

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO PAULO ANANIAS SILVA

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CURTO E
LONGO TERMO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

JUIZ DE FORA

2016

JOÃO PAULO ANANIAS SILVA

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CURTO E
LONGO TERMO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Aroca Tomim, Ph.D.

Coorientador: João Alberto Passos Filho, D.Sc.

JUIZ DE FORA

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, João Paulo Ananias.

Metodologia para Modelagem e Simulação de Curto e Longo Termo em
Sistemas Elétricos de Potência / João Paulo Ananias Silva. – 2016.

220 f. : il.

Orientador: Marcelo Aroca Tomim, Ph.D.

Coorientador: João Alberto Passos Filho, D.Sc.

Dissertação(Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade
de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Estabilidade eletromecânica. 3.
Métodos numéricos. 4. Condições Iniciais. I. Tomim, Marcelo Aroca, orient.
II. Filho, João Alberto Passos, coorient. III. Título.

JOÃO PAULO ANANIAS SILVA

**METODOLOGIA PARA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CURTO E
LONGO TERMO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Aprovada em 12 de Setembro de 2016:

BANCA EXAMINADORA

Marcelo Aroca Tomim, Ph.D. - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

João Alberto Passos Filho, D.Sc. - Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.
Universidade Federal de Juiz de Fora

*"Dedico este trabalho aos meus pais e
as minhas irmãs pelo apoio irrestrito."*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela constante presença em minha vida por ter me iluminado durante toda essa jornada e por ter me dado forças para vencer mais esse desafio.

Um agradecimento em especial aos meus pais, Julio e Maria Aparecida, porque apesar da distância essa vitória não teria sido alcançada sem o amor, a compreensão nos momentos difíceis e a força de vontade deles em me oferecer o melhor. Também agradeço as minhas irmãs Juliana e Gisele que sempre estiveram ao meu lado apoiando em todas as dificuldades.

A todos os meus amigos que sempre me apoiaram e estiveram presentes tanto nos momentos bons quanto nos difíceis.

Aos professores Marcelo Aroca Tomim e João Alberto Passos Filho, pela orientação, compreensão e confiança ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEE) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte técnico e financeiro.

À todos que diretamente ou indiretamente colaboraram nesta minha conquista.

Este trabalho objetiva explorar a generalização e flexibilização da modelagem matemática para simulação numérica das dinâmicas de curto e longo prazo dos componentes dos sistemas elétricos de potência. Para isto, é apresentada uma metodologia que busca explicitar os elementos integradores mostrando como estes podem ser manipulados visando tornar a solução das dinâmicas em sistemas de potência mais flexível. Ao explicitar o elemento integrador é possível flexibilizar a escolha do método de integração, o cálculo das condições iniciais para as variáveis de estado e, inclusive, a estratégia para eliminação de dinâmicas dependendo do estudo a ser realizado.

O método empregado para a solução do conjunto de equações algébrico-diferenciais é o simultâneo, ou seja, a rede é solucionada juntamente com as equações que modelam os equipamentos. Este conjunto é obtido através da conversão das equações diferenciais em equações das diferenças, empregando o método de integração trapezoidal, formando um único conjunto algébrico e não linear, que é resolvido pelo método de Newton-Raphson.

Todos os aspectos discutidos neste trabalho referentes a modelagem matemática são empregados no desenvolvimento de uma ferramenta de simulação flexível utilizando a linguagem de programação Python. Por fim, a metodologia proposta e a ferramenta são avaliadas através do estudo de três sistemas teste. Os resultados obtidos são comparados aos do programa ANATEM e, na sequência, é realizada uma análise do desempenho computacional.

Palavras-chave: Sistemas elétricos de potência, Estabilidade eletromecânica, Métodos numéricos, Condições Iniciais.

This work aims to explore the generalisation and flexibility of mathematical modelling to numerical simulation of dynamic short and long-term components of electric power systems. Thus, it is presented a methodology that seeks to clarify the integrating elements showing how these can be manipulated in order to make the solution of dynamics in power systems more flexible. After the integrating element be explained, it is possible to make the choice of integration method flexible, the calculation of initial conditions for the state variables and even the strategy for eliminating dynamics depending on the study to be performed.

It was used the simultaneous method to solve the set of algebraic-differential equations. In other words, the network and the equations that model the equipment are solved in a single set of equations and simultaneously. It was used the trapezoidal integration method to convert the differential equations into difference equations. This process generates a non-linear algebraic set, which is solved by the Newton-Raphson method.

Every aspect discussed in this work regarding the mathematical modelling are employed in the development of a flexible simulation tool using the Python programming language. Finally, the proposed methodology and the tool are evaluated by studying three different test systems. The obtained results are compared to the ANATEM program, following a computational efficiency analysis.

Key-words: Electric Power Systems, Electromechanical Stability, Numerical Methods, Initial Conditions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de Interligado Nacional.	28
Figura 2 – Elementos básicos de Sistema Elétrico de Potência.	29
Figura 3 – Sistema de geração e transmissão.	30
Figura 4 – Esquema genérico do sistema de excitação para um gerador síncrono.	32
Figura 5 – Sistema gerador - regulador de velocidade.	33
Figura 6 – Classificação de estabilidade em Sistemas de Potência.	35
Figura 7 – Escalas de tempo.	38
Figura 8 – Decomposição por escala de tempo e aproximação quase estática (QSS).	40
Figura 9 – Simulação Completa x Simulação Rápida	41
Figura 10 – Diagrama de blocos para a função definida em (3.4).	47
Figura 11 – Diagrama de fluxo de sinais para o diagrama de blocos definido na Figura 10.	47
Figura 12 – Diagrama de fluxo de sinais simplificado.	48
Figura 13 – Formulação do elemento integrador com a equação diferencial mantida: (a) Diagrama de bloco (b) Diagrama de fluxo	50
Figura 14 – Formulação do elemento integrador para cálculo das condições iniciais: (a) Diagrama de bloco (b) Diagrama de fluxo	50
Figura 15 – Cálculo de condições iniciais com entrada conhecida: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo	51
Figura 16 – Caso 2 - Diagrama de blocos modificado.	52
Figura 17 – Cálculo de condições iniciais com saída conhecida: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo	53
Figura 18 – Bloco integrador.	58
Figura 19 – Análise de descontinuidade.	59
Figura 20 – Diagrama para Análise de descontinuidade: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo	60
Figura 21 – Diagrama do regulador de tensão em malha aberta.	63
Figura 22 – Diagramas de simulação para o Sistema Linear: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo	63
Figura 23 – Diagramas para cálculo das condições iniciais (primeiro caso) - Sistema Linear: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo	64

Figura 24 – Cálculo das condições iniciais (segundo caso) - Sistema Linear: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo	68
Figura 25 – Resultados da simulação do sistema linear: (a) Sinal V_{ref} (b) Sinal E_{fd}	72
Figura 26 – Resultados da simulação do sistema linear: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x . . .	73
Figura 27 – Diagramas para análise de descontinuidade - Sistema Linear: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo	73
Figura 28 – Resultados da simulação do sistema linear considerando a análise de descontinuidades: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x	77
Figura 29 – Diagrama de blocos - Sistema não linear: (a) Original (b) Expandido .	77
Figura 30 – Diagrama de blocos para o cálculo das condições iniciais - Sistema não linear	78
Figura 31 – Diagrama de fluxo de sinais para o cálculo das condições iniciais - Sistema não linear.	79
Figura 32 – Resultados da simulação do sistema não-linear: (a) Sinal x_0 (b) Sinal x_3	83
Figura 33 – Resultados da simulação do sistema não-linear: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x	83
Figura 34 – Diagrama para cálculo das descontinuidades.	83
Figura 35 – Resultados da simulação do sistema não-linear considerando a análise de descontinuidades: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x	86
Figura 36 – Diagrama simplificado para o gerador.	87
Figura 37 – Diagrama simplificado para a unidade geradora.	88
Figura 38 – Diagrama simplificado da unidade geradora com os integradores adicionais.	88
Figura 39 – Diagrama simplificado do gerador síncrono sem sistemas de regulação e com os integradores adicionais.	89
Figura 40 – Diagrama simplificado para a carga dinâmica.	89
Figura 41 – Sistema de geração com n unidades geradoras.	90
Figura 42 – Esquema para o estudo de um sistema físico.	93
Figura 43 – Diagrama simplificado das classes básicas.	98
Figura 44 – Bloco ganho.	99
Figura 45 – Bloco ganho com limitador (estático).	100
Figura 46 – Bloco integrador.	101
Figura 47 – Bloco integrador limitado - limitador dinâmico.	103
Figura 48 – Bloco integrador para auxiliar para cálculo das condições iniciais. . . .	104
Figura 49 – Bloco para função não-linear/lógica.	105
Figura 50 – Estrutura representativa para diferentes blocos não lineares.	107
Figura 51 – Diagrama básico para os equipamentos	109
Figura 52 – Diagrama básico da classe <i>Inicializacao</i> empregada para o cálculo das condições iniciais de uma unidade geradora equivalente	110
Figura 53 – Diagrama básico para a classe <i>Inicializacao</i> empregada para o cálculo das condições iniciais de uma carga dinâmica	110

Figura 54 – Diagrama genérico para a classe <i>Inicializacao</i> empregado no cálculo das condições iniciais.	111
Figura 55 – Fluxograma simplificado para o do cálculo das condições iniciais.	112
Figura 56 – Diagrama simplificado representativo da classe <i>Simulacao</i>	113
Figura 57 – Fluxograma simplificado para a etapa de simulação.	114
Figura 58 – Fluxograma simplificado para análise de descontinuidade.	115
Figura 59 – Fluxograma simplificado da ferramenta de simulação desenvolvida	116
Figura 60 – Diagrama Unifilar: Sistema MBINF.	120
Figura 61 – Diagrama representativo para o cálculo das condições iniciais: Sistema MBINF.	121
Figura 62 – Diagrama representativo para simulação: Sistema MBINF.	123
Figura 63 – Esparsidade da matriz jacobiana - Sistema MBINF	124
Figura 64 – Comparação de resultados: PySEP x ANATEM - Sistema MBINF: (a) V_{ref} (b) E_{fd}	125
Figura 65 – Comparação de resultados: PySEP x ANATEM - Sistema MBINF: (a) Q_e (b) δ	125
Figura 66 – Comparação de resultados: PySEP x ANATEM - Sistema MBINF: MBINF:(a) F_e (b) V_t	125
Figura 67 – Comparação de resultados do Sistema MBINF - Atualização da matriz jacobiana:(a) V_{ref} (b) E_{fd}	128
Figura 68 – Comparação de resultados do Sistema MBINF - Atualização da matriz jacobiana(a) F_e (b) V_t	128
Figura 69 – Comparação de resultados do Sistema MBINF - Atualização da matriz jacobiana(a) Q_e (b) δ	128
Figura 70 – Diagrama Unifilar: Sistema <i>New England</i>	129
Figura 71 – Diagrama simplificado para o cálculo das condições iniciais da unidade geradora - Sistema <i>New England</i>	131
Figura 72 – Esparsidade da matriz jacobiana para cálculo das condições iniciais - Sistema <i>New England</i> :(a) Unidade Geradora (b) Carga dinâmica	131
Figura 73 – Diagrama simplificado para a simulação do Sistema <i>New England</i>	133
Figura 74 – Esparsidade da matriz jacobiana do processo de simulação - Sistema <i>New England</i>	133
Figura 75 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i> :(a) P_e (b) P_m	134
Figura 76 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i> :(a) V_t (b) E_{fd}	135
Figura 77 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i> :(a) δ (b) F_e	135

Figura 78 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i>	135
Figura 79 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i> :(a) P_e (b) P_m	136
Figura 80 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i> :(a) V_t (b) E_{fd}	136
Figura 81 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i> :(a) δ (b) F_e	137
Figura 82 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema <i>New England</i>	137
Figura 83 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema <i>New England</i> : (a) P_e (b) P_m	138
Figura 84 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema <i>New England</i> : (a) V_t (b) E_{fd}	138
Figura 85 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema <i>New England</i> : (a) δ (b) F_e	139
Figura 86 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema <i>New England</i> .	139
Figura 87 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema <i>New England</i> : (a) P_e (b) P_m	141
Figura 88 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema <i>New England</i> : (a) V_t (b) E_{fd}	142
Figura 89 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema <i>New England</i> : (a) δ (b) F_e	142
Figura 90 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema <i>New England</i>	143
Figura 91 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - <i>New England</i> : (a) P_e (b) P_m	144
Figura 92 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - <i>New England</i> : (a) V_t (b) E_{fd}	144
Figura 93 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - <i>New England</i> : (a) δ (b) F_e	144
Figura 94 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - <i>New England</i> : Carga dinâmica	145
Figura 95 – Diagrama Unifilar: sistema termelétrico equivalente.	146

Figura 96 – Esparsidade da matriz jacobiana para cálculo das condições iniciais - Sistema Termelétrico:(a) Unidade Geradora 4203 e 4205 (b) Unidade Geradora 4204	147
Figura 97 – Esparsidade da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico	148
Figura 98 – Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Termelétrico:(a) P_e (b) P_m	149
Figura 99 – Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Termelétrico:(a) V_t (b) E_{fd}	149
Figura 100 – Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema Termelétrico:(a) F_e	150
Figura 101 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Sistema Termelétrico:(a) P_e (b) P_m	152
Figura 102 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Sistema Termelétrico:(a) V_t (b) E_{fd}	152
Figura 103 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Sistema Termelétrico:(a) F_e	152
Figura 104 – Comparação de resultados para diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico: (a) P_e (b) P_m	153
Figura 105 – Comparação de resultados para diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico: (a) V_t (b) E_{fd}	154
Figura 106 – Comparação de resultados para diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico:(a) F_e	154
Figura 107 – Perfil computacional da Simulação - Sistema MBINF.	156
Figura 108 – Perfil computacional da Simulação - Curto Prazo - <i>New England</i>	156
Figura 109 – Perfil computacional da Simulação - Longo Prazo - <i>New England</i>	157
Figura 110 – Perfil computacional da Simulação - Sistema Termelétrico Equivalente.	157
Figura 111 – Perfil computacional - Sistema MBINF.	159
Figura 112 – Perfil computacional - Curto Prazo - <i>New England</i>	159
Figura 113 – Perfil computacional - Longo Prazo - <i>New England</i>	160
Figura 114 – Perfil computacional - Sistema Termelétrico Equivalente.	160
Figura 115 – Sistema linear com realimentação com o cálculo das condições iniciais ocorrendo da entrada para saída.	161
Figura 116 – Sistema linear com realimentação com o cálculo das condições iniciais ocorrendo da saída para entrada.	161
Figura 117 – Diagrama equivalente para o cálculo das condições iniciais da entrada para saída.	162
Figura 118 – Diagrama equivalente para o cálculo das condições iniciais da saída para entrada.	162

Figura 119–Diagrama equivalente para o cálculo das condições iniciais da saída para entrada.	164
Figura 120–Modelo gerador polos salientes (E_q'').	176
Figura 121–Diagrama para as equações de eixo direto - polos salientes.	176
Figura 122–Diagrama para as equações de eixo em quadratura - polos salientes.	177
Figura 123–Modelo Gerador Pólos Lisos (E_q'').	177
Figura 124–Diagrama para as equações de eixo em quadratura - polos lisos.	178
Figura 125–Diagrama para as equações de eixo direto - polos lisos.	178
Figura 126–Esquema representativo para a carga dinâmica.	183
Figura 127–Representação gráfica do método Trapezoidal.	185
Figura 128–Modelo regulador de tensão - Sistema Máquina/Barra Infinita.	191
Figura 129–Modelo estabilizador de potência - Sistema Máquina/Barra Infinita.	191
Figura 130–Modelo regulador de velocidade - Sistema New England.	194
Figura 131–Modelo regulador de tensão - Sistema New England.	195
Figura 132–Modelo de carga dinâmica - Sistema New England.	195

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo do modelo dinâmico.	42
Tabela 2 – Dimensionamento para o cálculo das condições iniciais - Sistema MBINF	122
Tabela 3 – Condições iniciais calculadas - Sistema MBINF	122
Tabela 4 – Dimensionamento para a simulação - Sistema MBINF	123
Tabela 5 – Tempos computacionais - Sistema MBINF.	126
Tabela 6 – Fator de desempenho Implementação x ANATEM - Sistema MBINF. .	126
Tabela 7 – Tempos computacionais de acordo com a estratégia de atualização da matriz jacobiana - Sistema MBINF	127
Tabela 8 – Dimensionamento para o cálculo das condições iniciais da unidade geradora - Sistema <i>New England</i>	130
Tabela 9 – Dimensionamento para a simulação - Sistema <i>New England</i>	132
Tabela 10 – Tempos computacionais - Sistema <i>New England</i>	139
Tabela 11 – Fator de desempenho Implementação x Anatem - Sistema <i>New England</i> .	140
Tabela 12 – Tempo computacional com variação do passo - Estudo de Longo Prazo - Sistema <i>New England</i>	140
Tabela 13 – <i>Dishonest-Newton</i> : Tempos computacionais - Estudo de Longo Prazo - Sistema <i>New England</i>	143
Tabela 14 – Tempos computacionais para simulação com eliminação de dinâmicas - Sistema <i>New England</i>	145
Tabela 15 – Dimensionamento - Sistema Termelétrico	148
Tabela 16 – Tempos computacionais - Sistema Termelétrico.	150
Tabela 17 – Fator de desempenho Implementação x Anatem - Sistema Termelétrico.	150
Tabela 18 – Tempo computacional com variação do passo - Sistema Termelétrico. .	151
Tabela 19 – Tempos computacionais considerando diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico	153
Tabela 20 – Perfil computacional - Sistema MBINF	155
Tabela 21 – Perfil computacional - Sistema <i>New England</i> - Curto Prazo	155
Tabela 22 – Perfil computacional - Sistema <i>New England</i> - Longo Prazo	155
Tabela 23 – Perfil computacional - Sistema Termelétrico Equivalente	155
Tabela 24 – Dados das barras do Sistema Máquina-Barra Infinita.	190
Tabela 25 – Dados dos ramos do Sistema Máquina-Barra Infinita.	190
Tabela 26 – Dados dos geradores - polos salientes	191

Tabela 27 – Dados das barras do Sistema New England.	192
Tabela 28 – Dados dos ramos do Sistema New England.	193
Tabela 29 – Dados dos geradores - polos salientes	194
Tabela 30 – Dados dos reguladores de velocidade - Sistema New England.	194
Tabela 31 – Dados dos reguladores de tensão - Sistema New England.	195
Tabela 32 – Dados das barras.	196
Tabela 33 – Dados do sistema de transmissão.	196
Tabela 34 – Dados dos geradores de polos lisos.	197
Tabela 35 – Dados das curvas de saturação - modelos ANATEM.	197
Tabela 36 – Associação modelos dos controladores e geradores.	197

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAREDE	Programa de Análise de Redes Elétricas
ANATEM	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATLAS	<i>Automatically Tuned Linear Algebra Software</i>
BLAS	<i>Basic Linear Algebra Subprograms</i>
CA	Corrente Alternada
CAG	Controle Automático de Geração
CC	Corrente Contínua
CCT	Controle Coordenado de Tensão
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
FA	Fator de aceleração
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FD	Fator de desempenho
HVDC	<i>High-Voltage Direct Current</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAPACK	<i>Linear Algebra Package</i>
LTCs	<i>Load Tap Changers</i>
MS	Máquina Síncrona
OLTC	<i>On Load Tap Changers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico

OXLs	<i>Overexcitation Limiters</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PSS	<i>Power System Stabilizers</i>
QSS	<i>Quasi Steady State</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SVC	<i>Static VAR compensator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\mathbf{J}	Representação para a matriz jacobiana
\mathbf{x}	Representação para o vetor x
y	Representação para a variável y
V_{ref}	Tensão de referência do regulador de tensão;
V_{sad}	Tensão do sinal adicional estabilizante do <i>Power System Stabilizers</i> ;
V_t	Tensão terminal;
I_r^k	Componente real da corrente injetada na barra k ;
I_m^k	Componente imaginária da corrente injetada na barra k ;
V_r^k	Componente real da tensão da barra k ;
V_m^k	Componente imaginária da tensão da barra k ;
Y_{bus}	Matriz de admitância nodal de rede;
Y_{ij}	Admitância equivalente entre as barras i e j ;
G_{ij}	Condutância equivalente entre as barras i e j ;
B_{ij}	Susceptância equivalente entre as barras i e j ;
E'_q	Tensão transitória de eixo em quadratura;
E'_d	Tensão transitória de eixo direto;
E''_q	Tensão subtransitória de eixo em quadratura;
E''_d	Tensão subtransitória de eixo direto;
T'_{q0}	Constante de tempo transitória de eixo em quadratura em circuito aberto;
T'_{d0}	Constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto;

T''_{q0}	Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura em circuito aberto;
T''_{d0}	Constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto;
E_{fd}	Tensão de campo da máquina;
R_a	Resistência de enrolamento de armadura;
X'_l	Impedância de dispersão da armadura;
X'_d	Impedância transitória de eixo direto;
X'_q	Impedância transitória de eixo em quadratura;
X_d	Impedância síncrona de eixo direto;
X_q	Impedância síncrona de eixo em quadratura;
I_d	Corrente de armadura da máquina projetada no eixo direto;
I_q	Corrente de armadura da máquina projetada no eixo em quadratura;
H	Constante de inércia;
P_e	Potência elétrica ativa gerada pela máquina;
P_m	Potência mecânica da máquina;
δ	Ângulo absoluto do eixo q da máquina;
ω_{maq}	Velocidade angular da máquina;
ω_s	Velocidade angular síncrona da máquina;

1	Introdução	22
1.1	Revisão Bibliográfica	23
1.2	Objetivos	25
1.3	Publicações decorrentes da dissertação	26
1.4	Estrutura do trabalho	26
2	Estabilidade em sistemas de potência	28
2.1	Sistemas Elétricos de Potência	28
2.1.1	Sistema de Geração	30
2.1.2	Sistema de Transmissão	34
2.2	Estabilidade em sistemas de potência	34
2.3	Estudos de estabilidade em sistemas de potência	37
2.4	Considerações Finais	43
3	Formulação Matemática	44
3.1	Representação de Sistemas Dinâmicos	44
3.2	Representação Matemática de Sistemas Dinâmicos	45
3.2.1	Diagrama de Blocos	46
3.2.2	Diagrama de Fluxo de Sinais	47
3.3	Estratégia para Cálculo das Condições Iniciais	49
3.3.1	Cálculo das Condições Iniciais	49
3.3.2	Eliminação de Dinâmicas	54
3.4	Estratégia de Simulação	55
3.4.1	Métodos de Integração Numérica	55
3.4.2	Aplicação dos métodos numéricos	57
3.5	Estratégia para Análise de Descontinuidade	57
3.6	Sistemas Não-Lineares	61
3.7	Exemplos Tutoriais	62
3.7.1	Sistema Linear	62
3.7.2	Sistema Não Linear	76
3.8	Formulação dos Sistemas Elétrico de Potência	86
3.8.1	Cálculo das Condições Iniciais	87
3.8.2	Simulação	89

3.8.3	Análise de Descontinuidade	89
3.9	Considerações Finais	90
4	Modelagem Computacional	92
4.1	Considerações Iniciais	92
4.2	Linguagem de programação Python	94
4.3	Desenvolvimento e Implementação Computacional	97
4.3.1	Blocos básicos implementados	98
4.3.2	Modelos de equipamentos	109
4.3.3	Modelo computacional para o cálculo das condições iniciais	109
4.3.4	Modelo computacional para simulação	112
4.3.5	Modelo geral da ferramenta implementada	115
4.4	Considerações Finais	117
5	Resultados das simulações e análise do desempenho computacional	119
5.1	Sistema Máquina - Barra Infinita	120
5.1.1	Estruturação do Problema	120
5.1.2	Resultados da Simulação	124
5.1.3	Desempenho Computacional	126
5.2	Sistema <i>New England</i>	129
5.2.1	Estruturação do problema	130
5.2.2	Resultados das Simulações	134
5.2.3	Desempenho Computacional	139
5.3	Sistema Termelétrico Equivalente	146
5.3.1	Estruturação do problema	147
5.3.2	Resultados da Simulação	149
5.3.3	Desempenho Computacional	150
5.4	Perfil Computacional das Simulações	154
5.5	Estratégia para Cálculo das Condições Iniciais	161
5.6	Considerações Finais	165
6	Conclusões	167
6.1	Trabalhos Futuros	168
REFERÊNCIAS		170
APÊNDICE A	Representação de sistemas dinâmicos no espaço de estados	173

APÊNDICE B	Modelo do gerador síncrono	175
B.1	Modelo de 5ª Ordem (modelo de polos salientes)	176
B.2	Modelo de 6ª Ordem (modelo de polos lisos)	177
APÊNDICE C	Sistema de transmissão	179
APÊNDICE D	Representação de curto circuito em barra CA .	181
APÊNDICE E	Modelo de carga	182
E.1	Carga Estática - Impedância constante	182
E.2	Carga Dinâmica	183
APÊNDICE F	Método de integração trapezoidal	184
APÊNDICE G	Método de Newton-Raphson	186
APÊNDICE H	Fatoração LU	188
H.1	Formulação do problema	188
APÊNDICE I	Dados dos sistemas testes	190
I.1	SISTEMA MÁQUINA - BARRA INFINITA	190
I.1.1	Dados das barra e rede	190
I.1.2	Dados dos Geradores - Máquina Síncrona	191
I.1.3	Modelo do Regulador de Tensão	191
I.1.4	Modelo do PSS	191
I.2	SISTEMA NEW ENGLAND	192
I.2.1	Dados das barra e rede	192
I.2.2	Dados das Máquina	194
I.2.3	Dados de Regulador de Velocidade	194
I.2.4	Dados de Regulador de Tensão	195
I.2.5	Dados do Modelo da Carga Dinâmica	195
I.3	SISTEMA TERMELÉTRICO EQUIVALENTE	196
I.3.1	Dados das barra e rede	196
I.3.2	Dados de Máquina	197
I.3.3	Dados dos controladores	197

A energia elétrica é definitivamente um dos bens mais essenciais para a sociedade moderna. Em face desta importância, tanto a dependência como a demanda por energia elétrica aumentam continuamente.

A atual situação do setor elétrico, no qual a expansão dos sistemas elétricos de potência vem encontrando dificuldades para acompanhar o crescimento da demanda, faz com que os sistemas elétricos de potência estejam experimentando condições operativas cada vez mais próximas dos seus limites físicos e operacionais, com fraco suporte de potência reativa e baixas margens de segurança. Isso torna o sistema mais propício a problemas de instabilidade, em especial, os relacionados à tensão, os quais estão sendo observados com maior frequência em diversos lugares do mundo.

Aliadas às dificuldades supracitadas inclui-se ainda a constante modernização das redes, com utilização cada vez mais frequente de equipamentos baseados em eletrônica de potência (FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) e elos de transmissão em corrente contínua) e controles não convencionais, a adoção de regras ditadas pelos mercados de energia e a diversificação das fontes de energia empregadas, tais como plantas biomassa, eólicas e fotovoltaicas. Em geral, estes aspectos acabam por descaracterizar o comportamento dos sistemas elétricos de potência.

Neste contexto, o contínuo desenvolvimento de técnicas analíticas e estudos relacionados com a operação e planejamento torna-se uma importante chave para melhorar as margens de segurança e confiabilidade dos sistemas de potência modernos. Estas técnicas englobam a simulação e avaliação do comportamento dinâmico e de regime permanente dos vários componentes que compreendem estes sistemas de forma cada vez mais eficiente e precisa.

Atualmente, o planejamento da operação dos sistemas de potência e sua implementação em tempo real necessitam de inúmeros estudos que envolvem a análise de diversas condições operativas do sistema, através de análise de fluxos de potência, cálculos de curto-circuito, simulação de transitórios eletromecânicos, entre outros. É papel fundamental de tais análises não só verificar os níveis de segurança estática e dinâmica das redes, mas também definir medidas preventivas e/ou corretivas para garantir a operação adequada e segura do sistema.

Portanto, é neste contexto de desenvolvimento de técnicas para a análise dos sistemas elétricos que o presente trabalho foi desenvolvido. Objetiva-se explorar a generalização e a flexibilização da modelagem matemática para a simulação numérica dos componentes dos sistemas elétricos por meio do desenvolvimento de uma ferramenta de simulação.

1.1 Revisão Bibliográfica

Nesta seção realiza-se uma revisão bibliográfica da literatura pesquisada ao longo do desenvolvimento deste trabalho e que possui importância no cenário dos estudos de estabilidade em sistemas elétricos de potência.

Em 1972, Dommel & Sato[1] descreveram técnicas que visavam acelerar os estudos de estabilidade transitória em sistemas de grande porte sem que a exatidão dos resultados fosse afetada. Os referidos autores apresentaram um método iterativo de solução das equações algébricas de rede e uma técnica de solução de equações diferenciais por meio do método de integração trapezoidal. Além disso, as duas técnicas foram combinadas permitindo obter uma solução simultânea para as equações algébricas e para as diferenciais, eliminando o erro de interface entre as variáveis.

Em 1979, Stott[2] fez uma avaliação dos métodos de cálculo utilizados na época visando apresentar uma visão geral de como poderia ser realizado o cálculo da resposta dinâmica de sistemas elétricos. Por tal motivo, o autor deu uma ênfase maior na descrição dos conceitos e soluções técnicas computacionais do que na realização da análise do método numérico. Ao longo do artigo alguns métodos específicos são recomendados para as simulações, em especial a aplicação do método trapezoidal para a resolução das equações diferenciais assim como o emprego da solução alternada destas equações com as equações de rede.

Hemmaplardh *et al.*, em [3], apresentaram um resumo do estado da simulação dinâmica dos sistemas de potência a longo prazo, na época da publicação, se concentrando nos principais resultados do projeto EPRI (*Electric Power Research Institute*) RP1469-1. Entre os principais resultados tem-se:

- especificação dos requisitos para a simulação de um sistema de dinâmicas lentas;
- documentação minuciosa sobre o estado dos modelos de longo prazo existentes até então;
- definição de métodos computacionais necessários para a simulação de longo prazo e para o desenvolvimento de um projeto detalhado para a produção de um programa de dinâmicas lentas.

Segundo [3], o foco principal da simulação dinâmica a longo prazo é avaliar os efeitos de amplas excursões de tensão e frequência por extensos períodos de tempo. O método de integração trapezoidal também foi escolhido para assegurar que soluções estáveis pudessem ser encontradas quando passos de um segundo ou mais fossem empregados. Além disso, especificou-se um procedimento de solução alternada para resolver eficientemente as equações diferenciais implícitas, e a estrutura esparsa das equações de potência foram preservadas com a incorporação da condição de frequência uniforme.

Na referência [4], Vanti apresentou o projeto da implementação de um programa destinado a realizar simulações dinâmicas de sistemas elétricos de potência. Também foram descritas definições de conceitos relacionados a simuladores para ensino e treinamento (SET), além de descrever métodos matemáticos de solução e os modelos dos componentes dos sistemas elétricos adequados à simulação de dinâmicas lentas. Ainda mostrou como a modularidade e flexibilidade podem ser obtidas com a adoção de técnicas de programação orientadas a objetos, neste caso, proporcionada pela linguagem C++.

Em [5], Van Cutsem propôs uma abordagem para estudos de estabilidade de tensão em médio prazo combinando simulação rápida, diagnóstico de instabilidade e a determinação de controle corretivo. A simulação rápida aproxima a evolução a médio prazo por uma sucessão de pontos de equilíbrio, oferecendo assim um bom compromisso entre eficiência e precisão. O diagnóstico de instabilidade e a determinação do controle corretivo consistem na análise de alguns pontos da trajetória do sistema simulado, a fim de identificar e determinar pontos críticos. O método descrito, embora simplificado em relação à integração numérica completa, mostrou-se capaz de reproduzir uma sequência de eventos relevantes para a instabilidade de tensão em médio prazo e suas medidas corretivas, sendo capaz de lidar com o incremento de carga e falhas em equipamentos. A eficiência computacional tornou o método adequado para uma utilização interativa, bem como para simulações extensas, mostrando-se atraente para:

- Estudos de planejamento: como ferramenta de triagem ou para o projeto preliminar de sistemas automáticos de proteção contra colapso de tensão;
- Estudos de planejamento da operação: Determinação dos limites de segurança pré-contingência;
- Análise de segurança de tensão em tempo real, em particular, como uma ferramenta de operador;
- Controle de emergência, já que a capacidade de simular o comportamento do sistema mais rápido do que em tempo real pode antecipar algumas medidas preventivas.

Van Cutsem, na referência [6], avaliou uma metodologia para análise de estabilidade de tensão no médio prazo e na escala de tempo transitória denominada *Quasi Steady State*

(QSS). A metodologia é baseada na decomposição de escala de tempo e substituição das equações diferenciais de fenômenos de dinâmicas rápidas por suas condições de equilíbrio, a fim de reduzir a complexidade de todo o modelo e aumentar a eficiência de cálculo de simulações de tempo.

Na referência [7], Manzoni apresentou o desenvolvimento e a implementação de um módulo computacional para a simulação dinâmica do comportamento de sistemas elétricos de potência usando programação orientada a objetos. Além disso, descreveu o método alternado empregado na solução do conjunto de equações algébrico-diferenciais não-lineares. Os modelos utilizados para representar os elementos do sistema permitiam a análise da dinâmica de curto e longo prazo de forma que ambos os estudos fossem realizados em um único módulo computacional.

Em [8], Manzoni desenvolveu uma base computacional para integrar um amplo conjunto de ferramentas de simulação e análise de sistemas elétricos de potência, sendo o modelo adequado para estudos como fluxo de potência, análise modal e simulação dinâmica completa. Propôs também uma alteração na metodologia de simulação de médio/longo prazo para um estudo mais amplo dos fenômenos que ocorressem em cenários de instabilidade de tensão. Além disso, mostrou que a retenção da dinâmica dos modelos na formulação do método possibilita o emprego das técnicas de análise modal durante o período de simulação do sistema. Por fim, apresentou uma metodologia de simulação combinada, reunindo o simulador rápido modificado e de dinâmica completa, permitindo ampliar a faixa de estudo dos fenômenos pelo simulador rápido.

Em [9], Milano descreveu uma ferramenta de análise de sistemas elétricos de potência inteiramente baseado na linguagem de programação Python, chamado DOME. Ao longo do artigo foram apresentadas características referentes a linguagem Python [10] que a torna adequada para a pesquisa, para simulações numéricas e para o emprego em educação, principalmente por ser uma linguagem de *script* moderna, madura, completa e versátil.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste em apresentar os esforços iniciais para o desenvolvimento de uma metodologia em direção à generalização da modelagem matemática e simulação numérica de componentes dos sistemas elétricos de potência.

O presente trabalho ainda busca mostrar como os elementos integradores, usados para descrever as dinâmicas que regem os dispositivos de sistemas elétricos de potência e os seus controladores, podem ser manipulados para tornar a solução da dinâmica em sistemas de potência mais flexíveis. Como parte desta discussão, também procura-se mostrar como a identificação destes elementos pode auxiliar na flexibilização da escolha do método de

integração, do cálculo das condições iniciais para as variáveis de estado e, inclusive, da estratégia de eliminação de dinâmicas dependendo do estudo a ser realizado.

O trabalho ainda tem por objetivo aplicar tais aspectos na implementação de uma ferramenta de simulação utilizando a linguagem de programação Python que fosse capaz de simular os transitórios eletromecânicos de sistemas elétricos de potência além de realizar simulações nas quais determinadas dinâmicas pudessem ser desconsideradas de acordo com os estudos a serem realizados. Ao longo do desenvolvimento da ferramenta busca-se, ainda, avaliar a viabilidade do emprego desta linguagem neste tipo de simulação.

Por fim, os resultados obtidos através da ferramenta desenvolvida são comparados com os resultados obtidos com o programa ANATEM (Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos), programa desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e amplamente utilizado em simulações de transitórios eletromecânicos envolvendo o sistema elétrico, a fim de validar a ferramenta desenvolvida. Além do mais, são realizadas simulações nas quais as dinâmicas de curta duração são eliminadas sendo retidas apenas as de longa duração a fim de avaliar e validar a metodologia para eliminação de dinâmicas proposta. Busca-se mostrar também como o comportamento dinâmico dos sistemas é fortemente caracterizado pelas dinâmicas de longa duração. Dessa forma, quando o período transitório é estável, nos estudos de longo prazo as dinâmicas de curta duração podem ser eliminadas sem que haja comprometimento dos resultados.

1.3 Publicações decorrentes da dissertação

Como resultado dos estudos realizados para a elaboração desta dissertação foi desenvolvido o seguinte trabalho:

- SILVA, J. P. A.; TOMIM, M. A.; PASSOS FILHO, J. A. A General Framework for Modeling and Simulation of Power System Controllers. XI Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CLAGTEE), São José dos Campos-SP, 2015.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em seis capítulos, sendo organizado e apresentado da seguinte forma:

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução sobre o trabalho desenvolvido, descrevendo os principais objetivos, a motivação e uma breve revisão bibliográfica sobre a literatura que serviram de base e motivaram o desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 2 expõe alguns conceitos e características relacionadas ao Sistema Elétrico de Potência que serviram como uma importante base teórica para o desenvolvimento

deste trabalho.

