-5,0000
Smythe	PQ	0,9916	32,34	-5,0000	-3,0000
Sorenson 1	PQ	0,9855	19,04	0,0000	0,0000
Sorenson 2	PQ	0,9951	14,01	-11,0000	-3,0000
SouthBnd	PQ	0,9851	13,02	-70,0000	-23,0000
Sporn 1	PQ	1,0032	27,60	0,0000	0,0000
Sporn 2	Referência	1,0350	30,00	513,4778	-82,3858
Sprigg	PQ	0,9846	28,46	-20,0000	-10,0000
Sterling	PV	0,9800	11,08	-31,0000	-18,9204
SthPoint	PQ	0,9673	22,93	-47,0000	-11,0000
Summerfl	PQ	1,0197	24,92	-28,0000	-7,0000
Sundial	PQ	1,0114	27,92	-15,0000	-9,0000
Sunnysde	PV	0,9540	15,25	-84,0000	-20,2856
Switchbk	PQ	0,9908	28,69	-30,0000	-16,0000
SWKammer	PQ	0,9932	23,23	-78,0000	-3,0000
TannrsCk 1	PV	1,0150	29,96	314,0000	9,8873
TannrsCk 2	PV	1,0500	28,18	220,0000	49,7202
Tazewell	PQ	0,9874	30,84	-12,0000	-7,0000
Tidd 1	PQ	0,9687	22,83	0,0000	0,0000
Tidd 2	PV	0,9850	19,45	-122,0000	-36,1669

Nome	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Potência ativa (MW)	Potência reativa (Mvar)
Torrey	PV	0,9550	15,35	-65,0000	-28,0974
Trenton	PV	0,9920	21,12	-13,0000	-15,4018
Turner	PV	1,0060	26,76	-61,0000	-16,1340
TwinBrch	PV	0,9900	12,50	38,0000	81,2723
W.Kammer	PV	0,9950	24,13	160,0000	-40,3942
W.Lancst	PV	1,0050	18,58	-9,0000	-15,2460
Wagenhls	PV	0,9520	15,06	-63,0000	-17,3358
WCambrdg	PQ	1,0011	18,99	-17,0000	-4,0000
WestEnd	PV	0,9700	7,53	-66,0000	3,7688
WestLima	PQ	0,9807	11,08	-33,0000	-9,0000
WHuntngd	PQ	0,9494	21,95	-33,0000	-15,0000
WMedford	PQ	0,9607	14,73	-8,0000	-3,0000
WMVernon	PQ	0,9851	13,95	-16,0000	-8,0000
WNwPhil1	PQ	0,9706	16,45	-12,0000	-3,0000
WNwPhil2	PQ	0,9590	15,60	-12,0000	-3,0000
Wooster	PQ	0,9460	14,44	-23,0000	-11,0000
Wythe	PQ	0,9928	29,65	-22,0000	-15,0000
Zanesvll	PQ	1,0206	20,03	-20,0000	-11,0000

Fonte: Autoria própria.

Não foram encontradas divergência significativas entre os métodos de solução de Gauss-Seidel (1573 iterações, 167,0 ms) e Newton-Raphson (18 iterações, 124,0 ms). Os resultados comparativos são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Desvio do resultado de barras do sistema de 118 barras do estudo de fluxo de carga.

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
Adams	0,0046%	0,0008%	0,0000%	0,0000%
Baileysv	0,0005%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
BeaverCk	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0017%
Bellefnt	0,0000%	0,0010%	0,0000%	0,0006%
Bequine	0,0078%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
BetsyLne	0,0033%	0,0001%	0,0000%	0,0000%
Blaine	0,0012%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
Bradley	0,0479%	0,0001%	0,0000%	0,0000%
Breed	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0042%
CabinCrk	0,0000%	0,0008%	0,0000%	0,0015%
Caldwell	0,0015%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
CapitlHI	0,0221%	0,0008%	0,0000%	0,0000%
Chemical	0,0423%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Claytor	0,0000%	0,0009%	0,0000%	0,0015%
ClinchRv	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0084%

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
Cloverdl	0,0038%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
CollCnr	0,0015%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Concord	0,0003%	0,0019%	0,0000%	0,0000%
Corey	0,0025%	0,0017%	0,0000%	0,0000%
Crooksvl	0,0053%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
DanRiver	0,0000%	0,0004%	0,0000%	0,0095%
Danville	0,0000%	0,0008%	0,0000%	0,0011%
Darrah	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0001%
DeerCrk 1	0,0000%	0,0014%	0,0000%	0,0086%
DeerCrk 2	0,0000%	0,0003%	0,0000%	0,0006%
Delaware	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0047%
EastLima 1	0,0037%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
EastLima 2	0,0020%	0,0018%	0,0000%	0,0000%
Fieldale	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0001%
Franklin	0,0027%	0,0013%	0,0000%	0,0000%
Fremont	0,0043%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
FtWayne	0,0000%	0,0021%	0,0000%	0,0001%
GlenLyn	0,0000%	0,0006%	0,0000%	0,0035%
GoshenJt	0,0009%	0,0010%	0,0000%	0,0000%
Grant	0,0017%	0,0022%	0,0000%	0,0000%
Hancock	0,0000%	0,0010%	0,0000%	0,0000%
Haviland	0,0007%	0,0017%	0,0000%	0,0000%
Hazard	0,0009%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
HickryCk	0,0008%	0,0006%	0,0000%	0,0000%
Hillsbro	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0019%
Hinton	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0171%
HolstonT	0,0000%	0,0006%	0,0000%	0,0261%
Holston	0,0000%	0,0006%	0,0000%	0,0006%
Howard	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0008%
JacksnRd	0,0028%	0,0012%	0,0000%	0,0000%
Jay	0,0012%	0,0012%	0,0000%	0,0000%
Kammer	0,0040%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Kanawha	0,0008%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Kankakee	0,0000%	0,0009%	0,0000%	0,0056%
KygerCrk	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0006%
Lincoln	0,0000%	0,0009%	0,0000%	0,0077%
Logan	0,0006%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Madison	0,0000%	0,0014%	0,0000%	0,0004%
McKinley	0,0000%	0,0008%	0,0000%	0,0032%
Medford	0,0036%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Mullin	0,0033%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Muskngum 1	0,0000%	0,0010%	0,0000%	0,0005%
Muskngum 2	0,0000%	0,0006%	0,0000%	0,0019%
N.E.	0,0012%	0,0006%	0,0000%	0,0000%

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
N.Newark	0,0026%	0,0010%	0,0000%	0,0000%
Natrium	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0002%
Newcmrst	0,0025%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
NPortsmt	0,0045%	0,0009%	0,0000%	0,0000%
NwCarlsl	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0160%
NwLibrty	0,0011%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Olive 1	0,0000%	0,0012%	0,0000%	0,0005%
Olive 2	0,0016%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Philo	0,0000%	0,0001%	0,0000%	0,0048%
Pinevll	0,0000%	0,0008%	0,0000%	0,0036%
Pokagon	0,0007%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
Portsmth	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0001%
Randolph	0,0043%	0,0009%	0,0000%	0,0000%
Reusens	0,0000%	0,0013%	0,0000%	0,0000%
Riversde	0,0000%	0,0020%	0,0000%	0,0003%
Roanoke	0,0000%	0,0004%	0,0000%	0,0098%
Rockhill	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0004%
S.Kenton	0,0018%	0,0020%	0,0000%	0,0000%
S.Tiffin	0,0034%	0,0009%	0,0000%	0,0000%
Saltvll	0,0000%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Sargents	0,0000%	0,0006%	0,0000%	0,0001%
SCoshoct	0,0018%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
Smythe	0,0006%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Sorenson 1	0,0034%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Sorenson 2	0,0035%	0,0008%	0,0000%	0,0000%
SouthBnd	0,0011%	0,0004%	0,0000%	0,0000%
Sporn 1	0,0249%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
Sporn 2	0,0000%	0,0002%	0,0004%	0,0051%
Sprigg	0,0034%	0,0008%	0,0000%	0,0000%
Sterling	0,0000%	0,0025%	0,0000%	0,0019%
SthPoint	0,0034%	0,0010%	0,0000%	0,0000%
Summerfl	0,0312%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Sundial	0,0426%	0,0006%	0,0000%	0,0000%
Sunnysde	0,0000%	0,0009%	0,0000%	0,0020%
Switchbk	0,0010%	0,0001%	0,0000%	0,0000%
SWKammer	0,0044%	0,0012%	0,0000%	0,0000%
TannrsCk 1	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0004%
TannrsCk 2	0,0000%	0,0008%	0,0000%	0,0004%
Tazewell	0,0026%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Tidd 1	0,0039%	0,0012%	0,0000%	0,0000%
Tidd 2	0,0000%	0,0002%	0,0000%	0,0004%
Torrey	0,0000%	0,0015%	0,0000%	0,0001%
Trenton	0,0000%	0,0013%	0,0000%	0,0120%
Turner	0,0000%	0,0009%	0,0000%	0,0002%

Nome	Tensão	Ângulo	Potência ativa	Potência reativa
TwinBrch	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0004%
W.Kammer	0,0000%	0,0003%	0,0000%	0,0105%
W.Lancst	0,0000%	0,0012%	0,0000%	0,0003%
Wagenhls	0,0000%	0,0014%	0,0000%	0,0001%
WCambrdg	0,0082%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
WestEnd	0,0000%	0,0024%	0,0000%	0,0043%
WestLima	0,0005%	0,0012%	0,0000%	0,0000%
WHuntngd	0,0040%	0,0006%	0,0000%	0,0000%
WMedford	0,0025%	0,0015%	0,0000%	0,0000%
WMVernon	0,0050%	0,0009%	0,0000%	0,0000%
WNwPhil 1	0,0018%	0,0002%	0,0000%	0,0000%
WNwPhil 2	0,0040%	0,0015%	0,0000%	0,0000%
Wooster	0,0019%	0,0008%	0,0000%	0,0000%
Wythe	0,0043%	0,0003%	0,0000%	0,0000%
Zanesvll	0,0359%	0,0008%	0,0000%	0,0000%

Fonte: Autoria própria.

O maior desvio encontrado é de 0,0479%, indicando a correta implementação dos algoritmos de cálculo e construção da rede genérica no PSP-UFU.

4.3 Curto-circuito

Nos estudos de curto-circuito são analisadas todas as faltas implementadas no PSP-UFU: trifásica, fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra. Foi utilizado o sistema de 14 barras, cujos dados e considerações são apresentados no Apêndice A. Tal sistema foi criado no PSP-UFU e no Anarede, ambos utilizando as cargas como impedância constante e, por meio do utilitário Anaana [96], converteram-se os dados pré-falta para o Anafas. Finalmente foram inseridos os dados de sequência zero no Anafas e aplicadas as faltas na Barra 13.

Nota-se que a conexão dos transformadores simulados é $\Delta - Y_{aterrado}$ (defasagem igual a -30°), além da conexão dos geradores e cargas ser $Y_{aterrado}$. São apresentados os resultados das correntes de curto, tensões de barras durante a falta e contribuições dos geradores calculados no PSP-UFU e o desvio relativo àqueles produzidos pelo Anafas.

4.3.1 Falta trifásica

A Tabela 4.9 mostra as correntes de curto-circuito nos programas, além da divergência relativa:

Tabela 4.9 – Correntes de curto-circuito trifásico na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
PSP-UFU	19172,82	-117,19	19172,82	122,806	19172,82	2,806
Anafas	19170,10	-117,20	19170,10	122,810	19170,10	2,809
Desvio (%)	0,0142%	0,0049%	0,0142%	0,0034%	0,0142%	0,1181%

Fonte: Autoria própria.

O maior desvio relativo encontrado foi de 0,1181%, porém com um desvio absoluto pequeno, com o valor de 0,003 graus, demonstrando a correta implementação do cálculo de curto-circuito trifásico no PSP-UFU. A Tabela 4.10 e Tabela 4.11 mostram as tensões durante a falta, assim como as contribuições das máquinas síncronas, respectivamente, calculados pelo PSP-UFU.

Tabela 4.10 – Tensões durante a falta trifásica na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	1,0021	0,25	1,0021	-119,75	1,0021	120,25
Barra 02	0,9390	-4,67	0,9390	-124,67	0,9390	115,33
Barra 03	0,8985	-13,55	0,8985	-133,55	0,8985	106,45
Barra 04	0,8015	-9,43	0,8015	-129,43	0,8015	110,57
Barra 05	0,7901	-7,26	0,7901	-127,26	0,7901	112,74
Barra 06	0,4280	-56,25	0,4280	-176,25	0,4280	63,75
Barra 07	0,7465	-46,09	0,7465	-166,09	0,7465	73,91
Barra 08	0,8611	-45,32	0,8611	-165,32	0,8611	74,68
Barra 09	0,6420	-51,21	0,6420	-171,21	0,6420	68,79
Barra 10	0,6005	-52,34	0,6005	-172,34	0,6005	67,66
Barra 11	0,5149	-54,26	0,5149	-174,26	0,5149	65,74
Barra 12	0,2217	-67,41	0,2217	172,59	0,2217	52,59
Barra 13	0,0000	-90,00	0,0000	150,00	0,0000	30,00
Barra 14	0,3560	-52,71	0,3560	-172,71	0,3560	67,29

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.11 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta trifásica na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	10956,21	-31,63	10956,21	-151,63	10956,21	88,37

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 2	4307,57	-75,89	4307,57	164,11	4307,57	44,11
Comp. síncrono 1	3292,40	-101,67	3292,40	138,33	3292,40	18,33
Comp. síncrono 2	2734,58	-127,37	2734,58	112,63	2734,58	-7,37
Comp. síncrono 3	6386,79	-130,29	6386,79	109,71	6386,79	-10,29

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4.12 e a Tabela 4.13 apresentam os resultados comparativo entre o PSP-UFU e o Anafas das tensões durante a falta e contribuições das máquinas síncronas.

Tabela 4.12 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta trifásica entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	0,0009%	0,0466%	0,0009%	0,0400%	0,0009%	0,0017%
Barra 02	0,0017%	0,0024%	0,0017%	0,0216%	0,0017%	0,0027%
Barra 03	0,0019%	0,0296%	0,0019%	0,0345%	0,0019%	0,0038%
Barra 04	0,0438%	0,0300%	0,0438%	0,0223%	0,0438%	0,0011%
Barra 05	0,0438%	0,0359%	0,0438%	0,0343%	0,0438%	0,0032%
Barra 06	0,0265%	0,0119%	0,0265%	0,0265%	0,0265%	0,0089%
Barra 07	0,0179%	0,0151%	0,0179%	0,0042%	0,0179%	0,0054%
Barra 08	0,0041%	0,0043%	0,0041%	0,0109%	0,0041%	0,0053%
Barra 09	0,0377%	0,0076%	0,0377%	0,0081%	0,0377%	0,0001%
Barra 10	0,0357%	0,0103%	0,0357%	0,0205%	0,0357%	0,0079%
Barra 11	0,0634%	0,0286%	0,0634%	0,0204%	0,0634%	0,0175%
Barra 12	0,1255%	0,0694%	0,1255%	0,0271%	0,1255%	0,0814%
Barra 13	-	-	-	-	-	-
Barra 14	0,0248%	0,0005%	0,0248%	0,0060%	0,0248%	0,0055%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.13 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta trifásica entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	0,0075%	0,0188%	0,0075%	0,0225%	0,0075%	0,0067%
Gerador 2	0,0093%	0,0080%	0,0093%	0,0037%	0,0093%	0,0069%
Comp. síncrono 1	0,0058%	0,0328%	0,0058%	0,0024%	0,0058%	0,0019%
Comp. síncrono 2	0,0039%	0,0099%	0,0039%	0,0027%	0,0039%	0,0286%

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Comp. síncrono 3	0,0161%	0,0228%	0,0161%	0,0009%	0,0161%	0,0271%

Fonte: Autoria própria.

O maior encontrado nas duas tabelas é de 0,1255%, com um desvio absoluto de 0,000278 p.u. de tensão.

4.3.2 Falta fase-fase

De forma semelhante, as faltas desbalanceadas foram aplicadas na barra 13. A Tabela 4.14 mostra o resultado da falta fase-fase no PSP-UFU e no Anafas.

Tabela 4.14 – Correntes de curto-circuito fase-fase na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
PSP-UFU	16604,15	-87,194	16604,15	92,806	0	0
Anafas	16601,79	-87,190	16601,79	92,809	0	0
Desvio (%)	0,0142%	0,0048%	0,0142%	0,0035%	-	-

Fonte: Autoria própria.

Os resultados dos dois programas foram bastante próximos, com o desvio relativo máximo de 0,0142%. As tensões durante a falta, assim como as contribuições das máquinas síncronas calculadas pelo PSP-UFU são apresentadas na Tabela 4.15 e na Tabela 4.16.

Tabela 4.15 – Tensões durante a falta trifásica na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	1,0021	0,25	1,0477	-118,57	1,0439	118,68
Barra 02	0,9390	-4,67	1,0245	-122,63	1,0146	112,21
Barra 03	0,8985	-13,55	0,9822	-130,61	0,9844	103,76
Barra 04	0,8015	-9,43	0,9762	-125,21	0,9564	103,78
Barra 05	0,7901	-7,26	0,9789	-123,17	0,9521	105,11
Barra 06	0,7058	-74,37	0,5908	-143,45	1,0700	74,58
Barra 07	0,8479	-54,71	0,8231	-156,08	1,0589	75,64
Barra 08	0,9310	-51,14	0,9162	-158,82	1,0900	75,64
Barra 09	0,7986	-62,20	0,7305	-155,40	1,0518	73,89

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 10	0,7757	-64,48	0,6980	-154,11	1,0468	73,70
Barra 11	0,7378	-69,27	0,6397	-149,62	1,0544	74,00
Barra 12	0,6221	-89,61	0,4915	-127,73	1,0535	73,65
Barra 13	0,5241	-106,42	0,5241	-106,42	1,0482	73,58
Barra 14	0,6250	-77,91	0,5752	-139,56	1,0310	72,69

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.16 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta fase-fase na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	10956,21	-31,63	6920,33	-125,62	12545,36	114,98
Gerador 2	4307,57	-75,89	2540,61	159,97	3567,13	68,00
Comp. síncrono 1	3292,40	-101,67	1945,13	108,84	1894,22	46,92
Comp. síncrono 2	2370,79	-100,95	2422,55	86,14	738,29	-15,42
Comp. síncrono 3	5493,40	-109,22	5590,03	88,46	691,82	-14,36

Fonte: Autoria própria.

Os resultados comparativos com o Anafas são apresentados pela Tabela 4.17 e pela Tabela 4.18:

Tabela 4.17 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta fase-fase entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	0,0009%	0,0466%	0,0001%	0,0259%	0,0003%	0,0027%
Barra 02	0,0017%	0,0024%	0,0002%	0,0216%	0,0005%	0,0003%
Barra 03	0,0019%	0,0296%	0,0002%	0,0058%	0,0006%	0,0045%
Barra 04	0,0438%	0,0300%	0,0385%	0,0100%	0,0393%	0,0029%
Barra 05	0,0438%	0,0359%	0,0387%	0,0273%	0,0380%	0,0020%
Barra 06	0,0115%	0,0018%	0,0045%	0,0342%	0,0000%	0,0033%
Barra 07	0,0151%	0,0001%	0,0126%	0,0120%	0,0080%	0,0030%
Barra 08	0,0036%	0,0031%	0,0017%	0,0154%	0,0000%	0,0030%
Barra 09	0,0275%	0,0037%	0,0285%	0,0009%	0,0170%	0,0012%
Barra 10	0,0227%	0,0066%	0,0278%	0,0058%	0,0144%	0,0031%
Barra 11	0,0435%	0,0191%	0,0584%	0,0117%	0,0402%	0,0035%
Barra 12	0,0414%	0,0227%	0,0714%	0,0234%	0,0433%	0,0024%
Barra 13	0,0151%	0,0220%	0,0151%	0,0220%	0,0151%	0,0033%
Barra 14	0,0081%	0,0071%	0,0022%	0,0283%	0,0016%	0,0007%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.18 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta fase-fase entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	0,0075%	0,0188%	0,0125%	0,0167%	0,0138%	0,0079%
Gerador 2	0,0093%	0,0080%	0,0056%	0,0008%	0,0070%	0,0031%
Comp. síncrono 1	0,0058%	0,0328%	0,0002%	0,0012%	0,0025%	0,0094%
Comp. síncrono 2	0,0044%	0,0201%	0,0021%	0,0029%	0,0260%	0,0298%
Comp. síncrono 3	0,0165%	0,0452%	0,0156%	0,0014%	0,0204%	0,0290%

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que as respostas dos dois programas para a falta fase-fase foram bastante semelhantes, com uma divergência máxima de 0,0714%.

4.3.3 Falta fase-fase-terra

A Tabela 4.19 mostra o resultado da falta fase-fase no PSP-UFU e no Anafas.

Tabela 4.19 – Correntes de curto-circuito fase-fase-terra na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
PSP-UFU	18823,54	-111,488	17822,11	118,561	0	0
Anafas	18820,87	-111,500	17819,59	118,560	0	0
Desvio (%)	0,0142%	0,0109%	0,0141%	0,0011%	-	-

Fonte: Autoria própria.

De forma idêntica ao curto fase-fase, a falta fase-fase-terra apresentou um desvio relativo máximo de 0,0142%. As tensões durante a falta, assim como as contribuições das máquinas síncronas calculadas pelo PSP-UFU são apresentadas na Tabela 4.20 e Tabela 4.21, respectivamente.

Tabela 4.20 – Tensões durante a falta fase-fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	1,0021	0,25	1,0358	-118,93	1,0321	119,05
Barra 02	0,9390	-4,67	1,0020	-123,24	0,9929	112,92

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 03	0,8985	-13,55	0,9603	-131,44	0,9603	104,34
Barra 04	0,8015	-9,43	0,9299	-126,40	0,9116	105,19
Barra 05	0,7901	-7,26	0,9288	-124,33	0,9049	106,70
Barra 06	0,5259	-68,44	0,4983	-161,12	0,9944	74,38
Barra 07	0,8034	-52,03	0,7969	-159,82	0,9913	75,19
Barra 08	0,9029	-49,39	0,8994	-161,09	1,0371	75,31
Barra 09	0,7075	-57,88	0,6892	-163,41	0,9910	73,39
Barra 10	0,6714	-59,75	0,6506	-163,51	0,9834	73,20
Barra 11	0,5984	-63,74	0,5741	-162,76	0,9850	73,61
Barra 12	0,2756	-79,36	0,2569	-171,59	1,0640	73,52
Barra 13	0,0000	26,57	0,0000	132,07	1,1493	72,07
Barra 14	0,3995	-59,44	0,3807	-163,84	1,0355	71,44

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.21 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta fase-fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	10956,21	-31,63	6920,33	-125,62	12545,36	114,98
Gerador 2	4307,57	-75,89	2540,61	159,97	3567,13	68,00
Comp. síncrono 1	3292,40	-101,67	1945,13	108,84	1894,22	46,92
Comp. síncrono 2	2370,79	-100,95	2422,55	86,14	738,29	-15,42
Comp. síncrono 3	5493,40	-109,22	5590,03	88,46	691,82	-14,36

Fonte: Autoria própria.

As diferenças percentuais entre o PSP-UFU e o Anafas são apresentados na Tabela 4.22 e na Tabela 4.23:

Tabela 4.22 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta fase-fase-terra entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	0,0009%	0,0466%	0,0003%	0,0220%	0,0004%	0,0023%
Barra 02	0,0017%	0,0024%	0,0006%	0,0304%	0,0008%	0,0016%
Barra 03	0,0019%	0,0296%	0,0006%	0,0342%	0,0010%	0,0023%
Barra 04	0,0438%	0,0300%	0,0398%	0,0003%	0,0405%	0,0019%
Barra 05	0,0438%	0,0359%	0,0398%	0,0231%	0,0394%	0,0052%
Barra 06	0,0204%	0,0006%	0,0161%	0,0117%	0,0012%	0,0038%
Barra 07	0,0164%	0,0030%	0,0145%	0,0128%	0,0096%	0,0044%
Barra 08	0,0039%	0,0115%	0,0025%	0,0066%	0,0008%	0,0033%

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 09	0,0330%	0,0007%	0,0331%	0,0046%	0,0190%	0,0016%
Barra 10	0,0294%	0,0218%	0,0320%	0,0036%	0,0163%	0,0028%
Barra 11	0,0528%	0,0195%	0,0618%	0,0221%	0,0419%	0,0044%
Barra 12	0,0881%	0,0489%	0,1258%	0,0033%	0,0432%	0,0033%
Barra 13	-	-	-	-	0,0152%	0,0036%
Barra 14	0,0213%	0,0072%	0,0204%	0,0224%	0,0016%	0,0001%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.23 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta fase-fase-terra entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	0,0075%	0,0188%	0,0097%	0,0274%	0,0123%	0,0093%
Gerador 2	0,0093%	0,0080%	0,0069%	0,0015%	0,0076%	0,0037%
Comp. síncrono 1	0,0058%	0,0328%	0,0010%	0,0055%	0,0029%	0,0064%
Comp. síncrono 2	0,0038%	0,0021%	0,0024%	0,0015%	0,0128%	0,0176%
Comp. síncrono 3	0,0161%	0,0282%	0,0161%	0,0052%	0,0013%	0,0097%

Fonte: Autoria própria.

A maior divergência encontrada foi de 0,1258%, com um desvio absoluto igual a 0,00032 p.u. de tensão.

4.3.4 Falta fase-terra

Finalmente, a Tabela 4.24 mostra as correntes de curto-circuito nos programas, além da divergência relativa para a falta fase-terra:

Tabela 4.24 – Correntes de curto-circuito trifásico na Barra 13 calculadas pelos programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
PSP-UFU	17169,7	-114,939	0	0	0	0
Anafas	17167,2802	-114,900	0	0	0	0
Desvio (%)	0,0141%	0,0342%	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que o maior desvio relativo encontrado foi de 0,0141%. A Tabela 4.25 e a Tabela 4.26 mostram as tensões durante a falta, assim como as contribuições das máquinas síncronas, respectivamente, calculados pelo PSP-UFU.

Tabela 4.25 – Tensões durante a falta fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	1,0347	0,88	1,0600	-120,00	1,0336	119,22
Barra 02	0,9996	-3,60	1,0450	-125,35	0,9958	113,24
Barra 03	0,9587	-11,85	1,0100	-133,39	0,9625	104,72
Barra 04	0,9247	-7,17	1,0154	-130,99	0,9171	105,92
Barra 05	0,9227	-5,14	1,0174	-129,38	0,9110	107,47
Barra 06	0,5827	-54,66	1,0296	-161,42	1,0319	70,52
Barra 07	0,8552	-46,03	1,0178	-160,87	1,0291	71,85
Barra 08	0,9445	-45,34	1,0575	-161,73	1,0662	72,78
Barra 09	0,7546	-50,52	1,0130	-163,01	1,0265	70,42
Barra 10	0,7200	-51,48	1,0069	-163,03	1,0201	70,07
Barra 11	0,6515	-53,09	1,0136	-162,37	1,0226	70,12
Barra 12	0,3035	-65,19	1,0566	-166,98	1,0619	74,10
Barra 13	0,0000	180,00	1,0773	-172,49	1,1379	77,46
Barra 14	0,4239	-51,22	1,0115	-168,21	1,0546	72,19

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.26 – Contribuições das máquinas síncronas durante a falta fase-terra na Barra 13, calculadas pelo PSP-UFU.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	8306,20	-14,76	9840,66	-115,74	11605,98	108,90
Gerador 2	3085,77	-75,82	2569,25	-176,79	3620,13	60,01
Comp. síncrono 1	2199,70	-115,79	1140,65	136,61	2149,95	33,83
Comp. síncrono 2	2135,72	-123,72	1012,14	-172,01	967,77	-66,82
Comp. síncrono 3	6545,84	-128,73	453,15	87,38	996,92	6,95

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4.27 e a Tabela 4.28 apresentam os resultados comparativo entre o PSP-UFU e o Anafas das tensões durante a falta, além das contribuições das máquinas síncronas.

Tabela 4.27 – Divergência no cálculo das tensões durante a falta fase-terra entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)	Tensão (p.u.)	Ângulo (Graus)
Barra 01	0,0003%	0,0198%	0,0000%	0,0000%	0,0004%	0,0006%
Barra 02	0,0006%	0,0138%	0,0000%	0,0382%	0,0007%	0,0032%
Barra 03	0,0006%	0,0195%	0,0000%	0,0085%	0,0009%	0,0053%
Barra 04	0,0399%	0,0361%	0,0378%	0,0112%	0,0403%	0,0045%
Barra 05	0,0399%	0,0326%	0,0372%	0,0132%	0,0394%	0,0069%
Barra 06	0,0150%	0,0139%	0,0001%	0,0098%	0,0012%	0,0033%
Barra 07	0,0137%	0,0019%	0,0083%	0,0156%	0,0092%	0,0033%
Barra 08	0,0024%	0,0087%	0,0000%	0,0189%	0,0007%	0,0031%
Barra 09	0,0298%	0,0025%	0,0179%	0,0066%	0,0180%	0,0006%
Barra 10	0,0273%	0,0141%	0,0155%	0,0206%	0,0151%	0,0055%
Barra 11	0,0537%	0,0135%	0,0417%	0,0192%	0,0404%	0,0054%
Barra 12	0,0977%	0,0397%	0,0435%	0,0149%	0,0431%	0,0026%
Barra 13	-	-	0,0151%	0,0034%	0,0152%	0,0029%
Barra 14	0,0182%	0,0042%	0,0012%	0,0061%	0,0019%	0,0008%

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.28 – Divergência no cálculo das contribuições das máquinas síncronas na falta trifásica entre os programas PSP-UFU e Anafas.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)	Corrente (A)	Ângulo (Graus)
Gerador 1	0,0101%	0,0829%	0,0160%	0,0314%	0,0122%	0,0077%
Gerador 2	0,0073%	0,0043%	0,0040%	0,0031%	0,0077%	0,0039%
Comp. síncrono 1	0,0013%	0,0112%	0,0119%	0,0010%	0,0025%	0,0081%
Comp. síncrono 2	0,0009%	0,0233%	0,0153%	0,0043%	0,0122%	0,1123%
Comp. síncrono 3	0,0162%	0,0137%	0,0312%	0,0029%	0,0132%	0,0015%

Fonte: Autoria própria.

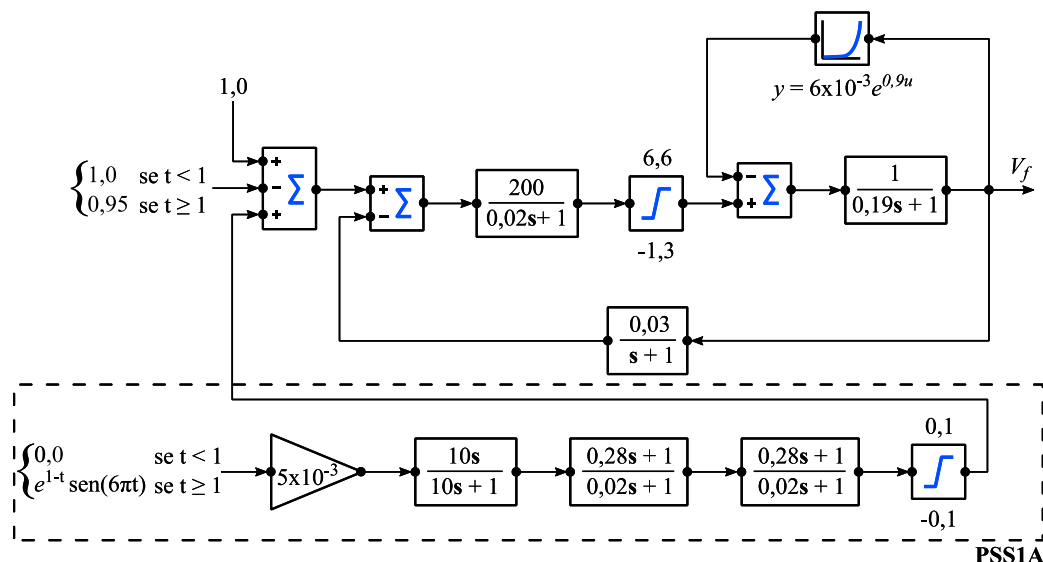
O maior encontrado nas duas tabelas é de 0,1123%, com um desvio absoluto de 0,0078 graus.

As divergências mínimas entre os programas demonstram a correta implementação da ferramenta de cálculo de curto-circuito, assim com os modelos dos elementos elétricos envolvidos nesse estudo. Tais diferenças são resultados da quantidade de casas decimais utilizadas nos valores das equações algébricas de curto-circuito em cada programa, assim como as pequenas divergências nos resultados pré-falta originados do cálculo do fluxo de carga.

4.4 Sistemas de controle

O sistema utilizado como teste dos elementos de controle e algoritmo de solução da rede de controle genérica desenvolvida no PSP-UFU foi a combinação de dois controles comumente presentes nas máquinas síncronas: um AVR e um PSS. No AVR foi usado o modelo DC1C presente no padrão IEEE Std. 421.5-2016 [100], o qual foi modificado com o intuito de apresentar convergência no regime permanente frente a uma entrada do tipo degrau. Para o PSS utilizou-se o PSS1A, pertencente à mesma padronização. A topologia empregada, assim como os parâmetros baseados em [1], são apresentados na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Sistema de controle DC1C e PSS1A sob teste.



Fonte: Autoria própria.

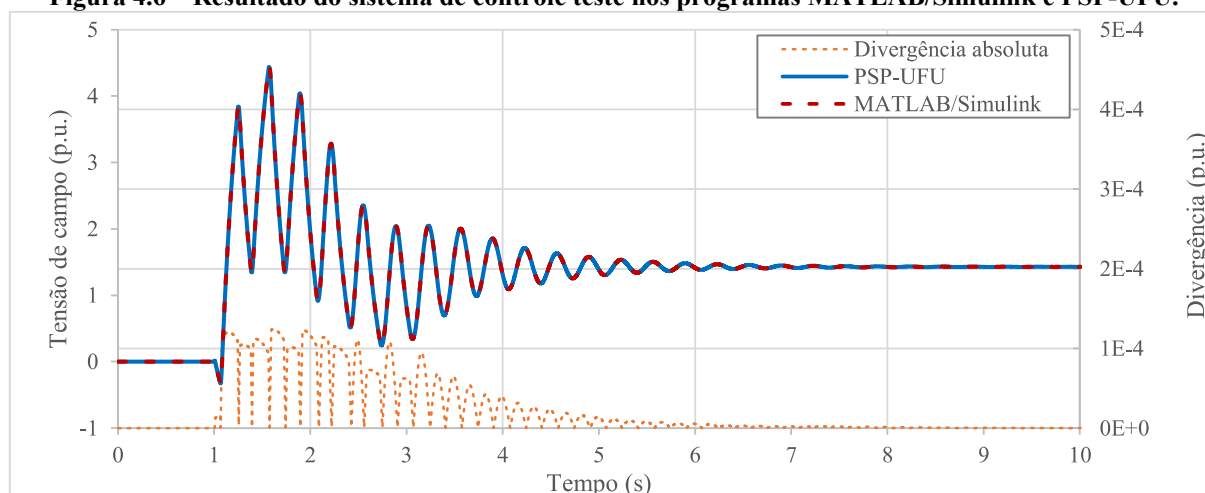
Tal sistema foi implementado no PSP-UFU e no MATLAB/Simulink e seus resultados comparados. Em um primeiro momento (até 1 segundo) as entradas aplicadas resultam em valor nulo, com isso é verificada a correta operação em condições sem oscilações do sistema. Após 1 segundo duas entradas são aplicadas, um degrau com valor absoluto de 0,05 p.u. no AVR DC1C e uma função oscilatória decrescente na entrada do PSS1A seguindo a função $f(t) = e^{1-t} \sin 6\pi t$ p.u. Para aplicar essas entradas no PSP-UFU foi utilizado o bloco de expressão matemática (seção 3.4.2), com as seguintes expressões:

```
if(time<1, 1, 0.95)
if(time<1, 0, e^(-time+1)*sin(time*6*pi))
```

Como método de integração numérica no MATLAB/Simulink foi utilizado o ode23t (Regra Trapezoidal) com passo de integração e tolerância de convergência automaticamente definidos automaticamente pelo programa.

A Figura 4.6 mostra o resultado comparativo dos dois programas.

Figura 4.6 – Resultado do sistema de controle teste nos programas MATLAB/Simulink e PSP-UFU.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado os resultados se mostraram praticamente idênticos. A maior divergência entre os programas foi de 0,000124 p.u. no instante de 1,615 s, enquanto a raiz do quadrado médio dos erros (RQME) (ou desvio padrão dos resíduos) em 10,0 s de simulação foi de apenas 0,0000533 p.u. Isso demonstra a correta implementação dos elementos de controle, do editor desses elementos e do algoritmo de solução no PSP-UFU.

4.5 Harmônicos

As duas ferramentas relacionadas a harmônicos descritas na seção 2.6 e desenvolvidas no PSP-UFU são objetos de comparação com o programa HarmZs. Na ferramenta de distorções harmônicas são injetadas correntes harmônicas e observadas as distorções em todos os barramentos. Para a resposta na frequência são comparados os resultados de impedância visto de uma barra em um espectro de frequências especificado.

Foi utilizado o sistema de 14 barras, cujos dados e considerações são apresentados no Apêndice A. Assim como nos estudos de curto-circuito, tal sistema foi criado no PSP-UFU e

no Anarede, ambos utilizando as cargas como impedância constante. Ao importar os dados de fluxo de potência convergidos gerados pelo Anarede no HarmZs, foram desconsideradas as impedâncias dos geradores e as impedâncias das cargas foram estabelecidas como a conexão paralela.

Para realizar a comparação da distorção harmônica com o *software* HarmZs, foi utilizada uma fonte de corrente harmônica no barramento 1. Três ordens harmônicas foram injetadas, com os seguintes valores: $I_{3h} = 0,1 \angle 0^\circ p.u.$, $I_{5h} = 0,07 \angle 30^\circ p.u.$ e $I_{7h} = 0,03 \angle 60^\circ p.u.$ A THD em cada barra foi calculada em ambos os programas e comparada. Os resultados de todas as barras e a divergência relativa entre os resultados de PSP-UFU e HarmZs são mostrados na Tabela 4.29.

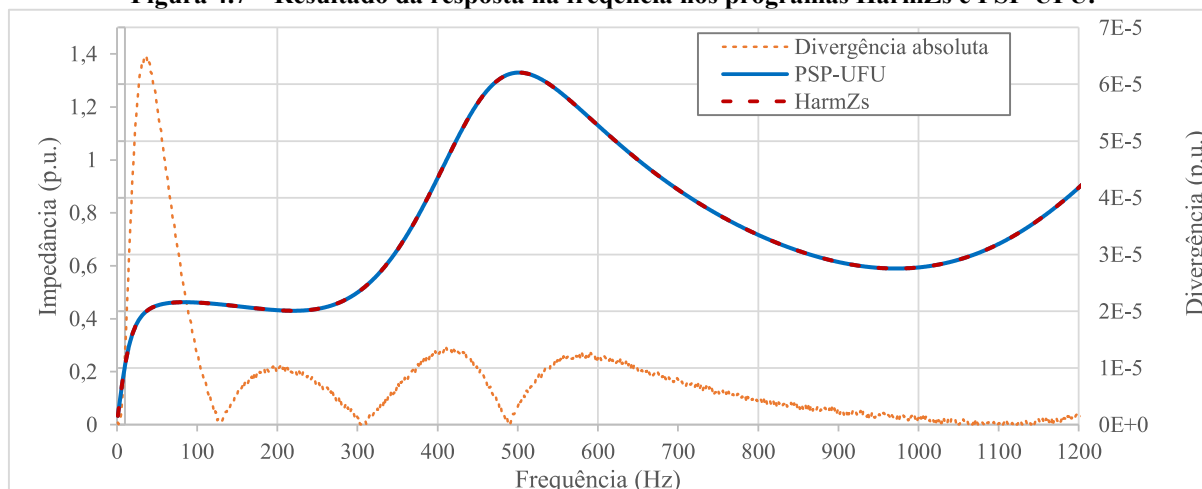
Tabela 4.29 – Comparação das distorções harmônicas de tensão do PSP-UFU e HarmZs.

Barra	THD		Divergência
	HarmZs	PSP-UFU	
Barra 1	9,37244%	9,37238%	0,0006%
Barra 2	7,43566%	7,43561%	0,0007%
Barra 3	5,22743%	5,22737%	0,0011%
Barra 4	4,74785%	4,74785%	0,0000%
Barra 5	5,23944%	5,23944%	0,0000%
Barra 6	3,95222%	3,95218%	0,0010%
Barra 7	5,51819%	5,51813%	0,0012%
Barra 8	5,51819%	5,51803%	0,0029%
Barra 9	7,84596%	7,84588%	0,0010%
Barra 10	7,00628%	7,00621%	0,0010%
Barra 11	5,31410%	5,31404%	0,0010%
Barra 12	4,07646%	4,07642%	0,0010%
Barra 13	4,23542%	4,23538%	0,0010%
Barra 14	6,02236%	6,02230%	0,0010%

Fonte: Autoria própria.

A maior divergência encontrada entre os programas foi de 0,0029% no barramento 8, originada principalmente da quantidade de casas decimais utilizadas. Os valores de THD são praticamente idênticos e validam os algoritmos usados nos cálculos de distorção harmônica, bem como a integração correta com as outras ferramentas de simulação do PSP-UFU.

Para validar a ferramenta de resposta na frequência do PSP-UFU, foi analisada a varredura de frequência da impedância do barramento 1 observada por ela mesma. Os resultados comparativos para um intervalo variando de 1 a 1200 Hz são mostrados na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Resultado da resposta na frequência nos programas HarmZs e PSP-UFU.

Fonte: Autoria própria.

A maior divergência foi encontrada em 36 Hz com o valor de 0,000065 Hz e uma RQME de apenas 0,000019 Hz. Mais uma vez, os resultados virtualmente idênticos confirmam a correta implementação das ferramentas de harmônicos no PSP-UFU.

4.6 Estabilidade

Nos estudos de estabilidade do PSP-UFU é possível avaliar o comportamento dinâmico da rede perante perturbações, em que são observadas as interações entre as máquinas síncronas e seus controles de velocidade e tensão com o restante dos elementos da rede. Com o intuito de avaliar o correto comportamento dos modelos das máquinas síncronas, de indução e da rede de potência, assim como a interação dos os sistemas de controle genéricos analisados na seção anterior, comparou-se o desempenho do sistema de 14 barras no programa Anatem com o *software* desenvolvido nesse trabalho.

Quatro distintas perturbações foram empregadas em diversos pontos da rede:

- Curto-circuito trifásico franco no barramento 13;
- Remoção da carga presente na barra 3 com o valor de potência ativa igual a 94,2 MW e potência reativa de 19,0 Mvar;
- Remoção da máquina síncrona conectada na barra 2;
- Partida de um motor de indução de 18000 HP na barra 13.

Compararam-se as curvas no tempo geradas por ambos programas relativas ao gerador 1, sendo a maior máquina síncrona do sistema. As seguintes variáveis foram confrontadas: Frequência da máquina, Potência ativa terminal injetada na rede, Potência mecânica no eixo do gerador, Tensão terminal da máquina (barra 1), Tensão de campo da máquina. Tais curvas foram escolhidas devido à sua importância na determinação da estabilidade do sistema, assim como o impacto em outros elementos de proteção e operação da rede. Uma vez que a potência mecânica e tensão de campo são originadas de sistemas de controle de regulação de velocidade e de tensão, respectivamente, avalia-se a correta integração desses elementos com o restante do circuito. Ainda, a frequência, potência ativa e potência mecânica, além da tensão terminal e tensão de campo, são variáveis relacionadas e, portanto, pode-se avaliar a coerência do comportamento no tempo dessas curvas.