No Capítulo 3 são apresentados os aspectos relacionados à modelagem de sistemas dinâmicos de forma genérica, descrevendo o equacionamento para o cálculo das condições iniciais das variáveis de estado e para a simulação no tempo, além de estratégias adotadas para a eliminação de dinâmicas e análise de descontinuidades. Por fim, todo o desenvolvimento matemático é apresentado sobre dois exemplos tutoriais, um linear e outro não linear.

No Capítulo 4 são apresentadas características referentes a ferramenta de simulação implementada bem como da linguagem de programação Python empregada no seu desenvolvimento.

No Capítulo 5 são descritos alguns resultados obtidos com o modelo computacional desenvolvido, buscando validá-los e compará-los aos obtidos com o Programa ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) desenvolvido e comercializado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Neste capítulo também é avaliada a estratégia de eliminação de dinâmicas proposta, empregando-a em um estudo de caso. Por fim, é realizada uma avaliação de desempenho computacional da ferramenta desenvolvida.

O Capítulo 6 dedica-se à apresentação das conclusões finais resultantes do desenvolvimento deste trabalho, além de algumas propostas de trabalhos futuros.

Esta dissertação é composta ainda por nove apêndices.

No Apêndice A é detalhada a conversão das funções de transferência ao formato de espaço de estados, para o qual o elemento integrador estará explícito.

Nos Apêndices B e C são apresentados, respectivamente, os modelos matemáticos empregados para o gerador síncrono e para os elementos passivos da rede (transformadores e linhas de transmissão). No Apêndice D é apresentada a formulação adotada para o curto em barras CA.

Na sequência, no Apêndice E são discutidas algumas características referentes aos modelos de cargas considerados nas análises dinâmicas de sistemas elétricos de potência.

Já nos Apêndices F e G são apresentadas as formulações matemáticas para os métodos numéricos empregados no desenvolvimento deste trabalho, respectivamente, o método de integração trapezoidal e o método de Newton-Raphson.

No Apêndice H é apresentada a formulação para solução do sistema linear $Ax = b$ empregando a fatoração LU.

Por fim, No Apêndice I são apresentados os dados dos sistemas testes avaliados neste trabalho.

Estabilidade em sistemas de potência

Neste capítulo são apresentadas características dos sistemas elétricos de potência e conceitos relacionadas aos estudos de estabilidade como forma de fornecer uma base teórica ao desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Sistemas Elétricos de Potência

Um sistema elétrico de potência (SEP) tem como objetivo principal gerar, transmitir e distribuir energia elétrica atendendo as mais variadas cargas com o mínimo de interrupções possível e, para isso, deve atender a determinados padrões de segurança, confiabilidade, qualidade e custo [11]. Dessa forma, para atender estes requisitos os sistemas são operados de maneira interligada como é o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN) representado na Figura 1. No entanto, devido a fatores técnicos, econômicos, geográficos, políticos, entre outros, alguns sistemas operam de maneira isolada, como em algumas localidades da

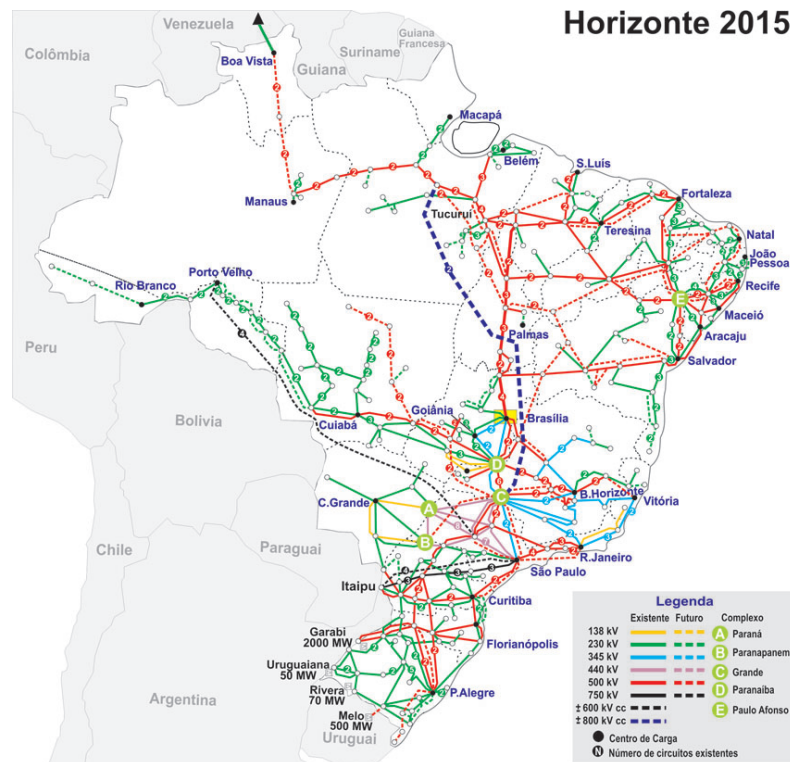


Figura 1 – Sistema de Interligado Nacional.

Fonte: ONS

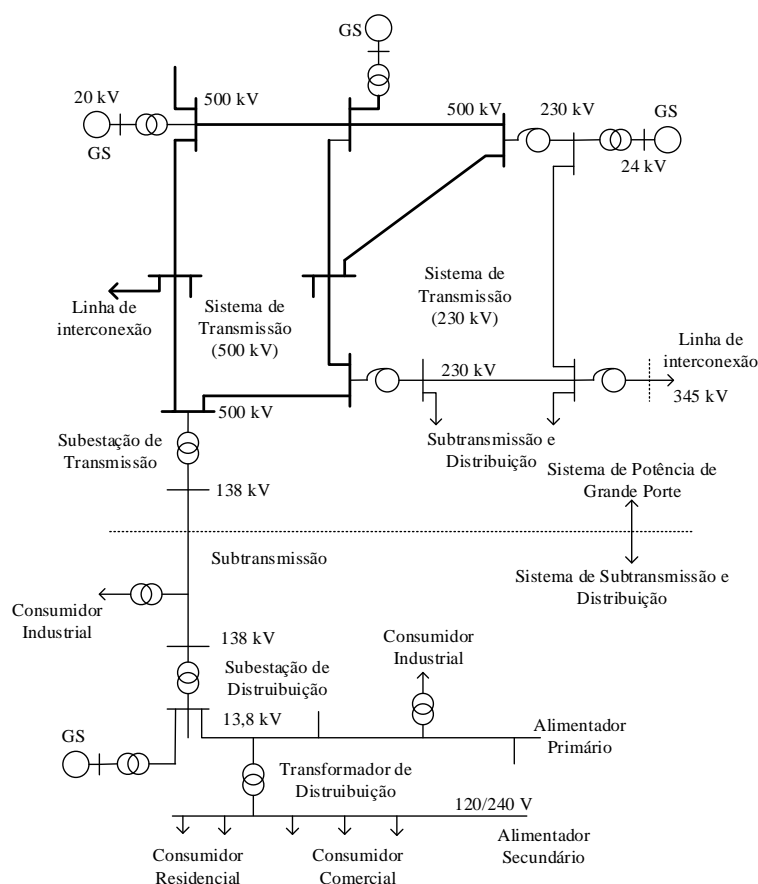


Figura 2 – Elementos básicos de Sistema Elétrico de Potência.

Fonte: [12].

região norte do Brasil.

No Brasil, os procedimentos e os requisitos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do SIN são definidos pelos Procedimentos de Rede que possuem caráter normativo elaborados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), com participação dos agentes, e aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). No âmbito do sistema de distribuição, o funcionamento e o desempenho do sistema é normatizado e padronizado por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) elaborado pela ANEEL.

Um SEP é composto basicamente pelo sistema de geração, de transmissão, de distribuição e pelas cargas como representado na Figura 2. No sistema de geração é onde ocorre a conversão das formas de energia encontradas na natureza em energia elétrica, sendo composto pelo gerador, pela máquina primária, pelos controladores em geral (tensão e velocidade, por exemplo), entre outros elementos. O sistema de transmissão tem como funções o transporte da energia gerada nos centros de geração para os centros de consumo, assim como a interligação entre os centros de geração. Dentro deste sistema são

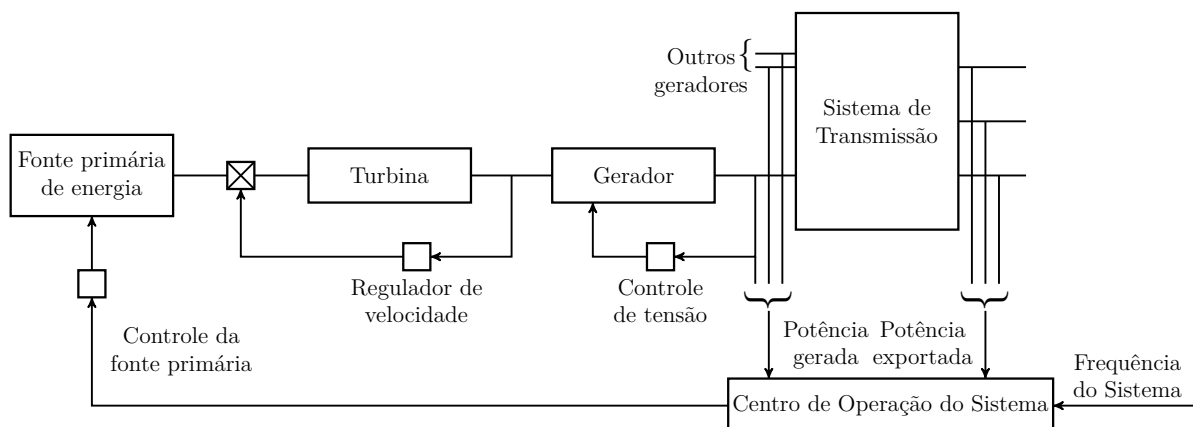


Figura 3 – Sistema de geração e transmissão.

considerados linhas de transmissão e transformadores, além dos sistemas de transmissão em corrente contínua, entre outros elementos FACTS. Estes dois sistemas estão representados de maneira simplificada na Figura 3.

O sistema de distribuição tem a função de transferir a energia das subestações de transmissão para as cargas. O sistema de distribuição primário atende diretamente alguns consumidores industriais e o secundário é responsável pelo atendimento dos consumidores residenciais e comerciais.

2.1.1 Sistema de Geração

O sistema de geração é formado pelo gerador e seus respectivos reguladores. A seguir estes componentes são descritos apresentando algumas de suas características, funcionalidades e modelos utilizados em estudos de estabilidade.

• Gerador

O gerador tem a função de converter a energia mecânica fornecida pela turbina (máquina primária) em energia elétrica, sendo que a turbina converte a fonte primária (água, carvão, gás, etc) em energia mecânica.

O gerador mais comumente empregado na geração de eletricidade (hidroelétricas e termoelétricas) são os síncronos, conseqüentemente, produzem a maior parte da energia elétrica consumida. Matematicamente, podem ser modelados de diferentes formas, levando em consideração suas características construtivas (polos lisos ou salientes) e aos efeitos que são representados no modelo (transitório e/ou subtransitório), dessa forma pode ser divididos em [13, 14]:

- Modelo de 2ª ordem (Modelo Clássico): este é o mais simples utilizado para representar máquinas síncronas. É válido apenas para estudos da ordem do período da

primeira oscilação, sendo inadequado para estudos de longa duração, onde necessita-se uma representação mais detalhada.

- Modelo de 3º Ordem (Transitório): representa as máquinas síncronas de polos salientes. Este modelo considera o efeito de magnetização/desmagnetização do circuito de excitação, possibilitando a avaliação do desempenho transitório das máquinas sujeitas a ação de controladores de excitação. Próprio para hidro-geradores.
- Modelo de 4º Ordem (Transitório): representa as máquinas síncronas de polos lisos desconsiderando os efeitos subtransitórios devido aos enrolamentos amortecedores. Inclui ainda a dinâmica transitória da reatância transitória de eixo em quadratura. Modelo próprio para representação de turbo-geradores no período transitório.
- Modelo de 5º Ordem (Subtransitório): representa as máquinas síncronas de polos salientes considerando os efeitos subtransitórios devido aos enrolamentos amortecedores e do circuito de excitação (transitória). Ou seja, tanto o período subtransitório como o transitório são representados. Empregado na representação de hidro-geradores.
- Modelo de 6º Ordem (Subtransitório): representa as máquinas síncronas de polos lisos considerando os efeitos subtransitórios devido aos enrolamentos amortecedores e os transitórios relacionados ao circuitos de excitação. Sendo estes efeitos considerados em ambos os eixos d e q. Utilizando na representação de turbo-geradores.

O detalhamento do modelo da máquina síncrona cresce de acordo com o crescimento da ordem no modelo, ou seja, nos modelos subtransitórios são considerados mais detalhes que no transitório. Portanto, de acordo com o estudo a ser realizado e a escala de tempo a ser considerada, deve-se empregar o modelo mais adequado a realização deste estudo. Para este trabalho são considerados apenas os modelos de 5ª e 6ª ordem, os quais estão representados no Apêndice B no formato de diagrama de blocos.

• Sistemas de Excitação e Reguladores de Tensão

A fundamental finalidade dos sistemas de excitação é produzir o campo principal do gerador síncrono. Além disso, realizam as funções de controle e proteção, essenciais para o desempenho satisfatório do sistema de alimentação através do controle da tensão de campo e, conseqüentemente, da corrente de campo. Uma representação genérica para os sistemas de excitação é dada pelo diagrama da Figura 4. Neste esquema a excitatriz tem função de gerar a tensão para alimentar o campo da máquina. Sabe-se que existe uma grande variedade de excitatrizes e em cada tipo há uma diferente fonte de alimentação. O controle da tensão gerada pela excitatriz é responsabilidade do regulador de tensão que realiza a comparação entre a referência e o valor medido nos terminais do gerador.

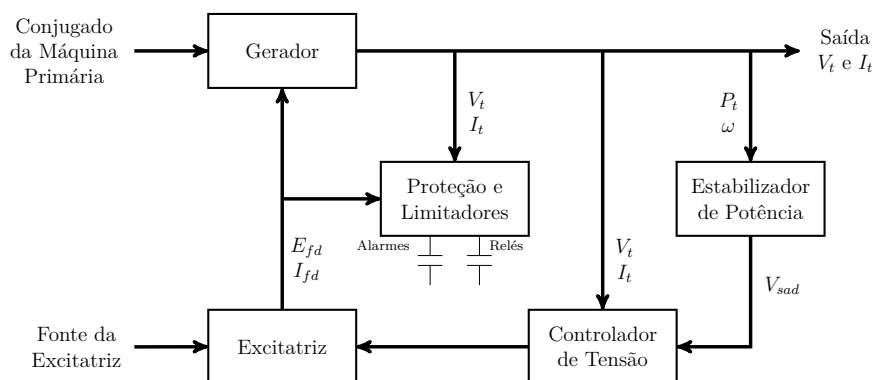


Figura 4 – Esquema genérico do sistema de excitação para um gerador síncrono.

Dessa forma, caso a tensão medida seja inferior à de referência o controlador envia sinais de controle a excitatriz para que a corrente de campo seja aumentada, e caso a tensão medida seja superior à de referência o controlador envia sinais de forma que a corrente fornecida pela excitatriz ao campo seja reduzida [12].

A malha formada pela excitatriz, gerador e controlador de tensão forma o sistema primário para a regulação de tensão. No entanto, para que o desempenho dinâmico dos reguladores de tensão seja mais adequado, adicionalmente são consideradas algumas malhas auxiliares formadas por equipamentos de proteção e estabilizadores de potência (PSS - *Power System Stabilizers*). O PSS auxilia no amortecimento das oscilações em sistema de potência e tem como sinais de entrada a velocidade angular do rotor, a frequência do sistema e a potência ativa despachada na máquina. Já os equipamentos de proteção visam manter as condições operativas do sistema dentro de limites aceitáveis e estabelecidos pelos fabricantes [12].

Como é possível observar, os sistemas de excitação tem grande importância na estabilidade dos sistemas de potência, pelo fato do nível de tensão ter influência direta no comportamento do sistema como um todo. Por isso, a velocidade de resposta do sistema de excitação, quando da ocorrência de variações de tensão, afeta diretamente a estabilidade de um sistema. Desta forma, é essencial conhecer os principais tipos de sistemas de excitação, podendo estes ser classificados como rotativo ou estático [15]:

- Excitatriz Rotativa CC (corrente contínua): utiliza gerador de corrente contínua como fonte de alimentação do sistema de excitação.
- Excitatriz Rotativa CA (corrente alternada): utiliza gerador de corrente alternada com retificadores estacionários ou rotativos como fonte de alimentação para o campo da máquina síncrona.
- Excitatriz Estática: a alimentação do sistema de excitação é realizada por meio de transformadores ou enrolamentos auxiliares dos geradores através de conversores CC.

Como mencionado anteriormente, há diversos modelos para os sistemas de excitação que podem ser utilizados em análises de estabilidade, e estes, em geral, são padronizados pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) como definidos em [15].

- **Regulador de velocidade**

Sabe-se que para a operação satisfatória dos sistemas de potência a frequência deve permanecer dentro de patamares aceitáveis. No entanto, qualquer variação súbita de carga pode resultar em variação de frequência. Esta mudança se deve à forte dependência da frequência com o balanço de potência ativa, o qual está diretamente relacionado ao balanço entre a potência mecânica fornecida pelas turbinas e as potências das cargas [12].

Os reguladores de velocidade tem papel fundamental neste balanço de potência ativa, já que influenciam diretamente o conjugado mecânico. Além disso, como o próprio nome já diz, estes dispositivos têm a função primária de regular a velocidade da máquina, resultando na regulação da frequência da própria máquina e, conseqüentemente, do próprio sistema [12]. Na Figura 5 é apresentado um esquema simplificado que exemplifica o funcionamento de um regulador de velocidade em um sistema gerador.

Basicamente, o regulador de velocidade monitora a variação de velocidade no gerador que está diretamente ligada a uma diferença entre a potência mecânica e elétrica. A fim de que seja mantido o equilíbrio entre as potências nos geradores, os reguladores de velocidade atuam controlando a válvula de vazão de combustível (turbinas térmicas) ou de água (turbinas hidráulicas) alterando a potência mecânica fornecida para a turbina.

Existem diversos tipos de reguladores que variam em termos de características construtivas e de funcionamento. No entanto, de maneira simplificada todos eles podem ser representados por dois modelos básicos [12]:

- Regulador Isócrono;

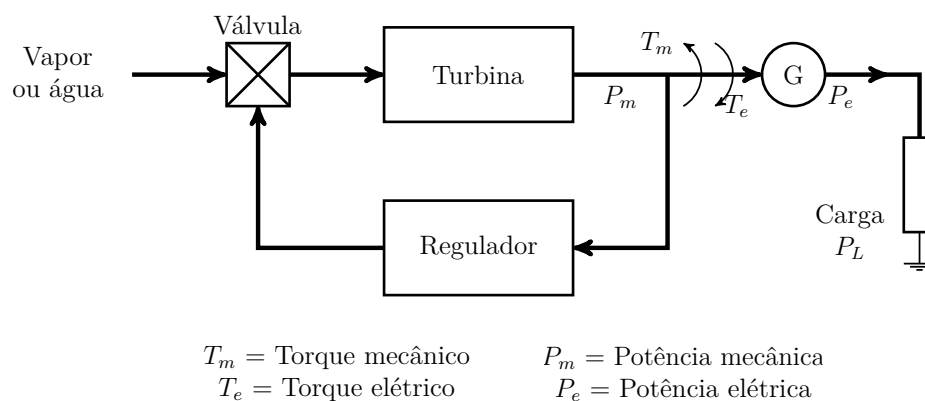


Figura 5 – Sistema gerador - regulador de velocidade.
 Fonte: [12]

- Regulador com queda de velocidade;

2.1.2 Sistema de Transmissão

No sistema de transmissão são considerados as linhas de transmissão, transformadores e sistemas de transmissão em corrente contínua. O sistema tem por função realizar as interconexões entre os inúmeros centros de geração, além de realizar a transferência dos grandes blocos de energia do sistema de geração para centros de consumo.

Os modelos considerados para os elementos passivos (linhas de transmissão e transformadores em fase e defasadores de tape fixo) são descritos no Apêndice C. Os elementos ativos (transformadores com tapes variáveis, compensadores síncronos e estáticos, e elementos FACTS) são os dispositivos para os quais devem ser considerados os seus modelos dinâmicos e são essenciais nos estudos de estabilidade de sistemas elétricos de potência.

2.2 Estabilidade em sistemas de potência

Estabilidade de sistemas de potência é a capacidade do sistema elétrico, operando em determinada condição inicial, retornar a um estado de equilíbrio após sofrer algum distúrbio. A estabilidade é uma questão multivariável pelo fato da sua resposta dinâmica ser influenciada por inúmeros dispositivos com diferentes características e respostas, além de depender da topologia da rede, das condições de operação do sistema e da forma de perturbação [16].

A estabilidade de sistemas de potência representa um importante problema para a operação segura do sistema. Diversos blecautes ocorridos em diferentes regiões do mundo mostram a grande importância dos estudos referentes a este fenômeno. Historicamente, a instabilidade transitória foi o problema de estabilidade dominante na maioria dos sistemas e, por isso, sempre recebeu grande parte da atenção nos estudos da área. Contudo, a evolução dos sistemas de potência com o crescimento contínuo das interligações, como observado no Sistema Interligado Nacional apresentado na Figura 1, o uso de novas tecnologias e controles (eletrônica de potência), e o crescimento das operações do sistema em condição de alto estresse, está fazendo com que novas formas de instabilidades do sistema sejam observadas, tais como: estabilidade de tensão, estabilidade de frequência e as oscilações inter-áreas. Por estes fatores, estes problemas ao longos dos últimos anos passaram a receber mais atenção do que no passado [16].

Com isso, obter um entendimento claro dos diferentes tipos de instabilidade e como eles estão inter-relacionados é essencial para a concepção e operação satisfatória dos sistemas de potência, além de necessário para o planejamento do sistema e definição de critérios operacionais e procedimentos do estudo. Com isso, como descrito em [16],

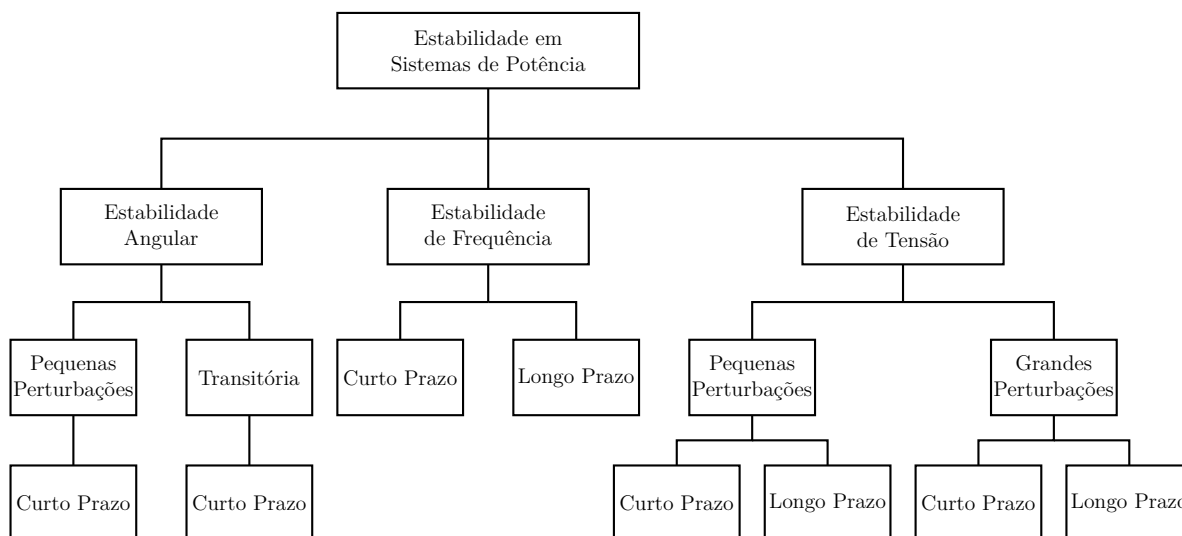


Figura 6 – Classificação de estabilidade em Sistemas de Potência.

Fonte: [16]

a classificação da estabilidade em sistemas de potência deve levar em consideração os seguintes pontos:

- A natureza física do modo resultante de instabilidade, indicada pela principal variável do sistema em que a instabilidade pode ser observada.
- A intensidade da perturbação, que influencia o método de cálculo e previsão de estabilidade.
- Os dispositivos, processos, e o tempo de atuação que deve ser levado em consideração a fim de avaliar a estabilidade.

Na Figura 6 é apresentado um quadro geral de classificação para os diversos tipos de estabilidade de acordo com as formas de identificação e o tempo de atuação, sendo descrita a seguir [16]:

- **Estabilidade Angular:** Está relacionada à habilidade das máquinas síncronas de um sistema elétrico interligado em permanecer em sincronismo após ter sido submetido a uma perturbação. Esta habilidade depende da capacidade de cada máquina alcançar ou manter o equilíbrio entre o conjugado mecânico e o eletromagnético. A perda de sincronismo pode ocorrer entre uma máquina e o sistema ou entre grupos de máquinas, que mantêm sincronismo de forma isolada.

A estabilidade angular pode ser subdividida em pequenas perturbações e transitória. A primeira subdivisão envolve a capacidade do sistema de potência manter o sincronismo sob o efeito de pequenas perturbações, ou seja, quando os distúrbios são suficientemente pequenos para que a linearização das equações que modelam o

sistema seja admissível para fins de análise. A instabilidade, em geral, está relacionada ao aumento no ângulo do rotor por falta de torque de sincronização ou de amortecimento. O período de tempo abrangido por estes estudos é na ordem de 10 a 20 segundos após a perturbação, caracterizando com uma análise de curto prazo. A estabilidade transitória refere-se a capacidade do sistema de potência manter o sincronismo após ser submetido a uma grande perturbação, como, por exemplo, um curto-circuito. A resposta do sistema envolve grandes excursões dos ângulos do rotor do gerador sendo fortemente influenciado pela relação não linear entre potência e ângulo. A instabilidade é geralmente sob a forma de um desvio angular resultante do torque de sincronização insuficiente, em geral, se manifestando na primeira oscilação. Por isso, o período de tempo para os estudos é na ordem de 3 a 5 segundos pós perturbação, podendo ainda ser estendido a 10/20 segundos, sendo caracterizado também como de curto prazo.

- **Estabilidade de Frequência:** Refere-se à capacidade do sistema de potência manter a frequência constante após um severo distúrbio que resulta num significativo desequilíbrio entre a geração e carga. Esta habilidade depende da capacidade do sistema em manter o equilíbrio entre geração e carga com a mínima perda de carga. A instabilidade ocorre sob a forma sustentada da oscilação de frequência que resultam no desligamento de unidades geradoras e/ou de cargas. A classificação de estabilidade de frequência pode ser subdividida de acordo com o tempo de atuação dos processos e dispositivos. Os tempos referente a fração de segundos corresponde aos dispositivos para alívio de carga por subfrequência, controle de geração e proteção, já para os de vários minutos refere-se, por exemplo, ao sistema de abastecimento da máquina primária e aos reguladores de tensão na carga.
- **Estabilidade de Tensão:** Refere-se à capacidade do sistema manter as tensões estáveis em todas as barras após a ocorrência de uma perturbação que afete a sua condição de operação inicial. Este tipo de estabilidade depende da capacidade do sistema em restaurar o equilíbrio entre a demanda e geração do sistema. A instabilidade de tensão pode ser observada quando as tensões em algumas barras reduzem ou crescem de maneira progressiva. Pode ser subdividida em estabilidade para pequenas e grandes perturbações.

A estabilidade para pequenas perturbações refere-se a capacidade do sistema em manter a tensão estável quando submetido a pequenas perturbações, tais como mudanças incrementais na carga. Esta forma de estabilidade é influenciada pelas características de cargas e dos controles contínuos e discretos. Para este tipo de estudo, levando em consideração as hipóteses adequadas, as equações do sistema podem ser linearizados permitindo a análise de sensibilidade que é útil na identificação de fatores que influenciam a estabilidade. No entanto, esta linearização não leva em

consideração alguns dos efeitos não lineares, principalmente, referente ao controle de tape dos transformadores OLTC (*On Load Tap Changers*), referente a discretização do tape e os atrasos de tempo para atuação. Portanto, para estes estudos é necessária a combinação de análises lineares e não lineares. Já a estabilidade para grandes perturbações refere-se a capacidade do sistema em manter as tensões em nível estável após grandes perturbações, tais como curto-circuitos, perda de geração, ou contingências de circuitos. Esta capacidade é determinada pelas características do sistema e das cargas, além da interação de controle e proteções. Nos estudos deste tipo de estabilidade é requerido a avaliação da resposta não linear do sistema de potência ao longo de um intervalo de tempo suficiente para que seja capaz de capturar a performance e as interações de dispositivos como motores, transformador comutadores e os limitadores da corrente de campo do gerador. Dessa forma, o período de estudo pode estender-se a partir de alguns segundos para dezenas de minutos.

Como destacado, o intervalo de tempo de interesse para análise da estabilidade de tensão pode variar de alguns segundos a dezenas de minutos, portanto, os fenômenos considerados podem ser tanto de curto como de longo prazo. Os de curto prazo envolvem as dinâmicas de componentes com rápida atuação, tais como motores de indução, cargas controlados eletronicamente, e conversores HVDC (*High-Voltage Direct Current*), portanto, nos estudos são considerados um intervalo de tempo da ordem de vários segundos. Já as longo prazo envolve equipamentos de atuação mais lenta, como mudanças no tap de transformadores, cargas termostáticas e limitadores da corrente de campo do gerador, dessa forma, o período de estudo estende-se a vários minutos o que torna as simulações de longo prazo tão importantes na avaliação do desempenho dinâmico do sistema.

2.3 Estudos de estabilidade em sistemas de potência

Considerando as definições de estabilidade observa-se que diferentes problemas de instabilidade podem surgir nos SEP devido as diversas formas de perturbação e de respostas dos componentes que compõem o sistema. Dessa forma, conclui-se que o conhecimento do comportamento desses diversos componentes é essencial tanto para o planejamento quanto para a operação adequada do sistema. Alcançar tais objetivos são fatores motivadores para a realização de estudos cuidadosos relacionados ao assunto de estabilidade.

Além disso, como pode ser observado na Figura 6 a classificação da estabilidade em escalas de tempo de acordo com os fenômenos que devem ser considerados permite dividir os estudos em análises estáticas e dinâmicas. A análise estática refere-se as técnicas de simulação como Fluxo de Potência, Fluxo de Potência Continuado, Fluxo de Potência Ótimo, Análise de Contingência e Análise de Sensibilidade. Estas técnicas, em geral,

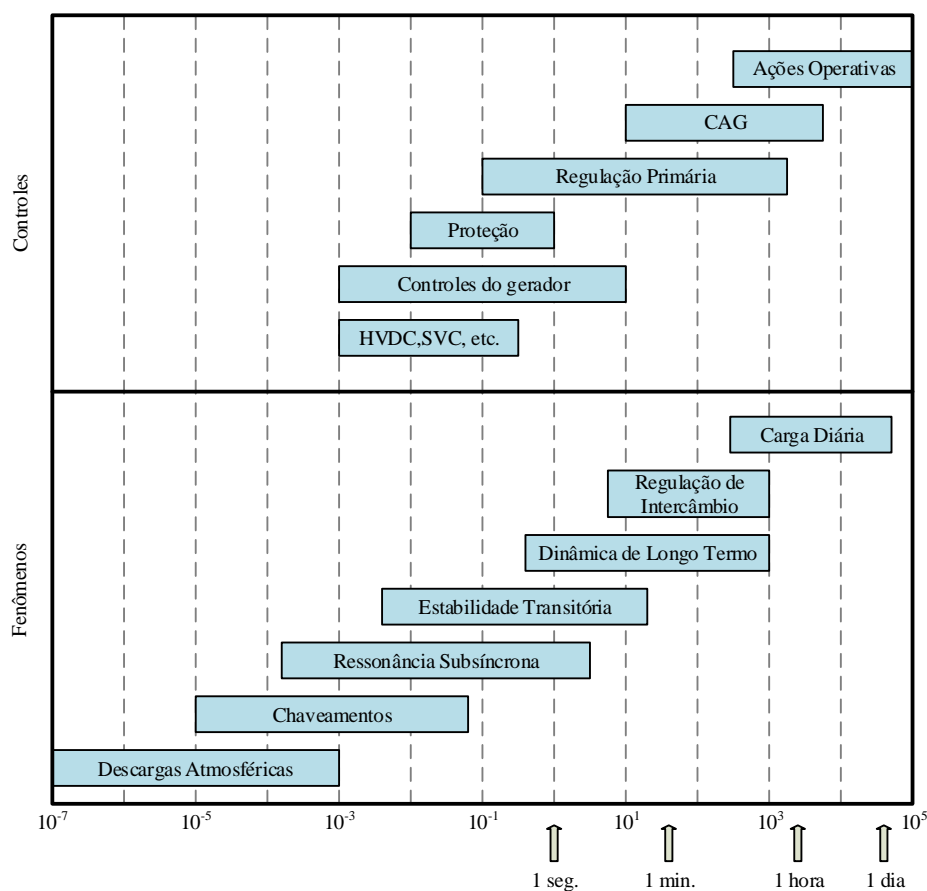


Figura 7 – Escalas de tempo.

Fonte: [17]

avaliam uma determinada condição de operação, podendo ser empregada na avaliação de um amplo conjunto de condições que podem descrever adequadamente a natureza do problema e os fatores contribuintes para a sua ocorrência. É importante destacar que nestes estudos os elementos dinâmicos são representados de forma aproximada, em geral, por meio do uso de injeções de corrente. Já a análise dinâmica é essencial para a reprodução mais adequada do comportamento dinâmico do sistema elétrico quando submetido à perturbações, sendo necessário um nível de detalhamento compatível para os componentes do sistema de acordo com os estudos (curto, médio e longo prazo) a serem realizados [17]. Conclui-se que é dentro da análise dinâmica que encontra-se o principal objetivo deste trabalho, no qual busca-se desenvolver uma ferramenta de análise que seja capaz de avaliar o desempenho dinâmico dos sistemas de potência.

Na Figura 7 é mostrado as escalas de tempo típicas dos transitórios de diversos fenômenos e controles presentes no sistema de potência. Os transitórios mais à esquerda referem-se as interações entre os campos magnéticos das indutâncias e os elétricos de capacitâncias, caracterizando os transitórios eletromagnéticos. Já aqueles mais à direita

estão relacionados a interações entre a energia mecânica armazenada nas máquinas rotativas e a energia elétrica armazenada na rede, definindo os transitórios eletromecânicos. Na parte mais central encontra-se a região de estabilidade transitória em que os efeitos dos transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos se misturam e, portanto, faz-se necessário uma representação adequada dos componentes [17].

Os estudos de estabilidade em sistemas de potência têm como principal foco a análise dos transitórios eletromecânicos, dessa forma, os efeitos dinâmicos dos transitórios eletromagnéticos são considerados já amortecidos e portanto estáveis. A principal ferramenta de análise dinâmica aplicada para estes tipos de estudos é a simulação eletromecânica completa, por meio da qual o conjunto de equações diferenciais que representam detalhadamente geradores, dispositivos de controle, cargas, entre outros elementos, são resolvidas através da integração numérica passo-a-passo considerando a rede passiva modelada na sua forma fasorial de regime permanente. Além disso, é importante lembrar que os modelos considerados para os diversos componentes são dependentes diretamente do período de simulação, por exemplo, em estudos de estabilidade transitória (poucos segundos - curta duração) os elementos que apresentam resposta lenta tais como transformadores OLTCs, controle coordenados (CAG - Controle Automático de Geração/ CCT - Controle Coordenado de Tensão), entre outros, tem os seus modelos desconsiderados. No entanto, em estudos de média e longa duração (minutos e/ou horas) estes elementos devem ser considerados incluindo ainda os modelos de caldeiras, limitadores de sobre e sub-excitação, cargas termostáticas, entre outros [5, 6, 18].

Como destacado, em simulações de média e longa duração são incluídos na análise do problema os modelos de diversos equipamentos de resposta lenta, portanto, o horizonte de simulação deve ser equivalente à essas constantes de tempo o que resulta em elevados gastos computacionais e tempos de computação. Uma alternativa a esses problemas alguns simuladores buscam utilizar técnicas de integração com passo e ordem variável que consequentemente otimiza o processo de simulação reduzindo o tempo total de computação nos horizontes de média e longa duração [19].