Para uma comparação mais fiel, utilizaram-se os modelos das máquinas síncronas mais próximas possíveis entre os programas. Para o gerador 1, conectado na barra 1, foi utilizado o modelo predefinido do Anatem MD02, que descreve a máquina síncrona de polos salientes com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores sendo um no eixo direto e outro no eixo em quadratura [23]. Para as demais máquinas empregou-se do modelo MD03, que representa a máquina síncrona de rotor liso com um enrolamento de campo e três enrolamentos amortecedores, sendo um no eixo direto e dois no eixo em quadratura [23]. Em ambos modelos do Anatem, as saliências subtransitórias são desprezadas, diferentemente do PSP-UFU, que considera tais reatâncias em seus cálculos. Para todos os geradores e compensadores síncronos presentes no sistema de 14 barras foi empregado o modelo 5, o mais detalhado e descrito na seção 2.5.1.5, nas simulações do PSP-UFU. Apesar de várias semelhanças, os modelos dos dois programas são diferentes, o que leva a resultados com algumas divergências, como será apresentado na sequência.

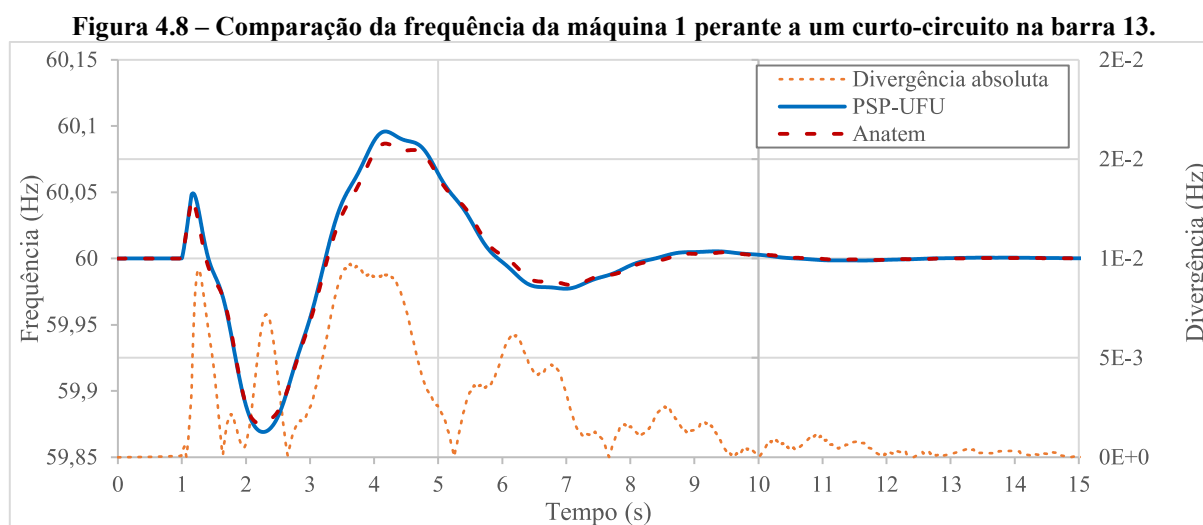
O reguladores automáticos de tensão e excitatriz de todas máquinas síncronas são baseados no AVR do tipo DC1C pertencente ao padrão IEEE Std. 421.5-2016 [100], equivalente ao modelo predefinido MD01 no Anatem [23]. O modelo do regulador de velocidade e turbina utilizado nos geradores conectados nos barramentos 1 e 2 está presente no programa TRANSUFU [49] e foram inseridos no Anatem por meio da ferramenta de Controle Definido pelo Usuário (CDU), uma vez que não existem modelos predefinidos desse regulador. No PSP-UFU foi utilizada a ferramenta de criação de sistemas de controle genéricos para a implementação do AVR, da excitatriz, do regulador de velocidade e da turbina.

Os dados do sistema, assim como os diagramas dos controles das máquinas e seus parâmetros estão presentes no Apêndice A. O arquivo de entrada de dados do Anatem, com a parametrização de todo os elementos dinâmicos, associação de arquivos, saída de dados e parâmetros de simulação é apresentado no Apêndice B.

4.6.1 Curto-circuito

De forma semelhante à análise de curto-circuito da seção 4.3, aplicou-se uma perturbação do tipo curto-circuito trifásico franco no barramento 13 no instante de 1,0 s durante 150 ms. No período inicial até 1,0 s é avaliada a correta operação do sistema para a rede sem perturbações, assim como a inicialização dos sistemas de controle, uma vez que oscilações nesse intervalo representam valores incompatíveis com o resultado de fluxo de carga ou erros numéricos de integração. Essa estratégia foi adotada para as demais simulações.

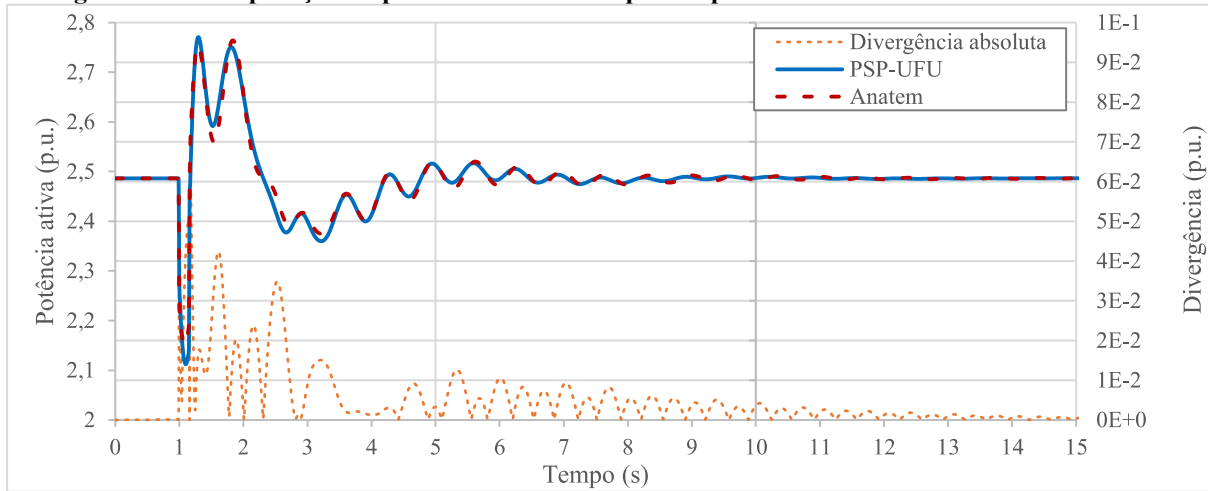
A comparação da frequência da máquina 1 é apresentada na Figura 4.8:



Fonte: Autoria própria.

O comportamento da frequência dos dois programas foi bastante semelhante, com uma divergência máxima de 0,009725 Hz no instante de 3,63 s, com uma RQME de apenas 0,002568 Hz. O comportamento apresentado é compatível com a literatura, apresentando aceleração da máquina durante o período da falta, representado pelo aumento da frequência. Além disso, o valor de regime permanente retorna a 60 Hz, uma vez que não há alteração no balanço de potência comparado às condições iniciais.

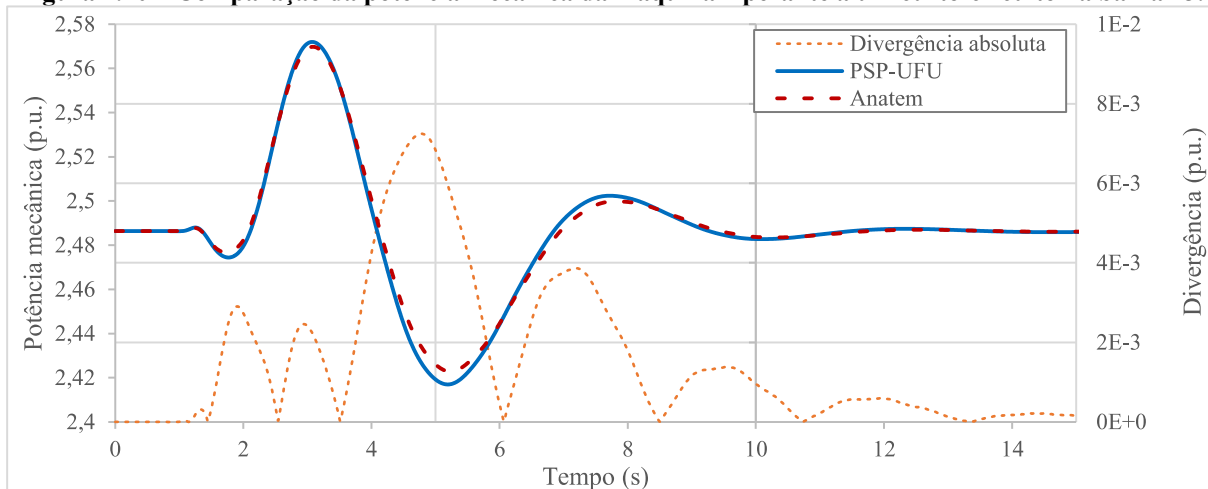
A potência ativa injetada no sistema pela máquina síncrona é exibida na Figura 4.9:

Figura 4.9 – Comparação da potência ativa da máquina 1 perante a um curto-circuito na barra 13.

Fonte: Autoria própria.

De forma semelhante à frequência, as potências ativas terminais da máquina 1 apresentaram comportamento bastante semelhante e compatíveis com a literatura. A maior divergência encontrada possui o valor de 0,06845 p.u. no tempo de 1,17 s, com uma RQME de 0,007207 p.u. A frequência de oscilação, assim como o valor de regime permanente se comportaram de forma idêntica.

A potência mecânica da máquina, valor originado do conjunto regulador de velocidade e turbina e que possui forte relação com a potência ativa e frequência da máquina, é apresentada na Figura 4.14:

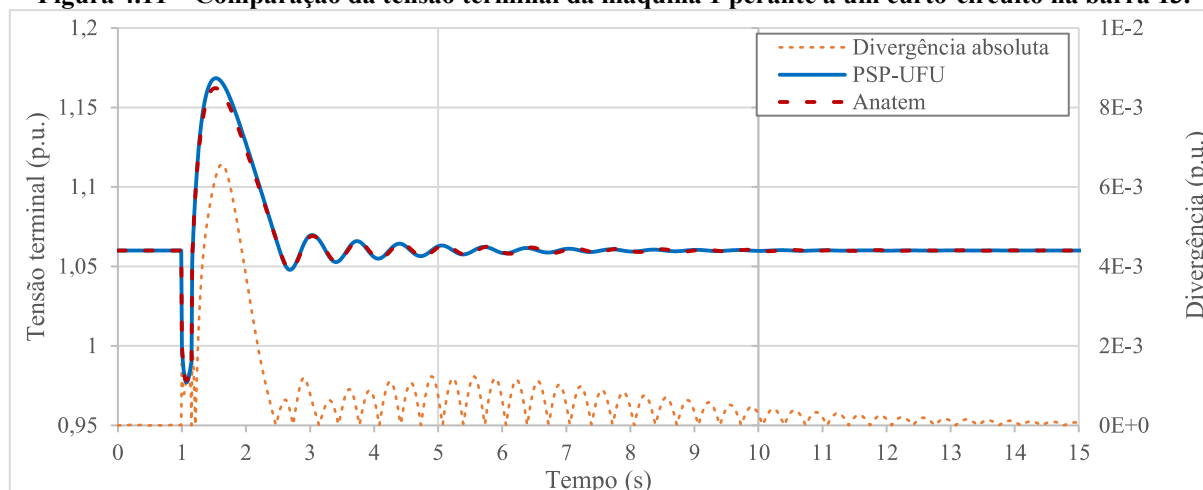
Figura 4.10 – Comparação da potência mecânica da máquina 1 perante a um curto-circuito na barra 13.

Fonte: Autoria própria.

A maior divergência entre o PSP-UFU e o Anatem para a potência mecânica frente ao curto-circuito na barra 13 foi de 0,00725 p.u. em 4,77 s, uma RQME de apenas 0,0017673 p.u. e valores de regime permanente idênticos. Tal gráfico indica a correta integração dos sistemas de controle com o restante dos elementos do programa. Devido à natureza da perturbação a potência mecânica não é alterada significativamente, como pode ser observado nas curvas da Figura 4.10.

A tensão terminal é uma variável importante de ser observada durante um curto-circuito, uma vez que é possível observar o afundamento no período da falta e a sua recuperação pós-falta devido à atuação dos reguladores de tensão. A Figura 4.11 exibe a tensão terminal da máquina 1 nos dois programas em estudo:

Figura 4.11 – Comparação da tensão terminal da máquina 1 perante a um curto-circuito na barra 13.



Fonte: Autoria própria.

O maior desvio absoluto entre os dois programas é de 0,006569 p.u. em 1,62 s, uma RQME de 0,001064 p.u., apresentando afundamento durante a falta e recuperação da tensão no regime permanente de 1,06 p.u. O PSP-UFU apresentou um maior amortecimento da tensão em comparação ao Anatem, além de uma pequena diferença na oscilação de tensão após 5,0 s de simulação.

Apesar dos pequenos desvios entre os dois programas, o resultado comparativo ao aplicar um curto-circuito trifásico no sistema teste se mostrou satisfatório, uma vez que existem diferenças nos modelos das máquinas implementados. Todas as variáveis em ambos programas

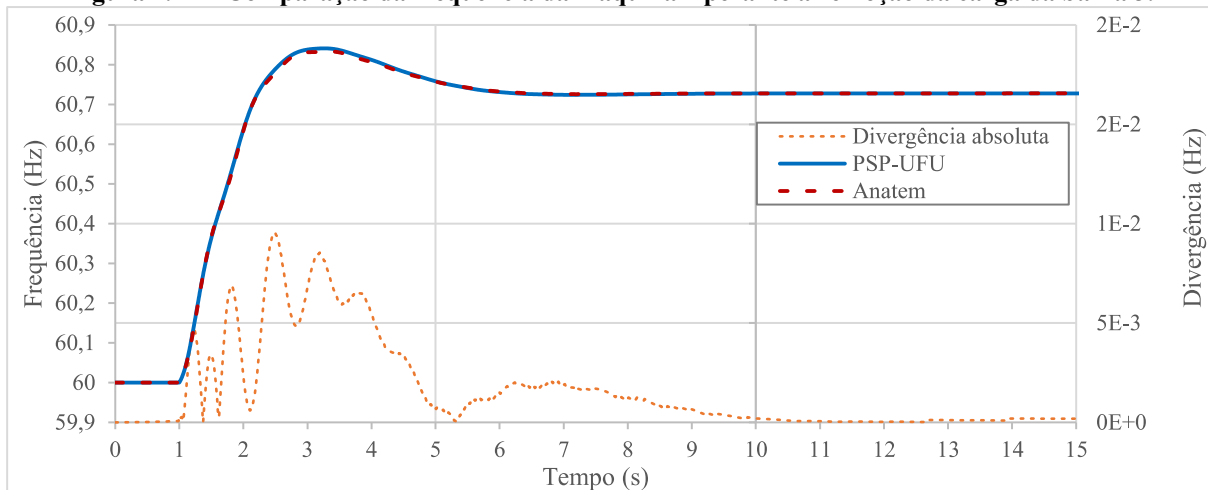
apresentaram comportamento típico, apontando para uma correta implementação e integração dos modelos e algoritmos no PSP-UFU.

4.6.2 Remoção de carga

A carga removida do circuito está conectada na barra 3 do sistema, com valor igual a $92,4 + j19,0$ MVA, consistindo da maior carga do sistema. Novamente a perturbação ocorrerá no instante de 1,0 s e as curvas analisadas tanto pelo PSP-UFU quanto pelo Anatem são originadas da máquina síncrona 1.

A Figura 4.12 apresenta a frequência da máquina em ambos os programas:

Figura 4.12 – Comparação da frequência da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.

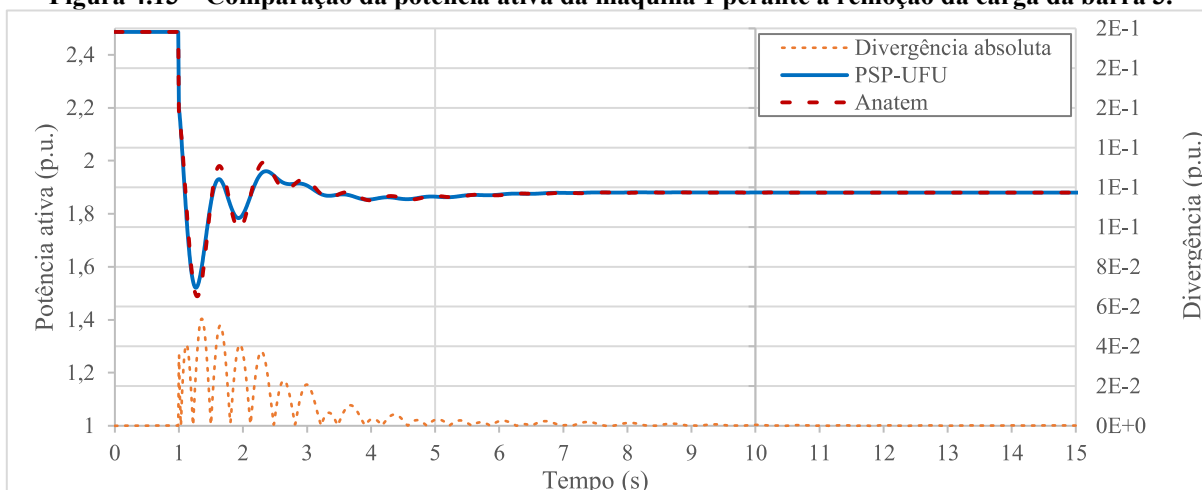


Fonte: Autoria própria.

Nota-se uma grande semelhança nas curvas, as quais apresentam um desvio máximo de 0,00953 Hz no instante de 2,5 s e uma RQME igual a 0,002071 Hz. Devido ao alívio de carga e o estatismo de 2,0% do controle primário de regulação de velocidade dos geradores, a frequência eleva seu valor, se estabilizando em 60,73 Hz em ambos programas, apresentando comportamento típico.

A potência ativa frente à perturbação em estudo é apresentada na Figura 4.13:

Figura 4.13 – Comparação da potência ativa da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.

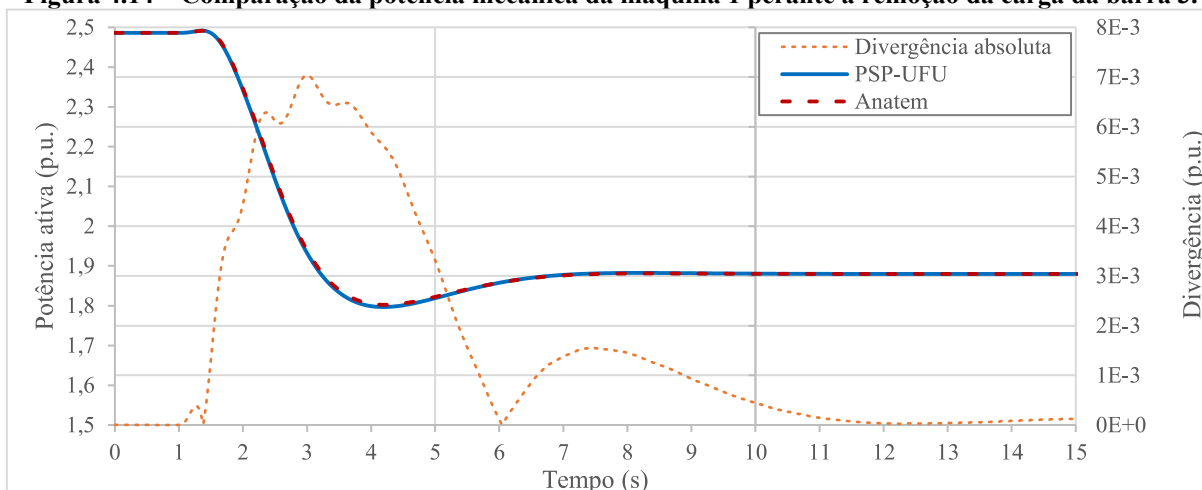


Fonte: Autoria própria.

A maior divergência de valores nessa análise ocorre em 1,36 s, com um valor de 0,05379 p.u e uma RQME de 0,008635 p.u. Novamente o comportamento se mostra coerente, visto que parte da rejeição de carga foi compensada pelo gerador 1, com valor de regime permanente de 1,88 p.u.

Na Figura 4.14 é exibido o gráfico da potência mecânica:

Figura 4.14 – Comparação da potência mecânica da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.



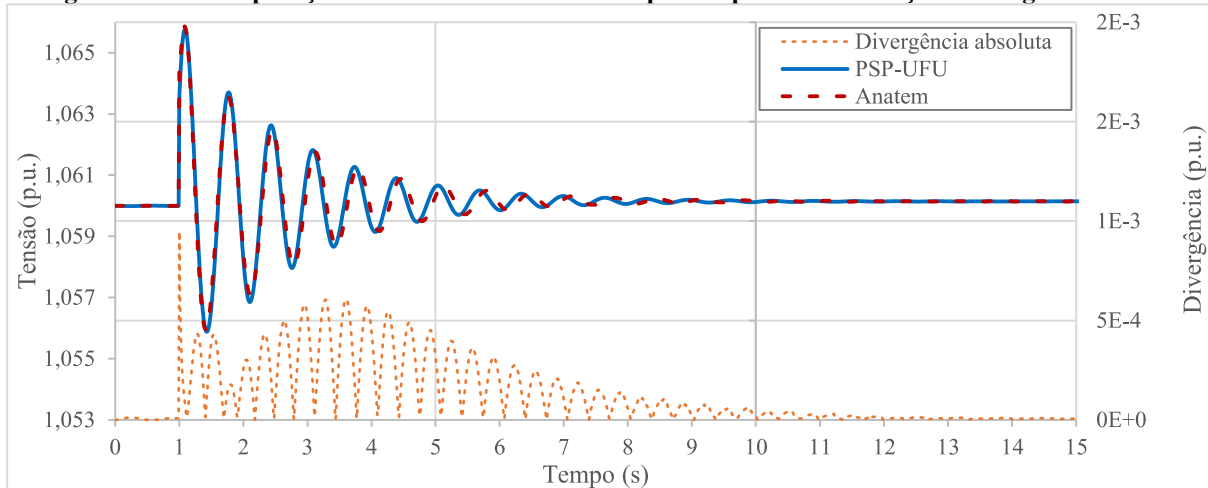
Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a divergência das duas curvas é bastante pequena, com um valor máximo de 0,005702 p.u. em 3,79 s e uma RQME igual a 0,002044 p.u. Novamente o valor de

regime permanente é de 1,88 p.u., ou seja, idêntico à potência ativa, uma vez que a resistência de armadura é desconsiderada nessa máquina.

A tensão terminal da máquina é comparada na Figura 4.15:

Figura 4.15 – Comparação da tensão terminal da máquina 1 perante a remoção da carga da barra 3.



Fonte: Autoria própria.

O impacto desse tipo de perturbação na tensão terminal da máquina 1 é pequeno e a diferença e a maior divergência apresentada entre os dois programas foi de 0,00092 p.u. no instante da remoção da carga, em 1,0 s e uma RQME de apenas 0,000147 p.u. De forma semelhante ao curto-circuito trifásico, o presente distúrbio exibiu um maior amortecimento da tensão no PSP-UFU em comparação ao Anatem, assim como uma pequena diferença na oscilação de tensão após 5,0 s de simulação.

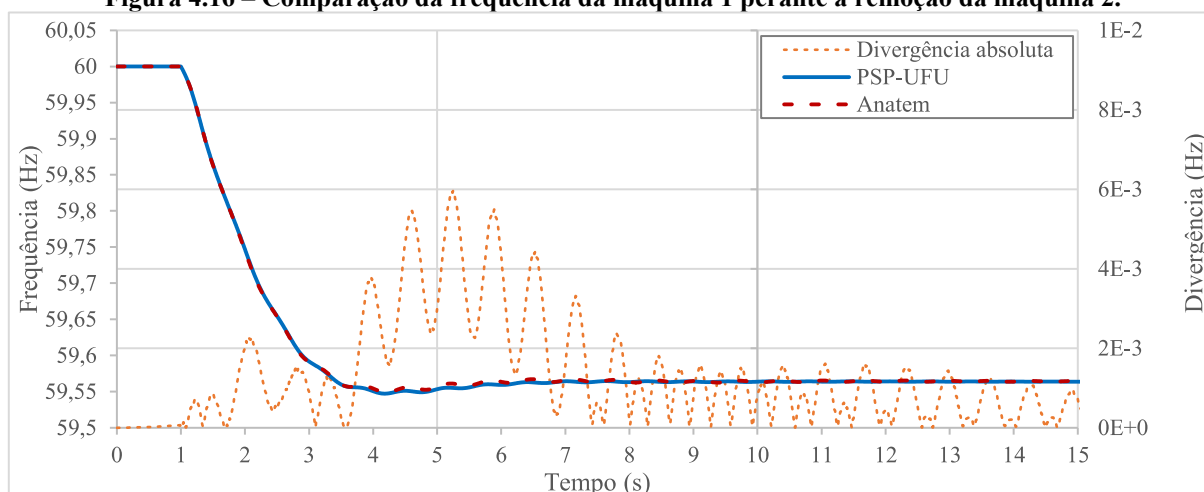
Novamente, agora para um segundo distúrbio em um ponto distinto do sistema, os resultados do PSP-UFU se mostraram satisfatórios, apresentando divergências pequenas na análise comparativa com o programa comercial Anatem.

4.6.3 Remoção de geração

Outro distúrbio aplicado ao sistema de 14 barras foi a remoção do gerador 2, conectado na barra 2, com valor de injeção de potência de $40,0 + j50,18$ MVA. Novamente o distúrbio foi aplicado no instante de 1,0 s e os dados analisados correspondem ao gerador 1.

A Figura 4.16 apresenta a frequência da máquina síncrona 1:

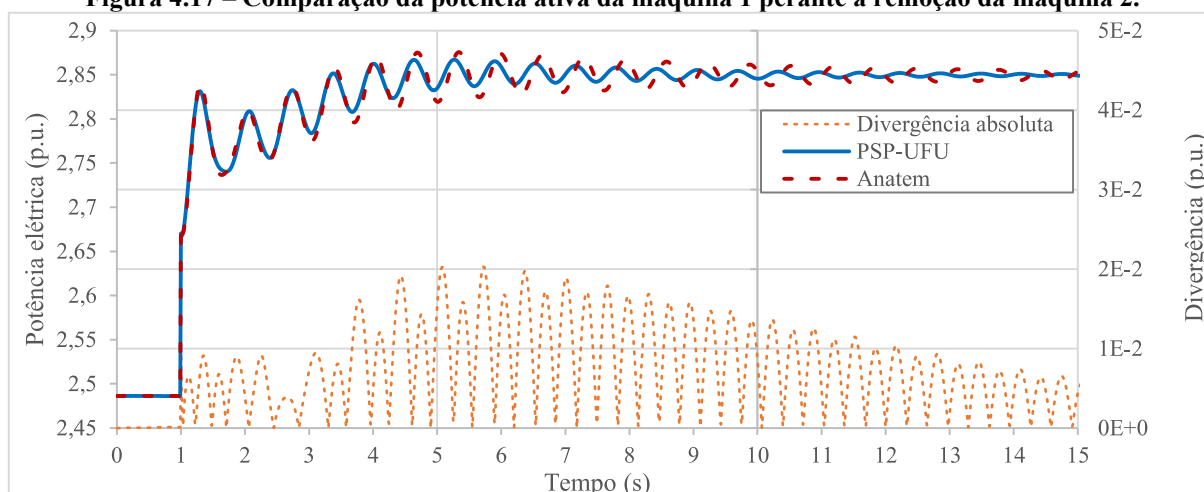
Figura 4.16 – Comparação da frequência da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.



Fonte: Autoria própria.

De forma semelhante às demais comparações de frequência, o resultado dos dois programas se mostraram bastante próximos, com uma divergência máxima de 0,005975 Hz em 5,25 s, com uma RQME de 0,001264 p.u. em 15,0 s de simulação. Mais uma vez o comportamento da máquina se mostra típico, uma vez que a máquina desacelera com a compensação da potência ativa removida da barra 2 pelo gerador remanescente, evidenciado pela curva de potência ativa da Figura 4.17:

Figura 4.17 – Comparação da potência ativa da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.

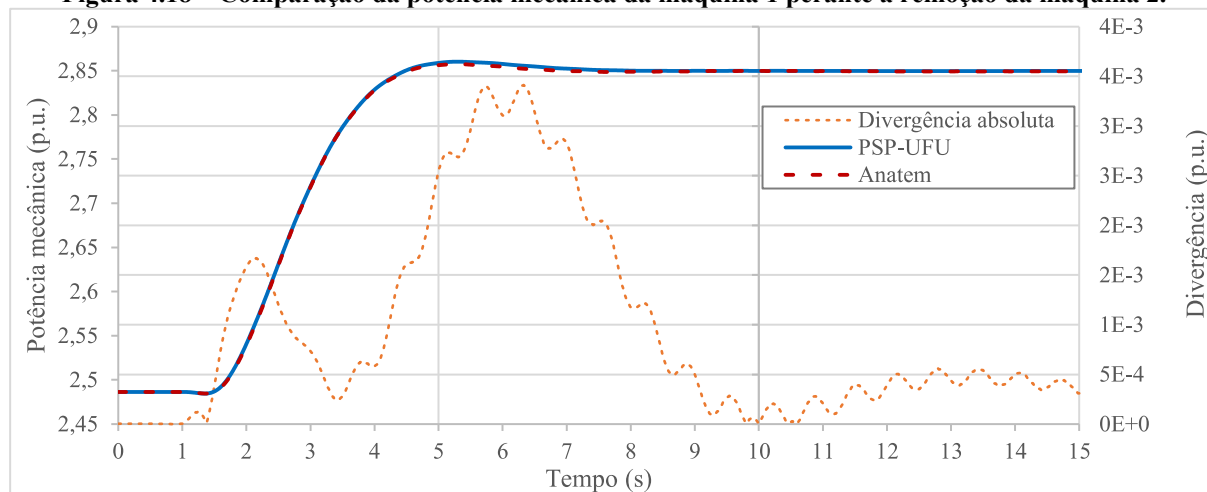


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado, o gerador 1 praticamente assume toda a potência ativa removida (40,0 MW), com um degrau de 36,4 MW. Tal diferença de potência se deve à redução

da potência das cargas de impedância constante do sistema ocasionada pela redução da tensão em barramentos sem tensão controlada, além da alteração das perdas nas linhas ocasionada pela mudança do fluxo de carga. Devido a um maior amortecimento do PSP-UFU após 3,0 s, o desvio máximo ocorre em 5,73 s com um valor de 0,020278 p.u. de potência ativa e um valor de RQME igual a 0,00578 p.u.

Figura 4.18 – Comparação da potência mecânica da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.

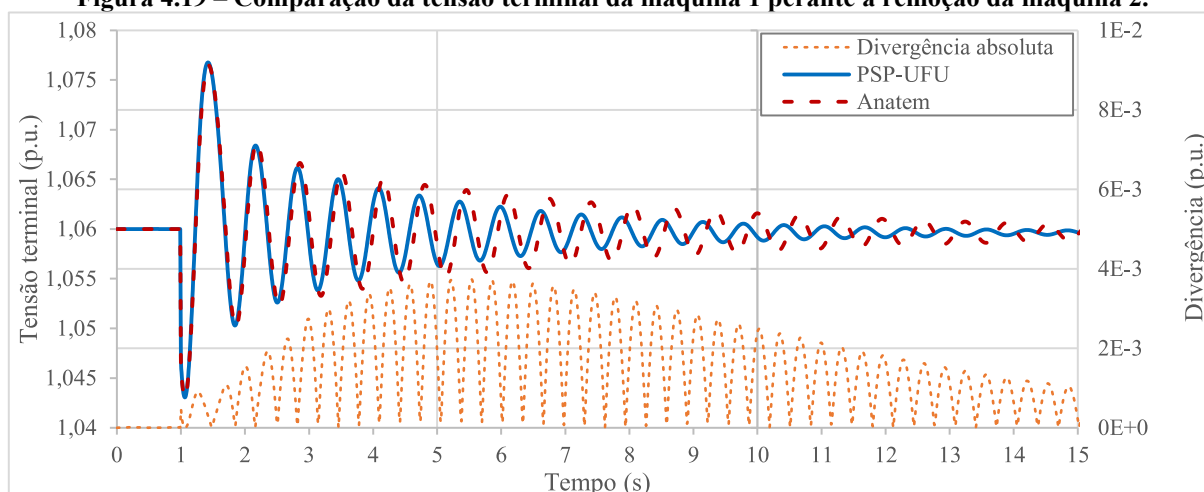


Fonte: Autoria própria.

A curva de potência mecânica, originada do conjunto regulador de velocidade e turbina, se mostrou praticamente idêntica nos dois programas, com uma diferença máxima de 0,00346 p.u. em 6,32 s e uma RQME de apenas 0,000931 p.u. De forma análoga às outras variáveis analisadas, o valor de regime permanente encontrado é idêntico tanto nas simulações dos dois programas.

A tensão terminal dessa máquina em análise é apresentado na Figura 4.19:

Figura 4.19 – Comparação da tensão terminal da máquina 1 perante a remoção da máquina 2.



Fonte: Autoria própria

Nesse gráfico pode ser observado com clareza um maior amortecimento no PSP-UFU nesse tipo de distúrbio. Contudo os valores nas primeiras oscilações apresentaram comportamento idêntico, cujo maior desvio encontrado ocorre somente no instante 5,54 s com valor de 0,003734 p.u e uma RQME de 0,001032 p.u.

4.6.4 Partida de motor de indução

Foi inserido um motor de 18000 HP inicialmente desligado na barra 13 do sistema com sua partida ocorrendo no instante de 1,0 s. Os dados do motor são exibidos na Tabela 4.30 [66], em que os valores em p.u. estão na base da máquina:

Tabela 4.30 – Parâmetros do motor de indução

Potência (HP)	Carregamento	Inércia (s)	r_s (p.u.)	x_s (p.u.)	r_r (p.u.)	x_r (p.u.)	x_m (p.u.)
18000	100%	0,45	0,0081	0,171	0,0671	0,135	2,13

Fonte: Adaptado de GUIMARÃES, G. C. [66].

A carga mecânica do motor de indução é proporcional a expressão quadrática (4.1):

$$T_m \propto 0,1 + 0,9\omega^2 \tag{4.1}$$

Em que:

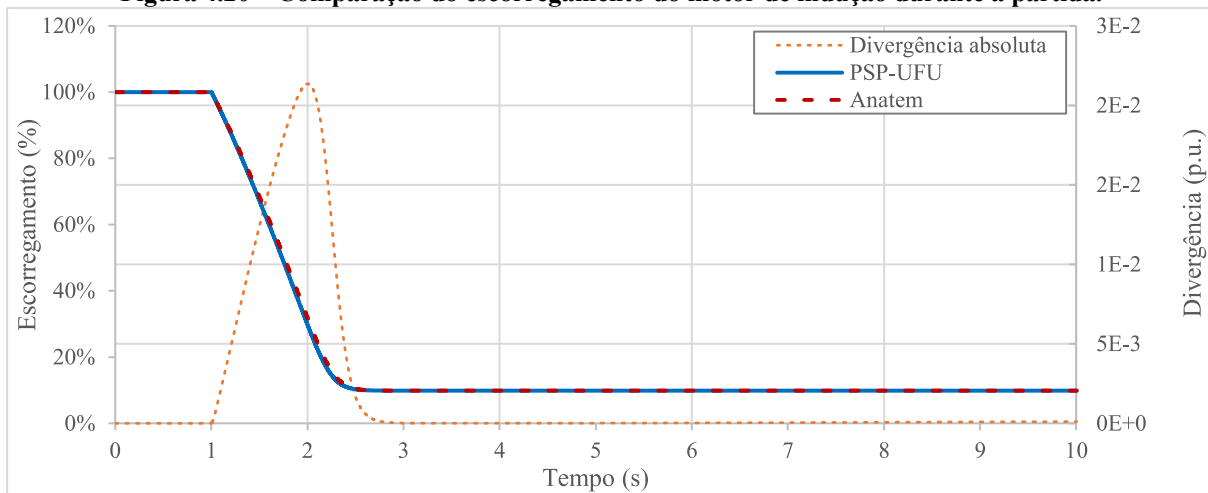
T_m Torque mecânico da carga

ω Velocidade do conjunto motor-carga

Para observar exclusivamente o comportamento do motor na partida, as máquinas síncronas do sistema de 14 barras foram consideradas como “geradores infinitos”. No Anatem, uma barra fictícia foi criada e conectada ao barramento 13 por meio de uma linha de impedância desprezível, possibilitando a retirada e posterior partida do motor e indução.

A Figura 4.20 apresenta o escorregamento do motor no tempo:

Figura 4.20 – Comparação do escorregamento do motor de indução durante a partida.

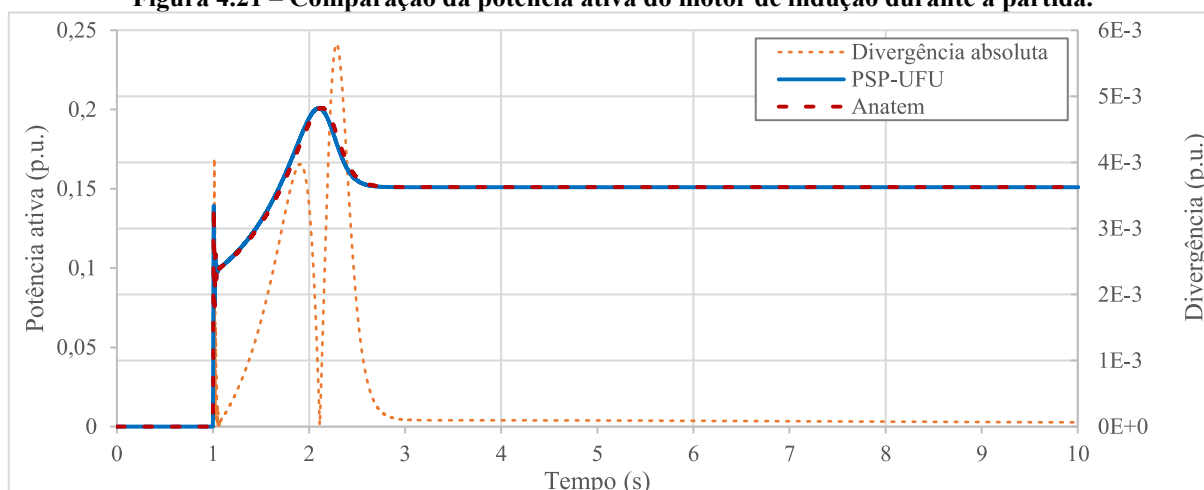


Fonte: Autoria própria.

Os escorregamentos de ambos programas são bastante semelhantes, com valores de regime permanente idênticos, iguais a 9,85%. A divergência máxima de 0,02135 p.u. ocorre em 2,0 s, com uma RQME em 10,0 s de simulação igual a 0,005 p.u. A resistência do rotor de valor expressivo resulta em um elevado escorregamento em regime permanente, assim como um menor tempo de partida do motor.

A potência ativa da máquina é apresentada na Figura 4.21:

Figura 4.21 – Comparação da potência ativa do motor de indução durante a partida.

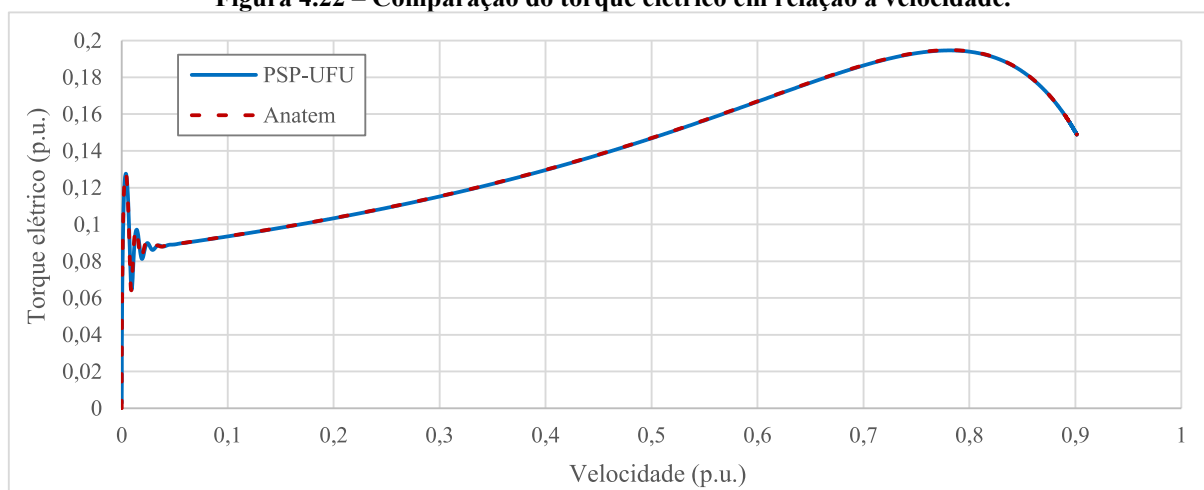


Fonte: Autoria própria.

Nota-se uma grande semelhança nas curvas, as quais apresentam um desvio máximo de 0,00579 p.u. no instante de 2,28 s e uma RQME igual a 0,001036 p.u. O comportamento apresentado é compatível com a literatura, apresentando comportamentos iniciais resultantes das oscilações transitórias do rotor, uma potência máxima de 0,2 p.u. (no instante de 2,1 s e escorregamento de 22,59%), se estabilizando em 0,151 p.u.

Por fim, o gráfico de torque elétrico em relação a velocidade do motor é apresentado na Figura 4.22:

Figura 4.22 – Comparação do torque elétrico em relação a velocidade.



Fonte: Autoria própria.

Nesse gráfico não foi realizada um exame dos desvios pois os programas não apresentam valores de velocidade e torque coincidentes, sendo impossível efetuar uma análise comparativa sem a utilização de técnicas estimativas e aproximações. Ainda assim, uma análise gráfica revela que os resultados de ambos programas são praticamente idênticos e com comportamento compatível com a literatura.

Finalmente, conclui-se que todos os resultados apresentados pelo PSP-UFU no estudo de estabilidade se mostraram satisfatórios, com divergências pequenas entre os programas ocasionados principalmente pelos modelos de máquinas síncronas diferentes.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar as conclusões do trabalho e sumarizar as perspectivas futuras. Para tal, é feita a consolidação das análises parciais expostas em cada capítulo, dando assim, uma visão geral dos estudos realizados no trabalho, bem como as suas contribuições.

Com o intuito de justificar o desenvolvimento desse trabalho, assim como apresentar os objetivos da tese, apresentou-se um capítulo introdutório, no qual destacaram-se sucintamente os principais trabalhos no “estado da arte” sobre os assuntos que envolvem esse trabalho, após uma breve contextualização sobre os temas. Preocupou-se em destacar os principais programas computacionais, tanto comerciais quanto livres de código aberto, capazes de realizar ao menos um dos estudos: fluxo de carga, curto-circuito e estabilidade. Ainda se comparou, com destaque para os FOSS, as principais características desses programas em que foram apontadas as fragilidades em comum. Finalmente, baseado nos dados apresentados, definiu-se o objetivo principal do trabalho, assim como o destaque para algumas metas específicas.

A modelagem matemática, assim como métodos numéricos computacionais, tanto na área de Engenharia Elétrica, quanto em outros campos de estudo, são amplamente utilizados 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, harmônicos e estudo de estabilidade transitória.

Para o estudo de fluxo de carga foram citados, a princípio, as modelagens dos principais elementos passivos de um SEP inseridos na matriz admitância, o modelo do motor de indução no fluxo de potência, além das equações de fluxo de potência para os elementos de ramo. Também foi explicitado o desenvolvimento dos 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 a solução mais provável de ocorrer, uma vez que caso um dos métodos não encontre a solução, o outro pode convergir.

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 balanceados. Também foram apresentadas as equações de cálculo de curto-circuito para cada tipo de falta presente no *software*.

No estudo de estabilidade destacou-se a máquina síncrona em sua forma fundamental modelada por meio da transformada de Park, apresentando as equações diferenciais do modelo de cinco enrolamentos, assim como as equações algébrico-diferenciais do modelo de Anderson-Fouad empregado no desenvolvimento do programa, apontando, por meio de equações, a equivalência dos parâmetros fundamentais com aqueles solicitados aos usuários (reatâncias, resistências e constantes de tempo). Ainda se destacou a inclusão do efeito da saturação magnética e as equações mecânicas dessas máquinas, permitindo, assim, a construção dos cinco modelos de máquina síncrona implementados no PSP-UFU.