Contudo, ao longo do tempo foi sendo observado que os fenômenos envolvidos nas análises de estabilidade, especialmente, de tensão de médio e longo prazo são de natureza lenta (minutos e/ou horas), portanto, as dinâmicas rápidas já se manifestaram e foram amortecidas. Com isso, considerando que a atuação destas dinâmicas seja estável e instantânea, as equações diferenciais que definem estas dinâmicas podem ser substituídas pelas equações de equilíbrio correspondentes. Estas alterações deram origem a um método de simulação simplificado, conhecido na literatura como aproximação quase-estática (QSS - *Quasi Steady State*) ou Simulação Rápida [5, 6, 8].

De maneira geral, a simulação rápida seria o meio termo entre análise estática e simulação eletromecânica completa, já que o método se baseia na eliminação dos efeitos

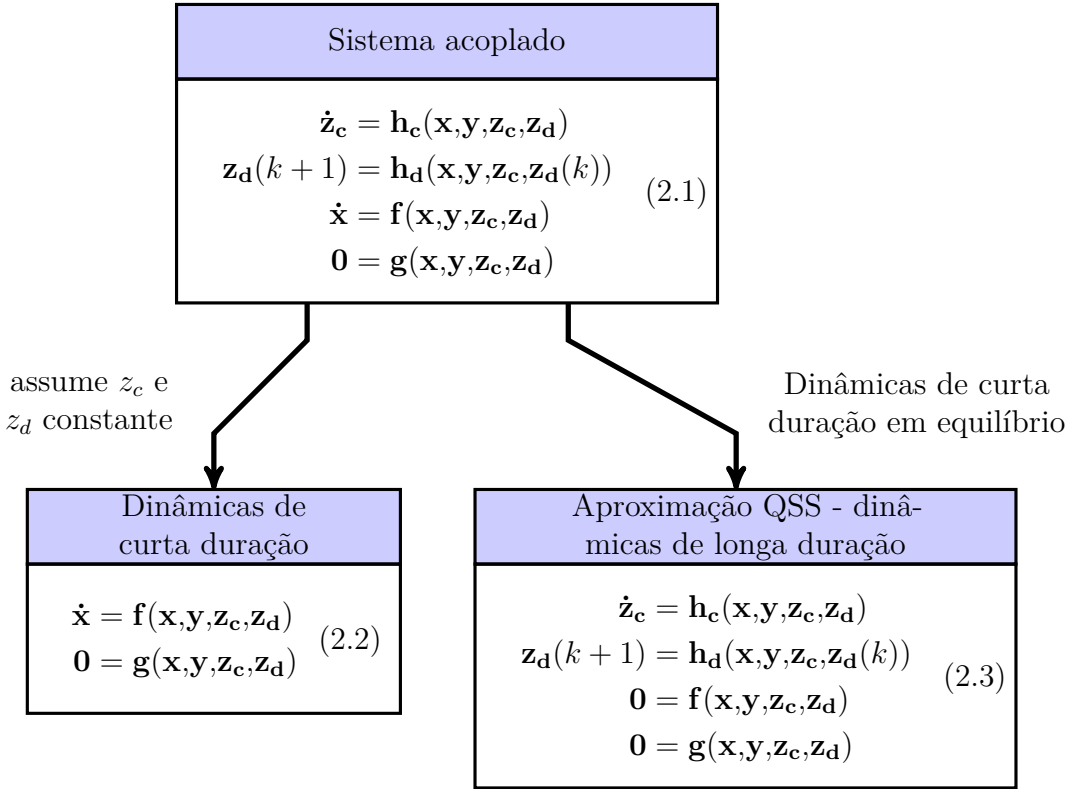


Figura 8 – Decomposição por escala de tempo e aproximação quase estática (QSS).

Fonte: [20]

transitórios rápidos dos modelos do sistema e na representação dos elementos dinâmicos lentos através de variações discretas e/ou contínuas no tempo [6, 8, 18].

Apesar de não representar todas as dinâmicas presentes no problema, a trajetória da solução da simulação rápida é uma aproximação adequada da resposta real do sistema, conseguindo representar ainda os efeitos da atuação de elementos como LTCs, limitadores de sub e sobre-excitação, entre outros. Além disso, como os transitórios de curta duração são considerados instantâneos e estão representadas apenas dinâmicas de média/longa duração, o passo de tempo utilizado pode ser elevado reduzindo o esforço e o tempo computacional gasto para a simulação do sistema. Dessa forma, a utilização de uma ferramenta capaz de realizar a simulação rápida torna-se essencial, principalmente, nas análises de segurança de tensão, inclusive, em tempo real [8].

Em resumo, observando as características destacadas anteriormente, o problema de estabilidade pode ser dividido como descrito na Figura 8, onde é levada em consideração a escala de tempo dos fenômenos avaliados. O sistema acoplado definido pela equação (2.1) representa o problema completo, no qual tanto as dinâmicas rápidas quanto as lentas são representadas. Em (2.1), \mathbf{y} representa as variáveis algébricas (tensões terminais), \mathbf{x} representa as variáveis relacionadas aos fenômenos de curto prazo (tensões internas das máquinas), \mathbf{z}_d representa as variáveis de estado discretas de médio e longo prazos (posição de tap do LTC), \mathbf{z}_c representa as variáveis de estado contínuas de médio e longo

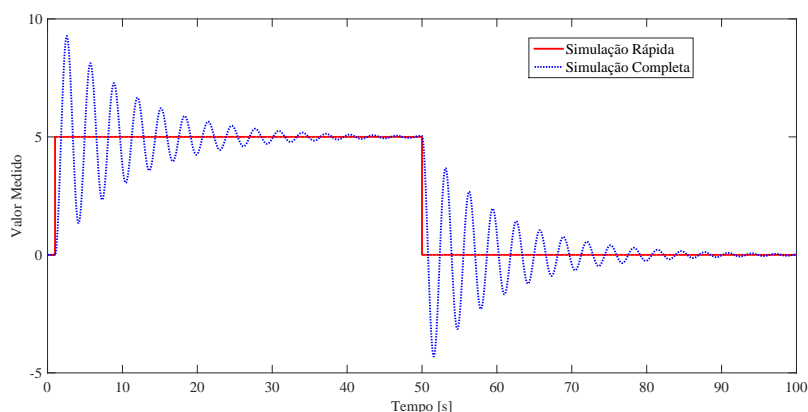


Figura 9 – Simulação Completa x Simulação Rápida

prazos (variáveis associadas à dinâmica do controle secundário de tensão), \mathbf{h}_c representa as funções contínuas para fenômenos de médio e longo prazos, \mathbf{h}_d representa as funções discretas para fenômenos de médio e longo prazos, \mathbf{g} representa as funções algébricas da rede, \mathbf{f} representa as funções diferenciais para variáveis de fenômenos de curto prazo.

O conjunto definido em (2.2) modela o problema para as análises de curto prazo (alguns segundos), o qual abrange apenas as dinâmicas rápidas. Neste caso, as dinâmicas lentas, tanto discretas quanto contínuas, são consideradas constantes pelo fato de não terem atuado dentro do período de tempo da simulação e, portanto, as equações referentes a essas dinâmicas são desprezadas. Por fim, o conjunto (2.3) define o problema para o qual as dinâmicas rápidas torna-se estáveis e instantâneas, já que suas equações diferenciais são substituídas pelas equações de equilíbrio correspondentes, e são mantidas as dinâmicas lenta, definindo o problema para a aproximação quase estática.

De forma a exemplificar, a Figura 9 apresenta comparativamente os resultados que seriam obtidos para a simulação completa e rápida simplificada. Como previsto, a única diferença entre os resultados é no período transitório já que na simulação rápida são desconsideradas algumas dinâmicas das variáveis de estado e estas passam a responder de forma instantânea, ainda é importante observar que o valor em regime permanente é igual. Já na Tabela 1 é feito um breve resumo das equações apresentadas na Figura 8 relacionando-as as escalas de tempo e aos elementos do sistema de potência que modelam [20].

O conjunto algébrico-diferencial que modela o sistema de potência pode ser solucionado através de duas técnicas, denominadas solução alternada e simultânea.

Em resumo, no método alternado as equações diferenciais são resolvidas separadamente das algébricas em cada passo de tempo por meio de uma alternância entre os conjuntos de equações, vale ressaltar que as respectivas soluções podem ser iterativas ou não. As duas principais características a serem destacadas na abordagem particionada

Tabela 1 – Resumo do modelo dinâmico.

Tipo	Equação	Exemplos
Instantâneo	$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d)$	Rede
Curto Prazo	$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d)$	Geradores Síncronos e reguladores; motores de indução; elementos FACTS (HVDC, SVC)
Médio/Longo Prazo	$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d)$ $\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k))$	OLTCs ; OXLs; controle secundário de tensão; controle carga-frequência.

são: a) o método de integração e o de solução das equações algébricas (rede) podem, em princípio, serem escolhidos de forma independente um do outro, e b) é sempre possível, através da utilização de técnicas de extrapolação/interpolação resolver a rede apenas a cada alguns passos de integração. Esta última é geralmente o caso em cálculos de estabilidade a médio e longo prazo, embora seja muito menos comum no estudos de curto prazo. Além disso, os métodos de solução particionada são mais flexíveis, apresentam maior facilidade de organização e permitem a introdução de uma série de simplificações que aceleram a solução. No entanto, este método pode incorrer em grandes erros numéricos devido ao interfaceamento entre as equações diferenciais e algébricas. Por fim, é importante destacar que em grande parte dos programas de simulação dinâmica descritos na literatura são baseados no métodos de solução particionadas [2, 14].

Na abordagem simultânea é aplicado um método de integração numérica sobre as equações diferenciais convertendo-as em equações das diferenças idêntico ao realizado para o alternado. Posteriormente, são combinadas às outras equações algébricas formando um único sistema que deve ser solucionado por meio da aplicação de um método numérico (Ex: Método de Newton). Uma característica inerente a este método é que tanto as equações algébricas quanto as diferenciais são resolvidos com a mesma frequência, evitando assim os possíveis erros numéricos de interface entre as equações algébricas e diferenciais característicos de método alternado. Além disso, a aplicação do método de Newton juntamente com métodos de integração implícitos torna possível o emprego de grandes passos quando não há variações bruscas nas variáveis. Ainda pode ser empregado o chamado método de *Dishonest Newton*. Ao considerar ambas as características (grandes passos de integração e *Dishonest Newton*) é possível acelerar os cálculos e, portanto, reduzir os gastos computacionais [2, 14].

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas características dos SEPs, mostrando alguns detalhes sobre os sistema de geração e transmissão, além de descrever os modelos dos dispositivos que podem ser considerados na avaliação do seu comportamento dinâmicos.

Além disso, são descritos conceitos referentes a estabilidade em SEP, apresentando definições e características para as estabilidades de tensão, frequência e angular. Ainda são descritas alguns pontos importantes sobre os estudos de estabilidade destacando a simulação dinâmica dos sistemas e as considerações que devem ser feitas quanto aos estudos de curto, médio e longo prazo.

Por fim, são descritas de maneira simplificada as soluções alternada e simultânea para as equações algébrico-diferenciais que modelam o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos de potência. Sendo necessário destacar que para o desenvolvimento deste trabalho empregasse o método simultâneo.

Formulação Matemática

Neste capítulo são discutidos aspectos relacionados à modelagem de sistemas dinâmicos de forma genérica, incluindo a formulação matemática para o cálculo das condições iniciais das variáveis de estado e para a simulação no tempo, além de estratégias adotadas na eliminação de dinâmicas e na análise de descontinuidades. Ainda são revistas técnicas de solução numérica de sistemas de equações algébrico-diferenciais. Posteriormente, os aspectos referentes a formulação matemática adotada e descrita ao longo do capítulo são demonstrados por meio de dois sistemas tutoriais, um linear e outro não linear. Por fim, são apresentados os modelos matemáticos e algumas considerações empregadas com relação aos componentes dos SEP.

3.1 Representação de Sistemas Dinâmicos

Os SEP, assim como qualquer outro sistema dinâmico, são modelados matematicamente por um conjunto de equações algébrico-diferenciais, geralmente não-lineares, como representado em (3.1).

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \end{cases} \quad (3.1)$$

Onde:

- x**: Vetor com n variáveis de estado;
- y**: Vetor com m variáveis algébricas;
- u**: Vetor com k variáveis de entrada do sistema;
- t : Tempo;
- f**: Vetor com n equações diferenciais;
- g**: Vetor com m equações algébricas.

A solução de (3.1), em geral, não é obtida de maneira explícita, fazendo-se necessário o emprego de métodos de integração numérica, tais como: Trapezoidal, Euler, Gear, Runge-Kutta, entre outros. O emprego destes métodos resulta na conversão das equações diferenciais em equações de diferenças, formando um conjunto puramente algébrico. Contudo, este novo conjunto não é necessariamente linear, requerendo, assim, um método numérico para a sua solução, como o de Newton-Raphson [2].

As características referentes ao processo de solução do conjunto algébrico-diferencial são descritas mais detalhadamente ao longo das próximas seções deste capítulo, onde são apresentadas as formulações matemáticas e estratégias adotadas que visam generalizar e flexibilizar as diversas etapas de desenvolvimento do trabalho.

3.2 Representação Matemática de Sistemas Dinâmicos

Como destacado anteriormente, o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos de potência, em geral, são definidos matematicamente segundo (3.1). No entanto, para alguns elementos que compõem o sistema, principalmente os controladores, adota-se inicialmente uma formulação definida por funções de transferências no domínio de Laplace, como definido em (3.2) [21].

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (3.2)$$

Onde:

$U(s)$: Sinal de excitação no domínio de Laplace;

$Y(s)$: Sinal de saída no domínio de Laplace;

$G(s)$: Função de transferência no domínio de Laplace.

Para estes elementos torna-se necessário adequar o modelo matemático para uniformizar o problema, ou seja, todas as equações que modelam o comportamento do sistema devem estar expressas no formato definido (3.1). Alcançar essa uniformidade representa a possibilidade de generalização da modelagem do sistema para os diversos estudos. Além disso, destaca-se que quando as equações estão definidas como um conjunto de equações algébrico-diferenciais é observado que os elementos integradores estão explícitos. Obter esta característica significa ter um modelo flexível que auxilia tanto na solução das equações quanto para a implementação computacional.

Tal flexibilidade tornar-se-á mais clara ao longo das próximas seções, onde serão destacadas as estratégias para o cálculo das condições iniciais, da formulação para simulação e da eliminação de dinâmicas. Posteriormente, no Capítulo 4 serão apresentadas as características da ferramenta computacional PySEP desenvolvida onde será demonstrada a importância de explicitar os elementos integradores.

Com isso, quando parte ou todo o sistema for definido por uma função de transferência como escrito em (3.2), o passo inicial é determinar as equações equivalentes para o formato definido em (3.1). Para exemplificar a conversão é utilizada a função de transferência representada na equação (3.3) referente a um bloco de avanço-atraso.

$$Y(s) = \left(\frac{As + B}{Cs + D} \right) U(s) \quad (3.3)$$

Dessa forma, utilizando a descrição realizada no Apêndice A para representação de sistemas dinâmicos no espaço de estados, obtêm-se o conjunto de equações em (3.4).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \left(\frac{BC - AD}{C^2}\right)u(t) - \left(\frac{D}{C}\right)x(t) \\ y(t) = \left(\frac{A}{C}\right)u(t) + x(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

Onde:

$x(t)$: Variável de estado intermediária;

$u(t)$: Sinal de entrada;

$y(t)$: Sinal de saída;

t : Tempo

Observa-se que com a representação matemática de sistemas dinâmicos no espaço de estado são definidas equações diferenciais com ordem igual a um, explicitando todos os elementos integradores. O conjunto algébrico-diferencial pode ser descrito através de um diagrama de blocos definido, inicialmente, por elementos básicos, tais como: integradores, somadores e ganhos. Estes blocos são suficientes para a representação de sistemas lineares, contudo, para os não lineares é necessário considerar novos elementos que sejam capazes de descrever as não linearidades. No entanto, num primeiro momento por questão simplicidade e por não afetar o entendimento do problema as estratégias adotadas são descritas considerando apenas sistemas lineares. Posteriormente, na Seção 3.6 serão descritas as peculiaridades dos sistemas não lineares, sendo que na Seção 3.7 a modelagem para este tipo de sistema é exemplificada por meio de um exemplo tutorial.

Na sequência, é feita a representação das equações algébrico-diferenciais do sistema dinâmico por meio de diagrama de blocos e, posteriormente, em diagramas de fluxo de sinais. A definição de tais diagramas é essencial para se compreender a construção do conjunto de equações que serão empregadas na solução do sistema dinâmico.

3.2.1 Diagrama de Blocos

Os diagramas de blocos tem por objetivo descrever as funções desempenhadas por diferentes componentes que, juntos, definem a estrutura global do sistema. No caso dos sistemas lineares, os componentes que desempenham tal papel são: os integradores, somadores e ganhos. Já para os não lineares surgem novos elementos com características peculiares, tais como: multiplicadores, divisores, operações trigonométricas, entre outros. As características dos não lineares serão discutidas posteriormente neste trabalho.

A representação do sistema no formato de diagramas de blocos permite visualizar com maior facilidade a sua operação funcional do que observando o próprio sistema físico.

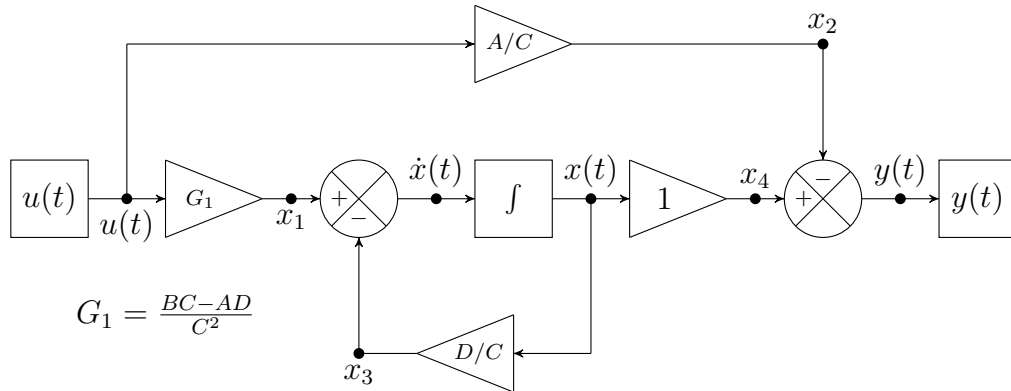


Figura 10 – Diagrama de blocos para a função definida em (3.4).

Além disso o diagrama contém toda a informação relativa ao comportamento dinâmico do sistema, embora, não possua nenhuma informação sobre a sua construção física [21].

Observando estas características e considerando como exemplo as equações definidas em (3.4) é possível construir o diagrama de blocos representado na Figura 10. Analisando-a observa-se que o sistema descrito é composto por um elemento integrador, quatro ganhos e dois somadores. No entanto, vale ressaltar a possibilidade de se realizar simplificações no problema, reduzindo o número de componentes e/ou o número de variáveis do problema. Esta característica pode ser melhor observada quando na composição das equações a serem resolvidas que são resultado do diagrama de fluxo de sinais descrito na próxima seção.

3.2.2 Diagrama de Fluxo de Sinais

Os diagramas de fluxos de sinais consistem em grafos orientados que representam um conjunto de equações. Os nós destes grafos representam cada uma das variáveis do sistema e tem como função a adição de todos os sinais incidentes ao nó e a transmissão do sinal total obtido a todos os ramos que saem. Os ramos que conectam os nós realizam operações sobre o sinal, além de estabelecer um sentido para o fluxo através da seta colocada no ramo. Os nós podem ser classificados segundo a seguinte divisão [22]:

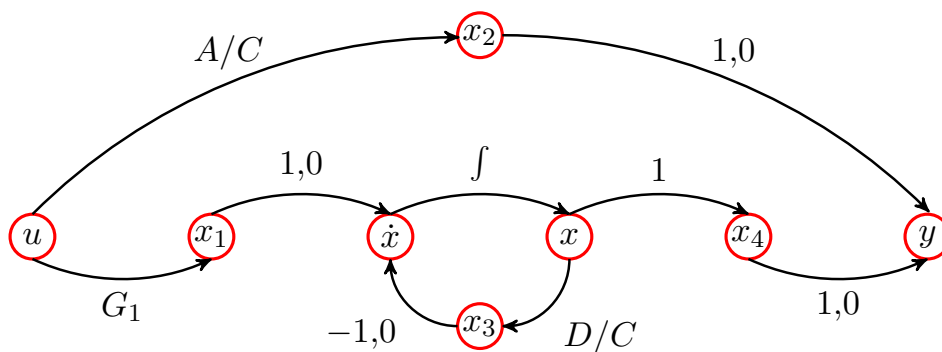


Figura 11 – Diagrama de fluxo de sinais para o diagrama de blocos definido na Figura 10.

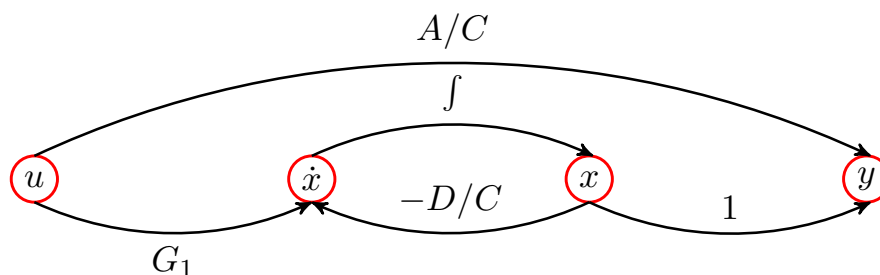


Figura 12 – Diagrama de fluxo de sinais simplificado.

- Nós-fontes: representam variáveis independentes e possuem apenas ramos saindo.
- Nós-sumidouro: representam variáveis dependentes e apresentam unicamente ramos incidentes.
- Nós-mistos: são nós que possuem ramos saindo e chegando.

Utilizando o diagrama de blocos definido na Figura 10 é possível construir um diagrama de fluxo de sinais equivalente como mostrado na Figura 11. Vale lembrar que essa construção é direta por haver apenas elementos lineares compondo o sistema.

Observa-se que pela conversão direta são definidos oito nós e nove ramos, o que resultaria em oito variáveis e oito equações. No entanto, devido a estrutura do diagrama de blocos da Figura 10, algumas simplificações possibilitam a redução do problema como mostrado na Figura 12. Com isso, visualiza-se que os nós auxiliares x_1 , x_2 , x_3 e x_4 são desnecessários.

Avaliando o fluxo de sinais obtido e utilizando as definições para os tipos dos nós, tem-se:

- Nó fonte: u
- Nó sumidouro: y
- Nós mistos: x e \dot{x}

Portanto, considerando o diagrama de fluxo de sinais da Figura 12 e suas características é possível obter as equações que modelam o sistema, como mostrado em (3.5):

$$\begin{cases} u = u(t) \\ \dot{x} = \left(\frac{BC - AD}{C^2}\right)u - \left(\frac{D}{C}\right)x \\ x = \int \dot{x} dt \\ y = \left(\frac{A}{C}\right)u + x \end{cases} \quad (3.5)$$

Onde:

- u, x, \dot{x}, y : Nós definidos no diagrama de fluxo de sinais;
- $u(t)$: Função de entrada a ser aplicada ao nó u ;
- t : Tempo.

Pode-se notar que a partir da avaliação conjunta dos diagramas de blocos e de fluxo de sinais é possível modelar um dado sistema de forma genérica. Na sequência serão discutidas características e estratégias decorrentes da modelagem de sistemas através de diagramas de fluxo de sinais a partir dos diagramas de blocos.

3.3 Estratégia para Cálculo das Condições Iniciais

O cálculo das condições iniciais visa determinar os valores iniciais das variáveis internas do modelo a partir de uma determinada condição de contorno. Ou seja, conhecidas determinadas grandezas, como entrada e/ou saída, busca-se os valores de todas as outras variáveis que descrevem o sistema.

Em geral, as condições de contorno adotadas definem um ponto de operação no qual o sistema encontra-se em regime permanente. Portanto, nesta condição considera-se que a variação das variáveis de estado são nulas. Sendo assim, em regime permanente, o sinal aplicado na entrada do elemento integrador deve ser nula. Esta característica também equivale às definidas para os estudos que visam eliminar determinadas dinâmicas na avaliação do comportamento dinâmico do sistema [23].

Assim sendo, na sequência será apresentada a formulação empregada para o cálculo das condições iniciais, e posteriormente, as considerações a serem adotadas para a eliminação de dinâmicas.

3.3.1 Cálculo das Condições Iniciais

Como destacado anteriormente, para o cálculo das condições iniciais a variação das variáveis de estado são nulas, portanto, o conjunto de equações definido em (3.1) pode ser reescrito considerando $\dot{\mathbf{x}} = 0$, que resulta na substituição das equações diferenciais por

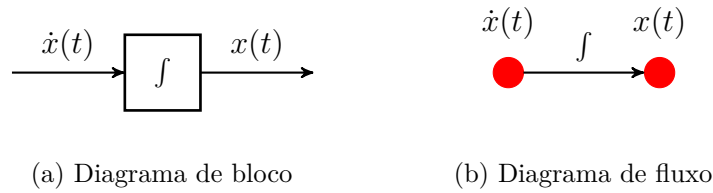


Figura 13 – Formulação do elemento integrador com a equação diferencial mantida: (a) Diagrama de bloco (b) Diagrama de fluxo

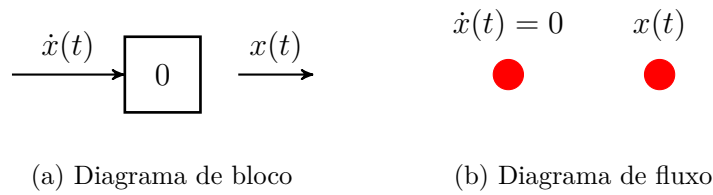


Figura 14 – Formulação do elemento integrador para cálculo das condições iniciais: (a) Diagrama de bloco (b) Diagrama de fluxo

suas equações algébricas de equilíbrio correspondentes, como representado em (3.6).

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \end{cases} \quad (3.6)$$

Partindo desse pressuposto, originalmente para descrever uma equação diferencial no formato de diagramas de blocos e de fluxo de sinais tem-se, respectivamente, as Figuras 13(a) e 13(b). Portanto, para tornar a variação da variável de estado nula, os integradores são retirados e substituídos como indicado na Figura 14, onde $\dot{x}(t)$ é zerado e a saída $x(t)$ é deixada flutuante para que seja determinada pela solução do conjunto de equações.

Sendo assim, de acordo com o exposto na Subseção 3.2.2, quando a equação diferencial é mantida no problema o equacionamento para o ramo referente ao bloco integrador é definida em (3.7a), enquanto, na formulação para o cálculo das condições iniciais, assume-se (3.7b).

$$x = \int \dot{x} dt \quad (3.7a)$$

$$\dot{x} = 0 \quad (3.7b)$$

Como a formulação proposta busca generalizar a modelagem dos sistemas dinâmicos, as condições impostas ao integrador, de sinal de entrada nulo e o de saída flutuante são definidas como propriedades atribuídas ao próprio bloco integrador. Definir estas características torna-se importante para a implementação computacional do bloco integrador, que será apresentada no Capítulo 4.

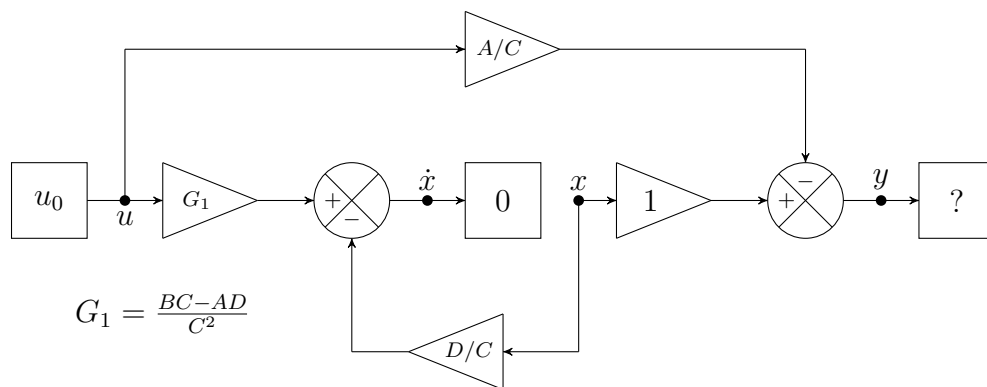
A partir destas considerações para o elemento integrador é possível proceder com o cálculo das condições iniciais segundo um condição de contorno pré-estabelecida. Contudo, esta condição pode ser caracterizada quando são conhecidos os sinais de entrada e/ou de saída do sistema. Sendo assim, pode-se dividir o problema em dois. Num primeiro momento todos os sinais de entrada são conhecidos e no segundo quando algum sinal de entrada é desconhecido.

Para descrever a modelagem a ser adotada em cada caso é utilizado como exemplo o sistema definido pela função de transferência (3.3) e representado pelo diagrama de blocos e de fluxo de sinais das Figuras 10 e 12, respectivamente.

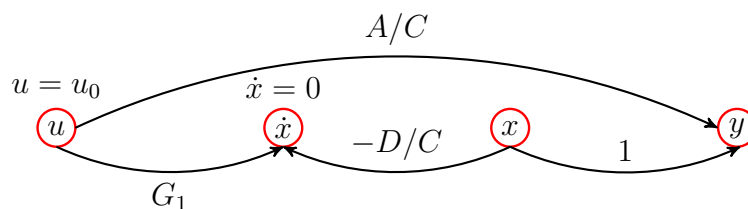
• Entradas Conhecidas

Para este caso a condição de contorno define $u(0) = u_0$. Nesta situação, torna-se necessário obter as condições em todos os outros nós (\dot{x} , x , y). Como todas as entradas são conhecidas, pode-se aplicar diretamente as considerações destacadas anteriormente obtendo o diagrama de blocos e de fluxo de sinais das Figuras 15(a) e 15(b), respectivamente.

Definida a estrutura do problema e considerando que o sinal resultante num nó é



(a) Diagrama de blocos



(b) Diagrama de fluxo

Figura 15 – Cálculo de condições iniciais com entrada conhecida: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo

igual ao somatório de todos os sinais que chegam, tem-se as equações em (3.8):

$$\begin{cases} u = u_0 \\ \dot{x} = \left(\frac{BC - AD}{C^2}\right)u - \left(\frac{D}{C}\right)x \\ \dot{x} = 0 \\ y = \left(\frac{A}{C}\right)u + x \end{cases} \quad (3.8)$$

Com as equações acima, a solução pode ser obtida por meio de métodos numéricos. O sistema exemplo empregado apresenta formulação matemática linear e, portanto, pode ser resolvido utilizando métodos numéricos para solução de sistemas lineares. No entanto, como o principal objetivo do presente trabalho é generalizar tanto a modelagem quanto a solução de sistemas dinâmicos associados a sistemas elétricos de potência, que em geral são não-lineares, faz-se necessário o emprego de métodos apropriados à solução de tais sistemas. Por estas razões, foi adotado o método de Newton-Raphson, o qual é detalhado no Apêndice G.

• Saídas Conhecidas

Neste segundo caso, a condição de contorno define $y(0) = y_0$. Diferentemente da situação anterior, o sinal de saída y é conhecido e o da entrada u é desconhecido. Nestas situações, adota-se que quando qualquer sinal de entrada é desconhecido, o bloco de entrada deve ser substituído por uma composição de um bloco de entrada com valor nulo e um bloco integrador, como representado no diagrama da Figura 16. É necessário observar que as mudanças realizadas resultam na criação de um novo nó, x_a , o qual tem o objetivo de auxiliar na definição das equações que modelam o problema.

Realizada a expansão do diagrama prossegue-se para a etapa de eliminação dos blocos integradores resultando nos diagramas das Figuras 17(a) e 17(b). Estes diagramas levam às equações em (3.9). Verifica-se, no entanto, que algumas equações são linearmente

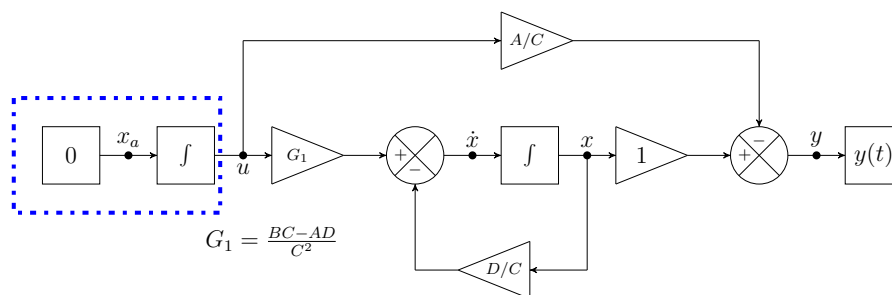
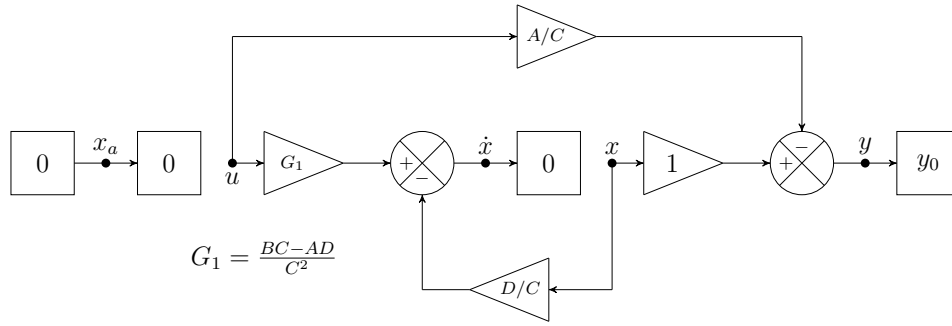
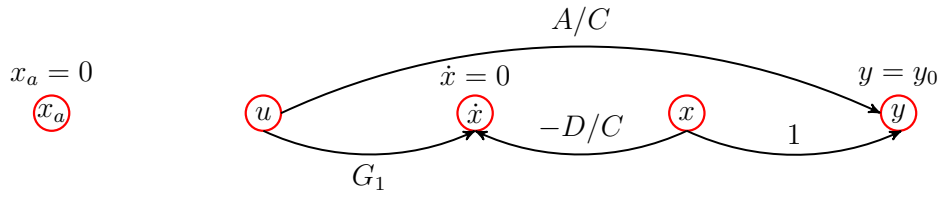


Figura 16 – Caso 2 - Diagrama de blocos modificado.



$$G_1 = \frac{BC-AD}{C^2}$$

(a) Diagrama de blocos



(b) Diagrama de fluxo

Figura 17 – Cálculo de condições iniciais com saída conhecida: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo

dependentes (LD) e, portanto, não é possível obter uma solução.

$$\left\{ \begin{array}{ll} x_a = 0 & (x_a) \\ x_a = 0 & (u) \\ \dot{x} = \left(\frac{BC-AD}{C^2}\right)u - \left(\frac{D}{C}\right)x & (\dot{x}) \\ \dot{x} = 0 & (x) \\ y = \left(\frac{A}{C}\right)u + x & (y) \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Para contornar este problema, uma das equações LD deve ser substituída pela equação da condição de contorno. Para isto atribui-se novas características ao integrador por meio das quais a equação (3.10a) referente ao nó u é substituída por (3.10b).

$$x_a = 0 \quad (3.10a)$$

$$y = y_0 \quad (3.10b)$$

Como resultado, obtêm-se o conjunto definido em (3.11) que deve ser solucionado

aplicando um método numérico idêntico ao primeiro caso.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_a = 0 \quad (x_a) \\ y = y_0 \quad (u) \\ \dot{x} = \left(\frac{BC - AD}{C^2} \right) u - \left(\frac{D}{C} \right) x \quad (\dot{x}) \\ \dot{x} = 0 \quad (x) \\ y = \left(\frac{A}{C} \right) u + x \quad (y) \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Dessa forma, definida a estratégia para cálculo das condições iniciais ao estabelecer que variações das variáveis de estado são nulas, esta pode ser estendida à eliminação de dinâmicas, como descrito a seguir.

3.3.2 Eliminação de Dinâmicas

Considerando o conjunto definido em (3.1), pode-se expandir a parcela das equações diferenciais em duas partes como indicado abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \\ \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Onde:

- \mathbf{x}_1 e \mathbf{x}_2 : Vetores com variáveis de estado;
- \mathbf{f}_1 e \mathbf{f}_2 : Funções vetoriais dos estados do sistema;

A eliminação de dinâmicas consiste na desconsideração da variação da variável de estado x em função do tempo, ou seja, faz \dot{x} nulo. Generalizando a definição para a equação (3.12) e considerando que as variáveis de estados a serem eliminadas estejam agrupadas em \mathbf{x}_2 , faz-se que taxa de variação destas variáveis seja igual a zero ($\dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{0}$). Dessa forma, define-se (3.13), onde as equações \mathbf{f}_2 tornam-se equações algébricas de equilíbrio.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{0} = \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{y}, \mathbf{u}, t) \end{array} \right. \quad (3.13)$$

A estratégia de eliminação de dinâmicas pode ser aplicada em diversos estudos independente da área. Em engenharia elétrica são muito empregados em estudos desde curto ao longo prazo nos quais, em geral, dinâmicas de curta duração (pequenas constantes de tempo) são desconsideradas e apenas as dinâmicas de média e/ou longa duração são retidas de acordo com o estudo a ser realizado. Exemplos destes estudos são os

de estabilidade de tensão, angular clássica e frequência [5, 8, 20]. Vale ressaltar que a desconsideração de alguma dinâmica é possível apenas quando o seu comportamento é estável. Além disso, a variável de estado passa a responder de forma instantânea a qualquer perturbação no sistema, ou seja, torna-se uma variável algébrica [8].