Além das máquinas síncronas, foram expostas a representação das cargas no sistema em sua forma ZIP (impedância, corrente e potência constantes), permitido ao usuário compor, de forma genérica, individualmente ou de forma geral, as cargas estáticas do sistema. Os motores de indução, uma carga dinâmica relevante no sistema elétrico, foi implementada no programa utilizando o modelo de gaiola simples em conjunto com o fluxo de potência, apresentado resultados corretos para quaisquer condições de carregamento do sistema.

Após definir os principais modelos dinâmicos, preocupou-se em inseri-los na rede elétrica por meio da modificação da matriz admitância e cálculo de correntes injetadas nas barras, com maior destaque para as máquinas síncronas e de indução, uma vez que são elementos mais complexos e demandam uma atenção mais significativa.

Para solução das EADs aplicou-se o método trapezoidal implícito por ser estável numericamente, apresentar rapidez nos cálculos e ser preciso em sua solução. Desenvolveram-se as equações dos modelos das máquinas para aplicação desse método, cujos elementos que necessitavam de cálculos iterativos foram destacados das constantes de integração, com o intuito de acelerar computacionalmente a integração numérica. Para evitar a inversão de matriz, além de cálculos desnecessários utilizando o método da eliminação Gaussiana, aplicou-se a

decomposição LU da matriz admitância, a qual é aplicada somente em instantes de alteração dessa matriz, acelerando significativamente os cálculos do programa.

Finalmente, ao fim da seção relativa à estabilidade, foi apresentada a estrutura desenvolvida no PSP-UFU para o cálculo de estabilidade transitória e dinâmica, destacando as seções e equações desenvolvidas até então de uma forma, agora, concomitante.

Um interessante estudo implementado nesse trabalho foram os harmônicos, divididos em duas ferramentas: cálculo das distorções harmônicas e análise da resposta da impedância na frequência. Esse tipo de estudo pouco presente nos FOSS foi implementado para se apresentar de forma intuitiva e amigável ao usuário.

Um dos destaques desse trabalho é a possibilidade de criação de sistemas de controle genéricos por meio de uma ferramenta CAD amigável e intuitiva. Para isso, foram explorados a estrutura teórica dos blocos fundamentais desenvolvidos, além estrutura do algoritmo de solução e da inicialização desses sistemas.

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 possibilitassem 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. Ainda foram empregadas outras bibliotecas: OpenGL, indispensável na ferramenta CAD desenvolvida, a qual permitiu a renderização dos elementos de potência, controle e dados da simulação; RapidXML, utilizado na gravação e recuperação dos arquivos no disco por meio do padrão XML; Function parser, biblioteca fundamental na generalização dos elementos de controle, o qual permite calcular funções matemáticas com condicionais a partir de uma *string* em tempo de execução do programa; e wxMathPlot, utilizada na criação do visualizador e editor de gráficos no tempo gerados pelo estudo de estabilidade.

Foi utilizada uma arquitetura de *software* padrão, denominada *Model-View-Controller*, simples, de fácil compreensão e bastante presente na literatura, com a intenção de facilitar a implementação de novas ferramentas, além daquelas criadas nessa pesquisa, por outros

programadores. Foram expostas as principais classes do programa, fornecendo uma visão geral da estrutura e funcionamento do PSP-UFU. A adoção dessa arquitetura padrão também se mostrou bastante eficiente na organização das classes presentes no programa, possibilitando a criação de sistemas mais complexos. Destaca-se, ainda, a criação de uma documentação *online* pública e de fácil compreensão, auxiliando significativamente outros desenvolvedores na aplicação de suas pesquisas e implementações inovadoras no código do PSP-UFU.

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.

Ainda sobre o PSP-UFU, destacou-se sua natureza multiplataforma, apresentando brevemente a implementação no sistema operacional livre Linux/Ubuntu. Finalmente destacou-se a licença empregada no *software* desenvolvida nesse trabalho, a GNU GLP, versão 2, apresentando as suas principais características.

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), Anafas (curto-circuito), HarmZs (harmônicos) e Anatem (estabilidade), todos desenvolvidos pelo CEPTEL. Para tanto foram construídos os sistemas teste do IEEE nos programas. Também se comparou o resultado de um sistema de controle com o MATLAB/Simulink por meio da ferramenta de teste da rede genérica presente no editor de elementos de controle do PSP-UFU.

No cálculo de fluxo de carga compararam-se os sistemas teste de 14, 30, 57 e 118 barras implementados tanto no PSP-UFU quanto no Anarede. Tais estudos foram realizados para averiguar a correta operação do cálculo do fluxo de carga, assim como o comportamento do *software* para distintas redes com diferentes configurações e números de barras. Os resultados comparativos se mostraram praticamente idênticos, com divergências mínimas entre os programas, validando os algoritmos do PSP-UFU nos estudos de fluxo de carga e aqueles auxiliares, como criação da matriz admitância, associação dos elementos de potência e conversão de parâmetros.

De forma semelhante, testou-se o sistema de 14 barras barra diferentes tipos de curto-circuito com o Anafas, o qual apresentou novamente resultados praticamente idênticos para todos as faltas balanceadas e desbalanceadas, demonstrando a correta implementação da

ferramenta de cálculo de curto-circuito, assim com os modelos dos elementos elétricos envolvidos nesse estudo.

O sistema de controle empregado como teste foi a junção de dois controles da máquina síncrona: um AVR (controle de tensão e modelo de excitatriz) e um PSS. Tal sistema foi implementado no PSP-UFU e no MATLAB/Simulink e seus resultados comparados. Duas entradas foram aplicadas simultaneamente, um degrau no AVR e uma função oscilatória decrescente na entrada do PSS. Os gráficos no tempo foram então comparados, apresentando divergência praticamente nula, afirmando a implementação adequada dos elementos de controle e algoritmos de solução.

Para a averiguação das ferramentas harmônicas foram inseridas correntes harmônicas em um barramento do sistema teste de 14 barras e observadas as distorções harmônicas de tensão em todos os barramentos do sistema. A análise da impedância observada em um espectro de frequência também foi comparada. Ambas ferramentas apresentaram virtualmente idênticos, confirmando a correta implementação das ferramentas de harmônicos no PSP-UFU

No estudo de estabilidade também foi empregado o sistema de 14 barras, cujos resultados provenientes dos distúrbios de curto-circuito trifásico franco, remoção de carga e remoção de geração calculados pelo PSP-UFU foram comparados com o Anatem. O comportamento das curvas para todas as perturbações se mostraram semelhantes, com pequenas divergências causadas principalmente pelos modelos de máquinas síncronas distintos implementados pelos dois programas. Ainda assim, os resultados se mostraram satisfatórios, atestando a correta operação dos algoritmos do estudo de estabilidade, dos modelos empregados, da interação entre os controles com as máquinas síncronas e com o restante do sistema elétrico de potência.

Salienta-se aqui o principal objetivo e contribuição desta tese: desenvolvimento de um *software* livre de código aberto, gráfico e multiplataforma para estudos em sistemas elétricos de potência, possuindo uma arquitetura de software padrão e modular, com o código fonte publicamente disponibilizado. Para usuários finais e aplicações industriais foram desenvolvidas ferramentas de desenho assistido por computadores para criação de diagramas unifilares de circuitos de potência e diagramas de blocos de sistemas de controle, permitindo a generalização de elementos do sistema elétrico por meio de uma interface gráfica, sem a necessidade de modificação do código fonte. Essas características são amplamente empregadas em programas comerciais, porém são inexistentes em aplicações livres. Elas foram aplicadas no presente trabalho e, em conjunto com os resultados satisfatórios das simulações apresentadas, cumprem

o objetivo principal dessa tese. O *software* desenvolvido, em sua versão atual, é estável e pode auxiliar como ferramenta as áreas de pesquisa e educação, além de aplicações práticas em sistemas elétricos de potência.

Apesar de estável e completamente utilizável, a versão atual do PSP-UFU ainda pode ser incrementada por qualquer desenvolvedor, uma vez que é um programa livre e de código aberto, possui arquitetura de *software* padrão e vasta documentação *online* de seu código fonte. Tais perspectivas de implementações em pesquisas futuras são aqui sucintamente sumarizadas:

- Expansão dos limites e controles no cálculo do fluxo de carga;
- Novas implementações no cálculo de curto-circuito, pretende-se explorar as faltas série, com destaque para abertura de uma e duas linhas, além da possibilidade de inserção de outras faltas não típicas, como a combinação de falhas shunt e série;
- Elaborar diferentes modelos da curva de saturação, além de permitir a inserção de curvas de saturação definidas ponto-a-ponto pelo usuário;
- Possibilitar a variação da resistência dos elementos devido ao efeito pelicular nos estudos de harmônicos.
- Expandir a aplicação dos sistemas de controle desenvolvido para a aplicação dos controles primários das máquinas síncronas, como, por exemplo, em dispositivos FACTS;
- Aumentar o número de blocos elementares dos sistemas de controle, com o intuito de possibilitar a criação de modelos mais complexos;
- Implementação de mais opções de modelagem de cargas nos estudos de falta, como a estratégia utilizada nos cálculos de estabilidade (carga ZIP), além de parâmetros de conexão, como estrela sem aterramento e delta;
- Perspectiva de reestruturação do programa para criação de novos modelos dinâmicos sem a necessidade de desenvolvimento do código fonte, utilizando o editor de elementos de controle como interface para tais criações do usuário;
- Análise de sensibilidade utilizando as submatrizes da matriz Jacobiana;
- Inclusão de elementos e ferramentas relacionadas a fontes alternativas de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] MILANO, F. **Power System Modelling and Scripting**. London: Springer, 2010. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13669-6>
- [2] STAGG, G.; GLENN, W.; EL-ABIAD, A. H. **Computer methods in power system analysis**. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [3] ELGERD, O. I. **Electrical Energy Systems Theory: An Introduction**. New York: McGraw-Hill, 1971.
- [4] STOTT, B. **Review of load flow calculation methods**. Proceedings of IEEE, v. 62, n. 7. IEEE, p. 916-929, 1974. doi: <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9544>
- [5] JAMALI, S.; SHATERI, H. **Some trouble-making aspects of load flow analysis in distribution systems and their solutions**. 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Turin (CIRED 2005), 2005, p. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1049/cp:20051365>
- [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. doi: <https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147281>
- [7] KUNDUR, P.; et al. **Definition and classification of power system stability**. IEEE Transactions Power Systems, v. 19, n. 2, mai 2004, p. 1387-1401. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825981>
- [8] ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Computer Modelling of Electrical Power Systems**. Wiley & Sons, New York, 2001. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118878286>
- [9] PARK, R. H. **Two-reactions Theory of Synchronous Machine. Generalized Method of Analysis – Part I**. AIEE Transactions, v. 48, n. 3, jul 1929. doi: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1929.5055275>
- [10] ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power System Control and Stability**. Wiley-IEEE Press, New York, 2002. doi: <https://doi.org/10.1109/9780470545577>
- [11] SAUER, P. W.; PAI, M. A. **Power System Dynamics and Stability**. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998.
- [12] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. McGraw-Hill, New York, 1994.

- [13] DOMMEL, H. W.; SATO, N. **Fast Transient Stability Solutions**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-91, n. 4, jul 1972, p. 1643-1650. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1972.293341>
- [14] ALBERTO, L. F. C.; SILVA, F. H. J. R.; BRETAS, N. G. **Direct Methods for Transient Stability Analysis in Power Systems: State of Art and Future Perspectives**. In: IEEE Porto Power Tech Conference, 2001.
- [15] BRETAS, N. G.; ALBERTO, F. C. **Lyapunov Function for Power Systems With Transfer Conductances: Extension of the Invariance Principle**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 18, n. 2, may 2003, p. 769-777. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2003.811207>
- [16] ATHAY, T; PODMORE, R.; VIRMANI, S. **A Practical Method for the Analysis of Transient Stability**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-98, n. 2, 1979, p. 573-584. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1979.319407>
- [17] TSOLAS, N. A.; ARAPOSTATHIS, A.; VARAIYA, P. P. **A Structure Preserving Energy Function for Power Systems Transient Stability Analysis**. IEEE Transactions on Circuits and Systems, v. CAS-32, n. 10, 1985, p. 1041-1049. doi: <https://doi.org/10.1109/TCS.1985.1085625>
- [18] ANGHEL, M.; MILANO, F.; PAPACHRISTODOULOU, A. **Algorithmic Construction of Lyapunov Functions for Power System Stability Analysis**. IEEE Transactions on Circuits and Systems, v. 60, n. 9, 2013, p. 2533-2546. doi: <https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2246233>
- [19] OpenElectrical. **Power System Analysis Software**. Disponível em <https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Power_Systems_Analysis_Software>. Acesso em: 22 nov. 2017.
- [20] TAMASHIRO, M. A., **Uma Estratégia de Interação na WEB Para a Análise de Sistemas Elétricos de Potência**. 2016. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- [21] CEPEL. **Programa de Análise de Redes – Manual do Usuário**. Rio de Janeiro, 2015.
- [22] CEPEL. **Anarede – Análise de Redes Elétricas**. Disponível em <<http://www.cepel.br/produtos/anarede-analise-de-redes-eletricas.htm>>. Acesso em 22 nov. 2017.
- [23] CEPEL. **Programa Anatem: Análise de Transitórios Eletromecânicos – Manual do Usuário**. Rio de Janeiro, 2015.
- [24] EATON. **CYME Power Engineering Software**. St. Bruno, Canadá, 2015.
- [25] Operation Technology Inc. **ETAP – Product Overview**. Irvine, EUA, 2015.

- [26] DlgSILENT GmbH. **DlgSILENT – PowerFactory 2017**. Gomaringen, Alemanha, 2017.
- [27] POWERWORLD CORPORATION. **PowerWorld Overview**. Disponível em <<https://www.powerworld.com/products/simulator/overview>>. Acesso em 23 nov. 2017.
- [28] Siemens AG. **PSS®E – High-performance Transmission Planning and Operations Software for the Power Industry**. Erlangen, Alemanha, 2017.
- [29] SKM System Analysis. **Power*Tools Integrated Study Modules**. <<http://www.skm.com/Product.html>>. Acesso em 24 de nov. 2017.
- [30] MathWorks. **Simscape Power Systems**. Disponível em <<https://www.mathworks.com/products/simpower.html>>. Acesso em 24 de nov. 2017.
- [31] MILANO, F. **An Open Source Power System Analysis Toolbox**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 20, n. 3, ago. 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.851911>
- [32] SARKINEN, J. **An Open Source(d) Controller**. In: Telecommunications energy Conference, 2007, Rome, p. 767-768. doi: <https://doi.org/10.1109/INTLEC.2007.4448885>
- [33] VANFRETTI, L.; MILANO, F. **Triggering the deep learning approach in power system courses using Free and Open Source**. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, Detroit. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039034>
- [34] VANFRETTI, L.; MILANO, F. **Facilitating Constructive Alignment in Power Systems Engineering Education Using Free and Open-Source Software**. IEEE Transactions on Education, v. 55, n. 3, ago 2012. doi: <https://doi.org/10.1109/TE.2011.2172211>
- [35] PALENSKY, P.; WIDL, E.; STIFTER, M.; ELSHEIKH, A. **Modeling Intelligent Energy Systems: Co-Simulation Platform for Validating Flexible-Demand EV Charging Management**. IEEE Transaction on Smart Grid, vol. 4, no. 4, dez 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2258050>
- [36] STIFTER, M.; EDMUND, W.; FILIP, ANDREN, F. **Co-simulation of components, controls and power systems based on open source software**. In: IEEE PED General Meeting, 2013, Vancouver. doi: <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672388>
- [37] MILANO, F.; VANFRETTI, L. **State of Art and Future of OSS for Power Systems**. In: IEEE PES General Meeting, 2009, Calgary. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275920>
- [38] TAMASHIRO, M. A.; GUIMARÃES, G. C.; RODRIGUES, A. R.; MONTEIRO, R. V. A.; OLIVEIRA, T. L.; SILVA, L. R. C. **Comparative Study of TACS/DBM and MODELS of ATP-EMTP Applied to Power Systems Computer Simulation**. IEEE

- Latin America Transactions, v. 14, n. 2, fev 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7437213>
- [39] EEUG.org. **About “European EMTP-ATP Users Group e.V.” Association.** <<http://eeug-test.hostingkunde.de/index.php/about-eeug/who-we-are>>. Acesso em 02 dez. 2017.
- [40] HØIDALEN, H. K. **ATPDraw™ – The graphical processor to ATP.** <<https://www.atpdraw.net/>>. Acesso em 02 dez 2017.
- [41] ZHOU, M.; ZHOU, S. **Internet, Open-source and Power System Simulator.** IEEE PES GM2007, Tampa, 2007. doi: <https://doi.org/10.1109/PES.2007.385492>
- [42] ZHOU, M.; HUANG Q. **InterPSS: A New Generation Power System Simulation Engine.** In: PSSCC 2018 - XX Power Systems Computation Conference, 2018, Dublin.
- [43] InterPSS. **InterPSS Projects.** < <https://github.com/InterPSS-Project> > Acesso em 02 dez. 2017.
- [44] ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SÁNCHEZ, THOMAS, R. J. **MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools Form Power Systems Research and Education.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 26, n. 1, fev. 2013, p 12-19. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051168>
- [45] BEERTEN, J.; BELMANS, R. **Development of na OpenSource Power Flow Software for HVDC Grids and Hybrid AC/DC Systems: MATA CDC.** IET Generation Transmission and Distribution, v. 9, n. 10, jun. 2015, p. 966-974. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0545>
- [46] BEERTEN, J. **MATA CDC 1.0 User’s Manual.** Leuven, 2012. Disponível em: <www.esat.kuleuven.be/electa/teaching/matacdc/>. Acesso em 6 dez. 2017.
- [47] COLE, S.; BELMANS, R. **MatDyn, A New MATLAB-Based Toolbox for Power System Dynamic Simulation.** IEEE Transactions on Power Systems, v. 26, n. 3, ago. 2011, p. 1129-1136. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2071888>
- [48] COLE, S. **MatDyn Version 1.2.** Leuven, 2010. Disponível em: <[https://www.esat.kuleuven.be/electa/teaching/matdyn/](http://www.esat.kuleuven.be/electa/teaching/matdyn/)>. Acesso em 6 dez, 2017.
- [49] GUIMARÃES, G. C. **Manual do TransUFU – Programa de Estabilidade Transitória da UFU.** Uberlândia, 2000.
- [50] GUIMARÃES, G. C. **Manual do UFUFlow – Programa de Fluxo de carga.** Uberlândia, 2000.
- [51] AYASUN, S.; NWANKPA, C. O.; KWATNY, H. G. **Voltage Stability Toolbox for Power System Education and Research.** IEEE Transactions on Education, v. 49, n. 4, nov. 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/TE.2006.879798>

- [52] KRISHNAMURTHY, D. **AMES (V4.0)**. Disponível em <<http://kdheepak.com/AMES-v4.0/>>. Acesso em 09 jan., 2018.
- [53] LINKCOLN, R. W. **Pylon – Port of MATPOWER to Python**. Disponível em <<https://github.com/rwl/pylon>>. Acesso em 09 jan., 2018.
- [54] STEVENSON JR.; WILLIAN, D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [55] FORTESCUE, C. L. **Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks**. Trans. AIEE, v. 37, p.1027-1140, 1918. doi: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1918.4765570>
- [56] IEEE Std 399-1997. **IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (Brown Book)**. IEEE, New York, ago. 1998. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.88568>
- [57] MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgar Blücher, 1983.
- [58] SÁNCHEZ, J. C.; OLIVARES, T. I. A.; ORTIZ, G. R.; VEGA, D. R. **Induction Motor Static Models for Power Flow and Voltage Stability Studies**. In: IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012, San Diego. doi: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345618>
- [59] TINNEY, W. F.; HART, C. E. **Power Flow Solution by Newton's Method**. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, v. PAS-86, n. 11, nov. 1967. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1967.291823>
- [60] ATKINSON, K. E. **An introduction to numerical analysis**. 2ª ed. Iowa. John Wiley & Sons, 1989.
- [61] ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems**. New York: IEEE Press, 1995.
- [62] PAPATHANASSIOU, S. A. **Modeling Transformers with Off-Nominal Ratios for Unbalanced Conditions**. IEEE Power Engineering Review, v. 22, n. 2, fev. 2002. doi: <https://doi.org/10.1109/MPER.2002.4311975>
- [63] IEEE Std 1110-2002 **IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses**. IEEE, New York, nov. 2003. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2003.94408>
- [64] KIMBARK, E. W. **Power System Stability: Volume III – Synchronous Machine**. New York: Wiley-IEEE Press, 1995.
- [65] ADKINS, B.; HARLEY R. G. **The General Theory of Alternating Current Machines: Applications to Practical Problems**. Chapman and Hall, 1975. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2907-5>

- [66] GUIMARÃES, G. C. **Computer Methods for Transient Stability Analysis of Isolated Power Generation Systems with Special Reference to Prime Mover and Induction Motor Modelling**. Tese (Doutorado) – Department of Engineering, University of Aberdeen. Aberdeen, 1990.
- [67] IEEE Std 115-2009 **IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines: Part II – Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis**. IEEE, New York, mai. 2010. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5464495>
- [68] MARCONATO, R. **Electric Power Systems: vol. 2**. CEI, Italian Electrotechnical Committee, Milano, Italy, 2002.
- [69] DANDENO, P. L.; HAUTH, R. L.; SCHULZ, R. P. **Effects of Synchronous Machine Modeling in Large Scale System Studies**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-92, n. 2, mar. 1973. doi: <https://doi.org/10.1109/TPAS.1973.293760>
- [70] POWELL, J.; RADMAN, G. **Initialization for Dynamic Simulation of Stressed Power Systems Considering Induction Motor Components of Loads**. In: North American Power Symposium (NAPS'07), 2007, Las Cruces, USA. doi: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2007.4402294>
- [71] VENKATESHAN, S. P.; SWAMINATHAN, P. **Computational Methods in Engineering**. Academic Press, Waltham, 2014.
- [72] ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power System Harmonics**. John Wiley & Sons; Chichester, 2003. doi: <https://doi.org/10.1002/0470871229>
- [73] OGATA, K. **Modern Control Engineering**. Prentice Hall Inc., New Jersey, 2004.
- [74] WXWIDGETS. **wxWidgets: Cross-Platform GUI Library**. Disponível em <<http://www.wxwidgets.org/>>. Acesso: 20 mar. 2018.
- [75] SMART, J.; HOCK, K.. **Cross-Platform GUI Programming with wxWidgets**. United States: Prentice Hall PTR, 2006.
- [76] SYROMIATNIKOV, A.; WEYNS, D. **A Journey Through the Land of Model-View-* Design Patterns**. In: Conference on Software Architecture (WICSA), 2014, Sydney, Australia. doi: <https://doi.org/10.1109/WICSA.2014.13>
- [77] STROUSTRUP, B. **The C++ Programming Language**. 4ª ed. New Jersey: Addison-Wesley, 2013.
- [78] INTERNATIONAL STANDARD. **ISO/IEC 14882: Information technology – Programming languages – C++**. Geneva, 2017.
- [79] ZHOU, E. Z. **Object-oriented programming, C++ and power system simulation**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, n. 1, p. 206 – 215, fev. 1996. doi: <https://doi.org/10.1109/59.486097>

- [80] KHRONOS GROUP. **OpenGL Overview**. Disponível em <<https://www.opengl.org/about/>>. Acesso em 22 de mar. 2018.
- [81] KALICINSKI, M. **RapidXml**. Disponível em: <<https://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>>. Acesso em 22 mar. 2018.
- [82] NIEMINEN, J.; YLILUOMA, J. **Function Parser for C++ v4.5.2**. Disponível em: <<http://warp.povusers.org/FunctionParser/>>. Acesso em 22 mar. 2018.
- [83] RONDINI, D. **wxMathPlot: Scientific plotting for wxWidgets**. Disponível em: <<http://wxmathplot.sourceforge.net/>>. Acesso em 22 mar. 2018.
- [84] FREE SOFTWARE FOUNDATION. **GNU General Public License, version 2**. Disponível em <<https://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>>. Acesso em 22 mar, 2018.
- [85] GARLAN, D.; SHAW, M. **An Introduction to Software Architecture**. Relatório Técnico. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, 1994.
- [86] CLEMENTS, P.; SHAW, M. **The Golden Age of Software Architecture: Revisited** IEEE Software, v. 26, n. 4, p. 70–72, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/MS.2009.83>
- [87] SYROMIATNIKOV, A.; WEYNS, D. **A Journey through the Land of Model-View-Design Patterns**. In: IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA), 2014, Sydney, Australia. doi: <https://doi.org/10.1109/WICSA.2014.13>
- [88] HEESCH, D. V. **Doxygen: Generate documentation from source code**. Disponível em: <<http://www.stack.nl/~dimitri/doxygen/>>. Acesso em 19 abr, 2018.
- [89] MATHJAX. **MathJax project**. Disponível em: <<https://www.mathjax.org/>>. Acesso em 19 abr, 2018.
- [90] GRAPHVIZ. **Graphviz - Graph Visualization Software**. Disponível em: <<http://www.graphviz.org/>>. Acesso em 19 abr, 2018.
- [91] FRUCHTERMAN, T. M. J.; REINGOLD, E. M. **Graph drawing by force-directed placement**. Software: Practice and Experience, v. 21, n. 11, p. 1129– 1164, 1991. doi: <https://doi.org/10.1002/spe.4380211102>
- [92] RODIC, M. **Weighted graphs: generate a layout in C++**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode23tb.html>>. Acesso em 02 ago, 2019.
- [93] Free Software Foundation, Inc. **Introduction to gettext**. Disponível em: <<https://www.gnu.org/software/gettext/>>. Acesso em 07 mai, 2018.
- [94] SLAVÍK, V. **Poedit: Gettext Translations Editor**. Disponível em: <<https://poedit.net/>>. Acesso em 07 mai, 2018.

- [95] LAURENT, A. M. S., **Understanding Open Source & Free Software Licensing**. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2004.
- [96] CEPTEL. **Anafas: Análise de Faltas – Manual do Usuário**. Rio de Janeiro, 2017.
- [97] CEPTEL. **Manual de Utilização do Programa HarmZs**. Rio de Janeiro, 2016.
- [98] MathWorks. **Simulink: Simulation and Model-Based Design**. Disponível em <<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>>. Acesso em 09 de mai. 2018.
- [99] CHRISTIE, R. D. **Power System Test Case Archive**. Disponível em <<https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Acesso: 09 mai. 2018.
- [100] IEEE Std 421.5-2016 **IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies**. IEEE, New York, ago. 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7553421>

A DADOS DOS SISTEMAS SIMULADOS

Nesse apêndice estão presentes os dados dos sistemas utilizados nas simulações de fluxo de carga, curto-circuito e estabilidade transitória no PSP-UFU a fim de comparar os resultados desses cálculos com aqueles originados pelos programas Anarede, Anafas, Anatem e MATLAB/Simulink.

A.1 Fluxo de carga

São apresentados os dados de barras: módulo da tensão nodal (em p.u.), ângulo (em graus), potências ativas e reativas geradas e consumidas; assim como os dados de ramos: resistência, reatância, susceptância (todos em p.u.) e tap de transformadores. Todos os dados estão na potência base de 100 MVA.

A.1.1 Sistema teste do IEEE de 14 barras

A topologia desse sistema é representada pela Figura 4.1. Os dados de barras são representados pela Tabela A.1 e os dados de ramos pela Tabela A.2. Alguns dados gerais desse sistema [1]:

- Frequência base: 60 Hz;
- 3 tensões base: 69 kV para as barras de 1 a 5, 13,8 kV para as barras 6, 7 e de 9 a 14 e 18 kV para a barra 8.

Tabela A.1 – Dados de barras do sistema IEEE de 14 barras.

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Barra 1	Referência	1,06	0	0	-	-	0
Barra 2	PV	1,045	21,7	12,7	40	-	0
Barra 3	PV	1,01	94,2	19	0	-	0
Barra 4	PQ	-	47,8	-3,9	0	0	0
Barra 5	PQ	-	7,6	1,6	0	0	0
Barra 6	PV	1,07	11,2	7,5	0	-	0
Barra 7	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 8	PV	1,09	0	0	0	-	0

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Barra 9	PQ	-	29,5	16,6	0	0	0,19
Barra 10	PQ	-	9	5,8	0	0	0
Barra 11	PQ	-	3,5	1,8	0	0	0
Barra 12	PQ	-	6,1	1,6	0	0	0
Barra 13	PQ	-	13,5	5,8	0	0	0
Barra 14	PQ	-	14,9	5	0	0	0

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

Tabela A.2 – Dados de ramos do sistema IEEE de 14 barras.

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Barra 1	Barra 2	0,01938	0,05917	0,0528	-
Barra 1	Barra 5	0,05403	0,22304	0,0492	-
Barra 2	Barra 3	0,04699	0,19797	0,0438	-
Barra 2	Barra 4	0,05811	0,17632	0,034	-
Barra 2	Barra 5	0,05695	0,17388	0,0346	-
Barra 3	Barra 4	0,06701	0,17103	0,0128	-
Barra 4	Barra 5	0,01335	0,04211	0	-
Barra 4	Barra 7	0	0,20912	0	0,978
Barra 4	Barra 9	0	0,55618	0	0,969
Barra 5	Barra 6	0	0,25202	0	0,932
Barra 6	Barra 11	0,09498	0,1989	0	-
Barra 6	Barra 12	0,12291	0,25581	0	-
Barra 6	Barra 13	0,06615	0,13027	0	-
Barra 7	Barra 8	0	0,17615	0	-
Barra 7	Barra 9	0	0,11001	0	-
Barra 9	Barra 10	0,03181	0,0845	0	-
Barra 9	Barra 14	0,12711	0,27038	0	-
Barra 10	Barra 11	0,08205	0,19207	0	-
Barra 12	Barra 13	0,22092	0,19988	0	-
Barra 13	Barra 14	0,17093	0,34802	0	-

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

A.1.2 Sistema teste do IEEE de 30 barras

A topologia desse sistema é representada pela Figura 4.2. Os dados de barras são representados pela Tabela A.3 e os dados de ramos pela Tabela A.4.

Tabela A.3 – Dados de barras do sistema IEEE de 30 barras

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Glen Lyn	Referência	1,06	0	0	-	-	0
Claytor	PV	1,045	21,7	12,7	40	-	0
Kumis	PQ	-	2,4	1,2	0	0	0
Hancock 1	PQ	-	7,6	1,6	0	0	0
Fieldale	PV	1,01	94,2	19	0	-	0
Roanoke 1	PQ	-	0	0	0	0	0
Blaine	PQ	-	22,8	10,9	0	0	0
Reusens	PV	1,01	30	30	0	-	0
Roanoke 3	PQ	-	0	0	0	0	0
Roanoke 4	PQ	-	5,8	2	0	0	0,19
Roanoke 2	PV	1,082	0	0	0	-	0
Hancock 3	PQ	-	11,2	7,5	0	0	0
Hancock 3	PV	1,071	0	0	0	-	0
Barra 14	PQ	-	6,2	1,6	0	0	0
Barra 15	PQ	-	8,2	2,5	0	0	0
Barra 16	PQ	-	3,5	1,8	0	0	0
Barra 17	PQ	-	9	5,8	0	0	0
Barra 18	PQ	-	3,2	0,9	0	0	0
Barra 19	PQ	-	9,5	3,4	0	0	0
Barra 20	PQ	-	2,2	0,7	0	0	0
Barra 21	PQ	-	17,5	11,2	0	0	0
Barra 22	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 23	PQ	-	3,2	1,6	0	0	0
Barra 24	PQ	-	8,7	6,7	0	0	0,043
Barra 25	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 26	PQ	-	3,5	2,3	0	0	0
Cloverdle 1	PQ	-	0	0	0	0	0
Cloverdle 2	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 29	PQ	-	2,4	0,9	0	0	0
Barra 30	PQ	-	10,6	1,9	0	0	0

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

Tabela A.4 – Dados de ramos do sistema IEEE de 30 barras.

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Glen Lyn	Claytor	0,0192	0,0575	0,0528	-
Glen Lyn	Kumis	0,0452	0,1652	0,0408	-
Claytor	Hancock 1	0,057	0,1737	0,0368	-
Kumis	Hancock 1	0,0132	0,0379	0,0084	-
Claytor	Fieldale	0,0472	0,1983	0,0418	-
Claytor	Roanoke 1	0,0581	0,1763	0,0374	-
Hancock 1	Roanoke 1	0,0119	0,0414	0,009	-

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Fieldale	Blaine	0,046	0,116	0,0204	-
Roanoke 1	Blaine	0,0267	0,082	0,017	-
Roanoke 1	Reusens	0,012	0,042	0,009	-
Roanoke 1	Roanoke 3	0	0,208	0	0,978
Roanoke 1	Roanoke 4	0	0,556	0	0,969
Roanoke 3	Roanoke 2	0	0,208	0	-
Roanoke 3	Roanoke 4	0	0,11	0	-
Hancock 1	Hancock 3	0	0,256	0	0,932
Hancock 3	Hancock 3	0	0,14	0	-
Hancock 3	Barra 14	0,1231	0,2559	0	-
Hancock 3	Barra 15	0,0662	0,1304	0	-
Hancock 3	Barra 16	0,0945	0,1987	0	-
Barra 14	Barra 15	0,221	0,1997	0	-
Barra 16	Barra 17	0,0524	0,1923	0	-
Barra 15	Barra 18	0,1073	0,2185	0	-
Barra 18	Barra 19	0,0639	0,1292	0	-
Barra 19	Barra 20	0,034	0,068	0	-
Roanoke 4	Barra 20	0,0936	0,209	0	-
Roanoke 4	Barra 17	0,0324	0,0845	0	-
Roanoke 4	Barra 21	0,0348	0,0749	0	-
Roanoke 4	Barra 22	0,0727	0,1499	0	-
Barra 21	Barra 22	0,0116	0,0236	0	-
Barra 15	Barra 23	0,1	0,202	0	-
Barra 22	Barra 24	0,115	0,179	0	-
Barra 23	Barra 24	0,132	0,27	0	-
Barra 24	Barra 25	0,1885	0,3292	0	-
Barra 25	Barra 26	0,2544	0,38	0	-
Barra 25	Cloverdle 1	0,1093	0,2087	0	-
Cloverdle 2	Cloverdle 1	0	0,396	0	0,968
Cloverdle 1	Barra 29	0,2198	0,4153	0	-
Cloverdle 1	Barra 30	0,3202	0,6027	0	-
Barra 29	Barra 30	0,2399	0,4533	0	-
Reusens	Cloverdle 2	0,0636	0,2	0,0428	-
Roanoke 1	Cloverdle 2	0,0169	0,0599	0,013	-

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

A.1.3 Sistema teste do IEEE de 57 barras

A topologia desse sistema é representada pela Figura 4.3. Os dados de barras são representados pela Tabela A.5 e os dados de ramos pela Tabela A.6.

Tabela A.5 – Dados de barras do sistema IEEE de 57 barras.

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Kanawha	Referência	1,04	55	17	-	-	0
Turner	PV	1,01	3	88	0	-	0
Logan	PV	0,985	41	21	40	-	0
Sprigg 1	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 5	PQ	-	13	4	0	0	0
Beaver Ck	PV	0,98	75	2	0	-	0
Barra 7	PQ	-	0	0	0	0	0
Clinch Rv	PV	1,005	150	22	450	-	0
Saltville 1	PV	0,98	121	26	0	-	0
Barra 10	PQ	-	5	2	0	0	0
Tazewell 1	PQ	-	0	0	0	0	0
Glen Lyn	PV	1,015	377	24	310	-	0
Barra 13	PQ	-	18	2,3	0	0	0
Barra 14	PQ	-	10,5	5,3	0	0	0
Barra 15	PQ	-	22	5	0	0	0
Barra 16	PQ	-	43	3	0	0	0
Barra 17	PQ	-	42	8	0	0	0
Sprigg 2	PQ	-	27,2	9,8	0	0	0,1
Barra 19	PQ	-	3,3	0,6	0	0	0
Barra 20	PQ	-	2,3	1	0	0	0
Barra 21	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 22	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 23	PQ	-	6,3	2,1	0	0	0
Barra 24	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 25	PQ	-	6,3	3,2	0	0	0,059
Barra 26	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 27	PQ	-	9,3	0,5	0	0	0
Barra 28	PQ	-	4,6	2,3	0	0	0
Barra 29	PQ	-	17	2,6	0	0	0
Barra 30	PQ	-	3,6	1,8	0	0	0
Barra 31	PQ	-	5,8	2,9	0	0	0
Barra 32	PQ	-	1,6	0,8	0	0	0
Barra 33	PQ	-	3,8	1,9	0	0	0
Barra 34	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 35	PQ	-	6	3	0	0	0
Barra 36	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 37	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 38	PQ	-	14	7	0	0	0
Barra 39	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 40	PQ	-	0	0	0	0	0
Tazewell 2	PQ	-	6,3	3	0	0	0

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Barra 42	PQ	-	7,1	4,4	0	0	0
Tazewell 3	PQ	-	2	1	0	0	0
Barra 44	PQ	-	12	1,8	0	0	0
Barra 45	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 46	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 47	PQ	-	29,7	11,6	0	0	0
Barra 48	PQ	-	0	0	0	0	0
Barra 49	PQ	-	18	8,5	0	0	0
Barra 50	PQ	-	21	10,5	0	0	0
Barra 51	PQ	-	18	5,3	0	0	0
Barra 52	PQ	-	4,9	2,2	0	0	0
Barra 53	PQ	-	20	10	0	0	0,063
Barra 54	PQ	-	4,1	1,4	0	0	0
Saltville 2	PQ	-	6,8	3,4	0	0	0
Barra 56	PQ	-	7,6	2,2	0	0	0
Barra 57	PQ	-	6,7	2	0	0	0

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

Tabela A.6 – Dados de ramos do sistema IEEE 57 barras.

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Kanawha	Turner	0,0083	0,028	0,129	-
Turner	Logan	0,0298	0,085	0,0818	-
Logan	Sprigg 1	0,0112	0,0366	0,038	-
Sprigg 1	Barra 5	0,0625	0,132	0,0258	-
Sprigg 1	Beaver Ck	0,043	0,148	0,0348	-
Beaver Ck	Barra 7	0,02	0,102	0,0276	-
Beaver Ck	Clinch Rv	0,0339	0,173	0,047	-
Clinch Rv	Saltville 1	0,0099	0,0505	0,0548	-
Saltville 1	Barra 10	0,0369	0,1679	0,044	-
Saltville 1	Tazewell 1	0,0258	0,0848	0,0218	-
Saltville 1	Glen Lyn	0,0648	0,295	0,0772	-
Saltville 1	Barra 13	0,0481	0,158	0,0406	-
Barra 13	Barra 14	0,0132	0,0434	0,011	-
Barra 13	Barra 15	0,0269	0,0869	0,023	-
Kanawha	Barra 15	0,0178	0,091	0,0988	-
Kanawha	Barra 16	0,0454	0,206	0,0546	-
Kanawha	Barra 17	0,0238	0,108	0,0286	-
Logan	Barra 15	0,0162	0,053	0,0544	-
Sprigg 1	Sprigg 2	0	0,555	0	0,97
Sprigg 1	Sprigg 2	0	0,43	0	0,978
Barra 5	Beaver Ck	0,0302	0,0641	0,0124	-
Barra 7	Clinch Rv	0,0139	0,0712	0,0194	-

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Barra 10	Glen Lyn	0,0277	0,1262	0,0328	-
Tazewell 1	Barra 13	0,0223	0,0732	0,0188	-
Glen Lyn	Barra 13	0,0178	0,058	0,0604	-
Glen Lyn	Barra 16	0,018	0,0813	0,0216	-
Glen Lyn	Barra 17	0,0397	0,179	0,0476	-
Barra 14	Barra 15	0,0171	0,0547	0,0148	-
Sprigg 2	Barra 19	0,461	0,685	0	-
Barra 19	Barra 20	0,283	0,434	0	-
Barra 21	Barra 20	0	0,7767	0	1,043
Barra 21	Barra 22	0,0736	0,117	0	-
Barra 22	Barra 23	0,0099	0,0152	0	-
Barra 23	Barra 24	0,166	0,256	0,0084	-
Barra 24	Barra 25	0	1,182	0	1
Barra 24	Barra 25	0	1,23	0	1
Barra 24	Barra 26	0	0,0473	0	1,043
Barra 26	Barra 27	0,165	0,254	0	-
Barra 27	Barra 28	0,0618	0,0954	0	-
Barra 28	Barra 29	0,0418	0,0587	0	-
Barra 7	Barra 29	0	0,0648	0	0,967
Barra 25	Barra 30	0,135	0,202	0	-
Barra 30	Barra 31	0,326	0,497	0	-
Barra 31	Barra 32	0,507	0,755	0	-
Barra 32	Barra 33	0,0392	0,036	0	-
Barra 34	Barra 32	0	0,953	0	0,975
Barra 34	Barra 35	0,052	0,078	0,0032	-
Barra 35	Barra 36	0,043	0,0537	0,0016	-
Barra 36	Barra 37	0,029	0,0366	0	-
Barra 37	Barra 38	0,0651	0,1009	0,002	-
Barra 37	Barra 39	0,0239	0,0379	0	-
Barra 36	Barra 40	0,03	0,0466	0	-
Barra 22	Barra 38	0,0192	0,0295	0	-
Tazewell 1	Tazewell 2	0	0,749	0	0,955
Tazewell 2	Barra 42	0,207	0,352	0	-
Tazewell 2	Tazewell 3	0	0,412	0	-
Barra 38	Barra 44	0,0289	0,0585	0,002	-
Barra 15	Barra 45	0	0,1042	0	0,955
Barra 14	Barra 46	0	0,0735	0	0,9
Barra 46	Barra 47	0,023	0,068	0,0032	-
Barra 47	Barra 48	0,0182	0,0233	0	-
Barra 48	Barra 49	0,0834	0,129	0,0048	-
Barra 49	Barra 50	0,0801	0,128	0	-
Barra 50	Barra 51	0,1386	0,22	0	-
Barra 10	Barra 51	0	0,0712	0	0,93
Barra 13	Barra 49	0	0,191	0	0,895
Barra 29	Barra 52	0,1442	0,187	0	-
Barra 52	Barra 53	0,0762	0,0984	0	-

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Barra 53	Barra 54	0,1878	0,232	0	-
Barra 54	Saltville 2	0,1732	0,2265	0	-
Tazewell 1	Tazewell 3	0	0,153	0	0,958
Barra 44	Barra 45	0,0624	0,1242	0,004	-
Barra 40	Barra 56	0	1,195	0	0,958
Barra 56	Tazewell 2	0,553	0,549	0	-
Barra 56	Barra 42	0,2125	0,354	0	-
Barra 39	Barra 57	0	1,355	0	0,98
Barra 57	Barra 56	0,174	0,26	0	-
Barra 38	Barra 49	0,115	0,177	0,003	-
Barra 38	Barra 48	0,0312	0,0482	0	-

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

A.1.4 Sistema teste do IEEE de 118 barras

A topologia desse sistema é representada pela Figura 4.4. Os dados de barras são representados pela Tabela A.7 e os dados de ramos pela Tabela A.8.

Tabela A.7 – Dados de barras do sistema IEEE 118 barras.