De forma a exemplificar este procedimento, retorna-se ao sistema (3.3). Originalmente as equações com as dinâmicas mantidas estão representadas em (3.5), enquanto (3.14) representa o conjunto de equações que desconsidera a dinâmica.

$$\begin{cases} u = u(t) \\ \dot{x} = \left(\frac{BC - AD}{C^2}\right)u - \left(\frac{D}{C}\right)x \\ \dot{x} = 0 \\ y = \left(\frac{A}{C}\right)u + x \end{cases} \quad (3.14)$$

Definidas as estratégias para o cálculo das condições iniciais e eliminação de dinâmicas, o próximo passo é definir as equações que modelam o problema do ponto de vista de simulação de forma a se obter o seu comportamento dinâmico dada uma perturbação de interesse.

3.4 Estratégia de Simulação

Na etapa de simulação, inicialmente, busca-se determinar as equações que modelam o comportamento dinâmico do sistema para que, posteriormente, sejam empregados métodos numéricos convenientes que permitam solucioná-las. Para exemplificar o procedimento, será utilizado o mesmo sistema da Seção 3.3 definido pela função de transferência (3.3) e representado pelos diagramas de blocos e de sinais das Figuras 10 e 12, respectivamente. As definições para determinar as equações foram especificadas na Subseção 3.2.2 e resultaram no conjunto definido em (3.5).

Uma vez modelado o sistema, emprega-se métodos de integração numérica que transformam as integrais em equações de diferenças, resultando um sistema de equações puramente algébrico, para o qual é empregado um método numérico que seja capaz de solucioná-lo. Para o desenvolvimento deste trabalho, é empregado o método de integração trapezoidal e o método de Newton-Raphson. Estes métodos são apresentados nos Apêndices F e G, respectivamente.

3.4.1 Métodos de Integração Numérica

Na literatura, diversas são as técnicas que podem ser empregadas para a solução de equações diferenciais. Na área de engenharia, os principais métodos conhecidos e empregados são: Trapezoidal, Euler, Gear, Runge-Kutta [1, 2, 24].

Como existem diversos métodos e cada um apresenta características próprias, a escolha do método mais adequado na solução depende de vários fatores, sendo necessário levá-las em consideração para avaliar como podem influenciar na solução. Além disso, outro ponto importante é observar as características inerentes ao problema a ser resolvido [2].

Dessa forma, a escolha do método para calcular a resposta dinâmica do sistema deve atender alguns requisitos que visam tornar o processo mais flexível e eficiente, tais como [2, 4]:

- Precisão suficiente para propósitos de engenharia.
- Robustez numérica que refere-se à capacidade de suportar descontinuidades mantendo a estabilidade dos métodos de integração e a convergência dos processos iterativos.
- O emprego de grandes passos de integração mantendo a estabilidade numérica do método, principalmente, quando for utilizado para estudos de médio e longo prazo.

Os métodos de solução de equações diferenciais podem ser divididos de acordo com características como:

- Passo fixo ou variável;
- Único ou múltiplos passos;
- Explícitos ou implícitos;
- Aproximação por derivação ou integração;
- Técnicas de discretização.

Observando esses requisitos, as características dos diversos métodos e do problema de estabilidade de sistema de potência constatou-se que o emprego do método trapezoidal seria eficaz e eficiente para resolver o conjunto de equações algébrico-diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do sistemas.

No método trapezoidal pode-se destacar o fato de ser implícito, além de favorecer o emprego de maiores passos de integração em comparação à outros métodos por apresentar uma boa estabilidade numérica e ainda, a implementação computacional do método é relativamente simples. Além disso, é amplamente consolidado e empregado na literatura em estudos dinâmicos, principalmente, dos sistemas elétricos de potência [1, 2, 8].

Somados a todos os fatores supracitados, o fato do programa ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) empregar o método trapezoidal também teve influência na sua escolha como método de solução das equações diferenciais [25].

3.4.2 Aplicação dos métodos numéricos

Para demonstrar o empregado do método de integração trapezoidal utiliza-se o problema apresentado nas seções anteriores e que resultaram nas equações descritas em (3.15).

$$\begin{cases} u = u(t) & (3.15a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x} = \left(\frac{BC - AD}{C^2} \right) u - \left(\frac{D}{C} \right) x & (3.15b) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \int \dot{x} dt & (3.15c) \end{cases}$$

$$\begin{cases} y = \left(\frac{A}{C} \right) u + x & (3.15d) \end{cases}$$

Aplicando o método apresentado no Apêndice F com passo de integração igual a Δt em (3.15c) é obtida (3.16).

$$x(t) = x(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [\dot{x}(t - \Delta t) + \dot{x}(t)] \quad (3.16)$$

Organizando (3.16) visando separar os termos dependentes de t e $t - \Delta t$, resulta em (3.17) abaixo, onde $\text{hist}(t)$ é a função histórica resultante do método trapezoidal.

$$x(t) - \frac{\Delta t}{2} \dot{x}(t) = \text{hist}(t) \quad (3.17a)$$

$$\text{hist}(t) = x(t - \Delta t) - \frac{\Delta t}{2} \dot{x}(t - \Delta t) \quad (3.17b)$$

Com isso substituindo (3.17a) em (3.15) e rearranjando-a no formato a ser resolvido pelo método numérico $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, tem-se a equação (3.18) no instante de tempo t .

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_1(\mathbf{x}) \\ g_2(\mathbf{x}) \\ g_3(\mathbf{x}) \\ g_4(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(t) - u(t) \\ \dot{x}(t) - \left(\frac{BC-AD}{C^2} \right) u(t) + \left(\frac{D}{C} \right) x(t) \\ x(t) - \left(\frac{\Delta t}{2} \right) \dot{x}(t) - \text{hist}(t) \\ y(t) - \left(\frac{A}{C} \right) u(t) + x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Onde:

$\mathbf{x} = [u(t), \dot{x}(t), x(t), y(t)]$: Vetor com as incógnitas;

$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [g_1(\mathbf{x}), g_2(\mathbf{x}), g_3(\mathbf{x}), g_4(\mathbf{x})]$: Funções algébricas.

Dessa forma, ao definir as equações em (3.18) basta empregar a formulação do método de Newton-Raphson obtendo a solução para cada instante de tempo.

3.5 Estratégia para Análise de Descontinuidade

A análise de descontinuidades é empregada quando alguma variável algébrica sofre uma variação instantânea decorrente de uma perturbação, por exemplo, para o sistema

de potência, quando é aplicada uma função degrau no sinal de entrada do controlador, ocorrência de curto circuito, abertura de linhas, entre outros eventos. Contudo nestas situações as variáveis de estado não podem sofrer variações bruscas e instantâneas, ao contrário das algébricas.

Com isso a importância de avaliar as discontinuidades está relacionada ao comportamento da resposta do elemento integrador nos instantes de tempo posteriores a ocorrência de eventos que provoquem variações instantâneas em variáveis algébricas. Dessa forma, considerando o bloco integrador representado na Figura 18 e uma variação instantânea do sinal de entrada \dot{x} é possível obter o comportamento da variável de estado x descrito pelos gráficos da Figura 19. Observando-os constata-se que o estado x pode ser definido por duas curvas (a e b) que se diferem a partir do tempo t_0 , instante no qual ocorre a variação brusca de \dot{x} . Esta diferença é resultado da realização ou não da análise de discontinuidade no instante de ocorrência da perturbação no sistema como discutido na sequência.

Quando a análise de discontinuidade não é realizada o comportamento da variável de estado x corresponde à curva a que pode ser obtida por integração numérica. Dessa forma empregando o método trapezoidal obtêm-se $x(t_0^-)$:

$$x(t_0^-) = x(t_0 - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [\dot{x}(t_0 - \Delta t) + \dot{x}(t_0^-)] \quad (3.19)$$

Avaliando a equação (3.19) observa-se que o segundo termo do lado direito é correspondente a área A_0 , resultando em:

$$x(t_0^-) = x(t_0 - \Delta t) + A_0 \quad (3.20)$$

É necessário ressaltar que as equações (3.19) e (3.20) são válidas tanto para a curva a quanto para b . Prosseguindo com a integração trapezoidal de forma convencional para a curva a , por não ser realizada a análise de discontinuidade, é determinado o estado de $x(t_0 + \Delta t)$, resultando em:

$$x_a(t_0 + \Delta t) = x(t_0^-) + \frac{\Delta t}{2} [\dot{x}(t_0 + \Delta t) + \dot{x}(t_0^-)] \quad (3.21)$$

Igualmente ao que foi feito para o passo anterior é possível observar que uma parcela da equação (3.21) refere-se a área A_1 , definindo:

$$x_a(t_0 + \Delta t) = x(t_0^-) + A_1 \quad (3.22)$$

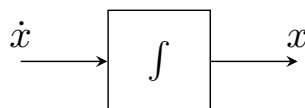


Figura 18 – Bloco integrador.

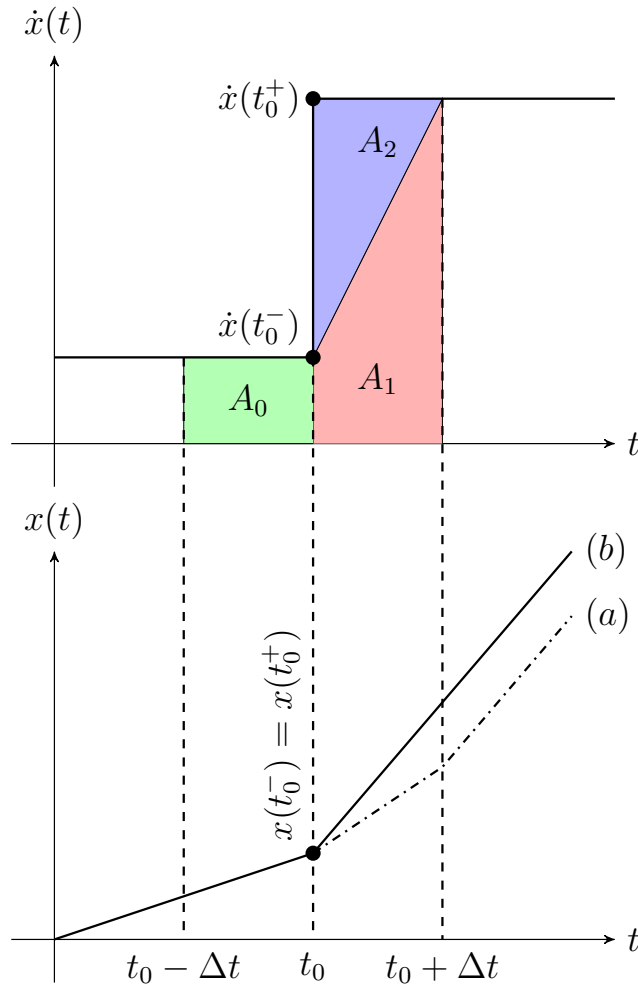


Figura 19 – Análise de descontinuidade.

No entanto, para a curva b é necessário um cálculo adicional entre a determinação de $x(t_0^-)$ e $x(t_0 + \Delta t)$, o qual define a etapa para análise de descontinuidades. Nesta etapa, o objetivo é atualizar todas as variáveis algébricas exatamente no instante de tempo infinitesimalmente posterior a ocorrência da perturbação, ou seja, t_0^+ tomando como restrição que todas as variáveis de estado se mantém constante. Dessa forma, determina-se o ponto $\dot{x}(t_0^+)$, e como a variável de estado se mantém constante no instante de tempo da ocorrência da perturbação define-se que $x(t_0^+)$ é igual a $x(t_0^-)$ calculado anteriormente. Definidos os valores das variáveis no instante t_0^+ calcula-se a variável de estado em $t_0 + \Delta t$ resultado em:

$$x_b(t_0 + \Delta t) = x(t_0^+) + \frac{\Delta t}{2} [\dot{x}(t_0 + \Delta t) + \dot{x}(t_0^+)] \quad (3.23)$$

Observando a equação (3.23) destaca-se que uma de suas parcela equivale a somas das áreas A_1 e A_2 , podendo assim definir (3.24):

$$x_b(t_0 + \Delta t) = x(t_0^+) + (A_1 + A_2) \quad (3.24)$$

Calculando o erro entre as curvas a e b no instante $t_0 + \Delta t$ considerando as equações (3.21) e (3.23), tem-se:

$$x_b(t_0 + \Delta t) - x_a(t_0 + \Delta t) = x(t_0^+) - x(t_0^-) + \frac{\Delta t}{2} \left[\dot{x}(t_0^+) - \dot{x}(t_0^-) \right] \quad (3.25)$$

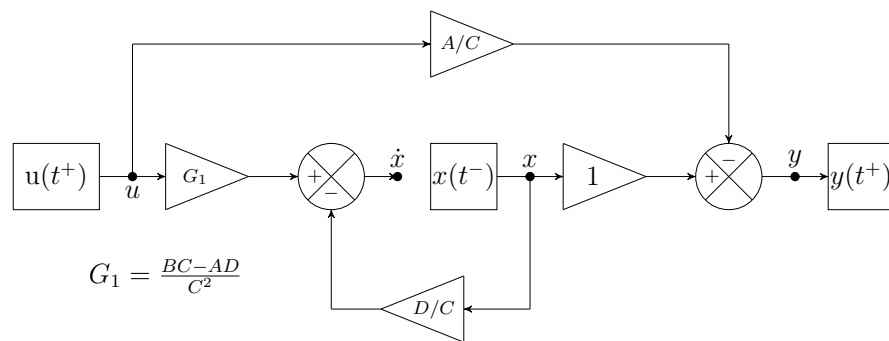
Como $x(t_0^+) = x(t_0^-)$, define-se:

$$x_b(t_0 + \Delta t) - x_a(t_0 + \Delta t) = \frac{\Delta t}{2} \left[\dot{x}(t_0^+) - \dot{x}(t_0^-) \right] \quad (3.26)$$

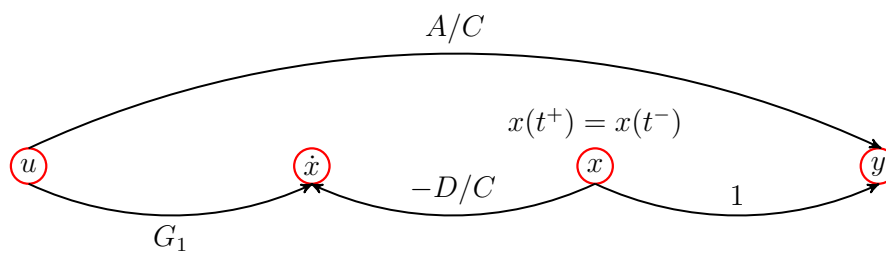
$$x_b(t_0 + \Delta t) - x_a(t_0 + \Delta t) = A_2$$

Ao avaliar o resultado em (3.26) constata-se que a diferença entre as curvas é função do passo de integração e da magnitude da perturbação ao alterar o valor de \dot{x} . Dessa forma, com a análise de descontinuidade, a área adicional A_2 apresenta potencial de alterar significativamente o valor da variável de estado x subsequente a uma descontinuidade.

Para exemplificar este procedimento retorna-se ao problema exemplo desenvolvido ao longo do capítulo e considera-se a ocorrência de uma perturbação no instante de tempo t . Como destacado as variáveis de estado em t^+ se mantém constante e igual ao instante imediatamente anterior a perturbação e as variáveis algébricas, no entanto, são afetadas. Dessa forma, buscando determinar o valor de todos os sinais em t^+ é possível construir os diagramas de bloco e de sinais nas Figuras 20(a) e 20(b), respectivamente.



(a) Diagrama de blocos



(b) Diagrama de fluxo

Figura 20 – Diagrama para Análise de descontinuidade: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo

Avaliando estes diagramas define-se (3.27):

$$\begin{cases} u(t^+) = u(t^+) \\ \dot{x}(t^+) = \left(\frac{BC - AD}{C^2}\right)u(t^+) - \left(\frac{D}{C}\right)x(t^+) \\ x(t^+) = x(t^-) \\ y(t^+) = \left(\frac{A}{C}\right)u(t^+) + x(t^+) \end{cases} \quad (3.27)$$

Igualmente às outras etapas a solução é obtida aplicando o método de Newton-Raphson para o cálculo das variáveis em t^+ . A estratégia adotada para análise de descontinuidade pode ser melhor entendida na Seção 3.7 quando aplicada na avaliação dos sistemas tutoriais os quais são resolvidos de forma mais detalhada.

3.6 Sistemas Não-Lineares

Como já mencionado, em sua grande maioria, os componentes dos sistemas elétricos de potência são modelados por equações não lineares, que apresentam algumas características peculiares quando comparados aos sistemas lineares. Um sistema é não linear se a ele não se aplica o princípio da superposição ou homogeneidade [21, 26].

A propriedade de superposição refere-se a resposta de um sistema quando da soma de entradas, ou seja, o resultado de saída é soma das respostas às entradas individuais. Assim, se uma entrada $r_1(t)$ gerar uma saída $c_1(t)$ e uma entrada $r_2(t)$ gerar uma saída $c_2(t)$, então uma entrada $r_1(t) + r_2(t)$ produzirá uma saída $c_1(t) + c_2(t)$. A propriedade da homogeneidade descreve a resposta de um sistema quando da multiplicação da entrada por um escalar. Especificamente, em um sistema linear, a propriedade da homogeneidade é demonstrada se para uma entrada $r_1(t)$ que gera uma saída $c_1(t)$, uma entrada $\alpha r_1(t)$ produzir uma saída $\alpha c_1(t)$; isto é, a multiplicação da entrada por um escalar faz com que a resposta seja multiplicada pelo mesmo escalar [21, 26].

Devido as características dos sistemas não lineares, deve-se empregar métodos numéricos capazes de solucionar esse tipo de problema. Um destes métodos é o de Newton-Raphson que é empregado neste trabalho e tem sua formulação apresentada no Apêndice G. A escolha deste método deve-se a suas características de convergência quadrática e número de iterações não ser afetado pelo número de variáveis [2]. Por isso o emprego do método na solução de problemas de grande porte é eficiente e permite generalizar tanto a solução de sistemas não lineares como lineares.

É importante salientar que, diferentemente dos sistemas lineares, o diagrama de fluxo de sinais para os sistemas não-lineares não pode ser obtido diretamente a partir do diagrama de blocos, sendo necessário, primeiramente, linearizar as equações do problema de acordo com o método numérico (Newton-Raphson) a ser empregado na solução.

Dessa forma, com o objetivo de exemplificar os procedimentos de análise de descontinuidades na Subseção 3.7.2 é apresentado um sistema não-linear por meio do qual são descritas as formulações para o cálculo das condições iniciais, para a simulação e para a análise de descontinuidades.

3.7 Exemplos Tutoriais

Nesta seção são demonstrados os aspectos referentes a modelagem descrita nas seções anteriores. Primeiramente, é avaliado um sistema linear, posteriormente, um não linear.

3.7.1 Sistema Linear

O primeiro exemplo é um sistema linear definido a partir do modelo de um regulador de tensão em malha aberta, o qual está representado pelo diagrama de blocos da Figura 21 e definido pela função de transferência (3.28).

$$E_{fd}(s) = \frac{100}{1 + 0,05s} (V_{ref}(s) + V_{sad}(s) - V_t(s)) \quad (3.28)$$

As grandezas de entrada representam a tensão de referência V_{ref} , a tensão terminal V_t (tensão da barra controlada) e o sinal adicional estabilizante V_{sad} proveniente do PSS associado, e a grandeza de saída é a tensão de campo da máquina E_{fd} .

O passo inicial é a conversão da função de transferência em um conjunto de equações algébrico-diferenciais, resultando em (3.29):

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = -20x(t) + 2000(V_{ref}(t) + V_{sad}(t) - V_t(t)) \\ E_{fd}(t) = x(t) \end{cases} \quad (3.29)$$

Onde x é a variável de estado e representa um estado intermediário do sistema. As equações algébricas-diferenciais podem ser escritas no formato de diagrama de blocos e de sinais, representados nas Figuras 22(a) e 22(b), respectivamente. Este diagramas definem a estrutura topológica do problema, a partir do qual obtém-se o conjunto de equações em (3.30). Onde u_0, u_1, u_2 são os sinais aplicados aos nós V_{ref}, V_t, V_{sad} , respectivamente.

$$\begin{cases} V_{ref} = u_0 \\ V_t = u_1 \\ V_{sad} = u_2 \\ V = V_{ref} + V_{sad} - V_t \\ \dot{x} = 2000V - 20x \\ x = \int \dot{x} dt \\ E_{fd} = x \end{cases} \quad (3.30)$$

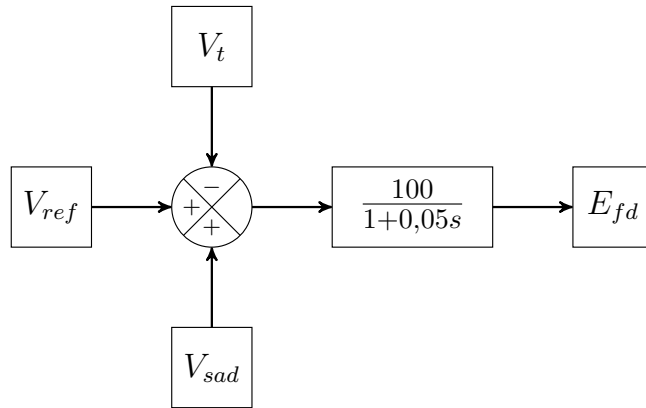
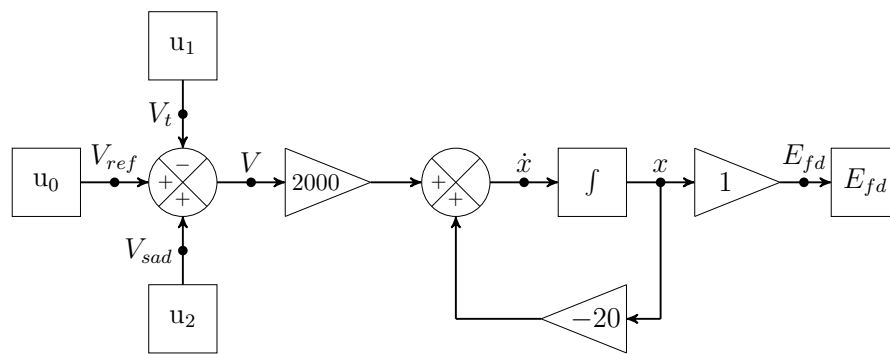
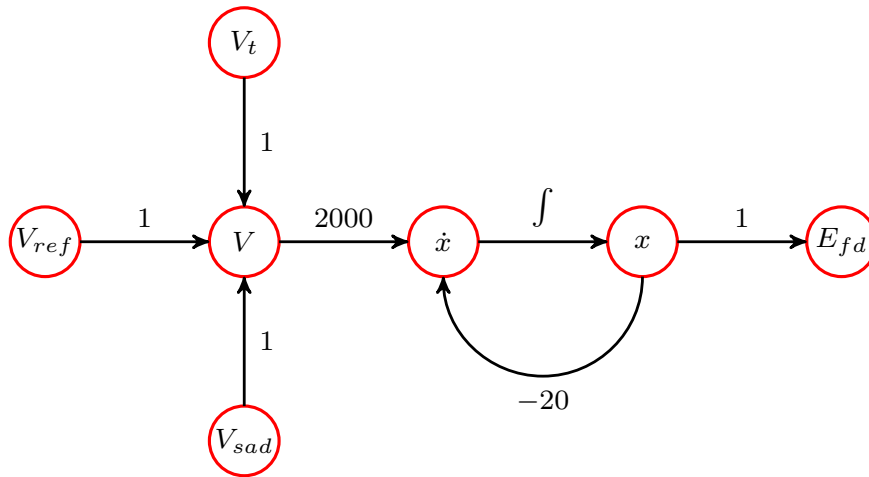


Figura 21 – Diagrama do regulador de tensão em malha aberta.



(a) Diagrama de blocos



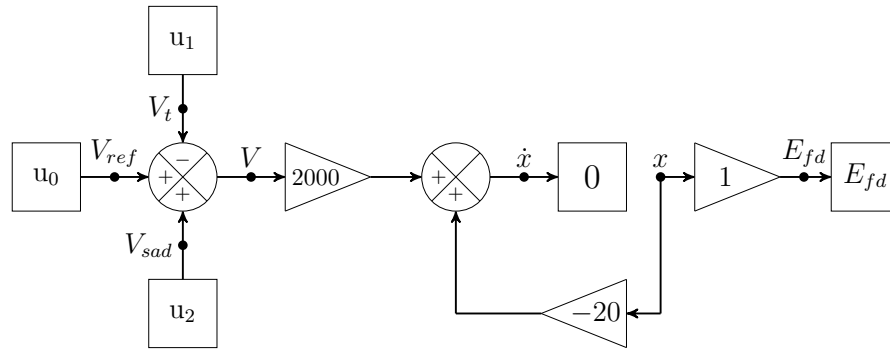
(b) Diagrama de fluxo

Figura 22 – Diagramas de simulação para o Sistema Linear: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo

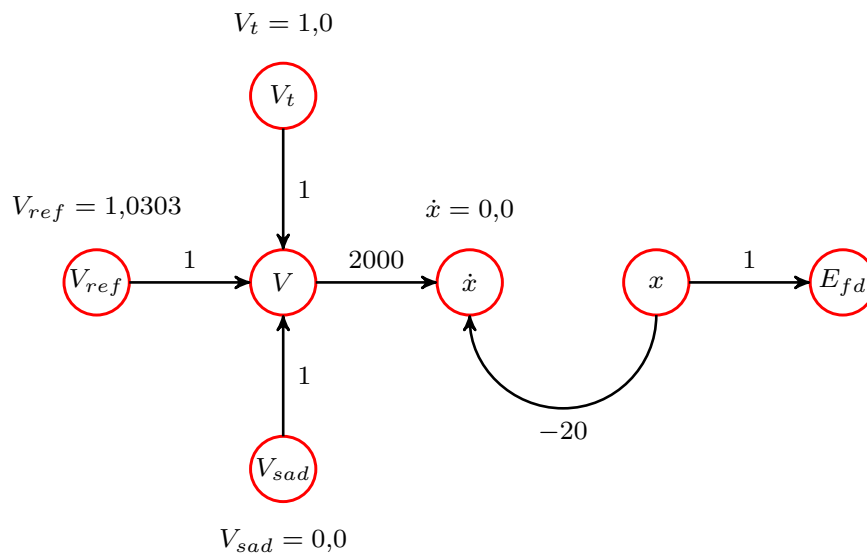
Onde u_0, u_1, u_2 são os sinais aplicados aos nós V_{ref}, V_t, V_{sad} , respectivamente.

Após a definição da estrutura básica do sistema linear é possível determinar as equações que modelam o cálculo das condições iniciais, a simulação no domínio do tempo e a análise de descontinuidades.

- Cálculo das condições iniciais



(a) Diagrama de blocos



(b) Diagrama de fluxo

Figura 23 – Diagramas para cálculo das condições iniciais (primeiro caso) - Sistema Linear:
 (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo

O cálculo das condições iniciais visa determinar um ponto de equilíbrio inicial para a simulação do sistema. Neste exemplo tutorial, quando for conhecido o valor da tensão de campo (E_{fd}) busca-se determinar o valor da tensão de referência (V_{ref}) ou vice-versa e ainda calcular as condições iniciais das outras variáveis que modelam o sistema.

Para este sistema são definidas duas condições de contorno, na primeira todos os sinais aplicados aos blocos de entrada são conhecidos e na segunda condição um dos sinais de entrada é desconhecido e o valor do sinal de saída conhecido. A seguir são apresentadas as estratégias empregadas para a determinação do estado de todas as variáveis que modelam o sistema linear definido pelo regulador de tensão.

• **Primeiro Caso:**

Neste primeiro caso todos os sinais de entrada são conhecidos e definidos pela

condição de contorno estabelecida em (3.31) para $t = 0$:

$$u = \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} \\ V_{sad} \\ V_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0303 \\ 0,0000 \\ 1,0000 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Como descrito na Subseção 3.3.1 quando são conhecidas todos os sinais de entrada não é necessário realizar modificações na estrutura topológica do problema, dessa forma apenas fazendo as considerações propostas para o cálculo das condições iniciais são definidos os diagramas de blocos e sinais das Figuras 23(a) e 23(b), respectivamente.

Considerando os diagramas da Figura 23 monta-se o conjunto de equações em (3.32) que modela o cálculo de condições iniciais para o sistema linear dada a condição de contorno em (3.31).

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ref} = 1,0303 \\ V_t = 1,0000 \\ V_{sad} = 0,0000 \\ V = V_{ref} + V_{sad} - V_t \\ \dot{x} = 2000V - 20x \\ \dot{x} = 0 \\ E_{fd} = x \end{array} \right. \quad (3.32)$$

Reescrevendo (3.32) no formato $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ para que o problema seja solucionado pelo método numérico tem-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} - 1,0303 \\ V_t - 1,0000 \\ V_{sad} \\ V - V_{ref} - V_{sad} + V_t \\ \dot{x} - 2000V + 20x \\ \dot{x} \\ E_{fd} - x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

A partir deste sistema de equação monta-se simbolicamente a matriz jacobiana

definida em (3.34).

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_0}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_0}{\partial V_t} & \frac{\partial g_0}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_0}{\partial V} & \frac{\partial g_0}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_0}{\partial x} & \frac{\partial g_0}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_1}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_1}{\partial V_t} & \frac{\partial g_1}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_1}{\partial V} & \frac{\partial g_1}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_1}{\partial x} & \frac{\partial g_1}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_2}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_2}{\partial V_t} & \frac{\partial g_2}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_2}{\partial V} & \frac{\partial g_2}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_2}{\partial x} & \frac{\partial g_2}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_3}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_3}{\partial V_t} & \frac{\partial g_3}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_3}{\partial V} & \frac{\partial g_3}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_3}{\partial x} & \frac{\partial g_3}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_4}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_4}{\partial V_t} & \frac{\partial g_4}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_4}{\partial V} & \frac{\partial g_4}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_4}{\partial x} & \frac{\partial g_4}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_5}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_5}{\partial V_t} & \frac{\partial g_5}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_5}{\partial V} & \frac{\partial g_5}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_5}{\partial x} & \frac{\partial g_5}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_6}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_6}{\partial V_t} & \frac{\partial g_6}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_6}{\partial V} & \frac{\partial g_6}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_6}{\partial x} & \frac{\partial g_6}{\partial E_{fd}} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Como o sistema é linear, a matriz jacobiana é numericamente constante resultando em (3.35).

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1,0 & & & & & & \\ & 1,0 & & & & & \\ & & 1,0 & & & & \\ -1,0 & 1,0 & -1,0 & 1,0 & & & \\ & & & -2000,0 & 1,0 & 20,0 & \\ & & & & 1,0 & & \\ & & & & & -1,0 & 1,0 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Portanto, dado o ponto inicial $\mathbf{x}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, define-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_0) = \begin{bmatrix} -1,0303 \\ -1,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Resolvendo o sistema linear $\mathbf{g}(\mathbf{x}_0) = -\mathbf{J}(\mathbf{x}) \cdot \Delta\mathbf{x}$ considerando as condições dadas, tem-se:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 + \Delta\mathbf{x} = \begin{bmatrix} V_{ref} \\ V_t \\ V_{sad} \\ V \\ \dot{x} \\ x \\ E_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0303 \\ 1,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0303 \\ 0,0000 \\ 3,0300 \\ 3,0300 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

• **Segundo Caso:**

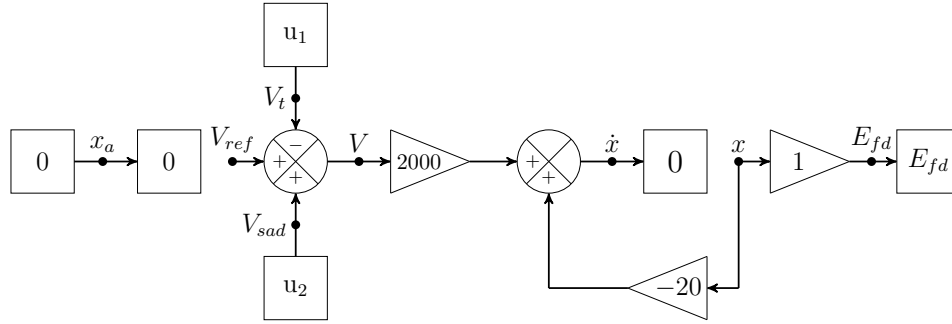
O segundo caso estabelece que a entrada V_{ref} é desconhecida e a saída E_{fd} é conhecida. Sendo que as condições de contorno são definidas em (3.38):

$$\begin{bmatrix} E_{fd} \\ V_{sad} \\ V_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,03 \\ 0,00 \\ 1,00 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

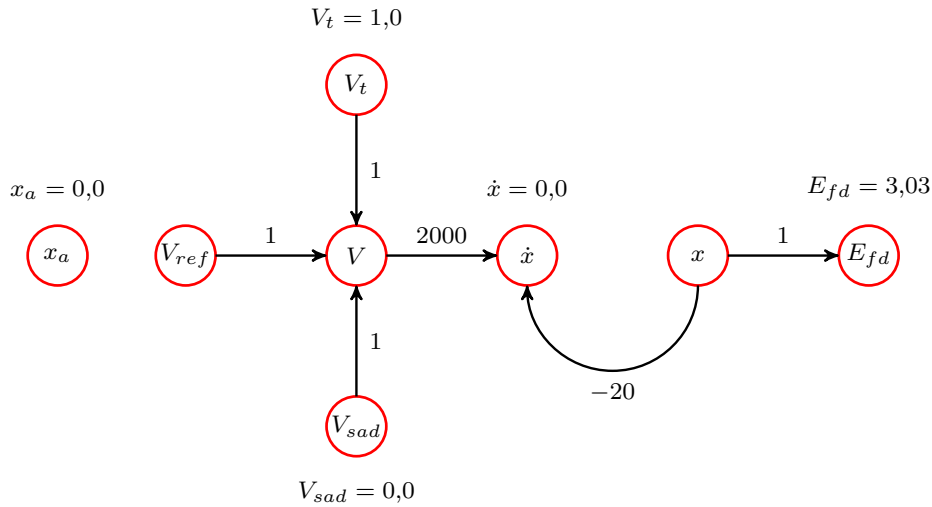
Empregando as estratégias definidas na Subseção 3.3.1, quando há alguma entrada desconhecida, é adicionado um integrador à esta entrada. Posteriormente, são retirados os blocos integradores tornando as suas entradas nulas e saídas flutuantes, dessa forma é definido os diagramas de blocos e sinal das Figuras 24(a) e 24(b), respectivamente.

Considerando estes diagramas e as condições de contorno estabelecidas obtém-se as equações em (3.39):

$$\left\{ \begin{array}{ll} x_a = 0,0 & (x_a) \\ x_a = 0,0 & (V_{ref}) \\ V_t = 1,0 & (V_t) \\ V_{sad} = 0,0 & (V_{sad}) \\ V = V_{ref} + V_{sad} - V_t & (V) \\ \dot{x} = 2000V - 20x & (\dot{x}) \\ \dot{x} = 0,0 & (x) \\ E_{fd} = x & (E_{fd}) \end{array} \right. \quad (3.39)$$



(a) Diagrama de blocos



(b) Diagrama de fluxo

Figura 24 – Cálculo das condições iniciais (segundo caso) - Sistema Linear: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo

Repetindo a mudança apresentada na Subseção 3.3.1 a equação referente ao nó V_{ref} é substituída pela equação de contorno referente ao sinal de saída E_{fd} , resultando:

$$\left\{ \begin{array}{ll} x_a = 0,0 & (x_a) \\ E_{fd} = 3,03 & (V_{ref}) \\ V_t = 1,0 & (V_t) \\ V_{sad} = 0,0 & (V_{sad}) \\ V = V_{ref} + V_{sad} - V_t & (V) \\ \dot{x} = 2000V - 20x & (\dot{x}) \\ \dot{x} = 0,0 & (x) \\ E_{fd} = x & (E_{fd}) \end{array} \right. \quad (3.40)$$

Igualmente ao primeiro caso as equações (3.40) são reescritas no formato $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$

para que seja aplicado o método de solução, definindo:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ E_{fd} - 3,0300 \\ V_t - 1,0000 \\ V_{sad} \\ V - V_{ref} - V_{sad} + V_t \\ \dot{x} - 2000V + 20x \\ \dot{x} \\ E_{fd} - x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

A partir deste sistema de equação monta-se simbolicamente a matriz jacobiana definida em (3.42).

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_0}{\partial x_a} & \frac{\partial g_0}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_0}{\partial V_t} & \frac{\partial g_0}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_0}{\partial V} & \frac{\partial g_0}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_0}{\partial x} & \frac{\partial g_0}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_1}{\partial x_a} & \frac{\partial g_1}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_1}{\partial V_t} & \frac{\partial g_1}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_1}{\partial V} & \frac{\partial g_1}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_1}{\partial x} & \frac{\partial g_1}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_a} & \frac{\partial g_2}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_2}{\partial V_t} & \frac{\partial g_2}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_2}{\partial V} & \frac{\partial g_2}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_2}{\partial x} & \frac{\partial g_2}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x_a} & \frac{\partial g_3}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_3}{\partial V_t} & \frac{\partial g_3}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_3}{\partial V} & \frac{\partial g_3}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_3}{\partial x} & \frac{\partial g_3}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_4}{\partial x_a} & \frac{\partial g_4}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_4}{\partial V_t} & \frac{\partial g_4}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_4}{\partial V} & \frac{\partial g_4}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_4}{\partial x} & \frac{\partial g_4}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_5}{\partial x_a} & \frac{\partial g_5}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_5}{\partial V_t} & \frac{\partial g_5}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_5}{\partial V} & \frac{\partial g_5}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_5}{\partial x} & \frac{\partial g_5}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_6}{\partial x_a} & \frac{\partial g_6}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_6}{\partial V_t} & \frac{\partial g_6}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_6}{\partial V} & \frac{\partial g_6}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_6}{\partial x} & \frac{\partial g_6}{\partial E_{fd}} \\ \frac{\partial g_7}{\partial x_a} & \frac{\partial g_7}{\partial V_{ref}} & \frac{\partial g_7}{\partial V_t} & \frac{\partial g_7}{\partial V_{sad}} & \frac{\partial g_7}{\partial V} & \frac{\partial g_7}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_7}{\partial x} & \frac{\partial g_7}{\partial E_{fd}} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Igualmente ao primeiro caso, pelo fato do sistema ser linear, a matriz jacobiana é

• **Formulação para a simulação**

Calculada as condições iniciais do sistema, a próxima etapa é a formulação das equações para a simulação que permitam avaliar o comportamento dinâmico do sistema frente a alguma perturbação. Nesta etapa utiliza-se os diagramas originais representados na Figura 22. As equações referentes as estes diagramas já foram obtidas e estão definidas em (3.30). Dessa forma, ao considerar as condições iniciais definidas anteriormente, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ref}(t) = u(t) \\ V_t(t) = 1,0000 \\ V_{sad}(t) = 0,0000 \\ V(t) = V_{ref}(t) + V_{sad}(t) - V_t(t) \\ \dot{x}(t) = 2000V(t) - 20x(t) \\ x(t) = \int \dot{x}(t)dt \\ E_{fd}(t) = x(t) \end{array} \right. \quad (3.46)$$

Aplicando o método trapezoidal no elemento integrador considerando um passo Δt e, depois, separando os termos dependentes de t e $t - \Delta t$, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(t) - \frac{\Delta t}{2}\dot{x}(t) = \text{hist}(t) \\ \text{hist}(t) = x(t - \Delta t) - \frac{\Delta t}{2}\dot{x}(t - \Delta t) \end{array} \right. \quad (3.47)$$

Substituindo (3.47) em (3.46) e reescrevendo no formato $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ para o método de Newton-Raphson define-se (3.48).

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} V_{ref}(t) - u(t) \\ V_t(t) - 1,0000 \\ V_{sad}(t) \\ V - V_{ref}(t) - V_{sad}(t) + V_t(t) \\ \dot{x}(t) - 2000V(t) - 20x(t) \\ x(t) - \frac{\Delta t}{2}\dot{x}(t) - \text{hist}(t) \\ E_{fd}(t) - x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

A partir das equações em (3.48) é possível simular o comportamento do sistema linear para qualquer perturbação aplicada. O ponto inicial $\mathbf{x}(0)$ foi definido no cálculo das

condições iniciais e resultou em:

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} V_{ref}(0) \\ V_t(0) \\ V_{sad}(0) \\ V(0) \\ \dot{x}(0) \\ x(0) \\ E_{fd}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0303 \\ 1,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0303 \\ 0,0000 \\ 3,0300 \\ 3,0300 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

A perturbação aplicada sobre o sistema para simular o seu comportamento é definida em (3.50):

$$u(t) = \begin{cases} 1,0303 & \text{para } t < 1s \\ 1,0503 & \text{para } 1s \leq t < 15s \\ 1,0103 & \text{para } t \geq 15s \end{cases} \quad (3.50)$$

O sistema linear foi simulado durante um intervalo de 30 segundos considerando o passo do método de integração $\Delta t = 0,005s$. Os resultados obtidos nesta simulação são mostrados nos gráficos das Figuras 25 e 26.

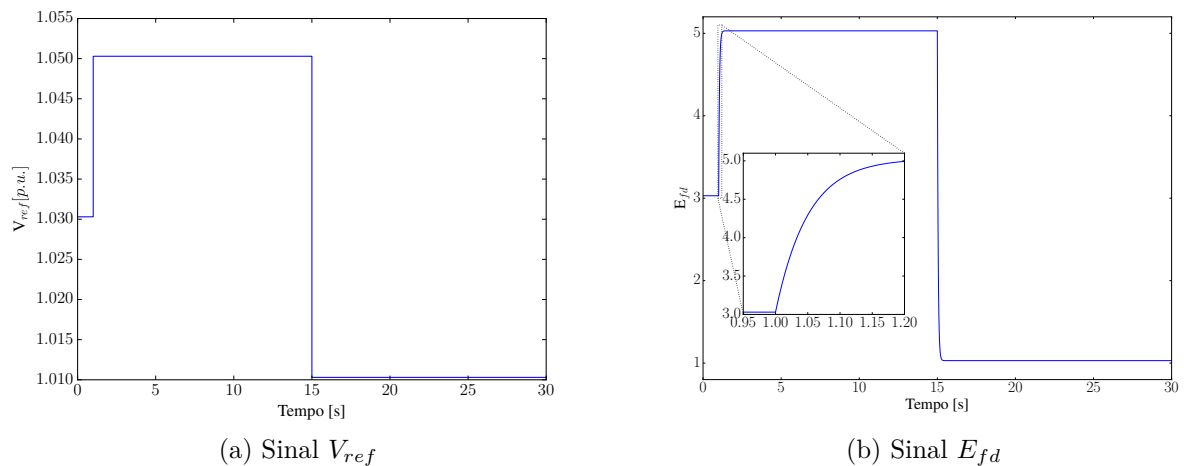


Figura 25 – Resultados da simulação do sistema linear: (a) Sinal V_{ref} (b) Sinal E_{fd}

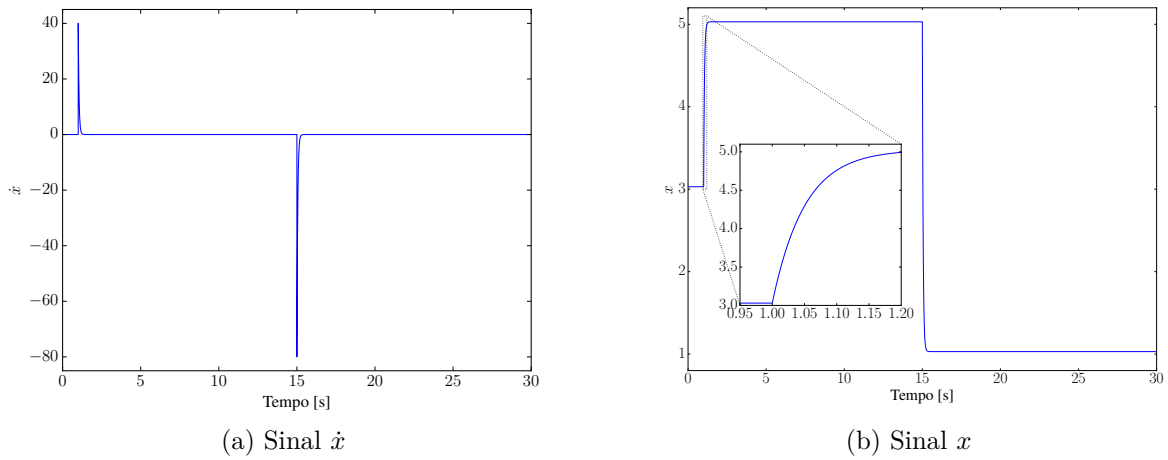


Figura 26 – Resultados da simulação do sistema linear: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x

• Formulação para a análise de descontinuidades

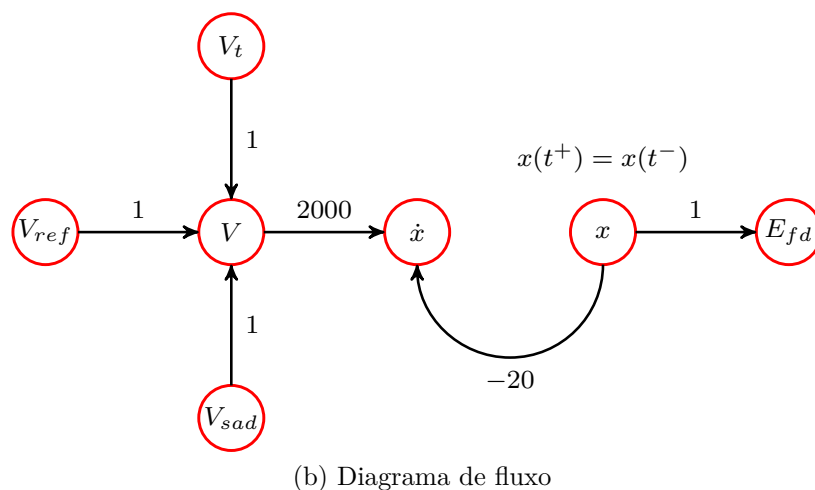
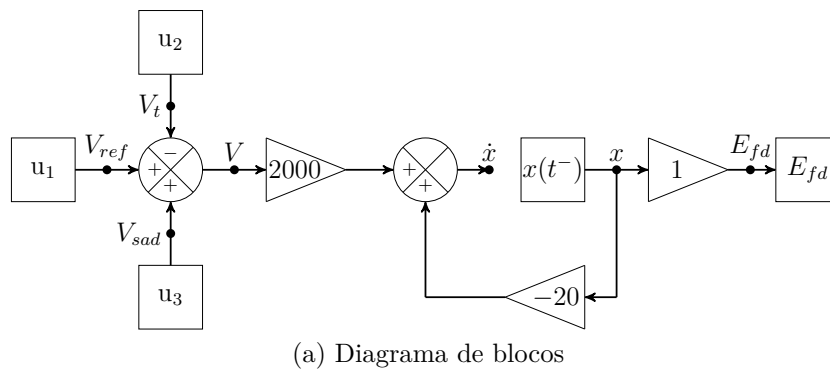


Figura 27 – Diagramas para análise de descontinuidade - Sistema Linear: (a) Diagrama de blocos (b) Diagrama de fluxo

Como descrito anteriormente, a análise de descontinuidades precisa ser realizada quando ocorrem eventos que resultam em variações instantâneas dos sinais algébricos.

No caso deste exemplo a análise precisa ser feita em dois instantes de tempo distintos ($t = 1\text{s}$ e $t = 15\text{s}$) já que nestes instantes o sinal V_{ref} sofre variações instantâneas. Dessa forma, levando em consideração as estratégias propostas na Seção 3.5 são estruturados os diagramas de blocos e sinal das Figuras 27(a) e 27(b), respectivamente. A partir destes digramas constrói-se o conjunto de equações em (3.51).

$$\begin{cases} V_{ref}(t^+) = u_0(t^+) \\ V_t(t^+) = u_1(t^+) \\ V_{sad}(t^+) = u_2(t^+) \\ V(t^+) = V_{ref}(t^+) + V_{sad}(t^+) - V_t(t^+) \\ \dot{x}(t^+) = 2000V(t^+) - 20x(t^+) \\ x(t^+) = x(t^-) \\ E_{fd}(t^+) = x(t^+) \end{cases} \quad (3.51)$$

As equações definidas em (3.51) são utilizadas para avaliar a descontinuidade nos dois instantes de tempo, $t = 1^+\text{s}$ e $t = 15^+\text{s}$.

- Para $t = 1\text{s}$:

A simulação do sistema linear prossegue normalmente até o instante $t = 1\text{s}$, neste momento é interrompida para que sejam feitos os cálculos de descontinuidade. Em $t = 1\text{s}$ o valor de todas as variáveis que modelam o sistema são:

$$\mathbf{x}(1^-) = \begin{bmatrix} V_{ref}(1^-) \\ V_t(1^-) \\ V_{sad}(1^-) \\ V(1^-) \\ \dot{x}(1^-) \\ x(1^-) \\ E_{fd}(1^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0303 \\ 1,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0303 \\ 0,0000 \\ 3,0300 \\ 3,0300 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Conhecendo as condições das variáveis de estado (mantém-se constante) no instante $t = 1\text{s}$ e as variações na variáveis algébricas devido a perturbação no sistema são realizadas substituições em (3.51), obtendo assim as equações definidas em (3.53) já organizadas no

formato $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$.

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} V_{ref}(1^+) - 1,0503 \\ V_t(1^+) - 1,000 \\ V_{sad}(1^+) \\ V(1^+) - V_{ref}(1^+) - V_{sad}(1^+) + V_t(1^+) \\ \dot{x}(1^+) - 2000V(1^+) + 20x(1^+) \\ x(1^+) - 3,0300 \\ E_{fd}(1^+) - x(1^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Resolvendo as equações (3.53) obtém-se:

$$\mathbf{x}(1^+) = \begin{bmatrix} V_{ref}(1^+) \\ V_t(1^+) \\ V_{sad}(1^+) \\ V(1^+) \\ \dot{x}(1^+) \\ x(1^+) \\ E_{fd}(1^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0503 \\ 1,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0503 \\ 40,0000 \\ 3,0300 \\ 3,0300 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

- Para $t = 15s$:

Após a análise no instante $t = 1^+s$ o processo de simulação é retomado a partir das novas condições iniciais obtidas em (3.54), sendo novamente interrompida em $t = 15s$ já que neste instante o sinal algébrico V_{ref} sofre outra variação instantânea. O valor de todas as variáveis neste instante de tempo estão definidas em (3.55).

$$\mathbf{x}(15^-) = \begin{bmatrix} V_{ref}(15^-) \\ V_t(15^-) \\ V_{sad}(15^-) \\ V(15^-) \\ \dot{x}(15^-) \\ x(15^-) \\ E_{fd}(15^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0503 \\ 1,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0503 \\ 0,0000 \\ 5,0300 \\ 5,0300 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

Igualmente a avaliação anterior de descontinuidade, considerando o valor da variável de estado x constante e a variação instantânea da variável algébrica V_{ref} , são realizadas

substituições em (3.51). Além disso, organizando-a no formato $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ define-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} V_{ref}(15^+) - 1,0103 \\ V_t(15^+) - 1,000 \\ V_{sad}(15^+) \\ V(15^+) - V_{ref}(15^+) - V_{sad}(15^+) + V_t(15^+) \\ \dot{x}(15^+) - 2000V(15^+) + 20x(15^+) \\ x(15^+) - 5,0300 \\ E_{fd}(15^+) - x(15^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Resolvendo (3.56) obtém-se:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} V_{ref}(15^+) \\ V_t(15^+) \\ V_{sad}(15^+) \\ V(15^+) \\ \dot{x}(15^+) \\ x(15^+) \\ E_{fd}(15^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0103 \\ 1,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0103 \\ -80,0000 \\ 5,0300 \\ 5,0300 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Na Figura 28 são mostrados o comportamento dos sinais de entrada e saída do elemento integrador com destaque para os instantes de tempo nos quais ocorrem a análise de descontinuidade. Em 28(a) é mostrado o sinal algébrico \dot{x} que sofre variações instantâneas de t^- para t^+ nos instantes $t = 1s$ e $t = 15s$. E em 28(b) é observada a variável de estado x que mantém-se constante nos instantes de análise de descontinuidades.

3.7.2 Sistema Não Linear

O segundo sistema tutorial é não linear e definido pelo diagrama de blocos da Figura 29(a). Observando-o e comparando-o ao sistema linear constata-se que é necessário converter a função de transferência no formato do espaço de estados, resultando nas equações em (3.58) e conseqüentemente no diagrama de blocos expandido da Figura 29(b).

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \frac{2,5}{1,96}x_1(t) - \frac{3,0}{1,4}x(t) \\ x_2(t) = \frac{0,1}{1,4}x_1(t) + x(t) \end{cases} \quad (3.58)$$

Onde x é uma variável de estado intermediária.

Como mencionado na Seção 3.6, diferentemente do sistema linear não é possível montar diretamente o diagrama de fluxo de sinais, podendo este ser construído após a

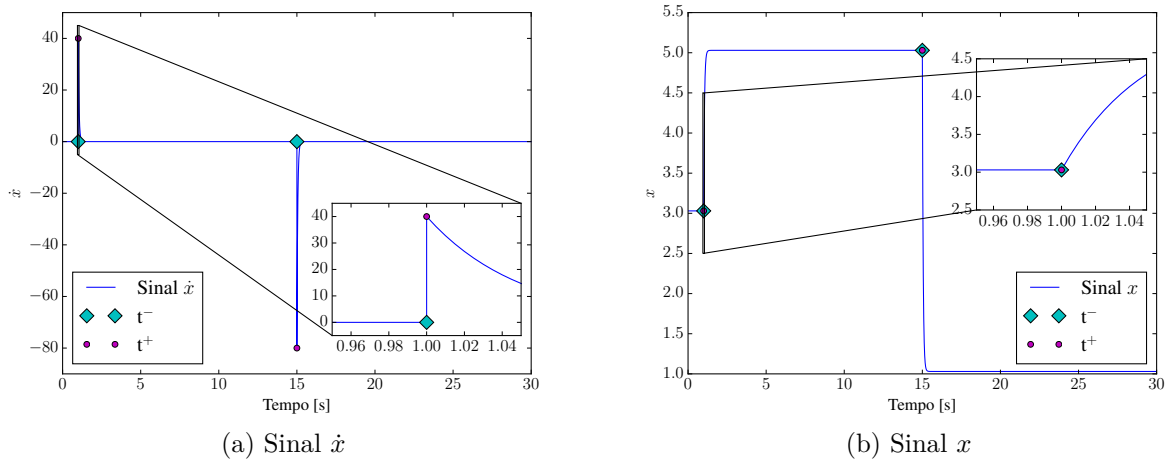


Figura 28 – Resultados da simulação do sistema linear considerando a análise de descontinuidades: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x

linearização das equações pelo método numérico. Portanto, definida a estrutura topológica é possível modelar o problema para realizar o cálculo das condições iniciais, definir as equações para simulação e a formulação para análise de descontinuidade, se necessário.

• Cálculo das condições iniciais

Diferentemente do sistema linear, para este caso é avaliado uma única condição de contorno na qual o sinal de entrada x_0 é conhecido e igual a 0,3.

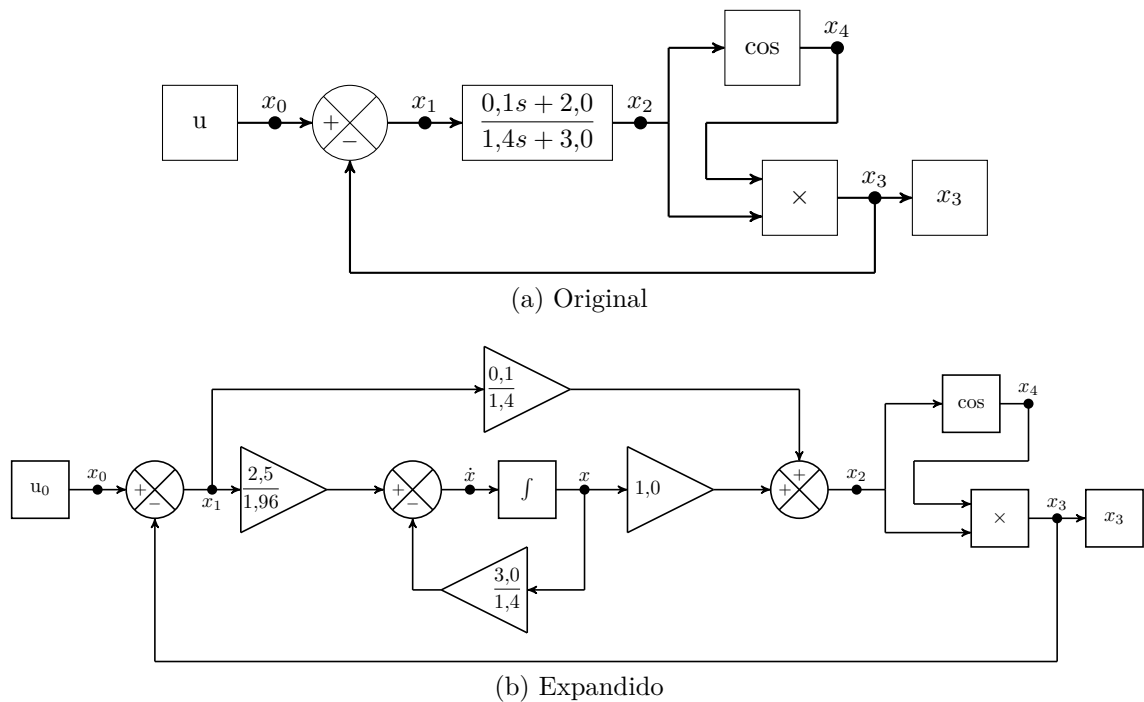


Figura 29 – Diagrama de blocos - Sistema não linear: (a) Original (b) Expandido

Como todas as entradas são conhecidas não é necessário alterar o digrama de blocos com a adição de novos elementos. Dessa forma, basta empregar as simplificações propostas na Seção 3.3 para eliminação de dinâmica. Portanto, os elementos integradores são eliminados e o seu sinal de entrada é forçado a zero, resultando no diagrama de blocos da Figura 30. A partir deste diagrama são formuladas as equações no formato $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$ resultando em (3.59).

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 - 0,3 \\ x_1 - x_0 + x_3 \\ x_2 - \frac{0,1}{1,4}x_1 - x \\ x_3 - x_2x_4 \\ x_4 - \cos x_2 \\ \dot{x} - \frac{2,5}{1,96}x_1 + \frac{3,0}{1,4}x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

A solução do sistema de equação em (3.59) é obtida aplicando o método de Newton-Rapshon. Dessa forma, seguindo os passos descritos no Apêndice G, monta-se a matriz jacobiana:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_0}{\partial x_0} & \frac{\partial g_0}{\partial x_1} & \frac{\partial g_0}{\partial x_2} & \frac{\partial g_0}{\partial x_3} & \frac{\partial g_0}{\partial x_4} & \frac{\partial g_0}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_0}{\partial x} \\ \frac{\partial g_1}{\partial x_0} & \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_3} & \frac{\partial g_1}{\partial x_4} & \frac{\partial g_1}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_1}{\partial x} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_0} & \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \frac{\partial g_2}{\partial x_3} & \frac{\partial g_2}{\partial x_4} & \frac{\partial g_2}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_2}{\partial x} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x_0} & \frac{\partial g_3}{\partial x_1} & \frac{\partial g_3}{\partial x_2} & \frac{\partial g_3}{\partial x_3} & \frac{\partial g_3}{\partial x_4} & \frac{\partial g_3}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_3}{\partial x} \\ \frac{\partial g_4}{\partial x_0} & \frac{\partial g_4}{\partial x_1} & \frac{\partial g_4}{\partial x_2} & \frac{\partial g_4}{\partial x_3} & \frac{\partial g_4}{\partial x_4} & \frac{\partial g_4}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_4}{\partial x} \\ \frac{\partial g_5}{\partial x_0} & \frac{\partial g_5}{\partial x_1} & \frac{\partial g_5}{\partial x_2} & \frac{\partial g_5}{\partial x_3} & \frac{\partial g_5}{\partial x_4} & \frac{\partial g_5}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_5}{\partial x} \\ \frac{\partial g_6}{\partial x_0} & \frac{\partial g_6}{\partial x_1} & \frac{\partial g_6}{\partial x_2} & \frac{\partial g_6}{\partial x_3} & \frac{\partial g_6}{\partial x_4} & \frac{\partial g_6}{\partial \dot{x}} & \frac{\partial g_6}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

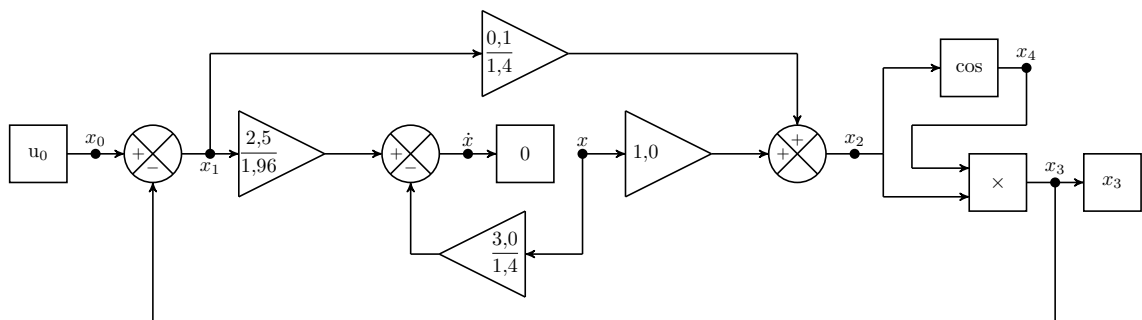


Figura 30 – Diagrama de blocos para o cálculo das condições iniciais - Sistema não linear

resultando em (3.66)

$$\mathbf{x}^1(0) = \mathbf{x}^0(0) + \Delta \mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} 0,3000 \\ -0,6775 \\ -0,4517 \\ 0,9775 \\ 1,7618 \\ 0,0000 \\ -0,4033 \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

O processo iterativo prossegue com o cálculo dos resíduos e da matriz jacobiana com os novos valores de \mathbf{x} até que as condições de convergência do método de Newton sejam atendidas após 5 iterações considerando a tolerância absoluta $\epsilon_{abs} = 1e^{-4}$ e relativa $\epsilon_{abs} = 1e^{-6}$. O resultado final obtido é definido em (3.67):

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3000 \\ 0,1805 \\ 0,1203 \\ 0,1195 \\ 0,9928 \\ 0,0000 \\ 0,1075 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

• Formulação para a simulação

O equacionamento para a simulação é obtido a partir da topologia do diagrama de blocos da Figura 29(b), definindo:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = u_0(t) \\ x_1(t) = x_0(t) - x_3(t) \\ x_2(t) = \frac{0,1}{1,4}x_1(t) + x(t) \\ x_3(t) = x_2(t)x_4(t) \\ x_4(t) = \cos x_2(t) \\ \dot{x}(t) = \frac{2,5}{1,96}x_1(t) - \frac{3,0}{1,4}x(t) \\ x(t) = \int \dot{x}(t)dt \end{array} \right. \quad (3.68)$$

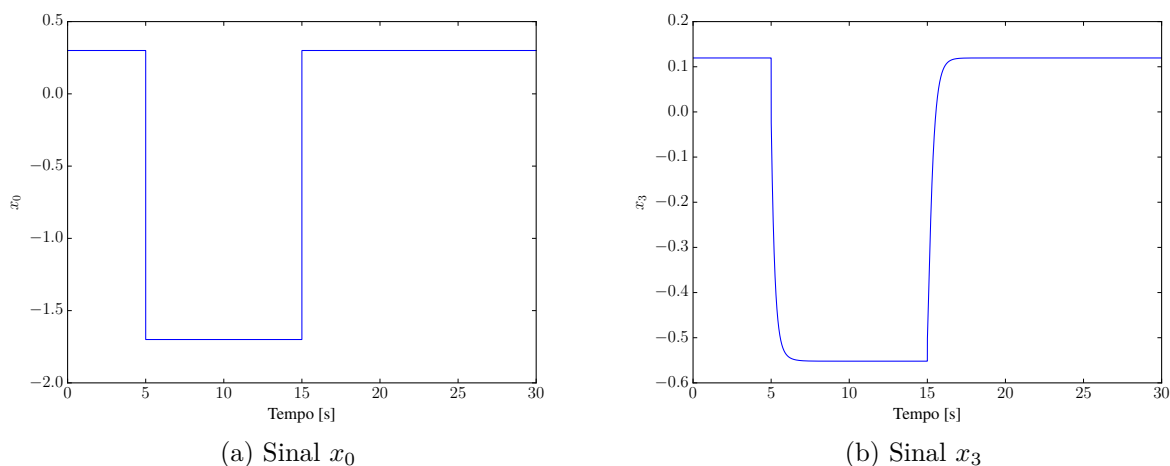


Figura 32 – Resultados da simulação do sistema não-linear: (a) Sinal x_0 (b) Sinal x_3

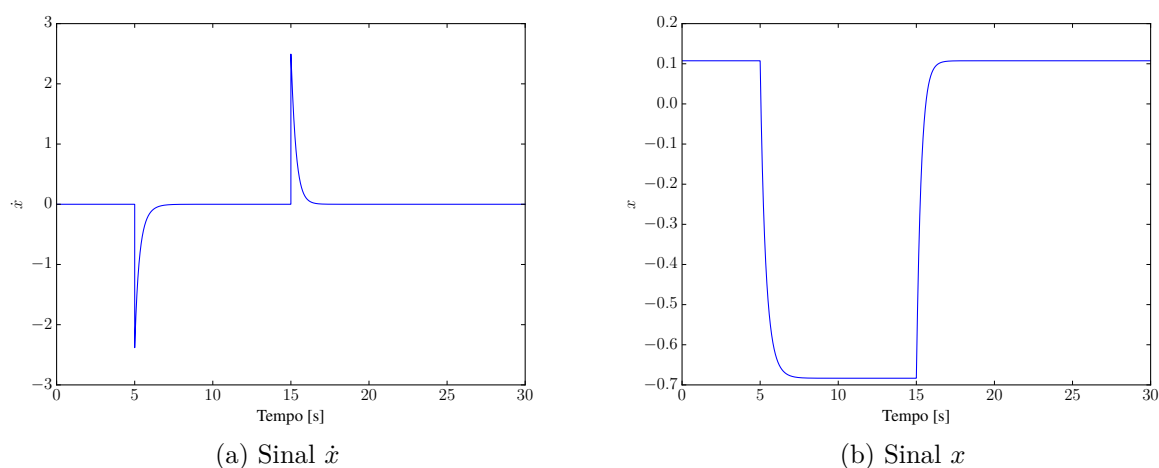


Figura 33 – Resultados da simulação do sistema não-linear: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x

• Formulação para a análise de descontinuidades

A análise de descontinuidade precisa ser aplicada em dois instantes de tempo,

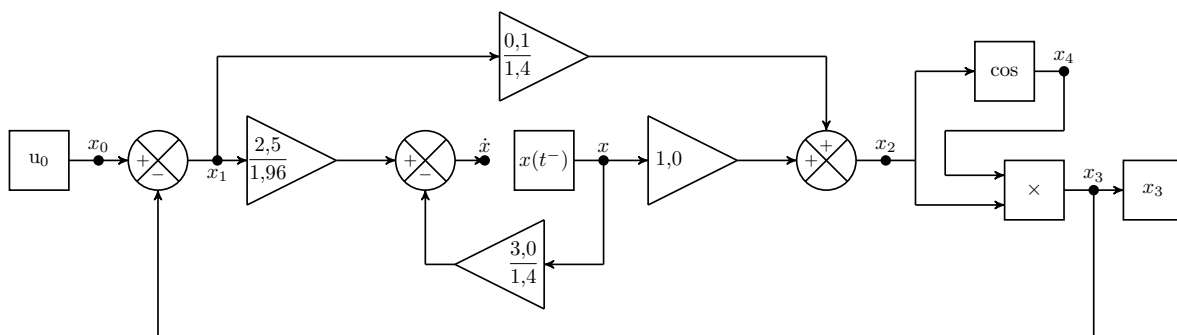


Figura 34 – Diagrama para cálculo das descontinuidades.

$t = 5s$ e $t = 15s$ nos quais ocorrem variações instantâneas do sinal $u_0(t)$. Dessa forma, fazendo as considerações pertinentes vistas na Seção 3.5 define-se o diagrama de bloco da Figura 34 e, conseqüentemente, as equações em (3.73).

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} x_0(t^+) - u_0(t^+) \\ x_1(t^+) - x_0(t^+) + x_3(t^+) \\ x_2(t^+) - \frac{0,1}{1,4}x_1(t^+) - x(t^+) \\ x_3(t^+) - x_2(t^+)x_4(t^+) \\ x_4(t^+) - \cos x_2(t^+) \\ \dot{x}(t^+) - \frac{2,5}{1,96}x_1(t^+) + \frac{3,0}{1,4}x(t^+) \\ x(t^+) - x(t^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

A matriz jacobiana referente à este conjunto de equações é apresentada em (3.74). Ao compará-la a matriz em (3.72) para simulação é observada a diferença na sétima linha pela modificação da equação do bloco integrador considerada em cada etapa.

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1,0000 & & & & & & \\ -1,0000 & 1,0000 & & & & & \\ & -0,0714 & 1,0000 & & & & -1,0000 \\ & & -x_4 & 1,0000 & -x_2 & & \\ & & \text{sen } x_2 & & 1,0000 & & \\ & -1,2755 & & & & 1,0000 & 2,1429 \\ & & & & & & 1,0000 \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

- Análise para $t = 5$:

No instante $t = 5^-$, \mathbf{x} vale:

$$\mathbf{x}(5^-) = \begin{bmatrix} x_0(5^-) \\ x_1(5^-) \\ x_2(5^-) \\ x_3(5^-) \\ x_4(5^-) \\ \dot{x}(5^-) \\ x(5^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3000 \\ 0,1805 \\ 0,1203 \\ 0,1195 \\ 0,9928 \\ 0,0000 \\ 0,1075 \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

Atualizando \mathbf{x} para $t = 5^+$ s, obtém-se:

$$\mathbf{x}(5^+) = \begin{bmatrix} x_0(5^+) \\ x_1(5^+) \\ x_2(5^+) \\ x_3(5^+) \\ x_4(5^+) \\ \dot{x}(5^+) \\ x(5^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,7000 \\ -1,6870 \\ -0,0130 \\ 0,0130 \\ 0,9999 \\ -2,3820 \\ 0,1075 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

- Análise para $t = 15$:

Repetindo o processo, no instante $t = 15^-$, \mathbf{x} vale:

$$\mathbf{x}(15^-) = \begin{bmatrix} x_0(15^-) \\ x_1(15^-) \\ x_2(15^-) \\ x_3(15^-) \\ x_4(15^-) \\ \dot{x}(15^-) \\ x(15^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1,7000 \\ -1,1481 \\ -0,7653 \\ -0,5519 \\ 0,7211 \\ 0,0000 \\ -0,6834 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Após aplicar a análise de descontinuidade \mathbf{x} é atualizado para:

$$\mathbf{x}(15^+) = \begin{bmatrix} x_0(15^+) \\ x_1(15^+) \\ x_2(15^+) \\ x_3(15^+) \\ x_4(15^+) \\ \dot{x}(15^+) \\ x(15^+) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3000 \\ 0,8072 \\ -0,6257 \\ -0,5072 \\ 0,8105 \\ 2,4939 \\ -0,6834 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

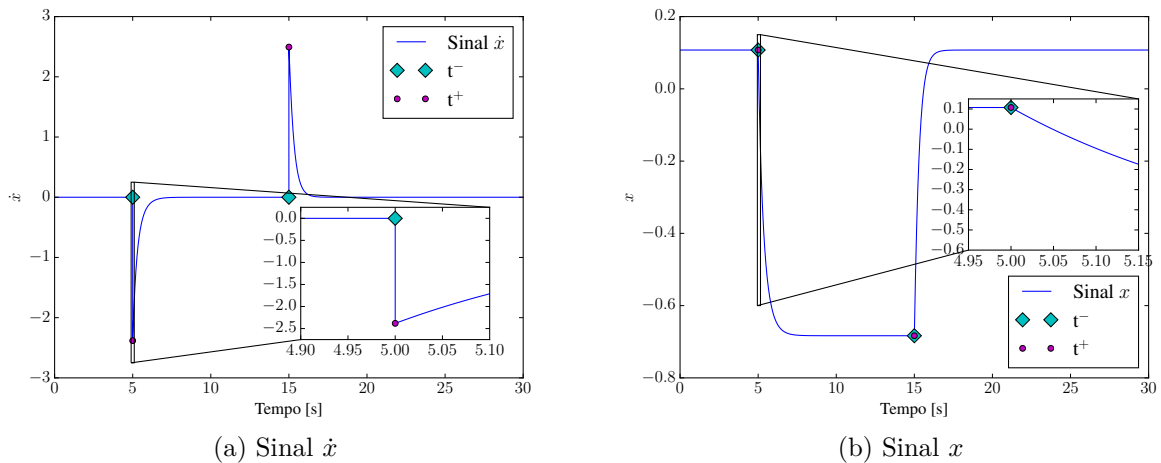


Figura 35 – Resultados da simulação do sistema não-linear considerando a análise de descontinuidades: (a) Sinal \dot{x} (b) Sinal x

3.8 Formulação dos Sistemas Elétrico de Potência

Nesta seção é apresentada a formulação matemática considerada para os componentes dos sistemas elétricos de potência e são definidas algumas estratégias adotadas para o cálculo das condições iniciais e simulação. Como visto os sistemas de potência de grande porte são compostos, basicamente, pelos sistemas de geração, de transmissão e pelas cargas.