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Riversde (V2)	PV	0,955	51	27	0	-	0
Pokagon (V2)	PQ	-	20	9	0	0	0
HickryCk (V2)	PQ	-	39	10	0	0	0
NwCarlsl (V2)	PV	0,998	30	12	-9	-	0
Olive (V2)	PQ	-	0	0	0	0	-0,4
Kankakee (V2)	PV	0,99	52	22	0	-	0
JacksnRd (V2)	PQ	-	19	2	0	0	0
Olive (V1)	PV	1,015	0	0	-28	-	0
Bequine (V1)	PQ	-	0	0	0	0	0
Breed (V1)	PV	1,05	0	0	450	-	0
SouthBnd (V2)	PQ	-	70	23	0	0	0
TwinBrch (V2)	PV	0,99	47	10	85	-	0
Concord (V2)	PQ	-	34	16	0	0	0
GoshenJt (V2)	PQ	-	14	1	0	0	0
FtWayne (V2)	PV	0,97	90	30	0	-	0
N. E. (V2)	PQ	-	25	10	0	0	0
Sorenson (V2)	PQ	-	11	3	0	0	0
McKinley (V2)	PV	0,973	60	34	0	-	0
Lincoln (V2)	PV	0,962	45	25	0	-	0
Adams (V2)	PQ	-	18	3	0	0	0

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Jay (V2)	PQ	-	14	8	0	0	0
Randolph (V2)	PQ	-	10	5	0	0	0
CollCmr (V2)	PQ	-	7	3	0	0	0
Trenton (V2)	PV	0,992	0	0	-13	-	0
TannrsCk (V2)	PV	1,05	0	0	220	-	0
TannrsCk (V1)	PV	1,015	0	0	314	-	0
Madison (V2)	PV	0,968	62	13	-9	-	0
Mullin (V2)	PQ	-	17	7	0	0	0
Grant (V2)	PQ	-	24	4	0	0	0
Sorenson (V1)	PQ	-	0	0	0	0	0
DeerCrk (V2)	PV	0,967	43	27	7	-	0
Delaware (V2)	PV	0,963	59	23	0	-	0
Haviland (V2)	PQ	-	23	9	0	0	0
Rockhill (V2)	PV	0,984	59	26	0	-	0,14
WestLima (V2)	PQ	-	33	9	0	0	0
Sterling (V2)	PV	0,98	31	17	0	-	0
EastLima (V2)	PQ	-	0	0	0	0	-0,25
EastLima (V1)	PQ	-	0	0	0	0	0
NwLibrty (V2)	PQ	-	27	11	0	0	0
West End (V2)	PV	0,97	20	23	-46	-	0
S.Tiffin (V2)	PQ	-	37	10	0	0	0
Howard (V2)	PV	0,985	37	23	-59	-	0
S.Kenton (V2)	PQ	-	18	7	0	0	0
WMVernon (V2)	PQ	-	16	8	0	0	0,1
N.Newark (V2)	PQ	-	53	22	0	0	0,1
W.Lancst (V2)	PV	1,005	28	10	19	-	0,1
Crooksvl (V2)	PQ	-	34	0	0	0	0
Zanesvll (V2)	PQ	-	20	11	0	0	0,15
Philo (V2)	PV	1,025	87	30	204	-	0
WCambrdg (V2)	PQ	-	17	4	0	0	0
Newcmrst (V2)	PQ	-	17	8	0	0	0
SCoshoct (V2)	PQ	-	18	5	0	0	0
Wooster (V2)	PQ	-	23	11	0	0	0
Torrey (V2)	PV	0,955	113	32	48	-	0
Wagenhls (V2)	PV	0,952	63	22	0	-	0
Sunnysde (V2)	PV	0,954	84	18	0	-	0
WNwPhil1 (V2)	PQ	-	12	3	0	0	0
WNwPhil2 (V2)	PQ	-	12	3	0	0	0
Tidd (V2)	PV	0,985	277	113	155	-	0
SWKammer (V2)	PQ	-	78	3	0	0	0
W.Kammer (V2)	PV	0,995	0	0	160	-	0
Natrium (V2)	PV	0,998	77	14	0	-	0
Tidd (V1)	PQ	-	0	0	0	0	0

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Kammer (V1)	PQ	-	0	0	0	0	0
Muskngum (V1)	PV	1,005	0	0	391	-	0
Muskngum (V2)	PV	1,05	39	18	392	-	0
Summerfl (V2)	PQ	-	28	7	0	0	0
Sporn (V1)	PQ	-	0	0	0	0	0
Sporn (V2)	Referência	1,035	0	0	-	-	0
Portsmth (V2)	PV	0,984	66	20	0	-	0
NPortsmt (V2)	PQ	-	0	0	0	0	0
Hillsbro (V2)	PV	0,98	0	0	-12	-	0
Sargents (V2)	PV	0,991	0	0	-6	-	0
Bellefnt (V2)	PV	0,958	68	27	0	-	0,12
SthPoint (V2)	PQ	-	47	11	0	0	0
Darrah (V2)	PV	0,943	68	36	0	-	0
Turner (V2)	PV	1,006	61	28	0	-	0
Chemical (V2)	PQ	-	71	26	0	0	0
CapitlHl (V2)	PQ	-	39	32	0	0	0,2
CabinCrk (V2)	PV	1,04	130	26	477	-	0
Kanawha (V1)	PQ	-	0	0	0	0	0
Logan (V2)	PQ	-	54	27	0	0	0,2
Sprigg (V2)	PQ	-	20	10	0	0	0,1
BetsyLne (V2)	PQ	-	11	7	0	0	0
BeaverCk (V2)	PV	0,985	24	15	0	-	0
Hazard (V2)	PQ	-	21	10	0	0	0
Pineville (V3)	PV	1,015	0	0	4	-	0
Fremont (V2)	PQ	-	48	10	0	0	0
ClinchRv (V2)	PV	1,005	0	0	607	-	0
Holston (V2)	PV	0,985	78	42	-85	-	0
HolstonT (V2)	PV	0,98	0	0	-10	-	0
Saltvll (V2)	PV	0,99	65	10	0	-	0
Tazewell (V2)	PQ	-	12	7	0	0	0
Switchbk (V2)	PQ	-	30	16	0	0	0
Caldwell (V2)	PQ	-	42	31	0	0	0
Baileysv (V2)	PQ	-	38	15	0	0	0
Sundial (V2)	PQ	-	15	9	0	0	0
Bradley (V2)	PQ	-	34	8	0	0	0
Hinton (V2)	PV	1,01	0	0	-42	-	0
Glen Lyn (V2)	PV	1,017	37	18	252	-	0
Wythe (V2)	PQ	-	22	15	0	0	0
Smythe (V2)	PQ	-	5	3	0	0	0
Claytor (V2)	PV	1,01	23	16	40	-	0
Hancock (V2)	PV	0,971	38	25	0	-	0
Roanoke (V2)	PV	0,965	31	26	0	-	0,2
Cloverdl (V2)	PQ	-	43	16	0	0	0
Reusens (V2)	PV	0,952	28	12	-22	-	0,06

Nome	Tipo	Tensão desejada	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (Mvar)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (Mvar)	B shunt
Blaine (V2)	PQ	-	2	1	0	0	0
Franklin (V2)	PQ	-	8	3	0	0	0
Fieldale (V2)	PV	0,973	39	30	0	-	0,06
DanRiver (V2)	PV	0,98	0	0	36	-	0
Danville (V2)	PV	0,975	25	13	-43	-	0
Deer Crk (V2)	PV	0,993	0	0	-6	-	0
WMedford (V2)	PQ	-	8	3	0	0	0
Medford (V2)	PQ	-	22	7	0	0	0
KygerCrk (V2)	PV	1,005	0	0	-184	-	0
Corey (V2)	PQ	-	20	8	0	0	0
WHuntngd (V2)	PQ	-	33	15	0	0	0

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

Tabela A.8 – Dados de ramos do sistema IEEE 118 barras.

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Riversde (V2)	Pokagon (V2)	0,0303	0,0999	0,0254	-
Riversde (V2)	HickryCk (V2)	0,0129	0,0424	0,01082	-
NwCarlsl (V2)	Olive (V2)	0,00176	0,00798	0,0021	-
HickryCk (V2)	Olive (V2)	0,0241	0,108	0,0284	-
Olive (V2)	Kankakee (V2)	0,0119	0,054	0,01426	-
Kankakee (V2)	JacksnRd (V2)	0,00459	0,0208	0,0055	-
Olive (V1)	Bequine (V1)	0,00244	0,0305	1,162	-
Olive (V1)	Olive (V2)	0	0,0267	0	0,985
Bequine (V1)	Breed (V1)	0,00258	0,0322	1,23	-
NwCarlsl (V2)	SouthBnd (V2)	0,0209	0,0688	0,01748	-
Olive (V2)	SouthBnd (V2)	0,0203	0,0682	0,01738	-
SouthBnd (V2)	TwinBrch (V2)	0,00595	0,0196	0,00502	-
Pokagon (V2)	TwinBrch (V2)	0,0187	0,0616	0,01572	-
HickryCk (V2)	TwinBrch (V2)	0,0484	0,16	0,0406	-
JacksnRd (V2)	TwinBrch (V2)	0,00862	0,034	0,00874	-
SouthBnd (V2)	Concord (V2)	0,02225	0,0731	0,01876	-
TwinBrch (V2)	GoshenJt (V2)	0,0215	0,0707	0,01816	-
Concord (V2)	FtWayne (V2)	0,0744	0,2444	0,06268	-
GoshenJt (V2)	FtWayne (V2)	0,0595	0,195	0,0502	-
TwinBrch (V2)	N. E. (V2)	0,0212	0,0834	0,0214	-
FtWayne (V2)	Sorenson (V2)	0,0132	0,0437	0,0444	-
N. E. (V2)	Sorenson (V2)	0,0454	0,1801	0,0466	-
Sorenson (V2)	McKinley (V2)	0,0123	0,0505	0,01298	-
McKinley (V2)	Lincoln (V2)	0,01119	0,0493	0,01142	-
Lincoln (V2)	Adams (V2)	0,0252	0,117	0,0298	-
FtWayne (V2)	Lincoln (V2)	0,012	0,0394	0,0101	-
Adams (V2)	Jay (V2)	0,0183	0,0849	0,0216	-
Jay (V2)	Randolph (V2)	0,0209	0,097	0,0246	-

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Randolph (V2)	CollCnr (V2)	0,0342	0,159	0,0404	-
CollCnr (V2)	Trenton (V2)	0,0135	0,0492	0,0498	-
CollCnr (V2)	TannrsCk (V2)	0,0156	0,08	0,0864	-
TannrsCk (V1)	TannrsCk (V2)	0	0,0382	0	0,96
TannrsCk (V2)	Madison (V2)	0,0318	0,163	0,1764	-
Madison (V2)	Mullin (V2)	0,01913	0,0855	0,0216	-
Mullin (V2)	Grant (V2)	0,0237	0,0943	0,0238	-
Sorenson (V1)	Sorenson (V2)	0	0,0388	0	0,96
Olive (V1)	Sorenson (V1)	0,00431	0,0504	0,514	-
TannrsCk (V1)	Sorenson (V1)	0,00799	0,086	0,908	-
Sorenson (V2)	DeerCrk (V2)	0,0474	0,1563	0,0399	-
Grant (V2)	DeerCrk (V2)	0,0108	0,0331	0,0083	-
CollCnr (V2)	Delaware (V2)	0,0317	0,1153	0,1173	-
DeerCrk (V2)	Delaware (V2)	0,0298	0,0985	0,0251	-
Madison (V2)	Delaware (V2)	0,0229	0,0755	0,01926	-
FtWayne (V2)	Haviland (V2)	0,038	0,1244	0,03194	-
Lincoln (V2)	Rockhill (V2)	0,0752	0,247	0,0632	-
WestLima (V2)	Sterling (V2)	0,00224	0,0102	0,00268	-
WestLima (V2)	EastLima (V2)	0,011	0,0497	0,01318	-
Haviland (V2)	EastLima (V2)	0,0415	0,142	0,0366	-
Rockhill (V2)	Sterling (V2)	0,00871	0,0268	0,00568	-
Rockhill (V2)	EastLima (V2)	0,00256	0,0094	0,00984	-
EastLima (V1)	EastLima (V2)	0	0,0375	0	0,935
EastLima (V2)	NwLibrty (V2)	0,0321	0,106	0,027	-
EastLima (V2)	West End (V2)	0,0593	0,168	0,042	-
Sorenson (V1)	EastLima (V1)	0,00464	0,054	0,422	-
NwLibrty (V2)	West End (V2)	0,0184	0,0605	0,01552	-
West End (V2)	S.Tiffin (V2)	0,0145	0,0487	0,01222	-
West End (V2)	Howard (V2)	0,0555	0,183	0,0466	-
S.Tiffin (V2)	Howard (V2)	0,041	0,135	0,0344	-
S.Kenton (V2)	WMVernon (V2)	0,0608	0,2454	0,06068	-
Rockhill (V2)	S.Kenton (V2)	0,0413	0,1681	0,04226	-
WMVernon (V2)	N.Newark (V2)	0,0224	0,0901	0,0224	-
N.Newark (V2)	W.Lancst (V2)	0,04	0,1356	0,0332	-
W.Lancst (V2)	Crooksvl (V2)	0,038	0,127	0,0316	-
W.Lancst (V2)	Zanesvll (V2)	0,0601	0,189	0,0472	-
Crooksvl (V2)	Philo (V2)	0,0191	0,0625	0,01604	-
Howard (V2)	Philo (V2)	0,0715	0,323	0,086	-
Howard (V2)	Philo (V2)	0,0715	0,323	0,086	-
N.Newark (V2)	Philo (V2)	0,0684	0,186	0,0444	-
Zanesvll (V2)	Philo (V2)	0,0179	0,0505	0,01258	-
Philo (V2)	WCambrdg (V2)	0,0267	0,0752	0,01874	-
Philo (V2)	Newcmrst (V2)	0,0486	0,137	0,0342	-
Newcmrst (V2)	SCoshoct (V2)	0,0203	0,0588	0,01396	-
SCoshoct (V2)	Wooster (V2)	0,0405	0,1635	0,04058	-
Wooster (V2)	Torrey (V2)	0,0263	0,122	0,031	-

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Philo (V2)	Torrey (V2)	0,073	0,289	0,0738	-
Philo (V2)	Torrey (V2)	0,0869	0,291	0,073	-
Torrey (V2)	Wagenhls (V2)	0,0169	0,0707	0,0202	-
Torrey (V2)	Sunnysde (V2)	0,00275	0,00955	0,00732	-
Wagenhls (V2)	Sunnysde (V2)	0,00488	0,0151	0,00374	-
Sunnysde (V2)	WNwPhil1 (V2)	0,0343	0,0966	0,0242	-
WCambdrg (V2)	WNwPhil1 (V2)	0,0474	0,134	0,0332	-
Sunnysde (V2)	WNwPhil2 (V2)	0,0343	0,0966	0,0242	-
Newcmrst (V2)	WNwPhil2 (V2)	0,0255	0,0719	0,01788	-
Torrey (V2)	Tidd (V2)	0,0503	0,2293	0,0598	-
Sunnysde (V2)	Tidd (V2)	0,0825	0,251	0,0569	-
Sunnysde (V2)	Tidd (V2)	0,0803	0,239	0,0536	-
Wagenhls (V2)	Tidd (V2)	0,04739	0,2158	0,05646	-
Tidd (V2)	SWKammer (V2)	0,0317	0,145	0,0376	-
Tidd (V2)	W.Kammer (V2)	0,0328	0,15	0,0388	-
SWKammer (V2)	W.Kammer (V2)	0,00264	0,0135	0,01456	-
SWKammer (V2)	Natrium (V2)	0,0123	0,0561	0,01468	-
W.Kammer (V2)	Natrium (V2)	0,00824	0,0376	0,0098	-
Tidd (V1)	Tidd (V2)	0	0,0386	0	0,96
Tidd (V1)	Kammer (V1)	0,00172	0,02	0,216	-
Kammer (V1)	W.Kammer (V2)	0	0,0268	0	0,985
EastLima (V1)	Muskngum (V1)	0,00901	0,0986	1,046	-
Kammer (V1)	Muskngum (V1)	0,00269	0,0302	0,38	-
Philo (V2)	Muskngum (V2)	0,018	0,0919	0,0248	-
Philo (V2)	Muskngum (V2)	0,018	0,0919	0,0248	-
Natrium (V2)	Muskngum (V2)	0,0482	0,218	0,0578	-
Natrium (V2)	Summerfl (V2)	0,0258	0,117	0,031	-
Muskngum (V1)	Muskngum (V2)	0	0,037	0	0,935
Muskngum (V2)	Summerfl (V2)	0,0224	0,1015	0,02682	-
Muskngum (V1)	Sporn (V1)	0,00138	0,016	0,638	-
Crooksv1 (V2)	Sporn (V2)	0,0844	0,2778	0,07092	-
Philo (V2)	Sporn (V2)	0,0985	0,324	0,0828	-
Sporn (V1)	Sporn (V2)	0	0,037	0	0,935
Sporn (V2)	Portsmth (V2)	0,03	0,127	0,122	-
Trenton (V2)	Portsmth (V2)	0,00221	0,4115	0,10198	-
Portsmth (V2)	NPortsmt (V2)	0,00882	0,0355	0,00878	-
Trenton (V2)	Hillsbro (V2)	0,0488	0,196	0,0488	-
NPortsmt (V2)	Hillsbro (V2)	0,0446	0,18	0,04444	-
NPortsmt (V2)	Sargents (V2)	0,00866	0,0454	0,01178	-
Portsmth (V2)	Bellefnt (V2)	0,0401	0,1323	0,03368	-
Portsmth (V2)	SthPoint (V2)	0,0428	0,141	0,036	-
Sporn (V2)	SthPoint (V2)	0,0405	0,122	0,124	-
Bellefnt (V2)	SthPoint (V2)	0,0123	0,0406	0,01034	-
Darrah (V2)	Turner (V2)	0,0444	0,148	0,0368	-
Sporn (V2)	Turner (V2)	0,0309	0,101	0,1038	-
SthPoint (V2)	Turner (V2)	0,0601	0,1999	0,04978	-

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Turner (V2)	Chemical (V2)	0,00376	0,0124	0,01264	-
Chemical (V2)	CapitlHl (V2)	0,00546	0,0244	0,00648	-
Turner (V2)	CabinCrk (V2)	0,017	0,0485	0,0472	-
Turner (V2)	CabinCrk (V2)	0,0294	0,105	0,0228	-
CapitlHl (V2)	CabinCrk (V2)	0,0156	0,0704	0,0187	-
Sporn (V1)	Kanawha (V1)	0,00175	0,0202	0,808	-
Kanawha (V1)	CabinCrk (V2)	0	0,037	0	0,935
Turner (V2)	Logan (V2)	0,0298	0,0853	0,08174	-
Logan (V2)	Sprigg (V2)	0,0112	0,03665	0,03796	-
Sprigg (V2)	BetsyLne (V2)	0,0625	0,132	0,0258	-
Sprigg (V2)	BeaverCk (V2)	0,043	0,148	0,0348	-
BetsyLne (V2)	BeaverCk (V2)	0,0302	0,0641	0,01234	-
BeaverCk (V2)	Hazard (V2)	0,035	0,123	0,0276	-
Hazard (V2)	Pineville (V3)	0,02828	0,2074	0,0445	-
BeaverCk (V2)	Fremont (V2)	0,02	0,102	0,0276	-
BeaverCk (V2)	ClinchRv (V2)	0,0239	0,173	0,047	-
Fremont (V2)	ClinchRv (V2)	0,0139	0,0712	0,01934	-
ClinchRv (V2)	Holston (V2)	0,0518	0,188	0,0528	-
ClinchRv (V2)	Holston (V2)	0,0238	0,0997	0,106	-
Holston (V2)	HolstonT (V2)	0,0254	0,0836	0,0214	-
ClinchRv (V2)	Saltville (V2)	0,0099	0,0505	0,0548	-
ClinchRv (V2)	Saltville (V2)	0,0393	0,1581	0,0414	-
HolstonT (V2)	Saltville (V2)	0,0387	0,1272	0,03268	-
Saltville (V2)	Tazewell (V2)	0,0258	0,0848	0,0218	-
Saltville (V2)	Switchbk (V2)	0,0481	0,158	0,0406	-
Tazewell (V2)	Switchbk (V2)	0,0223	0,0732	0,01876	-
Switchbk (V2)	Caldwell (V2)	0,0132	0,0434	0,0111	-
CabinCrk (V2)	Baileysv (V2)	0,0356	0,182	0,0494	-
Logan (V2)	Baileysv (V2)	0,0162	0,053	0,0544	-
Switchbk (V2)	Baileysv (V2)	0,0269	0,0869	0,023	-
CabinCrk (V2)	Sundial (V2)	0,0183	0,0934	0,0254	-
CabinCrk (V2)	Bradley (V2)	0,0238	0,108	0,0286	-
CabinCrk (V2)	Hinton (V2)	0,0454	0,206	0,0546	-
Saltville (V2)	Glen Lyn (V2)	0,0648	0,295	0,0472	-
Switchbk (V2)	Glen Lyn (V2)	0,0178	0,058	0,0604	-
Caldwell (V2)	Baileysv (V2)	0,0171	0,0547	0,01474	-
Baileysv (V2)	Sundial (V2)	0,0173	0,0885	0,024	-
Bradley (V2)	Glen Lyn (V2)	0,0397	0,179	0,0476	-
Hinton (V2)	Glen Lyn (V2)	0,018	0,0813	0,0216	-
Glen Lyn (V2)	Wythe (V2)	0,0277	0,1262	0,0328	-
Saltville (V2)	Smythe (V2)	0,0123	0,0559	0,01464	-
Wythe (V2)	Smythe (V2)	0,0246	0,112	0,0294	-
Glen Lyn (V2)	Claytor (V2)	0,016	0,0525	0,0536	-
Glen Lyn (V2)	Hancock (V2)	0,0451	0,204	0,0541	-
Claytor (V2)	Hancock (V2)	0,0466	0,1584	0,0407	-
Claytor (V2)	Roanoke (V2)	0,0535	0,1625	0,0408	-

De	Para	r (p.u.)	x_l (p.u.)	b^d (p.u.)	Tap
Glen Lyn (V2)	Cloverdl (V2)	0,0605	0,229	0,062	-
Hancock (V2)	Roanoke (V2)	0,00994	0,0378	0,00986	-
Roanoke (V2)	Cloverdl (V2)	0,014	0,0547	0,01434	-
Roanoke (V2)	Reusens (V2)	0,053	0,183	0,0472	-
Roanoke (V2)	Blaine (V2)	0,0261	0,0703	0,01844	-
Cloverdl (V2)	Reusens (V2)	0,053	0,183	0,0472	-
Blaine (V2)	Franklin (V2)	0,0105	0,0288	0,0076	-
Claytor (V2)	Fieldale (V2)	0,03906	0,1813	0,0461	-
Franklin (V2)	Fieldale (V2)	0,0278	0,0762	0,0202	-
Fieldale (V2)	DanRiver (V2)	0,022	0,0755	0,02	-
Fieldale (V2)	Danville (V2)	0,0247	0,064	0,062	-
Sorenson (V2)	Deer Crk (V2)	0,00913	0,0301	0,00768	-
Delaware (V2)	Deer Crk (V2)	0,0615	0,203	0,0518	-
Delaware (V2)	WMedford (V2)	0,0135	0,0612	0,01628	-
Madison (V2)	Medford (V2)	0,0164	0,0741	0,01972	-
WMedford (V2)	Medford (V2)	0,0023	0,0104	0,00276	-
Sporn (V1)	KygerCrk (V2)	0,00034	0,00405	0,164	-
TwinBrch (V2)	Corey (V2)	0,0329	0,14	0,0358	-
SthPoint (V2)	WHuntngd (V2)	0,0145	0,0481	0,01198	-
Darrah (V2)	WHuntngd (V2)	0,0164	0,0544	0,01356	-

Fonte: Adaptado de CHRISTIE, R. D [99].