O sistema de geração é composto pelas unidades geradoras e seus respectivos controladores. Os geradores mais comumente empregados são os síncronos, cujos modelos matemáticos são descritos no Apêndice B. Os controladores podem apresentar diferentes topologias e funções dependendo dos sistemas de excitação. Os modelos dos sistemas de excitação (regulador de tensão, estabilizadores de potência) apropriados para estudos de estabilidade do sistema de potência podem ser encontrados em [12, 15] e alguns modelos para os reguladores de velocidade são descritos em [12].

Os componentes básicos do sistema de transmissão são as linhas de transmissão e os transformadores. Para estes elementos são considerados os modelos π de regime permanente (desconsidera-se as dinâmicas da rede), também empregados nos estudos de fluxo de potência [27]. A formulação matemática é apresentada no Apêndice C.

Por fim, as características das cargas podem influenciar na estabilidade dos sistemas elétricos. Por este motivo é necessário adotar modelos que sejam capazes de representar adequadamente o comportamento da carga de acordo com o estudo a ser realizado. No entanto, obter um modelo adequado para representar as diferentes cargas no sistema se torna uma tarefa árdua devido à falta de informações precisas e as incertezas envolvidas no comportamento das cargas. Por isso, para este trabalho, são adotados dois tipos de cargas,

um modelo estático e outro dinâmico. Para o primeiro adota-se o modelo de impedância constante, já para o segundo não há um modelo pré-definido, dessa forma a sua topologia é um dado de entrada do problema. Algumas considerações acerca dos modelos de carga são descritos no Apêndice E.

Definidos os modelos matemáticos dos componentes do sistema elétrico, na sequência, são apresentadas as estratégias que são adotadas em cada etapa (cálculo das condições iniciais, simulação e análise de descontinuidades) das simulações de estabilidade em sistemas de potência.

3.8.1 Cálculo das Condições Iniciais

Para o sistema de potência o cálculo das condições iniciais visa determinar o estado de operação dos geradores síncronos, dos reguladores e das cargas dinâmicas. Este estado é obtido a partir do ponto de operação calculado previamente por meio de um fluxo de potência, no qual são obtidos os valores das tensões, potências geradas, consumidas, entre outras grandezas.

O cálculo é dividido de acordo com os componentes considerados, ou seja, é realizado um cálculo para cada unidade geradora equivalente, que é formado por uma planta com diversos geradores e controles associados, e um para cada modelo de carga dinâmica considerada. Dessa forma, avaliando um sistema com k unidades geradoras equivalente e m cargas dinâmicas, são realizados $k + m$ processos sequenciais de cálculos das condições iniciais.

A unidade geradora equivalente é composta pelo gerador e controladores associados. A partir dos modelos definidos no Apêndice B para os geradores síncronos, pode-se representar o gerador de forma simplificada pelo diagrama da Figura 36. Observa-se a existência de quatro sinais de entrada (V_r - componente real da tensão terminal, V_m - componente imaginária da tensão terminal, E_{fd} - tensão de campo e P_m potência mecânica) e dois de saída (I_r - componente real da corrente injetada e I_m - componente imaginária da corrente injetada). Por meio desses sinais é realizada tanto a conexão à rede (V_r , V_m , I_r e I_m) quanto aos reguladores (E_{fd} e P_m).

Os sinais V_r , V_m , I_r e I_m estão relacionadas às tensões e correntes nas suas formas

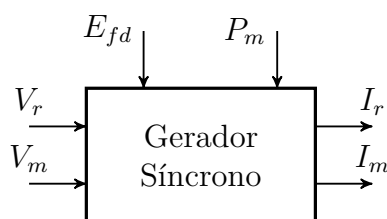


Figura 36 – Diagrama simplificado para o gerador.

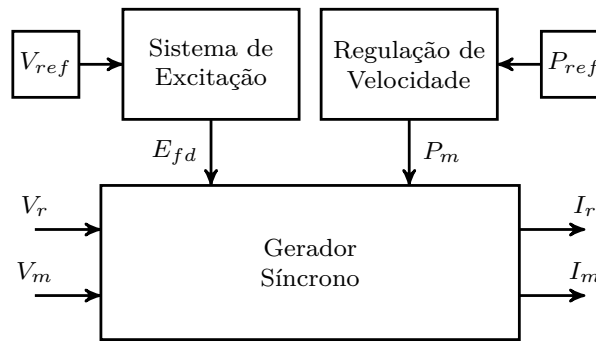


Figura 37 – Diagrama simplificado para a unidade geradora.

cartesianas, portanto, são definidos a partir do fluxo de potência e representam as condições de contorno para a unidade geradora considerada. Já os sinais E_{fd} e P_m estão relacionados aos sinais provenientes dos sistemas de excitação e regulação da velocidade, respectivamente. Em geral, internamente à estes sistemas existem sinais de referência (V_{ref} , P_{ref}) também desconhecidos que são responsáveis por produzir os sinais E_{fd} e P_m . Portanto, quando ambos os sistemas estão presentes, topologicamente a unidade geradora pode ser ilustrada pelo diagrama da Figura 37.

Como visto na Subseção 3.3.1 quando determinados sinais de entrada são desconhecidos devem ser realizadas alterações no modelo matemático para que sejam consideradas as condições de contorno definidas pelos sinais de saída conhecidos (I_r e I_m). Sendo assim, às entradas desconhecidas é adicionado um bloco integrador com entrada nula como representado na Figura 38.

Contudo, em determinadas situações, os geradores não possuem alguns dos sistemas de regulação para o controle dos sinais E_{fd} e P_m . Para esta condição a topologia adotada para o problema é a representada na Figura 39.

Quanto as cargas dinâmicas, o processo de cálculo é similar, com as condições de contorno sendo definidas pelos sinais V_r , V_m , I_r e I_m provenientes a partir do fluxo de potência. No entanto, as alterações com relação ao acréscimo ou não dos integradores adicionais ou outras modificações na topologia é dependente do modelo considerado para a carga dinâmica. Genericamente, pode-se considerar o diagrama da figura Figura 40 como

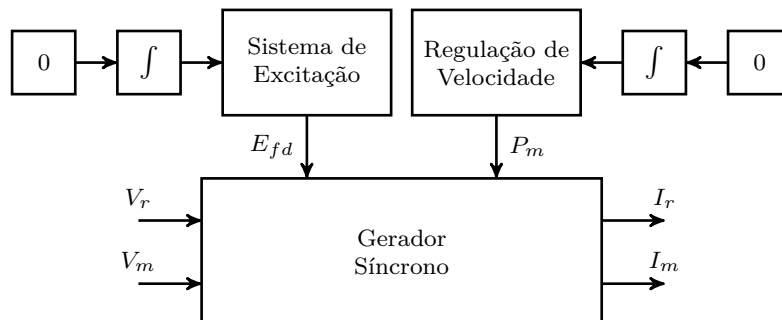


Figura 38 – Diagrama simplificado da unidade geradora com os integradores adicionais.

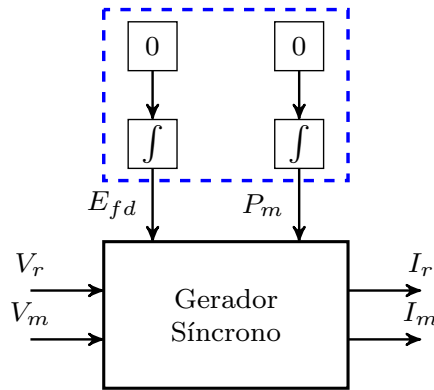


Figura 39 – Diagrama simplificado do gerador síncrono sem sistemas de regulação e com os integradores adicionais.

modelo para as cargas dinâmicas.

3.8.2 Simulação

Na etapa de simulação é considerado um único problema, as equações do sistema de geração, da rede e das cargas são agrupadas em um único conjunto. As equações algébricas e diferenciais são solucionadas simultaneamente caracterizando o esquema simultâneo implícito para a solução do conjunto de equações algébrico-diferenciais do sistema. Desta maneira, a topologia do problema global pode ser representada de forma genérica pelo diagrama da Figura 41 para um sistema com n unidade geradoras. Vale observar que não estão representadas as cargas explicitamente, já que para este sistema de potência as cargas são consideradas passivas e modeladas por impedância constante e, portanto, incluídas na matriz de admitância nodal (\mathbf{Y}_{bus}) que representa a rede.

3.8.3 Análise de Descontinuidade

Como visto na Seção 3.5 a análise de descontinuidade é realizada quando alguma variável algébrica do sistema sofre uma variação instantânea em função de alguma perturbação. Eventos normalmente estudados através de simulações de estabilidade são dados a seguir:

- Abertura total de circuito CA no sistema de transmissão;
- Modificação de *shunt* em barra CA;

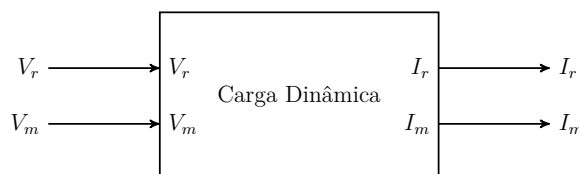


Figura 40 – Diagrama simplificado para a carga dinâmica.

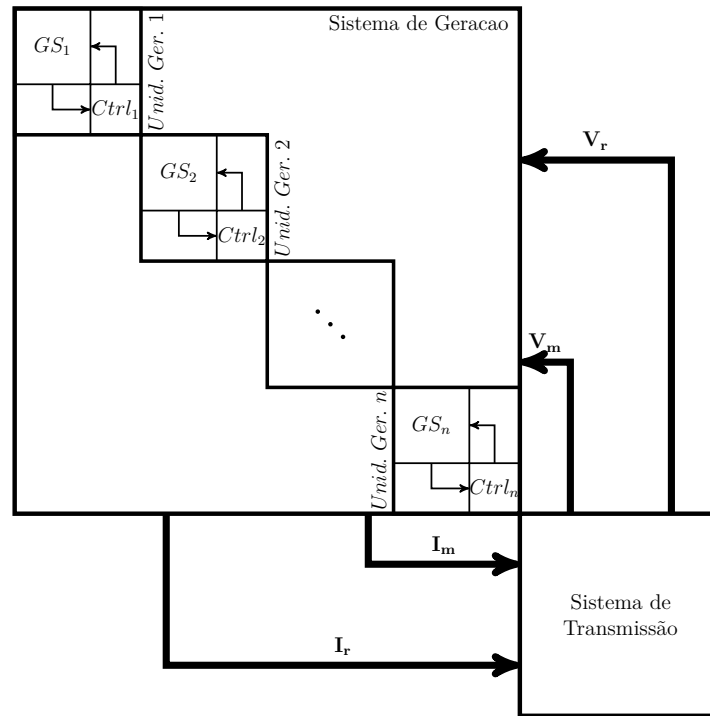


Figura 41 – Sistema de geração com n unidades geradoras.

- Aplicação de curto circuito em barra CA (Apêndice D);
- Remoção de curto circuito em barra CA;
- Aplicação de degrau na referência ou entrada de sistemas de controle.

A topologia considerada para avaliação de descontinuidades em estudos de estabilidade em sistema de potência é a mesma para simulação ilustrada na Figura 41 como descrito anteriormente, sendo diferenciado apenas pelo conjunto de equações que modelam a análise de descontinuidade.

3.9 Considerações Finais

Neste capítulo é apresentado e formalizado os aspectos básicos relacionados a modelagem de sistemas dinâmicos, descrevendo os pontos abordados para o equacionamento do problema com o objetivo de calcular as condições iniciais e avaliar o comportamento dinâmico do sistema. Posteriormente, foram destacados os métodos numéricos necessários para a solução do problema, o método trapezoidal implícito, que é o método de integração empregado para a conversão das equações diferenciais em das diferenças, tornando o problema puramente algébrico para que, na sequência, fosse utilizado o método de Newton-Raphson para obtenção da solução, caracterizando o esquema de solução como sendo simultâneo e implícito. Além disso, foram apresentadas estratégias consideradas para eliminação de dinâmicas que consiste, basicamente, na retirada do bloco integrador e, por

fim, apresentou-se aspectos referentes a análise de descontinuidades que refere-se a avaliação do problema no instante da ocorrência de um distúrbio no sistema e é caracterizado pela não variação instantânea das variáveis de estado.

Após a apresentação da modelagem dos sistemas, as diversas estratégias definidas foram empregadas em dois sistemas exemplos, sendo, o primeiro um sistema linear e o segundo não linear. Com este dois exemplos observou-se que as características de modelagem para ambos os sistemas é idêntica inclusive com relação ao emprego do método de Newton-Raphson. Por fim, foram apresentados alguns aspectos da modelagem que são empregados especificamente aos componentes dos sistemas elétricos de potência, tais como, as considerações para cálculo das condições iniciais individualmente por unidade geradora e cargas dinâmicas, quando consideradas.

Ainda foram definidas as características matemáticas gerais do problema, no próximo são apresentadas as características da ferramenta computacional PySEP implementada para a simulação de sistemas dinâmicos, em especial, os sistemas elétricos de potência.

Modelagem Computacional

Neste capítulo são descritas as características computacionais do simulador desenvolvido, apresentando a organização funcional adotada para cada bloco (integrador, ganho, não-linear, comparadores), os quais são empregados para descrever as equações algébrico-diferenciais dos diversos componentes presentes nos SEP, tais como geradores, reguladores, cargas, entre outros, na forma de diagramas de blocos.

Ainda são apresentados alguns conceitos básicos de programação orientada a objetos empregados no desenvolvimento da ferramenta computacional, além de características da linguagem de programação Python utilizada na implementação [10]. Na sequência, são apresentados detalhes referentes a modelagem do cálculo das condições iniciais e da simulação do comportamento dinâmico de SEP.

4.1 Considerações Iniciais

No desenvolvimento de ferramentas computacionais, principalmente para a simulação do comportamento dinâmico de sistemas elétricos de potência, precisa-se atender alguns requisitos, tais como [2]:

- **Economia no armazenamento de dados:** Em geral, os sistemas de equações associadas aos sistemas elétricos de potência apresentam dimensões elevadas. Assim, torna-se fundamental a aplicação de técnicas que minimizem tanto o acesso como armazenamento de dados, tais como técnicas de esparsidade.
- **Flexibilidade:** Caracterizado pela facilidade com que os modelos podem ser alterados para acomodar os requisitos específicos e novos dispositivos.

Dessa forma, destaca-se que todos os aspectos empregados visam tornar a ferramenta flexível além de propiciar um elevado grau de generalidade permitindo a análise de uma diversidade de modelos para os equipamentos, já que os controladores são, em geral, definidos pelos usuários. Adotar tal característica deve-se a necessidade de atender as constantes diversificação dos modelos dos equipamentos que podem ser empregados na operação dos sistemas elétricos. Além disso, a flexibilização adotada busca compatibilizar os modelos empregados aos do programa ANATEM.

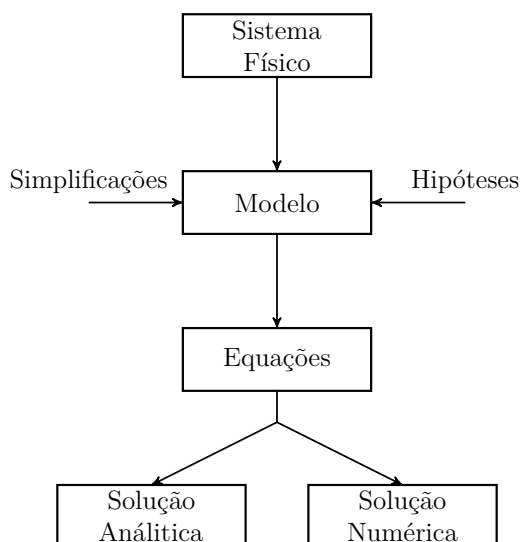


Figura 42 – Esquema para o estudo de um sistema físico.
Fonte: [28]

Para a modelagem de um sistema físico, incluindo os sistemas elétricos de potência, pode-se empregar o esquema apresentado na Figura 42 que descreve uma sequência de passos para o desenvolvimento de modelos matemáticos referentes ao sistema sob estudo. Observando esta figura destaca-se que para qualquer sistema real (físico) deve-se primeiramente definir o escopo do problema, ou seja, deve-se definir as estratégias, hipóteses e simplificações que precisam ser consideradas, sendo possível assim estabelecer um modelo matemático. Ao serem formalizadas, essas equações, teoricamente, podem ser resolvidas de forma analítica ou numericamente, dependendo da natureza e das características inerentes ao sistema físico avaliado.

Relacionando o esquema apresentado na Figura 42 aos estudos de estabilidade de sistemas elétricos de potência, o sistema físico corresponde ao SEP. O modelo matemático, por sua vez, é definido a partir dos equipamentos (geradores, reguladores, cargas, sistema de transmissão) e pelas hipóteses e simplificações adotadas (Ex: desconsideração dos efeitos dos transitórios eletromagnéticos) para que o sistema seja caracterizado por um conjunto de equações algébrico-diferenciais.

Como destacado a solução desse conjunto de equações pode ser obtida de duas formas: analítica ou numérica. No entanto, para a avaliação do comportamento dinâmico dos sistemas elétricos de potência, devido as suas dimensões, torna-se praticamente impossível obter uma solução analítica sendo necessário o emprego de métodos numéricos. Contudo, devido às dimensões e complexidades dos conjuntos de equações associados, empregar os métodos numéricos manualmente também pode ser considerado inviável. Neste contexto, torna-se fundamental buscar alternativas que permitam auxiliar e automatizar o processo de estudo.

Dessa forma, a alternativa é a implementação computacional de uma ferramenta

capaz de lidar tanto com as equações matemáticas quanto com as diferentes topologias para os sistemas elétricos.

Com o desenvolvimento de uma ferramenta genérica e flexível que seja capaz de atender as exigências (dimensão e complexidade) relacionadas aos estudos dos sistemas elétricos de potência, também é possível atribuir características que permitam avaliar determinadas hipóteses e simplificações de forma a adaptar os modelos inicialmente considerados. Como, por exemplo, para os estudos de longo prazo no qual pode-se desconsiderar as dinâmicas de curta/média duração.

Conclui-se assim que o ponto chave para a avaliação de um sistema físico é a tradução de suas equações matemáticas em uma forma de código computacional adequado, empregando para isso uma das linguagens de programação disponíveis (Fortran, C/C++, Python, entre outras).

Portanto, buscando realizar a tradução das equações algébrico-diferenciais que modelam o comportamento dinâmico do SEP é desenvolvida uma ferramenta de simulação, nomeada como PySEP, a qual tem suas características apresentadas e discutidas ao longo deste capítulo. A linguagem de programação Python foi escolhida para a implementação dessa ferramenta. Alguns aspectos que justificam essa escolha são também apresentados ao longo do capítulo, além de destacar algumas características pertinentes referente a linguagem.

4.2 Linguagem de programação Python

No ambiente de desenvolvimento computacional de qualquer aplicação é possível adotar duas abordagens distintas quanto a linguagem de programação empregada, podendo ser utilizadas as linguagens tradicionais ou de *scripting*. Nos tópicos a seguir são descritas algumas diferenças conceituais entre essas linguagens [28]:

- As linguagens tradicionais são tipicamente C, C++, Fortran, Java, C# e Scala.
- As linguagens comumente utilizadas para execução de *scripts* são, por exemplo, Perl, Python, PHP, Tcl e Ruby. Na área da engenharia, linguagens com altos níveis de abstração, como R, Matlab, Mathematica e Octave são escolhas populares.
- As linguagens tradicionais (C, C++, Fortran, Java, entre outras) são compiladas, enquanto as linguagens de *script* (Perl, Python e entre outras) são interpretadas. Uma linguagem interpretada facilita a fase de implementação e permite a rápida criação de protótipos de novas funções. Por outro lado, linguagens compiladas são capazes de fornecer aplicações mais eficientes do que as interpretadas.

Além disso, as linguagens de *script* fornecem ferramentas versáteis para o rápido desenvolvimento das ideias dos programadores já que a maioria das operações básicas estão disponíveis em bibliotecas existentes. Estas linguagens ainda são caracterizadas por uma curva de aprendizado de alta velocidade em comparação as linguagens tradicionais. Isto deve-se ao fato da reduzida preocupação com a definição de tipo de variáveis, alocação de memória e por sua sintaxe ser, geralmente, bastante simples e limpa [28].

Nas últimas décadas bibliotecas eficientes para a álgebra linear, fatoração de matrizes, análise de auto-valores, têm sido desenvolvidas e otimizadas com a ajuda de milhares de programadores. As bibliotecas ATLAS (*Automatically Tuned Linear Algebra Software*) e UMFPACK são bons exemplos, estas bibliotecas são códigos escritos em Fortran ou C. Utilizando as linguagens de *script* é possível criar interfaces muito eficientes e assim reutilizar bibliotecas implementadas em linguagens tradicionais tirando partido de todos os recursos de uma forma mais eficiente [28].

De maneira geral, nenhuma linguagem de programação é perfeita, sendo assim, qualquer escolha tem vantagens e desvantagens. Portanto, avaliando os aspectos básicos apresentados para os objetivos deste trabalho observou-se que as vantagens do emprego de uma linguagem de *script* prevaleceu sobre a de outras linguagens, justificando assim a escolha pela linguagem Python para o desenvolvimento da ferramenta proposta.

Em [9], Milano destacou algumas importantes características do Python.

- É uma linguagem de código aberto, que permite a implementação e distribuição de projetos também em código aberto;
- Totalmente baseada em estruturação por classes, o que beneficia a criação, manutenção e reutilização de códigos modulados por orientação a objeto;
- Possui bibliotecas disponíveis como NumPy e CVXOPT que fornecem um ligação às bibliotecas tradicionais (Por exemplo, BLAS, LAPACK, UMFPACK, entre outras.) para a manipulação de matrizes multidimensionais, álgebra linear, análise de autovalores e matrizes esparsas;
- Também possui bibliotecas gráficas como Matplotlib, para a produção de gráficos 2D e 3D de qualidade;
- Possui ainda uma enorme variedade de bibliotecas disponíveis desenvolvidas por terceiros que permitem facilmente estender as características de uma aplicação muito além do escopo do projeto original;
- A sintaxe é relativamente simples e compacta.

As bibliotecas descritas a seguir são os principais pacotes empregadas no desenvolvimento e implementação da ferramenta.

- NumPy: É um pacote para uso em geral projetado para manipulação eficiente de matrizes de pequenas e grandes dimensões. Além disso, fornece ferramentas para a integração do Python à linguagens como C/C++ e Fortran, possibilitando o uso de rotinas numéricas compiladas nessas linguagens. Ainda fornece ferramentas para operações matemáticas em geral, para álgebra linear, transformadas de Fourier, entre outras [29,30]. Esta biblioteca é empregada na implementação das operações básicas com vetores e matrizes.
- SciPy: É um conjunto de funções matemáticas construídas sobre a biblioteca NumPy, acrescentando um poder significativo ao Python fornecendo ao desenvolvedor comandos de alto nível e classes para manipulação e visualização de dados. O Scipy é composto por sub-pacotes para solução de equações diferenciais ordinárias e integrações, álgebra linear, processamento de sinais, matrizes esparsas, entre outros [31]. Este pacote é amplamente empregado pela ferramenta na solução do sistema linear $Ax = b$, além de ser utilizada a sua capacidade na manipulação da esparsidade das matrizes jacobianas.
- NetworkX: é o pacote para a criação, manipulação e estudo da estrutura, dinâmica e funções de redes complexas [32]. Este pacote é empregado para criar e manipular o grafo orientado que representa o diagrama de fluxo de sinais como descrito no longo do Capítulo 3 para os sistemas que são avaliados.
- Cython: É um compilador estático otimizado para a linguagem de programação Python que, suporta realizar a chamada de funções na linguagem C e declaração de dados do tipos C para variáveis e atributos das classes. Isso permite que o compilador gere códigos C muito eficientes a partir do código Cython. Além disso, tem a capacidade de realizar a integração nativamente de códigos existentes, principalmente a bibliotecas de alto desempenho implementadas na linguagem C [33]. Dessa forma, o conjunto de ferramentas disponíveis nesta biblioteca podem ser empregados para estabelecer uma interface entre pacotes compilados em C, tais como UMFPACK [34], SUPERLU [35] e KLU [36]. Estas bibliotecas são empregadas na solução de sistemas lineares do tipo $Ax = b$, como mostrado no Apêndice H. Adicionalmente, o emprego do Cython permitiu adotar uma estrutura para matrizes esparsas desenvolvida em C por meio da qual foram obtidos ganhos de performance com relação ao processo de acesso e atualização dos elementos não nulos da matriz jacobiana quando comparado ao emprego do Scipy.

Como descrito, as bibliotecas UMFPACK, SUPERLU e KLU são empregadas na solução do sistema linear esparsa, dessa forma, na sequência, são apresentados alguns detalhes sobre essas bibliotecas de solução.

- UMFPAK: É conjunto de rotinas para sistemas de equações lineares, $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, quando \mathbf{A} é uma matriz esparsa e assimétrica. São realizadas fatorações em \mathbf{PAQ} , \mathbf{PRAQ} ou $\mathbf{PR}^{-1}\mathbf{AQ}$ para o produto \mathbf{LU} , onde \mathbf{L} e \mathbf{U} são matrizes triangulares inferior e superior, respectivamente, \mathbf{P} e \mathbf{Q} são matrizes de permutação e \mathbf{R} é uma matriz diagonal. As matrizes \mathbf{P} e \mathbf{Q} são escolhidos para reduzir o número de elementos não nulos adicionados (*fill-in*). Adicionalmente a matriz de permutação \mathbf{P} tem a função de manter a precisão numérica (pivoteamento parcial e troca de linhas). A matriz esparsa \mathbf{A} pode ser quadrada ou retangular, singular ou não singular, real ou complexa. No entanto, apenas as matrizes quadradas podem ser empregadas na solução dos sistemas lineares do tipo $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, as matrizes retangulares apenas podem ser fatoradas [34].
- SUPERLU: É um conjunto de sub-rotinas empregados na solução de sistemas lineares esparsos do tipo $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$. A matriz \mathbf{A} é quadrada, não singular, esparsa e de dimensão $n \times n$, já \mathbf{X} e \mathbf{B} são matrizes densas e de dimensão $n \times n_{rhs}$, onde n_{rhs} é o número de vetores independentes. A matriz \mathbf{A} não precisa ser simétrica ou definida, na verdade a biblioteca SUPERLU é particularmente apropriada para matrizes com estrutura muito assimétricas. As bibliotecas usam variações da eliminação de Gauss otimizadas para tirar proveito da topologia esparsa de \mathbf{A} [35].
- KLU: É um conjunto de rotinas empregados para resolver sistemas esparsos de equações lineares. Primeiramente, a biblioteca permuta a matriz na sua forma triangular superior, através do pacote BTF. Caso isso não seja possível, a matriz é classificada como estruturalmente deficiente e numericamente singular. O bloco triangular formado é essencialmente único, independente do método aplicado sempre será levado ao mesmo número e tamanho de blocos, embora a ordem possa variar [36].

Após a definição pela escolha da linguagem de programação Python e apresentação dos seus aspectos básicos, são descritos, na sequência, as estruturas e modelagens adotadas para o desenvolvimento computacional da ferramenta de simulação proposta. Inicialmente são mostrados os blocos desenvolvidos para que as equações algébrico-diferenciais dos diferentes componentes dos sistemas elétricos possam ser descritas no formato de diagramas de blocos. Por fim, são apresentadas as estruturas específicas para o cálculo das condições iniciais e para a simulação dos sistemas de potência.

4.3 Desenvolvimento e Implementação Computacional

Nesta seção é apresentada a estrutura organizacional da ferramenta de simulação, partindo desde os blocos básicos para a escrita das equações algébrico-diferenciais na

forma de diagramas de blocos até as estruturas para o cálculo de condições iniciais e de simulação.

4.3.1 Blocos básicos implementados

Como destacado ao longo do desenvolvimento deste trabalho pode-se observar que os equipamentos dos sistemas elétricos de potência podem ter suas equações matemáticas escritas por meio de diagramas de blocos. Por este motivo, buscando generalizar e flexibilizar a modelagem pode-se definir alguns tipos de blocos básicos necessários para descrevê-los, resultando na implementação de cinco tipos:

- Ganho fixo (*Gain*);
- Integrador (*Int*);
- Bloco de Interface (*Interface*);
- Funções não lineares (*NonLinear*);
- Funções lógicas e comparadores (*Logical*).

Por meio dos três primeiros blocos é possível descrever qualquer sistema linear. No entanto, os sistemas de potência possuem equipamentos com características não-lineares e funções lógicas/comparadoras tornando-se necessário outros blocos, justificando a implementação dos dois últimos blocos. O diagrama de classes simplificado para estes blocos é representado na Figura 43, na qual ainda é possível observar a presença de outros três blocos (*GainLimit*, *IntLimit*, *IntInic*) que são derivados dos básicos e possuem características especiais.

Na sequência são apresentados os atributos e métodos presentes em cada uma das classes bem como a sua representação no formato de diagrama de blocos e as equações matemáticas que modelam.

Classe *Gain*:

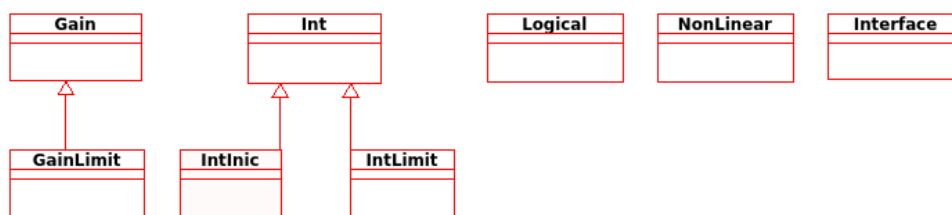


Figura 43 – Diagrama simplificado das classes básicas.

Classe estabelecida para o bloco de ganho fixo representado na Figura 44 e definido pela equação (4.1).

$$y = G \cdot x \quad (4.1)$$

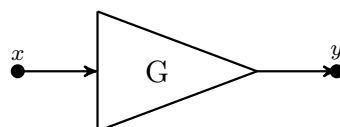


Figura 44 – Bloco ganho.

Para esta classes foram adotados os seguintes atributos:

- Input: Recebe a variável de entrada (x).
- IndexInput: Armazena o índice referente ao nó da variável de entrada.
- Output: Recebe a variável de saída (y).
- IndexOutput: Armazena o índice referente a variável de saída.
- gainG: Armazena o valor do ganho fixo(G).

Para o bloco de ganho fixo são implementadas os seguintes métodos:

- MatrixInic: Define a estrutura da matriz jacobiana para o cálculo das condições iniciais preenchendo apenas as posições com os elementos não nulos. Como a derivada para este bloco não é alterada a matriz jacobiana é diretamente preenchida com a derivada da equação $y - G \cdot x = 0$ adotada no método de Newton.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= -G \end{aligned} \quad (4.2)$$

- MatrixSim : Define a estrutura dos elementos não nulos da matriz jacobiana para a etapa de simulação. É idêntica ao método MatrixInic.
- MatrixRein: Define a estrutura da matriz jacobiana para os cálculos de descontinuidades sendo implementado igual ao método MatrixInic.

Ao longo do desenvolvimento observou-se a necessidade de estabelecer um bloco que tivesse a capacidade de representar as características dos limitadores estáticos. Dessa forma, utilizando a classe *Gain* como base definiu-se a classe *GainLimit*.

Classe *GainLimit*:

Classe para o bloco de ganho fixo com limitador estático, derivada da classe *Gain*. Este bloco está representado na Figura 45 e definido pela equação (4.3).

$$y = \begin{cases} G \cdot x, & \text{para } y_{min} \leq G \cdot x \leq y_{max} \\ y_{min}, & \text{para } G \cdot x < y_{min} \\ y_{max}, & \text{para } G \cdot x > y_{max} \end{cases} \quad (4.3)$$

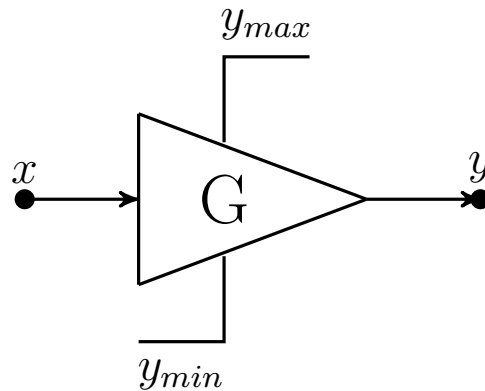


Figura 45 – Bloco ganho com limitador (estático).

Adicionalmente aos da classe *Gain* são definidos os seguintes atributos específicos:

- Ymin: Armazena o valor do limite inferior (y_{min})
- Ymax: Armazena o valor do limite Superior (y_{max})

Somados aos métodos que estabelecem a estrutura da matriz jacobiana, tem-se:

- VerificaLimiteIni, VerificaLimiteSim, VerificaLimiteRein: Método para verificação dos limites e modificação da matriz jacobiana durante o cálculo das condições iniciais, simulação e análise de descontinuidades, respectivamente.

– Verifica se o limite superior foi violado ($G \cdot x > y_{max}$): Se a condição for verdadeira a matriz jacobiana é modificada adotando a equação $y - y_{max} = 0$:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 0. \end{aligned} \quad (4.4)$$

– Verifica se o limite inferior foi violado ($G \cdot x < y_{min}$): Se a condição for verdadeira a matriz jacobiana é modificada adotando a equação $y - y_{min} = 0$:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 0. \end{aligned} \quad (4.5)$$

- Caso os limites não tenham sido violados é considerada a equação para faixa normal de operação ($y - G \cdot x = 0$):

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= -G. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Classe *Int*:

Classe para o bloco integrador que está representado na Figura 46 e é definido pela equação (4.7).

$$y = \int x dt \quad (4.7)$$

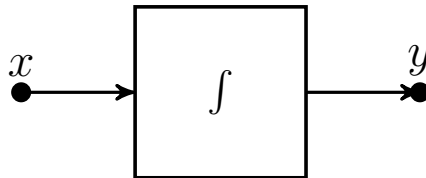


Figura 46 – Bloco integrador.

Os atributos adotados inicialmente para esta classe são:

- Input: Recebe a variável de entrada (x).
- IndexInput: Armazena o índice referente ao nó da variável de entrada.
- Output: Recebe a variável de saída (y).
- IndexOutput: Armazena o índice referente a variável de saída.
- valInic: Armazena um valor inicial pré-fixado definido pela entrada de dados (y_0).
- FlagFast: É uma condição para indicar se a dinâmica deste bloco será mantida ou eliminada durante a simulação.

Para este bloco foram definidos os seguintes métodos:

- calcHist: Cálculo da função histórica do integrador, neste momento está implementado apenas para o método trapezoidal segundo a equação (3.17b).

$$\text{hist}(t) = y(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \cdot x(t - \Delta t) \quad (4.8)$$

- **MatrixInic:** Define a estrutura da matriz jacobiana para o cálculo das condições iniciais. Como descrito na Seção 3.3 a equação considerada para o elemento integrador é $x = 0$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 0. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 1. \end{aligned} \quad (4.9)$$

No entanto, se tiver um valor definido no atributo referente ao valor inicial (`valInic`), a equação considerada torna-se $y - y_0 = 0$, resultando em:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 0. \end{aligned} \quad (4.10)$$

- **MatrixSim:** Define a estrutura da matriz jacobiana para a fase de simulação sendo considerada a aplicação do método trapezoidal resultando na equação $y - \frac{\Delta t}{2}x - \text{hist}(t) = 0$

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= -\frac{\Delta t}{2} \end{aligned} \quad (4.11)$$

- **MatrixRein:** Define a estrutura da matriz jacobiana para a análise de descontinuidade. Nestes cálculos a variável de estado é considerada constante não sofrendo variações instantâneas, portanto, adota-se $y(t^+) - y(t^-) = 0$.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 0. \end{aligned} \quad (4.12)$$

- **FastSimulation:** Método que estabelece a estrutura da matriz jacobiana de simulação quando a dinâmica modelada por esse integrador deve ser desconsiderada/eliminada. A equação considerada é $x = 0$.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 0. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 1. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Igualmente ao que foi observado para o bloco ganho, observou-se a necessidade de implementar um bloco que tivesse a capacidade de descrever as características dos limitadores dinâmicos, dessa forma, foi estabelecido o bloco integrador limitado.

Classe *IntLimit*:

Classe para o bloco integrador com limitador dinâmico, derivada da classe *Int*. Está representado na Figura 47 e é definido pela equação (4.14).

$$y = \begin{cases} \int x dt, & \text{para } X_{min} \leq \int x dt \leq X_{max} \\ X_{min}, & \text{para } \int x dt < X_{min} \\ X_{max}, & \text{para } \int x dt > X_{max} \end{cases} \quad (4.14)$$

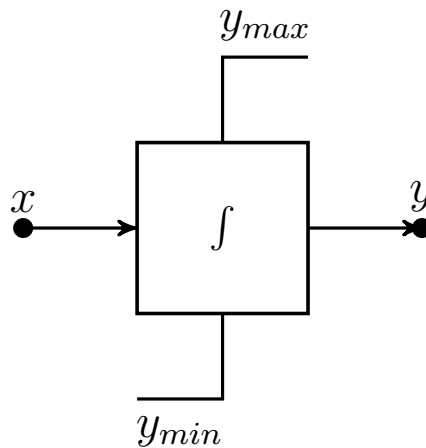


Figura 47 – Bloco integrador limitado - limitador dinâmico.

Além dos atributos estabelecidos para o bloco integrador comum definiu-se:

- Ymin: Armazena o valor do limite inferior (y_{min}).
- Ymax: Armazena o valor do limite superior (y_{max}).
- FaixaOperacao: Armazena a faixa de operação na qual o bloco integrador encontra-se, podendo ser normal, limite superior ou inferior.

Os métodos adicionais definidos para este bloco são para tratar os limites.

- VerificaLimiteIni: Verificação dos limites durante o cálculo das condições iniciais.
 - Limite superior violado ($y < y_{max}$), é considerada a equação $y - y_{max} = 0$.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 0. \end{aligned} \quad (4.15)$$

- Limite inferior violado ($y < X_{min}$), adota-se a equação $y - y_{min} = 0$.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 0. \end{aligned} \quad (4.16)$$

- Faixa Normal ($x = 0$)

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 0. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 1. \end{aligned} \quad (4.17)$$

- VerificaLimiteSim: Método para verificação dos limites durante a etapa de simulação. É importante destacar que para essa verificação o problema é subdividido de acordo com as três faixas de operação (normal, limite superior e inferior):

- Faixa de operação normal: Verifica-se se y viola o limite superior ou inferior, caso isso ocorra a matriz jacobiana é atualizada como definido em (4.18), caso contrário, é mantida a estrutura já definida.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 0. \end{aligned} \quad (4.18)$$

- Atual faixa de operação: limite inferior violado ($y < X_{min}$). Verifica se o integrador pode voltar a integrar, para isso avalia-se se $x > 0$, caso seja verdadeira a verificação a matriz jacobiana é atualizada:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= -\frac{\Delta t}{2} \end{aligned} \quad (4.19)$$

- Por fim, a faixa de operação com limite superior violado ($y > X_{max}$). Para retornar a faixa normal de operação na qual é retomada o processo de integração, verifica-se se $x < 0$. Caso a condição seja atendida faz-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 0. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= -\frac{\Delta t}{2} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Integrador: Classe *IntInic*:

Classe para o bloco integrador auxiliar o cálculo das condições iniciais também derivado da classe *Int*. É representado pelo bloco da Figura 48 e definido pela equação (4.21).

$$x = 0 \quad (4.21)$$

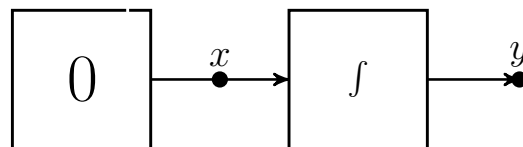


Figura 48 – Bloco integrador para auxiliar para cálculo das condições iniciais.

Este bloco não possui nenhum atributo ou método adicional com relação a sua classe base. Apenas os métodos são modificados de acordo com o que foi apresentado na Seção 3.3.

Métodos:

- **MatrixInic:** Define a estrutura para a matriz jacobiana empregada no cálculo das condições iniciais:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 0. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput] &= 1. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Classe *NonLinear*:

Classe do bloco para funções não lineares, diferentemente das classes anteriores, aceita n diferentes entradas de acordo com a função modelada e implementada. A Figura 49 representa de maneira simplificada as diferentes funções não lineares que podem ser modeladas por este blocos. A equação considerada pode ser escrita de forma genérica como em (4.23).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.23)$$

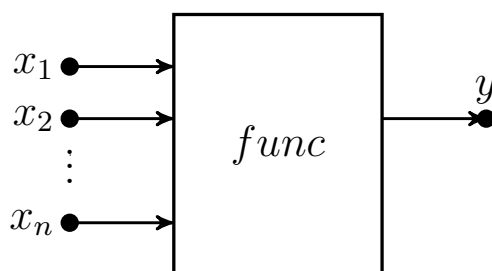


Figura 49 – Bloco para função não-linear/lógica.

Os atributos básicos desta classe são praticamente idênticos aos do ganho fixo, sendo diferenciado apenas pelo número de entradas possíveis.

- **Input:** Recebe as n variável de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n) .
- **IndexInput:** Armazena o índice referente aos nós das variáveis de entrada.
- **Output:** Recebe a variável de saída (y) .
- **IndexOutput:** Armazena o índice referente a variável de saída.

Para esta classe foram adotados os seguintes métodos:

- **MatrixInic, MatrixSim, MatrixRein:** Define apenas a estrutura inicial da matriz de cálculo das condições iniciais, de simulação e de análise de descontinuidades,

respectivamente, de forma a armazenar as posições dos elementos possivelmente não nulos.

$$\begin{aligned} \mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput_1] &= 1. \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput_2] &= 1. \\ &\vdots \\ \mathbf{J}[IndexOutput, IndexInput_n] &= 1. \end{aligned} \tag{4.24}$$

- Function: Realiza o cálculo da função implementada no bloco.
- Jacobian: Cálculo das derivadas parciais da função em relação as variáveis de entrada e atualização da matriz jacobiana.

Os dois últimos métodos dependem da função implementada diretamente no bloco, neste primeiro momento as seguintes funções podem ser empregadas pelo bloco:

- Funções básicas: Multiplicação, Divisão;
- Funções trigonométricas: Seno, Cosseno, Tangente;
- Cálculo da norma de um vetor;
- Valor absoluto;
- Raiz Quadrada;
- Exponencial;
- Logarítmico neperiano e base 10;
- Função Inversa;
- Pulso;
- Potência na base x;
- Rampa;
- Curvas de saturação;
- Função por pontos;
- Máximo e mínimo;
- Seletor;

- Implementação de qualquer função não linear (Ex: cálculo de potência elétrica ativa e reativa (Equação B.2), conversão de coordenadas (Equação B.4 e Equação B.5).

A Figura 50 representa de maneira simplificada uma estrutura para as diferentes funções não lineares implementadas neste bloco.

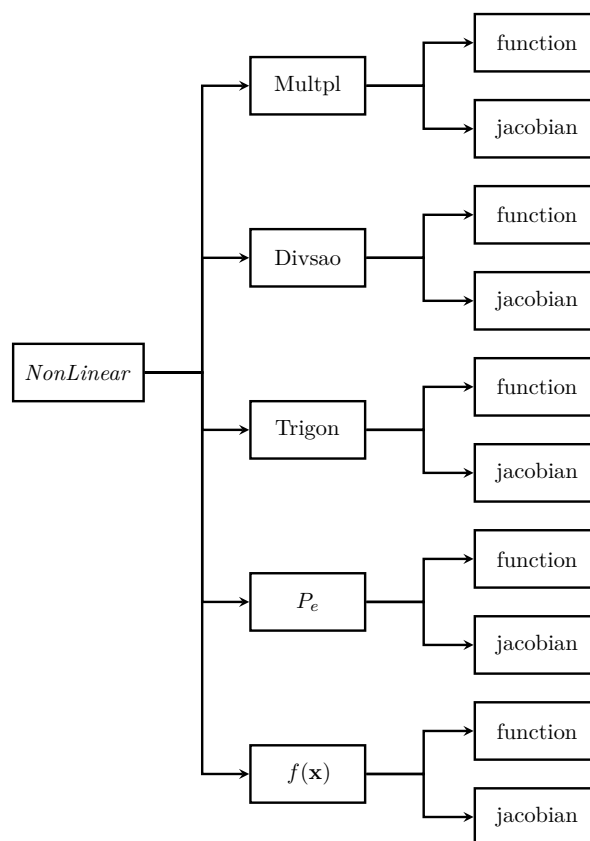


Figura 50 – Estrutura representativa para diferentes blocos não lineares.

Classe *Logical*: Classe do bloco para funções lógicas ou comparadoras. Igualmente ao bloco não linear também aceita n diferentes entradas de acordo com a função modelada. A representação mostrada na Figura 49 também pode ser empregada para representar as diferentes funções comparadoras/lógicas. A equação considerada pode ser escrita de forma genérica como em (4.23), no entanto, diferentemente das funções não-lineares para este tipo de bloco a saída é sempre 0 ou 1 de acordo com a função f , resultando em (4.25). Com isso, pode-se concluir que a estrutura da matriz jacobiana resultante para este bloco é sempre fixa.

$$y = \begin{cases} 0, & \text{para condição A da função } f \\ 1, & \text{para condição B da função } f \end{cases} \quad (4.25)$$

Os atributos básicos desta classe são idênticos ao da classe *NonLinear*, no entanto difere em parte com relação aos métodos implementados.

- Input: Recebe as n variáveis de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n) .
- IndexInput: Armazena o índice referente aos nós das variáveis de entrada.
- Output: Recebe a variável de saída (y) .
- IndexOutput: Armazena o índice referente a variável de saída.

Métodos:

- MatrixInic, MatrixSim, MatrixRein: Define a estrutura inicial da matriz de cálculo das condições iniciais, de simulação e de análise de descontinuidades, respectivamente, armazenando a posição do elemento não nulo.

$$\mathbf{J}[IndexOutput, IndexOutput] = 1. \quad (4.26)$$

- Function: Análise do resultado da função lógica ou comparador com saída igual a zero ou um.

As seguintes funções lógicas e comparadores foram implementados.

- Funções comparadoras: menor que (LT), menor igual (LE), maior que (GT), maior igual (GE), igual (EQ), diferente (NE);
- Funções lógicas: AND, OR, XOR, NOT, NAND, NOR, NXOR.

Classe *Interface*: Classe para o bloco de interface, o qual pode ser de 4 tipos: Exportação, importação, entrada e saída. Os dois primeiros servem para realizar a interface entre diferentes sinais que compõem o problema, já os dois últimos são empregados apenas para carregar informações de valores pré-estabelecidos referente aos nós que representam, sendo que apenas o bloco do tipo entrada é considerado na estrutura das equações e da matriz jacobiana, sendo considerada para isso a equação definida em (4.27).

$$y = y_0 \quad (4.27)$$

Atributos:

- Node: Recebe o nó y ao qual o bloco está associado.
- IndexNode: Armazena o índice do nó y
- Tipo: Exportação, importação, entrada e saída.
- Subtipo: Presente apenas nos blocos do tipo exportação e importação sendo empregado para fazer a associação dos sinais entre diferentes nós.

- MatrixInic, MatrixSim e MatrixRein: Estabelece a estrutura da matriz jacobiana para o cálculo das condições iniciais, de simulação e análise de descontinuidades, respectivamente. Isto é valido apenas para o bloco quando do tipo ENTRADA.

$$\mathbf{J}[IndexNode, IndexNode] = 1. \quad (4.28)$$

4.3.2 Modelos de equipamentos

Os modelos dinâmicos dos equipamentos que compõem os SEP podem ser representados e descritos por diagramas de blocos e um grafo orientado que descreve a direção dos sinais internos ao modelo. Portanto, empregando os blocos descritos anteriormente é possível descrever qualquer conjunto de equações algébrico-diferencial.

Neste trabalho foram caracterizados os modelos para os seguintes equipamento:

- Gerador (Máquina Síncrona);
- Controladores (Regulador de velocidade, regulador de tensão e estabilizadores de potência);
- Carga dinâmica.

Para o gerador são considerados os dois modelos (polos salientes e lisos) pré-definidos descritos no Apêndice B. Já para os controladores e carga dinâmica os modelos são importados dos mesmos arquivos empregados pelo programa ANATEM. Estes arquivos, no formato CDU (Controladores Definidos pelo Usuário), são convertidos para uma estrutura de blocos básicos empregada posteriormente para a montagem do modelo a ser compreendido pela ferramenta desenvolvida.

Em resumo, para os equipamentos é montada uma estrutura composta com as informações de quais blocos definem as suas equações matemáticas e um grafo orientado, resultando no diagrama básico da Figura 51

4.3.3 Modelo computacional para o cálculo das condições iniciais

Neste primeiro momento o cálculo das condições iniciais está dividido de acordo com o número de unidades geradoras equivalentes e de cargas dinâmicas. Portanto, como descrito na Seção 3.8 os cálculos são realizados individualmente para cada um destes

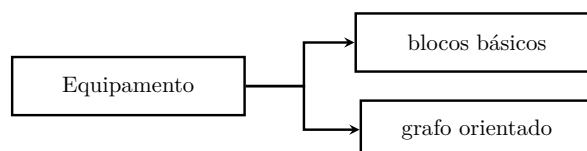


Figura 51 – Diagrama básico para os equipamentos

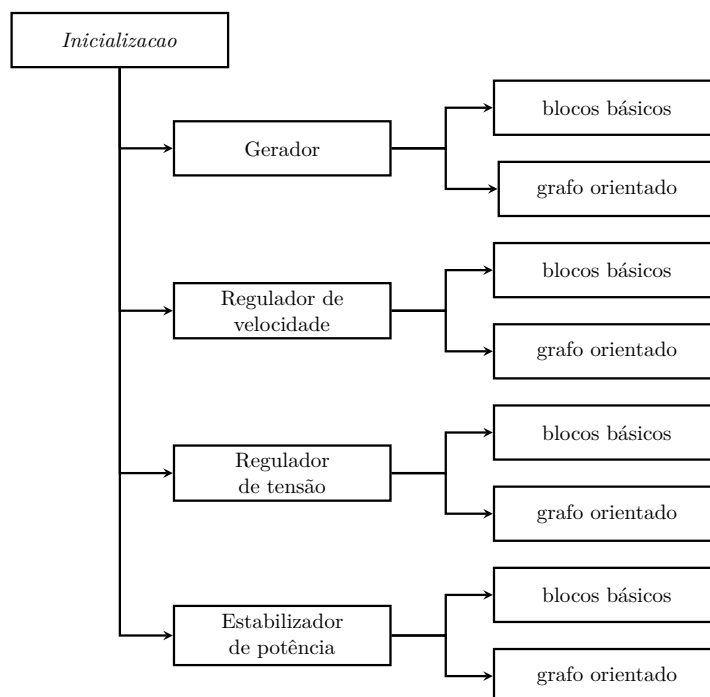


Figura 52 – Diagrama básico da classe *Inicializacao* empregada para o cálculo das condições iniciais de uma unidade geradora equivalente

componentes. Este cálculo é realizado internamente através da classe *Inicializacao*, o qual absorve todas as informações contidas nos objetos de cada equipamento. Por exemplo, quando é realizado o cálculo para uma unidade geradora equivalente as informações dos blocos básicos e do grafo orientado referente ao modelo do gerador, regulador de tensão, regulador de velocidade e do estabilizador de potência são repassadas à classe *Inicializacao* que constrói um conjunto único de blocos básicos e de grafo orientado, de acordo com o diagrama básico da Figura 52.

No caso da carga dinâmica, a Figura 53 representa de maneira simplificada a formação da estrutura para a classe *Inicializacao*.

Simplificando, a classe *Inicializacao* acumula todos os blocos que compõe o sistema a partir dos blocos dos equipamentos individuais, resultando em um único diagrama de blocos e seu grafo de sinais associado como representado na Figura 54.

Definida a estrutura principal é dada sequência ao cálculo que é realizado seguindo

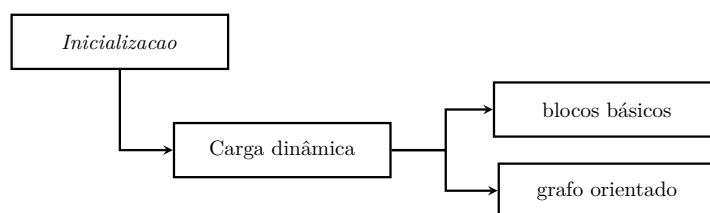


Figura 53 – Diagrama básico para a classe *Inicializacao* empregada para o cálculo das condições iniciais de uma carga dinâmica

os seguintes passos:

1. Geração de índices globais para as variáveis do sistema (nós) empregando as informações fornecidas pelo grafo orientado gerado a partir utilizando a biblioteca NetworkX. Esta informação é armazenada internamente ao bloco básico de acordo com suas características;
2. Para cada bloco de interface do tipo importação e exportação adiciona-se um bloco com ganho fixo que estabelece a conexão entre estes nós, além de adicionar este novo ramo ao grafo orientado (Ex: Tensão de campo E_{fd} exportada pelo regulador de tensão e importada pelo gerador);
3. Constrói-se a matriz jacobiana \mathbf{J} considerando o número de nós existentes no grafo orientado que representa o sistema global e, posteriormente, é preenchida com os elementos não nulos empregando o método definido nos blocos básicos como *MatrixInic*;
4. Define-se o ponto inicial para o método de Newton, empregando informações prévias para que o processo de convergência seja acelerado;
5. Inicia-se o processo iterativo representado no fluxograma da Figura 55.

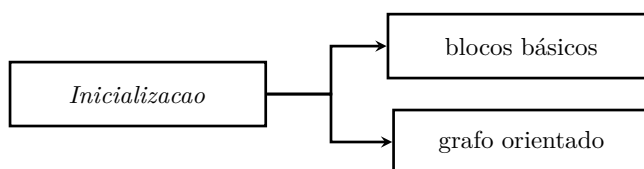


Figura 54 – Diagrama genérico para a classe *Inicializacao* empregado no cálculo das condições iniciais.

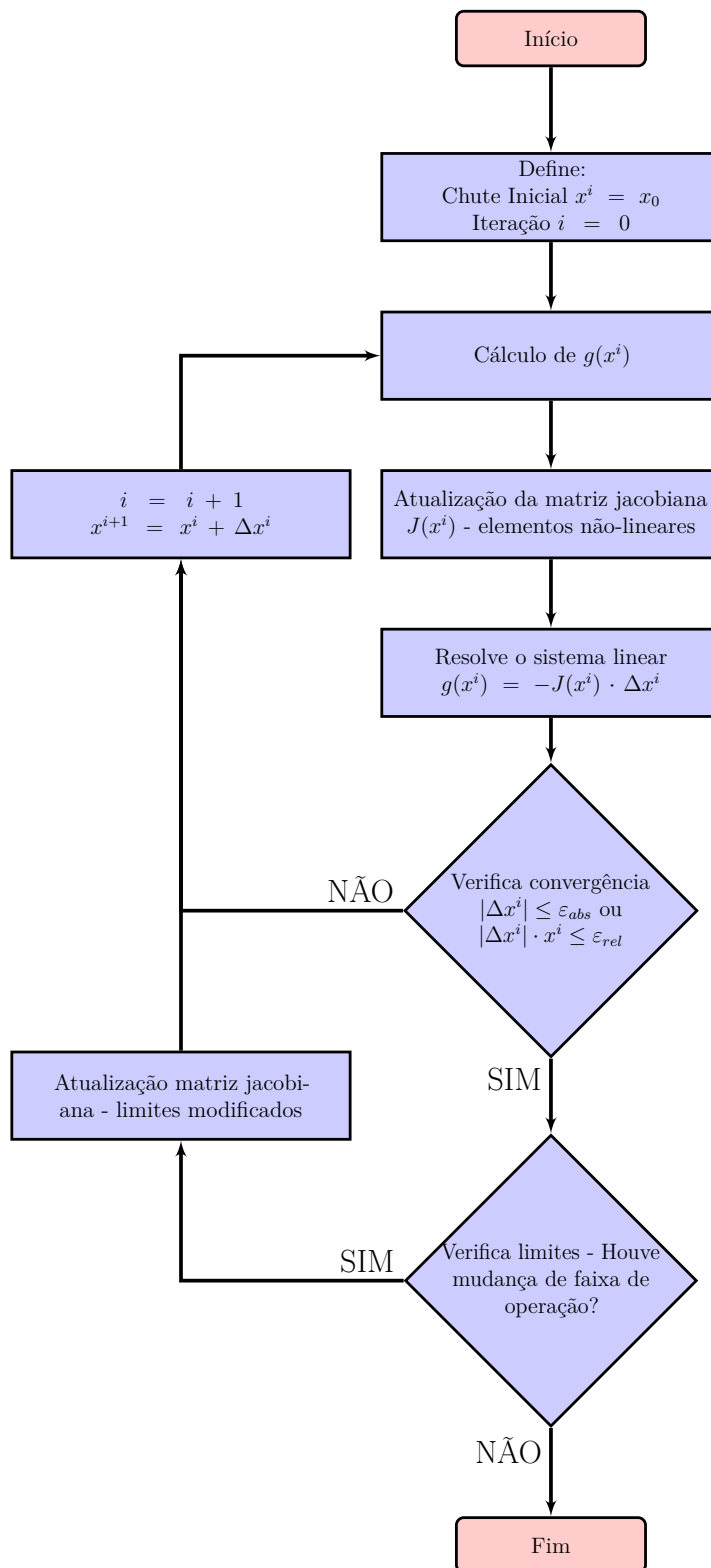


Figura 55 – Fluxograma simplificado para o do cálculo das condições iniciais.

4.3.4 Modelo computacional para simulação

A estrutura adotada para a simulação do comportamento dinâmico é muito similar a adotada para o cálculo das condições iniciais. No entanto, ao invés da classe *Simulacao*

receber as informações das estruturas definidas pelos equipamentos, estas vêm diretamente da classe *Inicializacao* já que estas, adicionalmente ao conjunto dos blocos básicos e do grafo orientado, também fornece os valores iniciais para todos os nós do sistema estabelecendo a condição inicial para a simulação. Esta estrutura pode ser representada de maneira simplificada pelo diagrama da Figura 56 para um sistema que realizou n cálculos de condições iniciais.

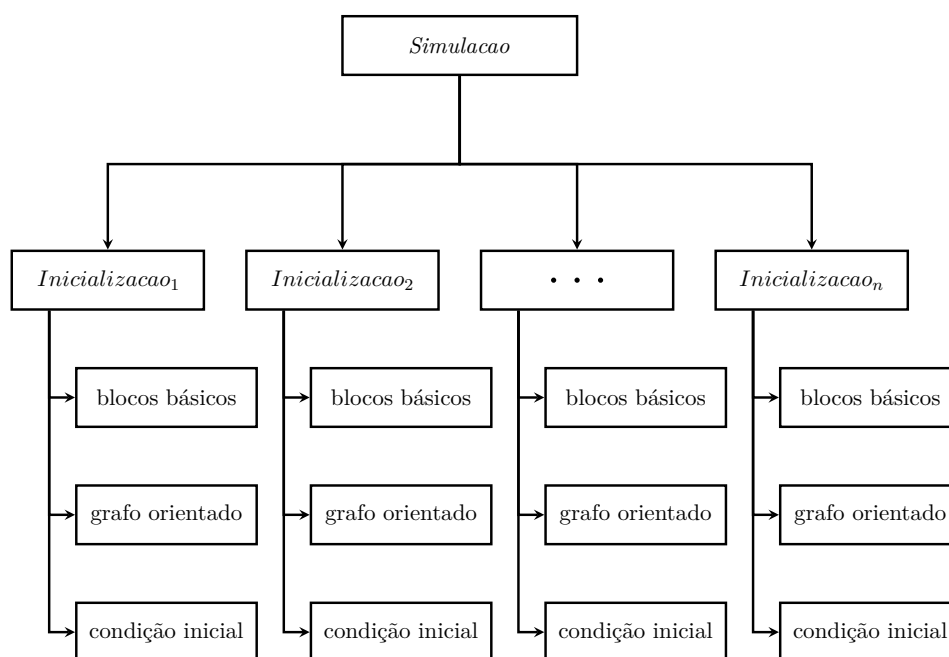


Figura 56 – Diagrama simplificado representativo da classe *Simulacao*.

Após estabelecida a estrutura geral do problema com as condições iniciais, são executados os seguintes passos:

1. Os nós são ranqueados para que novamente sejam definidos os índices globais dos nós para cada bloco;
2. Avalia-se os blocos de interface do tipo importação e exportação referente aos sinais remotos, adicionando-se blocos com ganho fixo quando necessário;
3. A quantidade de nós é expandida com duas vezes o número de barras presentes na rede elétrica passiva associada ao sistema de potência;
4. As matrizes jacobianas para simulação e análise de descontinuidades tem suas estruturas inicializadas. Posteriormente, são definidos os elementos não nulos empregando os métodos *MatrixSim* e *MatrixRein* implementados nos blocos básicos;
5. Inclui-se na matriz jacobiana a estrutura referente à rede elétrica passiva já que o método de solução empregado é simultâneo;

6. Inicia-se o processo iterativo descrito na Figura 57.

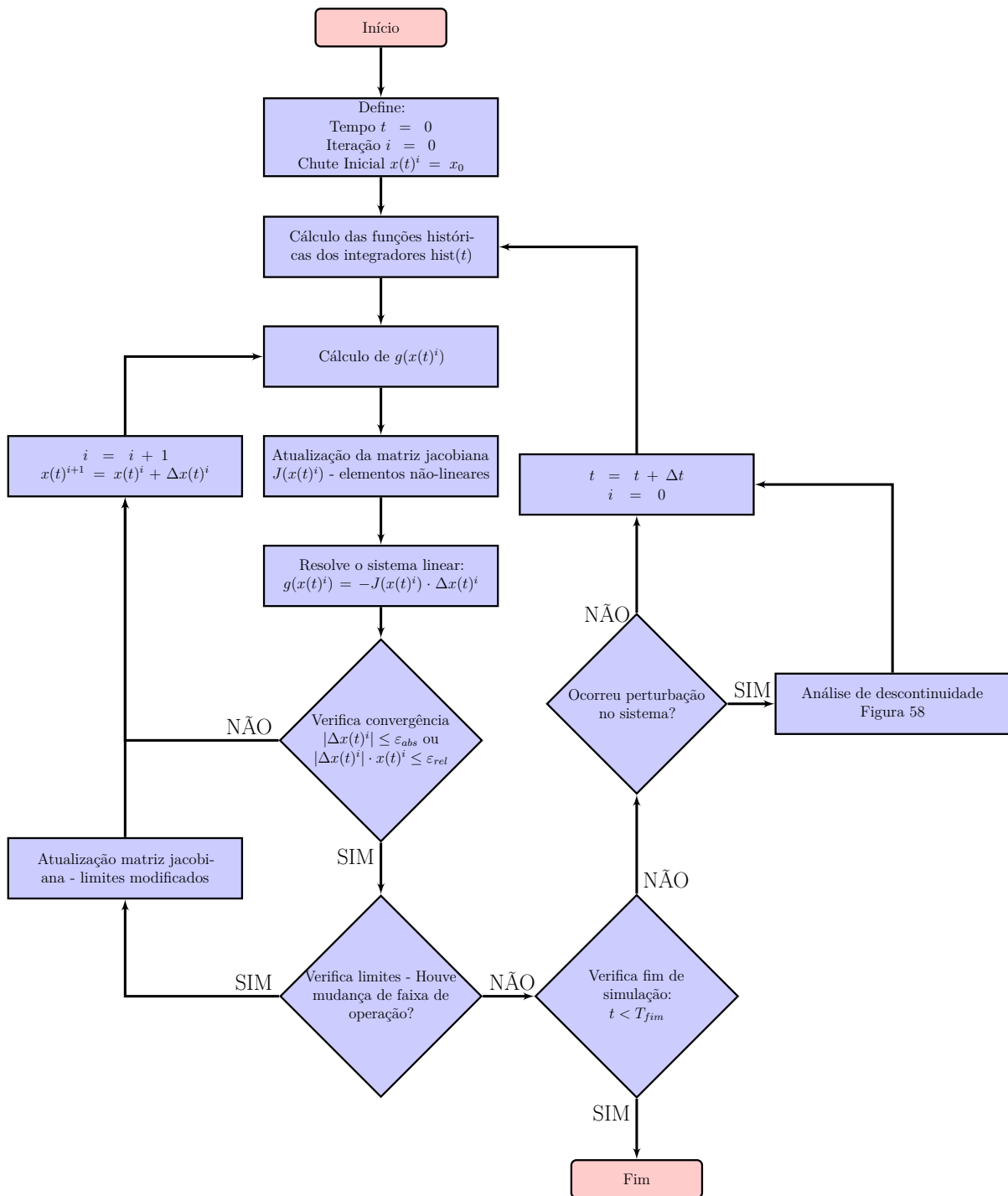


Figura 57 – Fluxograma simplificado para a etapa de simulação.

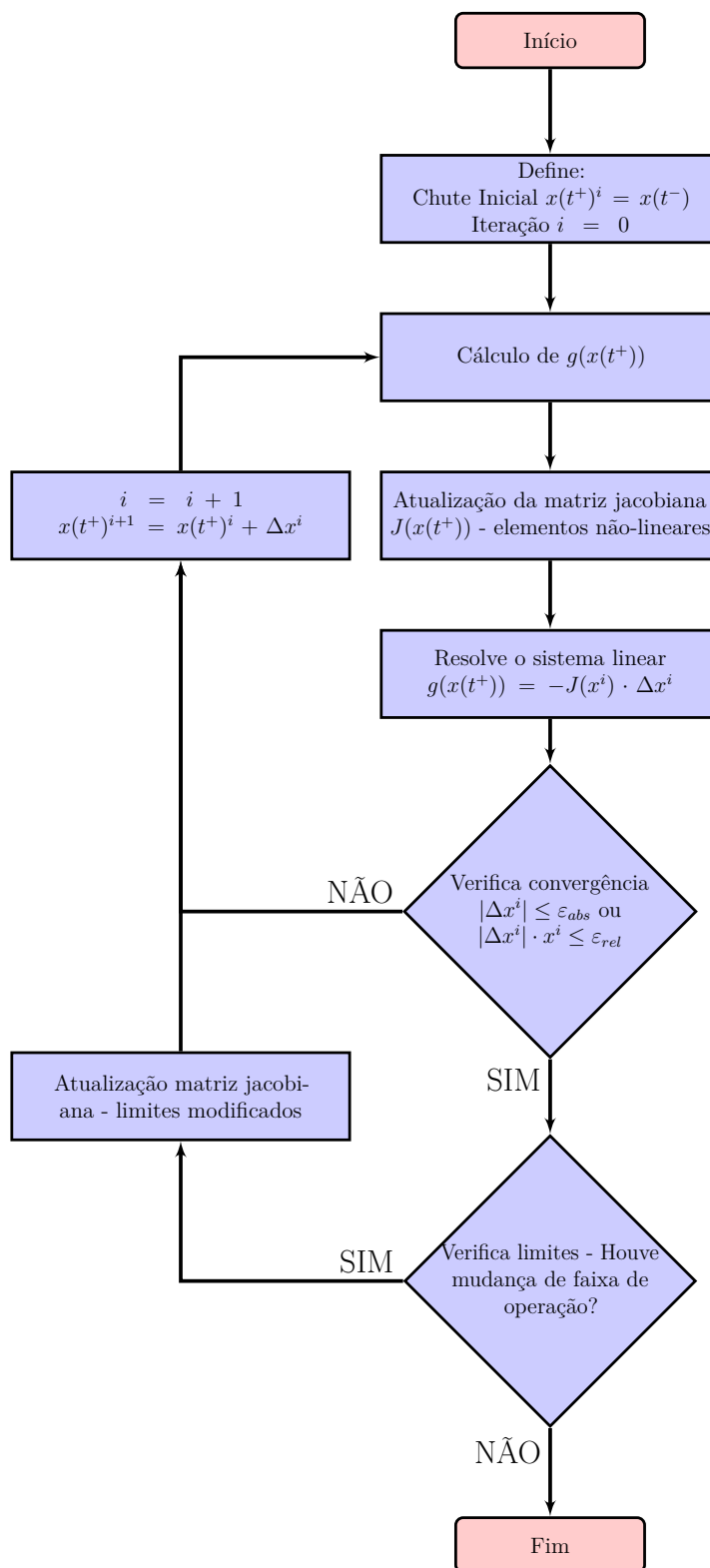


Figura 58 – Fluxograma simplificado para análise de descontinuidade.

4.3.5 Modelo geral da ferramenta implementada

O fluxograma da Figura 59 estabelece de forma simplificada o modelo da ferramenta implementada considerando as etapas que são executadas ao longo da simulação de um

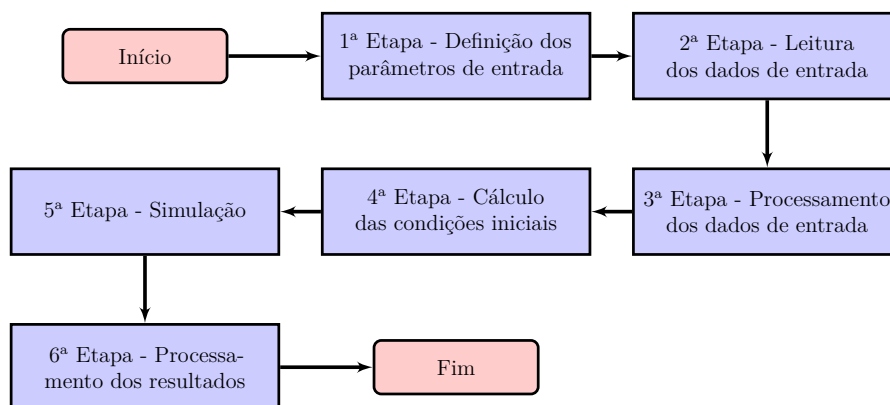


Figura 59 – Fluxograma simplificado da ferramenta de simulação desenvolvida

sistema genérico ou de interesse.

- A primeira etapa consiste na definição dos parâmetros de simulação, que são obtidos através da leitura de um arquivo de configuração. Neste arquivo são definidas informações essenciais para a simulação do sistema de interesse, sendo composto pelo seguintes itens:
 - passo de integração (Δt);
 - tempo total de simulação (T_{FIM});
 - tolerância relativa (ϵ_{rel});
 - tolerância absoluta (ϵ_{abs});
 - número máximo de iterações para o cálculo das condições iniciais;
 - número máximo de iterações por passo de integração;
 - localização de arquivos com os dados do sistema;
- A segunda etapa consiste na leitura dos dados de entrada do sistema a ser simulado, os quais contêm os parâmetros dos geradores e reguladores, os resultados do fluxo de potência, dados de eventos, entre outros parâmetros. Esses arquivos são os mesmos empregados para a simulação do sistema no programa ANATEM com exceção dos resultados do fluxo de potência, o qual está armazenado num arquivo binário gerado por uma ferramenta de fluxo de potência implementada também em Python. Dos arquivos também utilizados pelo programa ANATEM são lidos os seguintes campos [25]:
 - DCDU: Dados de controladores definidos pelo usuário (vide exemplo em Seção I.3).
 - DCST: Dados de curvas de saturação.
 - DEVT: Dados de evento.

- DLDN: Dados de associação de carga dinâmica ao seu modelo.
 - DLOC: Dados de localização remoto de sinais para CDU.
 - DMAQ: Dados de associação de geração a máquina síncrona e modelos correspondentes.
 - DMDG: Dados de modelos predefinidos de máquina síncrona.
- A terceira etapa caracteriza-se pelo processamento dos dados de entrada. Após a leitura dos arquivos de dados, as informações são processadas e carregadas em estruturas próprias da ferramenta de simulação, como se segue:
 - Define-se os modelos de máquinas de acordo com os modelos pré-definidos no campo DMAQ utilizando os blocos básicos.
 - Os modelos dos controladores definidos no arquivo CDU (campo DCDU) tem os seus blocos convertidos ao formato dos blocos básicos que foram implementados na ferramenta.
 - Cria-se, também, os modelos das cargas dinâmicas utilizando os blocos básicos para a descrição dos diagramas de blocos.
 - Associa-se as máquinas e seus respectivos controladores, para que sejam indicados quais modelos serão considerados simultaneamente no cálculo das condições iniciais.
 - Também são relacionados a unidade geradora e a carga dinâmica ao seu respectivo ponto de conexão à rede.
 - A quarta etapa define o cálculo das condições iniciais descrita na Subseção 4.3.3
 - Na quinta etapa a simulação do sistema é de fato realizada durante a qual o seu comportamento dinâmico frente a alguma perturbação é obtido, como descrito na Subseção 4.3.4
 - A sexta e última etapa consiste no processamento dos resultados obtidos tanto no cálculo das condições iniciais quanto na simulação para que possam ser avaliados e interpretados de acordo com os objetivos do estudo realizado.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados alguns pontos referentes a fase de implementação computacional da ferramenta de simulação, mostrando as estruturas consideradas para os blocos básicos, utilizados na descrição das equações dos equipamentos presentes nos sistemas elétricos de potência na forma de diagrama de blocos.