A.2 Curto-circuito

Para os estudos de faltas utilizou-se o sistema teste do IEEE de 14 barras, cujos dados de barras e ramos para o estudo de fluxo de carga, assim como as impedâncias de sequência positiva do equivalente π das linhas são apresentados na Tabela A.1 e Tabela A.2.

As impedâncias de sequência negativa da rede de transmissão e de cargas estáticas são geralmente idênticas às impedâncias de sequência positiva [8] e, portanto possuem os mesmos valores daqueles apresentados na Tabela A.2.

Nas linhas de transmissão, as correntes de sequência zero estão em fase, percorrendo através dos seus cabos e retornando através do neutro aterrado. Como resultado, as impedâncias de sequência zero das linhas são diferentes das demais sequências, geralmente maiores [8]. Para a análise desse caso será utilizada a seguinte aproximação:

$$\bar{z}_0 = 2,5\bar{z}_1 \quad (\text{A.1})$$

Em que:

\bar{z}_0 Impedância de sequência zero;

\bar{z}_1 Impedância de sequência positiva.

A partir da equação (A.1) e os dados da Tabela A.2, calculou-se a seguinte tabela complementar aos dados de falta da rede de transmissão.

Tabela A.9 – Dados de falta dos ramos do sistema de 14 barras

De	Para	r_0 (p.u.)	x_{l0} (p.u.)	b_0^d (p.u.)	Tap	Defasagem	Conexão
Barra 1	Barra 2	0,04845	0,14793	0,0528	-	-	-
Barra 1	Barra 5	0,13508	0,5576	0,0492	-	-	-
Barra 2	Barra 3	0,11748	0,49493	0,0438	-	-	-
Barra 2	Barra 4	0,14528	0,4408	0,034	-	-	-
Barra 2	Barra 5	0,14238	0,4347	0,0346	-	-	-
Barra 3	Barra 4	0,16753	0,42758	0,0128	-	-	-
Barra 4	Barra 5	0,03338	0,10528	0	-	-	-
Barra 4	Barra 7	0	0,20912	0	0,978	-30°	$\Delta - Y_{aterrado}$
Barra 4	Barra 9	0	0,55618	0	0,969	-30°	$\Delta - Y_{aterrado}$
Barra 5	Barra 6	0	0,25202	0	0,932	-30°	$\Delta - Y_{aterrado}$
Barra 6	Barra 11	0,23745	0,49725	0	-	-	-
Barra 6	Barra 12	0,30728	0,63953	0	-	-	-
Barra 6	Barra 13	0,16538	0,32568	0	-	-	-
Barra 7	Barra 8	0	0,17615	0	-	-	-
Barra 7	Barra 9	0	0,27503	0	-	-	-
Barra 9	Barra 10	0,07953	0,21125	0	-	-	-
Barra 9	Barra 14	0,31778	0,67595	0	-	-	-
Barra 10	Barra 11	0,20513	0,48018	0	-	-	-
Barra 12	Barra 13	0,5523	0,4997	0	-	-	-
Barra 13	Barra 14	0,42733	0,87005	0	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Para as impedâncias de sequência positiva das máquinas síncronas foram utilizadas as resistências de armadura (r_a) e reatâncias subtransitórias de eixo direto (x_d''), presentes em [1].

Se correntes de sequência zero são aplicadas no estator de uma máquina síncrona, não haverá campo girante, somente um campo pulsante estacionário. O campo pulsante irá se opor às correntes induzidas no rotor e um fluxo de entreferro muito pequeno será gerado. Portanto a reatância de sequência zero é muito pequena e depende do espaçamento dos enrolamentos, variando de 0,15 a 0,6 vezes o valor de x_d'' . Para as simulações da seção 4.3 utilizou-se o valor de $0,4x_d''$.

A Tabela A.10 mostra os parâmetros utilizados nos cálculos de curto-circuito, utilizando os dados das máquinas síncronas extraídos de [1] e as considerações das impedâncias de sequência negativa e zero apresentadas.

Tabela A.10 – Dados de falta das máquinas síncronas do sistema de 14 barras (na base de potência da máquina).

Máquina síncrona	Barra	S_n (MVA)	$r_1 = r_2 = r_a$	$x_1 = x_d'' = x_2$	x_0
Gerador 1	Barra 1	615	0	0,23	0,092
Gerador 2	Barra 2	60	0,0031	0,13	0,052
Comp. Síncrono 1	Barra 3	60	0,0031	0,13	0,052
Comp. Síncrono 2	Barra 6	25	0,0041	0,12	0,048
Comp. Síncrono 3	Barra 8	25	0,0041	0,12	0,048

Fonte: Autoria própria.

A.3 Estabilidade

Assim como no curto-circuito, utilizou-se o sistema teste do IEEE de 14 barras para os estudos de estabilidade. Os dados da rede são os mesmos do fluxo de carga, representados pela Tabela A.1 e pela Tabela A.2.

A Tabela A.11 apresenta dos dados das máquinas síncronas:

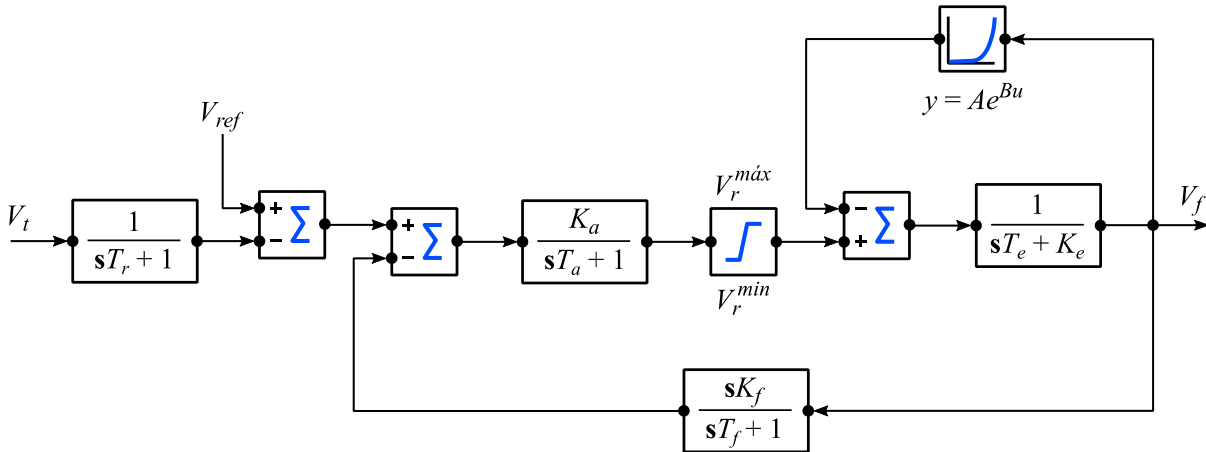
Tabela A.11 – Dados das máquinas síncronas do sistema de 14 barras (na base de potência da máquina).

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2	Compensador Síncrono 1	Compensador Síncrono 2	Compensador Síncrono 3
Barra	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 6	Barra 8
H (s)	5,148	6,54	6,54	5,06	5,06
S_n (MVA)	615	60	60	25	25
$x_p = x_l$ (p.u.)	0,2396	0	0	0,134	0,134
r_a (p.u.)	0	0,0031	0,0031	0,0041	0,0041
x_d (p.u.)	0,8979	1,05	1,05	1,25	1,25
x_d' (p.u.)	0,2995	0,185	0,185	0,232	0,232
x_d'' (p.u.)	0,23	0,13	0,13	0,12	0,12
T_{d0}' (s)	7,4	6,1	6,1	4,75	4,75
T_{d0}'' (s)	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06
x_q (p.u.)	0,646	0,98	0,98	1,22	1,22
x_q' (p.u.)	0,646	0,36	0,36	0,715	0,715
x_q'' (p.u.)	0,4	0,13	0,13	0,12	0,12
T_{q0}' (s)	0	0,3	0,3	1,5	1,5
T_{q0}'' (s)	0,033	0,099	0,099	0,21	0,21

Fonte: MILANO, F. [1].

Os modelo de AVR utilizado é baseado no regulador DC1C [100], representado pela Figura A.1. Os parâmetros são apresentados na Tabela A.12.

Figura A.1 – Modelo de AVR utilizado nas simulações.



Fonte: Autoria própria.

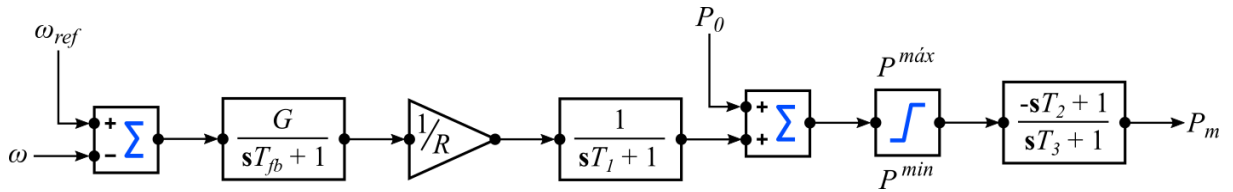
Tabela A.12 – Dados dos AVRs do sistema de 14 barras.

Parâmetro	AVR 1	AVR 2	AVR 3	AVR 4	AVR 5
Máquina síncrona	Gerador 1	Gerador 2	Compensador síncrono 1	Compensador síncrono 2	Compensador síncrono 3
V_r^{max}	9,99	2,05	2,05	2,05	2,05
V_r^{min}	0	0	0	0	0
K_a	200	20	20	20	20
T_a	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
K_f	0,0012	0,001	0,001	0,001	0,001
T_f	1	1	1	1	1
K_e	1	1	1	1	1
T_e	0,19	1,98	1,98	0,7	0,7
T_r	0	0	0	0	0
A	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
B	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Fonte: Adaptado de MILANO, F. [1].

O modelo de regulador de velocidade e turbina utilizado nos geradores conectados nos barramentos 1 e 2 está presente no programa TRANSUFU [49]. Esse sistema de controle, apresentado na Figura A.2, permite a representação de turbinas hidráulicas e térmicas. Os parâmetros utilizados nos estudos desse trabalho são apresentados na Tabela A.13.

Figura A.2 – Modelo de regulador de velocidade e turbina utilizado nas simulações.



Fonte: Adaptado de GUIMARÃES, G. C. [49].

Tabela A.13 – Dados dos reguladores de velocidade do sistema de 14 barras.

Máquina síncrona	Tipo	G	R	T_{fb}	T_1	T_2	T_3	$P_{m\acute{a}x}$	$P_{m\acute{i}n}$
Gerador 1	Hidráulica	1,0	0,02	0,2	0,3	0,15	0,2	6,0	0,0
Gerador 2	Térmica	1,0	0,02	0,2	0,3	0,0	0,2	6,0	0,0

Fonte: Autoria própria.

B ARQUIVOS DO ANATEM

A simulação realizada no Anatem tem por finalidade avaliar a correta implementação dos estudos de estabilidade no PSP-UFU em que se utilizou o sistema teste de 14 barras descrito no Apêndice A.

B.1 Arquivo principal

No arquivo principal estão presentes a associação com os arquivos auxiliares, como relatórios, resultado do fluxo de carga e da rede gerados pelo Anarede e arquivos de saída de dados de impressão; dados das máquinas síncronas; dados dos reguladores de tensão e saturação da excitatriz; associação das máquinas e seus controles; parametrização das perturbações; variáveis de saída e parâmetros da simulação.

```
(=====
( TITULO DO CASO
(=====
TITU
Sistema teste IEEE 14 barras
(=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO PARA SAIDA DE RELATORIOS ( opção FILE )
(=====
ULOG
4
14BARRAS_Anatem.out
(=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM FLUXO DE POTENCIA ( Anarede )
(=====
ULOG
2
14BARRAS_Anatem.his
(=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO COM DADOS PARA PLOTAGEM
(=====
ULOG
8
14BARRAS_Anatem.plt
ULOG
```

9

14BARRAS_Anatem.log

```
(=====
( DADOS DE OPCOES DEFAULT DE EXECUCAO
```

```
(=====
DOPC IMPR CONT
```

```
(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E
```

```
IMPR L FILE L CONT L 80CO L
```

999999

```
(=====
( RESTABELECIMENTO DO CASO DE FLUXO DE POTENCIA
```

```
(=====
ARQV REST
```

01

```
(=====
( ASSOCIACAO DE ARQUIVO DE MODELOS
```

```
(=====
ACDE
```

14BARRAS.CDU

999999

```
(=====
( MODELOS DE GERADOR
```

```
(=====
DMDG MD02
```

(Máquina da barra 1

```
(No) (CS) (Ld )(Lq )(L'd) (L'd)(Ll )(T'd) (T'd)(T"q)
```

```
101 89.79 64.629.95 23.023.96 7.4 0.030.033
```

```
(No) (Ra )( H )( D )(MVA)Fr C
```

```
101 5.148 615.0
```

999999

DMDG MD03

(Máquina da barra 2

```
(No) (CS) (Ld )(Lq )(L'd)(L'q)(L'd)(Ll )(T'd)(T'q)(T"q)(T"q)
```

```
102 105.0 98.0 18.5 36.0 13.0 14.8 6.10 0.3 0.040.099
```

```
(No) (Ra )( H )( D )(MVA)Fr C
```

```
102 0.31 6.54 60.0
```

(Máquina da barra 3

```
(No) (CS) (Ld )(Lq )(L'd)(L'q)(L'd)(Ll )(T'd)(T'q)(T"q)(T"q)
```

```
103 105.0 98.0 18.5 36.0 13.0 14.8 6.10 0.3 0.040.099
```

```
(No) (Ra )( H )( D )(MVA)Fr C
```

```
103 0.31 6.54 60.0
```

(Máquina da barra 6

```
(No) (CS) (Ld )(Lq )(L'd)(L'q)(L'd)(Ll )(T'd)(T'q)(T"q)(T"q)
```

```
106 125.0122.0 23.2 71.5 12.018.56 4.75 1.5 0.06 0.21
```

```
(No) (Ra )( H )( D )(MVA)Fr C
```

```
106 0.41 5.06 25.0
```

(Máquina da barra 8

```
(No) (CS) (Ld )(Lq )(L'd)(L'q)(L'd)(Ll )(T'd)(T'q)(T"q)(T"q)
```

108 125.0122.0 23.2 71.5 12.018.56 4.75 1.5 0.06 0.21

(No) (Ra)(H)(D)(MVA)Fr C

108 0.41 5.06 25.0

999999

(=====

(MODELOS DE REGULADORES DE TENSAO

(=====

DRGT MD01

(Regulador de tensão 1

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Tm)(Ta)(Te)(Tf)(Lmn)(Lmx)LS

201 2 200. 1.00.0012 0.0 0.02 0.19 1.00 0.00 9.99EI

(Regulador de tensão 2

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Tm)(Ta)(Te)(Tf)(Lmn)(Lmx)LS

202 2 20. 1.000.001 0.0 0.02 1.98 1.00 0.00 2.05EI

(Regulador de tensão 3

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Tm)(Ta)(Te)(Tf)(Lmn)(Lmx)LS

203 2 20. 1.000.001 0.0 0.02 1.98 1.00 0.00 2.05EI

(Regulador de tensão 4

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Tm)(Ta)(Te)(Tf)(Lmn)(Lmx)LS

204 2 20. 1.000.001 0.0 0.02 0.70 1.00 0.00 2.05EI

(Regulador de tensão 5

(No) (CS) (Ka)(Ke)(Kf)(Tm)(Ta)(Te)(Tf)(Lmn)(Lmx)LS

205 2 20. 1.000.001 0.0 0.02 0.70 1.00 0.00 2.05EI

999999

(=====

(CURVAS DE SATURACAO

(=====

DCST

(No) 0 T (Y1) (Y2) (X1)

(Saturação da excitatriz

2 2 0.0006 0.9 0.0

999999

(=====

(DADOS DE MAQUINAS E ASSOCIACAO DAS MAQUINAS AOS CONTROLES

(=====

DMAQ

(Nb) Gr (P) (Q) Und (Mg) (Mt)u(Mv)u(Me)u(Xvd)(Nbc)

1 10 1 101 201 302u

2 10 1 102 202 303u

3 10 1 103 203

6 10 1 106 204

8 10 1 108 205

999999

(=====

(DADOS DAS VARIAVEIS DE SAIDA

(=====

DPLT

(Tipo)M(E1) (Pa) Nc Gp (Br) Gr (Ex) (B1) P

VOLT	1		Tensão na barra do gerador 1
PTERM	1	10	Potência ativa do gerador 1
PMEC	1	10	Potência mecânica do gerador 1
EFD	1	10	Tensão de campo do gerador 1
VOLT	2		Tensao na barra do gerador 2
PTERM	2	10	Potência ativa do gerador 2
PMEC	2	10	Potência mecânica do gerador 2
EFD	2	10	Tensão de campo do gerador 2
FMAQ	1	10	Frequencia na barra do gerador 1
FMAQ	2	10	Frequencia na barra do gerador 2
QELE	1	10	Potência reativa do gerador 1
QELE	2	10	Potência reativa do gerador 2
PCAR	3		Potência ativa da carga da barra 3
QCAR	3		Potência reativa da carga da barra 3

999999

(=====

(DADOS DE EVENTOS

(=====

DEVT

(Curto-circuito na barra terminal do gerador 1

(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)

(APCB 1.00 13

(RMCB 1.15 13

(

(Remoção da carga na barra 3

(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)

(MDLP 1.00 3 -100

(MDLQ 1.00 3 -100

(

(Remoção do gerador 2

(Tp) (Tempo)(E1)(Pa)Nc(Ex) (%) (ABS) Gr Und (B1)P (Rc) (Xc) (Bc) (Defas)

(RMGR 1.00 2 10 1

999999

(=====

(DADOS DE SIMULACAO

(=====

DSIM

(Tmax) (Stp) (P) (I)

15.00 .001 10

(=====

(INICIALIZACAO DE VARIAVEIS SEM SIMULACAO

(=====

EXSI INIC

(=====

(RELATORIOS

(=====

RELA RBAR RLIN RGER ROPG

(=====


```
( EXECUCAO DA SIMULACAO
(=====
EXSI ECHO
(=====
( FIM DA SIMULACAO
(=====
FIM
```

B.2 Controle definido pelo usuário (CDU)

No arquivo de controle definido pelo usuário (CDU) é especificado o modelo de regulador de velocidade e turbina utilizado nas simulações, assim como sua parametrização (CDU 302 para o regulador de velocidade do gerador 1 e CDU 303 para o gerador 2). Tal implementação se fez necessária pois esse regulador não está presente nos modelos de reguladores pré-definidos do Anatem.

```
DCDU
(ncdu) ( nome cdu )
  302 R_VEL
(-----
(EFPAR (nome) ( valor )
(-----
DEFPAR #wref          1
(
(-----
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----
  1 IMPORT WMAQ          X1
  4 ENTRAD                wref
  3 SOMA      +wref      X3
                   -X1      X3
 12 LEDLAG      X3      X12   1.   0.   1.   0.2   infn   inf
  7 FRACAO      X12     X7     1.           0.02
 13 LEDLAG      X7      X13   1.   0.   1.   0.3   infn   inf
  5*ENTRAD                P0
  9 SOMA          P0      X9
                   X13     X9
 10 LIMITA      X9      X10
 14 LEDLAG      X10     X14   1.  -0.15 1.   0.2   infn   inf
  2 EXPORT PMEC      X17
 16 IMPORT PBGER                X16
 17 DIVSAO      X14     X17
                   X20     X17
```

```

19 IMPORT PBSIS      X19
20 DIVSAO           X16  X20
                   X19  X20

(-----)
(DEFVA (stip) (vdef) ( d1 )( d2 )
(-----)
DEFVAL      infn  -9999 -9999
DEFVAL      inf   9999  9999
DEFVAL      pmin  0     0
DEFVAL      pmax  6     6
DEFVAL      wref  1     1
FIMCDU
(
(ncdu) ( nome cdu )
  303 R_VEL2
(
(-----)
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
  1 IMPORT WMAQ      X1
  4 ENTRAD          wref
  3 SOMA            +wref X3
                   -X1  X3
 12 LEDLAG          X3  X12  1.  0.  1.  0.2  infn  inf
  7 FRACAO          X12  X7   1.      0.02
 13 LEDLAG          X7  X13  1.  0.  1.  0.3  infn  inf
  5*ENTRAD          P0
  9 SOMA            P0  X9
                   X13  X9
 10 LIMITA          X9  X10                pmin  pmax
 14 LEDLAG          X10  X14  1.  0.  1.  0.2  infn  inf
 16 IMPORT PBGER    X16
 19 IMPORT PBSIS    X19
 20 DIVSAO          X16  X20
                   X19  X20
 17 DIVSAO          X14  X17
                   X20  X17
  2 EXPORT P MEC   X17

(-----)
(DEFVA (stip) (vdef) ( d1 )( d2 )
(-----)
DEFVAL      infn  -9999 -9999
DEFVAL      inf   9999  9999
DEFVAL      pmax  6     6
DEFVAL      pmin  0     0
DEFVAL      wref  1     1
FIMCDU
(

```

999999

FIM