Também foram apresentadas características importantes sobre a linguagem de programação Python destacando as vantagens do emprego das linguagem de *script* em detrimento às tradicionais, com destaque para a versatilidade da linguagem que permitiu o rápido desenvolvimento das ideias propostas. Além disso, empregando-a é possível utilizar bibliotecas compiladas em linguagem C/C++ que permitam obter um ganho de performance quando empregadas para a solução de sistema lineares.

Por fim, foram apresentadas as etapas executadas pela ferramenta de forma a realizar a simulação do comportamento dinâmico de qualquer sistema de potência.

Resultados das simulações e análise do desempenho computacional

Neste capítulo são realizados alguns estudos de casos nos quais perturbações são simuladas, tais como: Curto-circuitos em barras, abertura de linhas, modificação do *shunt* de barra, aplicação de degrau na referência dos controladores (reguladores de tensão, de velocidade e estabilizadores), variação da carga, entre outros.

Por meio destes estudos busca-se avaliar a ferramenta PySEP implementada tanto em aspectos relacionados a precisão como desempenho. Primeiramente, os resultados das simulações são comparados aos obtidos com o programa ANATEM e, posteriormente, realiza-se uma avaliação de desempenho computacional.

Ao longo deste capítulo, os comportamentos dinâmicos de três sistemas de potência são avaliados. O primeiro é um sistema, composto por um gerador e uma barra infinita.

O segundo sistema é conhecido na literatura como *New England* ou IEEE 39 barras, para o qual são realizados estudos de curto e longo prazo. O primeiro estudo realizado sobre este sistema é resultado da aplicação de um curto circuito em uma barra do sistema. Posteriormente, é realizado o estudo de longo prazo através da variação de uma carga. Sendo que, num primeiro momento, é realizada a simulação dinâmica completa com o objetivo de validar os resultados e avaliar o desempenho da ferramenta. Na sequência, a formulação para eliminação de dinâmicas descrita na Subseção 3.3.2 foi empregada. Nesta simulação todas as dinâmicas presentes nos geradores e seus reguladores (velocidade, tensão e estabilizadores de potência) são desconsideradas, enquanto que apenas as dinâmicas presentes no modelo de carga foram mantidas. Este estudo busca avaliar e validar a formulação para eliminação de dinâmicas.

O terceiro e último estudo envolve um sistema termelétrico equivalente simplificado que sofre um ilhamento forçado.

Ao final deste capítulo são apresentadas algumas importantes características que devem ser destacadas referente a formulação adotada para o método de cálculo das condições iniciais mostrando as vantagens e desvantagens desta modelagem com relação ao método empregado pelo programa ANATEM.

Todas as simulações foram realizadas em um microcomputador com processador Intel Core i5-4440 (3,3 GHz) e 8GB de memória RAM DDR3 1600 MHz. As simulações

empregando o PySEP foram realizadas com o sistema operacional Linux, kernel 3.13.0-37-generic, distribuição Linux Mint e os resultados do programa ANATEM, versão acadêmica, no Windows 10.

5.1 Sistema Máquina - Barra Infinita

O sistema Máquina - Barra Infinita (MBINF) é formado por duas barras, sendo uma modelada como barra infinita. Na outra barra está conectada uma unidade geradora composta por um máquina síncrona de polos salientes associada a seus respectivos controladores (regulador de tensão e estabilizador de potência). O sistema é representado pelo diagrama unifilar da figura Figura 60.

Na Seção I.1 são apresentados os parâmetros do gerador, os modelos do regulador de tensão e do estabilizador de potência, os dados de barras e linhas do sistema. Empregando os dados de barras são definidas as condições de contorno para o cálculo das condições iniciais e com os de linhas monta-se a matriz de rede que caracteriza os elementos passivos do sistema de transmissão.

A perturbação considerada na avaliação deste sistema é a aplicação de um degrau sobre a referência do regulador de tensão (V_{ref}) definido em (5.1):

$$V_{ref}(t) = \begin{cases} V_{ref}^0 + 0,02 & \text{para } t \geq 1s \\ V_{ref}^0 - 0,02 & \text{para } 16s \leq t < 31s \\ V_{ref}^0 & \text{para } t < 1s \text{ e } t \geq 31s \end{cases} \quad (5.1)$$

Onde V_{ref}^0 é o valor inicial do sinal de referência obtido previamente através do cálculo das condições iniciais.

5.1.1 Estruturação do Problema

Nesta seção é apresentada mais detalhadamente a estrutura adotada para a simulação do sistema. O primeiro passo consiste em estabelecer as condições iniciais do problema a partir de uma condição operativa (condições de contorno) pré-definida pelo resultado do fluxo de potência.

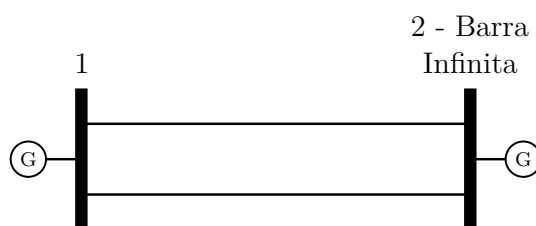


Figura 60 – Diagrama Unifilar: Sistema MBINF.

Considerando o estado da rede definido pelo módulo e fase das tensões das barras e pelas potências geradas é possível definir os valores das tensões V_r^1 (componente real da tensão na barra 1) e V_m^1 (componente imaginária da tensão na barra 1) e as correntes I_r^1 (componente real da corrente injetada na barra 1) e I_m^1 (componente imaginária da corrente injetada na barra 1).

Dessa forma, considerando o resultado do fluxo de potência descrito na Tabela 24 da Seção I.1 é obtida para o gerador conectado à barra 1 a condição de contorno definida em (5.2):

$$\begin{cases} V_r^1 = 0,9808 \text{ p.u.} \\ V_m^1 = 0,1950 \text{ p.u.} \\ I_r^1 = 50,0000 \text{ p.u.} \\ I_m^1 = 4,9222 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (5.2)$$

Como descrito na Seção 3.8, como há uma única unidade geradora equivalente realiza-se um único cálculo de condições iniciais considerando os modelos dos reguladores (estabilizador de potência e regulador de potência) e da máquina síncrona como estabelecido no diagrama simplificado da Figura 61.

Estes dispositivos são representados através de diagrama de blocos utilizando as estruturas dos blocos básicos implementados. Dessa forma, considerando a formulação descrita ao longo do Capítulo 3 é possível estabelecer as equações e variáveis que são consideradas no processo de solução resultando no dimensionamento definido na Tabela 2.

Observando o diagrama representado na Figura 61 destaca-se que dentre as variáveis de entrada os sinais P_m (não há regulador de velocidade, portanto, a potência mecânica é considerada constante durante todo o período de simulação) e V_{ref} (sinal de referência interno ao modelo do regulador de tensão) são desconhecidos. Portanto, para o cálculo

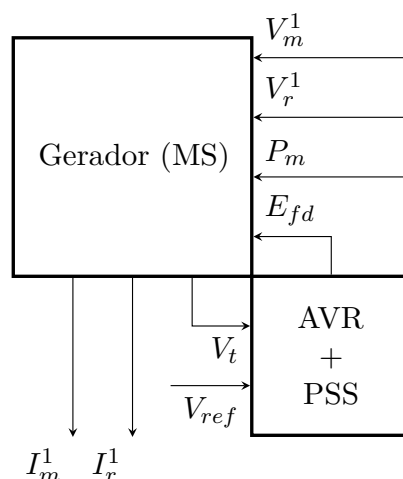


Figura 61 – Diagrama representativo para o cálculo das condições iniciais: Sistema MBINF.

Tabela 2 – Dimensionamento para o cálculo das condições iniciais - Sistema MBINF

Equipamento	Nº de nós/equações
Gerador	34
AVR	7
PSS	12
Total	53

das condições iniciais emprega-se a formulação apresentada na Seção 3.3, com a inclusão dos integradores auxiliares com entrada nula no lugar das entradas. Como descrito previamente estes integradores têm a finalidade de auxiliar na definição das equações de contorno referentes às correntes que são variáveis de saída no modelo considerado. Após serem realizadas essas modificações calculam-se as condições iniciais resultando nos valores descritos na Tabela 3.

A condição obtida torna-se o ponto de equilíbrio adotado para a fase de simulação. No entanto, para esta etapa o sistema é redimensionado já que o método de solução empregado é simultâneo. Portanto, além de incluir todas as unidades geradoras (equações diferenciais) num único problema também é incluído o sistema de transmissão modelado como descrito no Apêndice C.

Conseqüentemente, ao estabelecer o modelo completo de simulação é definido o diagrama simplificado da Figura 62 por meio do qual observa-se a interface entre unidade geradora e rede, que é realizada pelas componentes reais e imaginárias das tensões e correntes nos terminais do gerador (V_r^1 , V_m^1 , I_r^1 e I_m^1)

O dimensionamento do sistema para a simulação é definido na Tabela 4, onde é possível observar que as dimensões individuais associada às equações do gerador, do regulador de velocidade e estabilizador são idênticas às consideradas para o cálculo das

Tabela 3 – Condições iniciais calculadas - Sistema MBINF

Variável	Valor Inicial	Variável	Valor Inicial
V_{ref}	1,0291 [p.u]	V_t	1,0000 [p.u]
V_r	0,9808 [p.u]	V_m	0,1950 [p.u]
I_r	50,0000 [p.u]	I_m	4,9222 [p.u]
V_q	0,4461 [p.u]	V_d	0,8950 [p.u]
I_q	17,8997 [p.u]	I_d	46,9450 [p.u]
E'_q	0,7711 [p.u]	E'_d	0,0000 [p.u]
E''_q	0,6808 [p.u]	E''_d	0,8055 [p.u]
P_m	50,0000 [p.u]	P_e	50,0000 [p.u]
E_{fd}	2,9143 [p.u]	V_{sad}	0,0000 [p.u]
ω_{maq}	1,0000 [p.u]	δ	74,7510 [°]

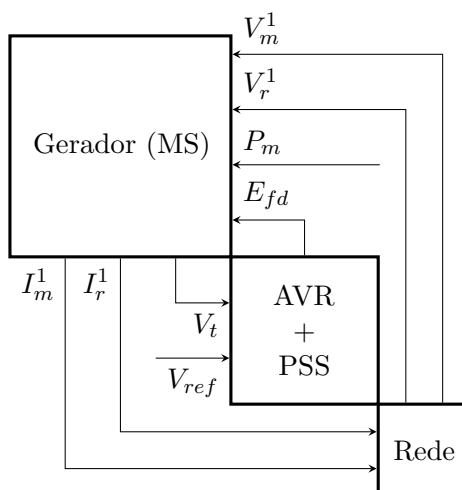


Figura 62 – Diagrama representativo para simulação: Sistema MBINF.

Tabela 4 – Dimensionamento para a simulação - Sistema MBINF

Equipamento	Nº de nós/equações
Gerador	34
AVR	7
PSS	12
Rede	4
Total	57

condições iniciais e a dimensão do sistema de transmissão consiste em duas vezes o número de barras do sistema, totalizando 57 nós e equações.

É importante destacar que o sistema de equações considerado está associado a uma matriz jacobiana empregada para o método de Newton altamente esparsa e não simétrica como pode ser observado na Figura 63. Esta figura apresenta a topologia da matriz jacobiana subdividida de acordo com os dispositivos considerados com devido destaque para os elementos não lineares, atualizados em cada iteração ou ainda a cada n iterações, de acordo com as características de atualização adotada. O grau de esparsidade (GE) da matriz jacobiana do sistema máquina-barras infinita é calculado e definido na equação (5.3).

$$GE[\%] = \frac{\text{número de elementos nulos}}{\text{numero total de elementos}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

$$GE[\%] = \frac{57 \cdot 57 - 154}{57 \cdot 57} \cdot 100\% = 95,26\%$$

Destes 154 elementos não nulos, 31 são definidos a partir de funções não lineares e, portanto, podem ser atualizados a cada iteração. Além disso, é importante salientar que para este sistema teste, como pode ser observado na topologia da matriz jacobiana

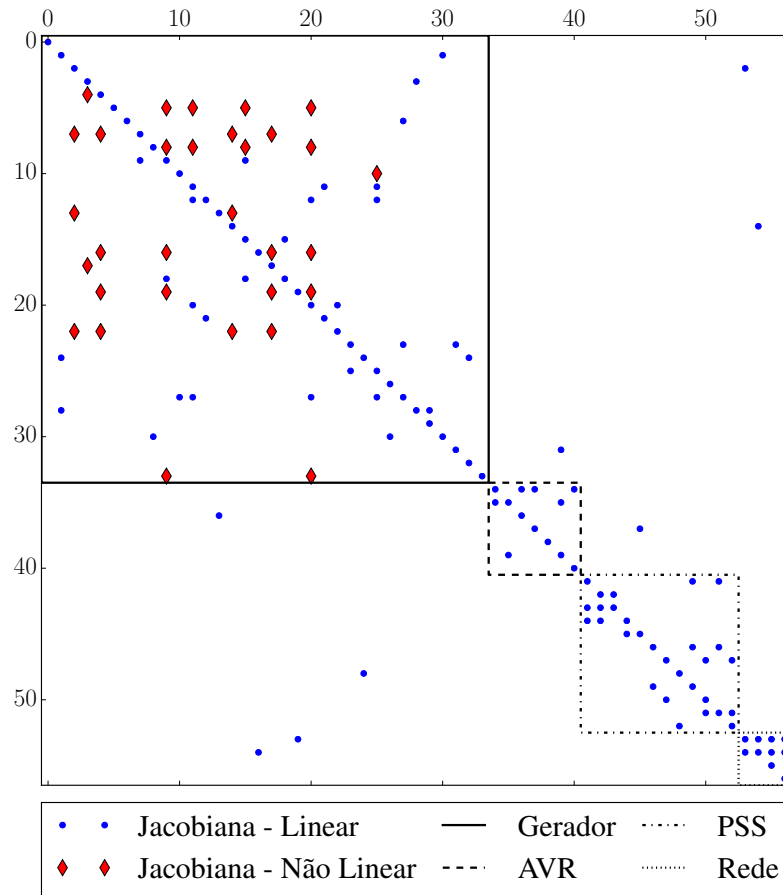


Figura 63 – Esparsidade da matriz jacobiana - Sistema MBINF

destacada na Figura 63, as não linearidades consideradas são apenas referentes ao modelo do gerador.

5.1.2 Resultados da Simulação

Nesta seção são comparados os resultados da ferramenta PySEP aos obtidos através do programa ANATEM. Para a simulação do comportamento dinâmico deste sistema é considerada variações na referência de tensão do AVR, como indicado em (5.1) com o tempo total de simulação $T_{FIM} = 50s$ e um passo de integração $\Delta t = 0,005s$.

Na Figura 64(a) está representado o sinal aplicado a entrada V_{ref} do regulador de tensão do gerador que caracteriza a perturbação aplicada sobre o sistema, enquanto que na Figura 64(b) é mostrada a tensão de campo E_{fd} produzida no regulador e aplicada ao gerador síncrono. Na Figura 65, em (a) é representada a potência reativa Q_e injetada na rede pelo gerador da barra 1 e em (b) é descrito o ângulo de potência δ do gerador com referência na barra infinita. Por fim, na Figura 66 está representada a frequência elétrica em (a) e em (b) a tensão terminal V_t do gerador.

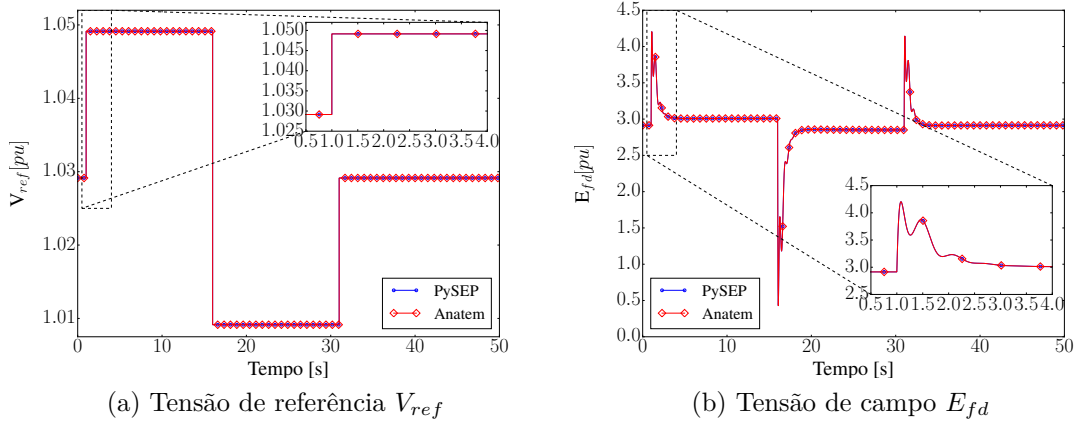


Figura 64 – Comparação de resultados: PySEP x ANATEM - Sistema MBINF: (a) V_{ref} (b) E_{fd}

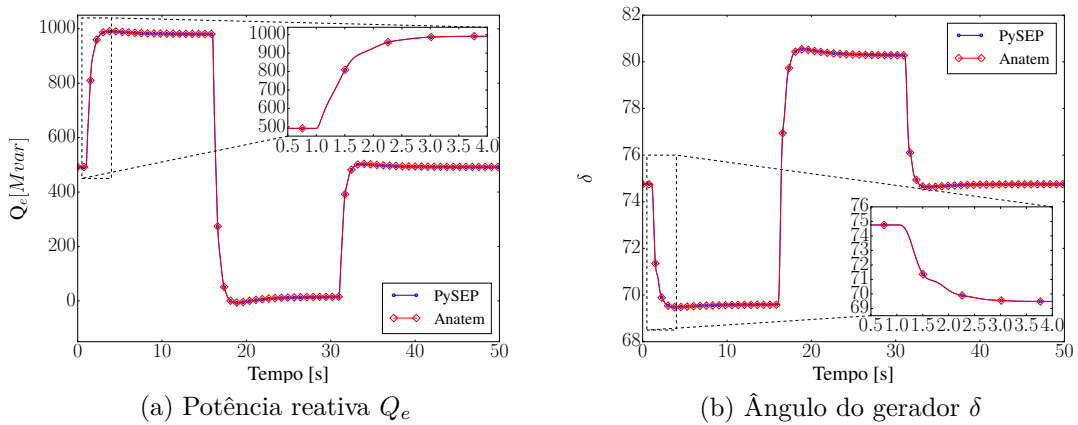


Figura 65 – Comparação de resultados: PySEP x ANATEM - Sistema MBINF: (a) Q_e (b) δ

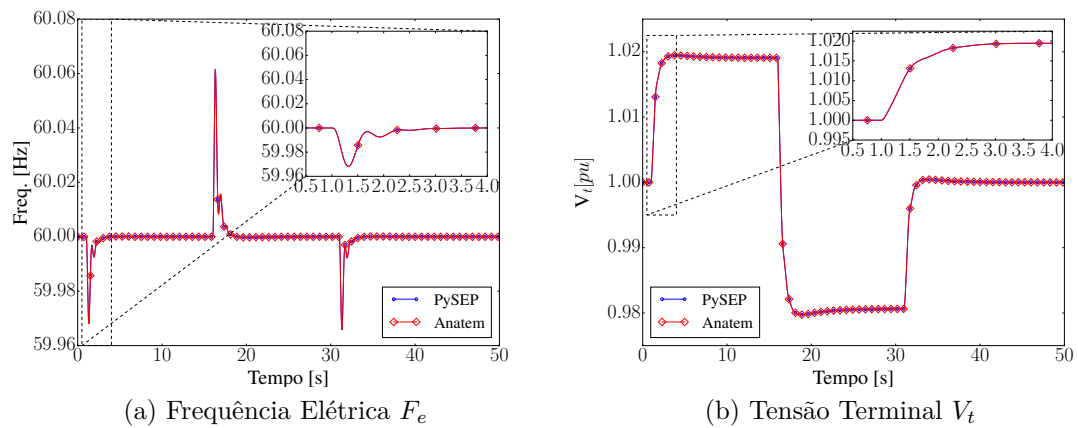


Figura 66 – Comparação de resultados: PySEP x ANATEM - Sistema MBINF: (a) F_e (b) V_t

Tabela 5 – Tempos computacionais - Sistema MBINF.

ANATEM	SCIPY	CYTHON		
		KLU	UMFPACK	SUPERLU
0,16s	5,08s	3,26s	5,08s	3,77s

Os sinais representados nestas figuras descrevem o comportamento dinâmico do gerador conectado a barra 1 obtidas tanto com o PySEP quanto com o programa ANATEM. Avaliando os gráficos constata-se que os resultados obtidos em ambas as ferramentas são idênticos permitindo validar aqueles alcançados com a ferramenta implementada.

5.1.3 Desempenho Computacional

Nesta seção é realizada a comparação entre os tempos computacionais para a simulação do sistema pela ferramenta PySEP e pelo programa ANATEM. Na Tabela 5 são apresentados os tempos computacionais para a simulação do sistema Máquina-Barra Infinita em ambos os programas. No caso do PySEP é considerado as diferentes bibliotecas de solução dos sistemas lineares esparsos, requeridos pelo método de Newton.

Na Tabela 6 é apresentado o fator de desempenho (FD) da ferramenta PySEP com relação ao programa ANATEM definido pela equação (5.4). No caso desta fator, quanto menor o valor apresentado melhor é o desempenho com relação ao programa ANATEM. Dessa forma, avaliando os fatores apresentados nesta tabela é possível observar que em todas as simulações a ferramenta mostrou-se mais lenta podendo variar, aproximadamente, entre 20 e 32 vezes dependendo da biblioteca de solução empregada.

$$FD = \frac{\text{Tempo computacional PySEP}}{\text{Tempo computacional ANATEM}} \quad (5.4)$$

Esta diferença de desempenho está diretamente relacionada as características inerentes aos programas, principalmente pelo fato da ferramenta implementada empregar o método simultâneo para o qual é necessário calcular e fatorar a matriz jacobiana em praticamente todas as interações. Além disso, é importante considerar o grau de maturidade do programa ANATEM que conta com significativas quantidades de homens/hora empregadas no seu desenvolvimento e otimização.

Tabela 6 – Fator de desempenho Implementação x ANATEM - Sistema MBINF.

		FD
SCIPY		31,8
CYTHON	KLU	20,4
	UMFPACK	31,8
	SUPERLU	23,6

Avaliando os resultados, pode-se constatar ainda que o emprego da biblioteca KLU para a solução dos sistemas lineares esparsos torna a ferramenta mais eficiente tanto com relação ao emprego da biblioteca própria do Python (Scipy) quanto das bibliotecas UMFPACK e SUPERLU.

Como mencionado, no método simultâneo é comum realizar a atualização da matriz jacobiana em todas as iterações de todos os passos. No entanto, quando é considerado um passo de integração relativamente pequeno e não há grandes variações nos sinais é possível adotar estratégias de atualização diferenciadas para a matriz jacobiana com o intuito de acelerar o processo de simulação dos sistemas (*Dishonest-Newton*) [37].

Portanto, visando avaliar tal possibilidade, para o Sistema MBINF foram adotados três possíveis métodos de atualização como descritos a seguir:

- 1º Caso: Atualização em todos os passos e em todas as iterações, como realizado anteriormente.
- 2º Caso: Atualização no início de cada passo e a cada 5 iterações dentro do passo.
- 3º Caso: Atualização a cada 5 iterações, independente do passo

É necessário destacar que em todos estes casos, nos instantes de ocorrência de perturbações no sistema e durante os cálculo de descontinuidade, a matriz jacobiana é atualizada para todas as iterações já que dependendo das condições apresentadas há uma grande probabilidade de ocorrência de variações que poderiam afetar a convergência para as soluções.

Foram realizados os testes para os três casos definidos, obtendo os tempos computacionais da Tabela 7 para os quais foi considerado apenas o emprego da biblioteca Scipy de solução do Python.

Buscando mostrar que os resultados da simulações não são afetados pela adoção de métodos com diferentes frequências de atualização da matriz jacobiana, nas Figuras 67 a 69 são plotados gráficos para alguns sinais comparando os resultados obtidos em cada caso.

Tabela 7 – Tempos computacionais de acordo com a estratégia de atualização da matriz jacobiana - Sistema MBINF

Caso	Tempo [s]	%
1º	5,08	-
2º	4,68	-7,9
3º	4,37	-14,0

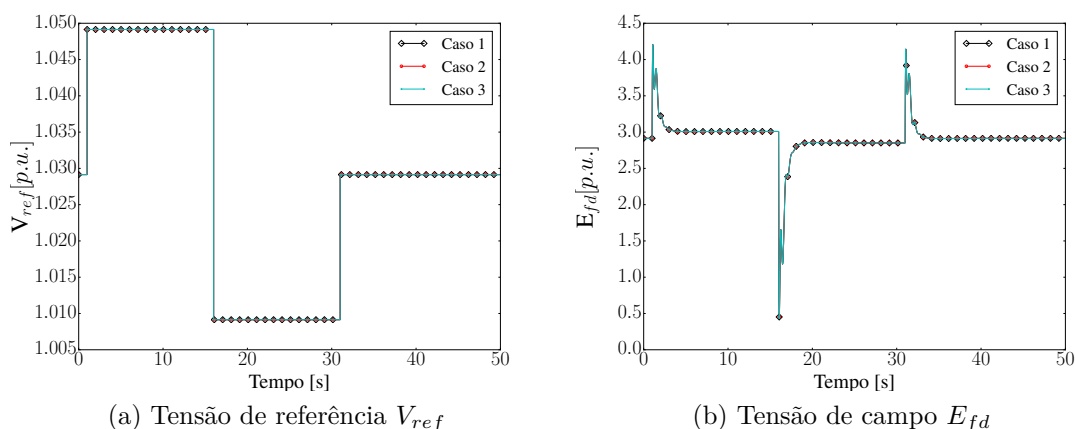


Figura 67 – Comparação de resultados do Sistema MBINF - Atualização da matriz jacobiana:(a) V_{ref} (b) E_{fd}

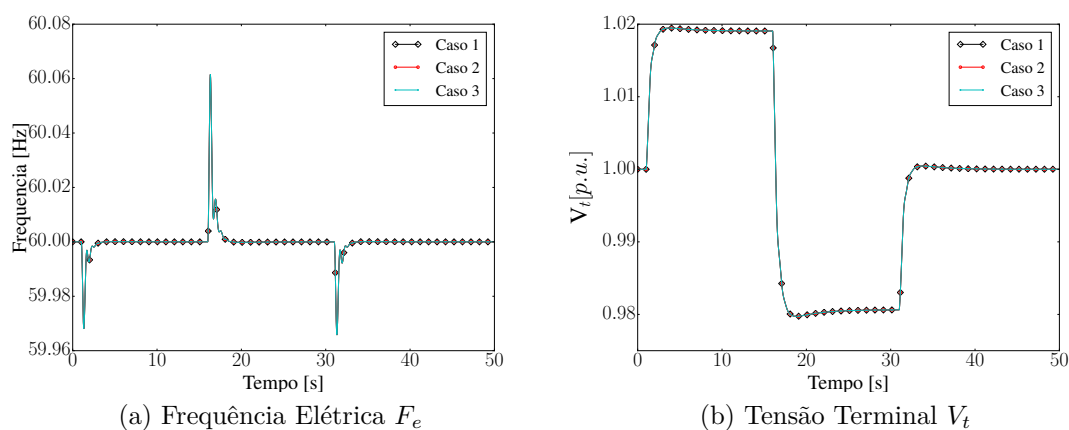


Figura 68 – Comparação de resultados do Sistema MBINF - Atualização da matriz jacobiana(a) F_e (b) V_t

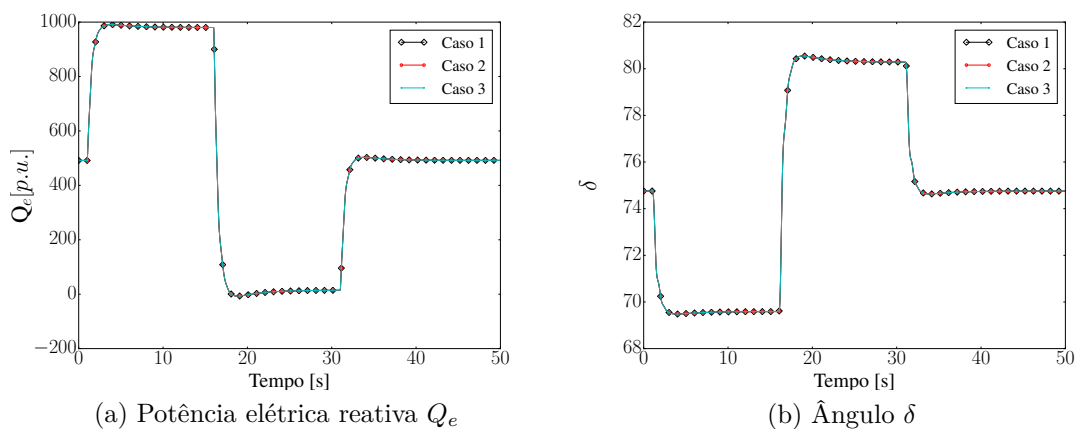


Figura 69 – Comparação de resultados do Sistema MBINF - Atualização da matriz jacobiana(a) Q_e (b) δ

Em termos de desempenho para este sistema a escolha do terceiro método de atualização mostrou-se mais eficiente, no entanto, não é possível afirmar que o seu emprego seja o ideal para todos os estudos de casos. Ao final deste capítulo, são apresentados maiores detalhes para cada um destes modos de atualização da matriz jacobiana permitindo obter uma conclusão mais qualificada acerca do problema.

5.2 Sistema *New England*

O sistema *New England* ilustrado no diagrama unifilar da Figura 70 é composto por 39 barras e 10 unidades geradoras. Os dados do sistema estão descritos na Seção I.2. Para este sistema busca-se, inicialmente, avaliar o desempenho da ferramenta PySEP com relação ao programa ANATEM sendo realizados dois diferentes estudos. O primeiro é resultado da aplicação de um curto circuito franco na barra 17 do sistema de duração de 0,1s no instante de 1s. Como consequência da eliminação deste curto ocorre a abertura completa dos terminais da linha de transmissão entre as barras 16 e 17.

Na sequência, é avaliado o emprego da formulação para eliminação de dinâmicas descrita na Subseção 3.3.2. Para isto são realizados estudos de longo prazo caracterizados pela variação da potência de uma carga dinâmica conectada a barra 15 do sistema. O modelo dinâmico para esta carga está descrito na Seção I.2. A perturbação aplicada ao sistema consiste no acréscimo de carga nos instantes $t = 10s$ e $t = 200s$, através de

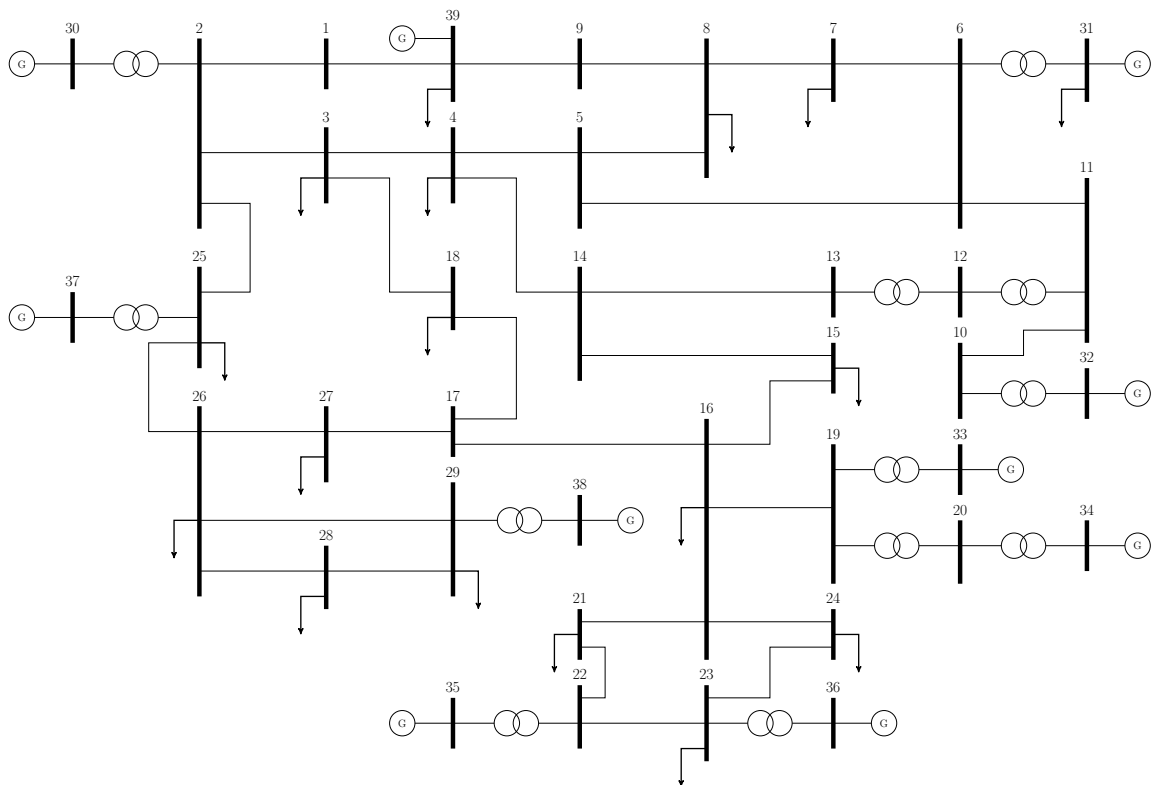


Figura 70 – Diagrama Unifilar: Sistema *New England*.

variações no valor da referência de potência (P_{ref}) no modelo da carga dinâmica, dado por (5.5):

$$P_{ref}(t) = \begin{cases} P_{ref}^0 & \text{para } t < 10.s \\ P_{ref}^0 + 1,5 & \text{para } 10s \geq t < 200s \\ P_{ref}^0 + 3,0 & \text{para } t \geq 200s \end{cases} \quad (5.5)$$

Onde P_{ref}^0 é a potência de referência obtida no cálculo das condições iniciais.

Para esta segunda etapa são realizadas duas análises: na primeira é avaliado o desempenho dinâmico do sistema retendo todas as dinâmicas e na segunda todas as dinâmicas de curta duração são eliminadas (geradores, reguladores de tensão e velocidade) mantendo-se apenas as dinâmicas da carga que são de longa duração.

5.2.1 Estruturação do problema

Nesta seção é apresentada a estrutura e o dimensionamento do sistema tanto para o cálculo das condições iniciais e quanto para a simulação dinâmica.

Como descrito na Seção 3.8 o cálculo das condições iniciais é dividido de acordo com o número de unidades geradoras equivalentes e cargas dinâmicas, assim, para este sistema são realizados onze cálculos sequenciais, sendo dez para as unidades geradoras e um para a carga dinâmica.

Os modelos considerados para os geradores, reguladores de velocidade e de tensão são todos idênticos, conseqüentemente, a dimensão e estrutura do problema para o cálculo das condições iniciais de cada uma das unidades geradoras também é idêntica. A Tabela 8 apresenta um quadro descritivo para o número de equações e nós (variáveis) dessas unidades geradoras e a Figura 71 apresenta de maneira simplificada a organização estrutural resultante.

Para este caso as entradas P_{ref} (regulador de velocidade) e V_{ref} (regulador de tensão) são desconhecidos, portanto, é necessário incluir um elemento integrador com

Tabela 8 – Dimensionamento para o cálculo das condições iniciais da unidade geradora - Sistema *New England*

Equipamento	Nº de nós/equações
Gerador	33
AVR	15
Reg. Velocidade	13
Total	61

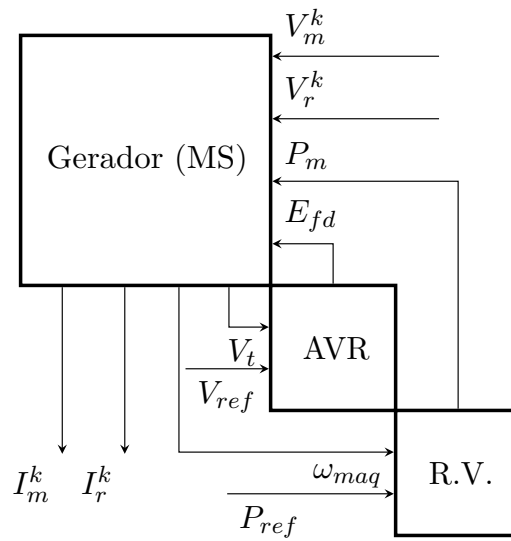
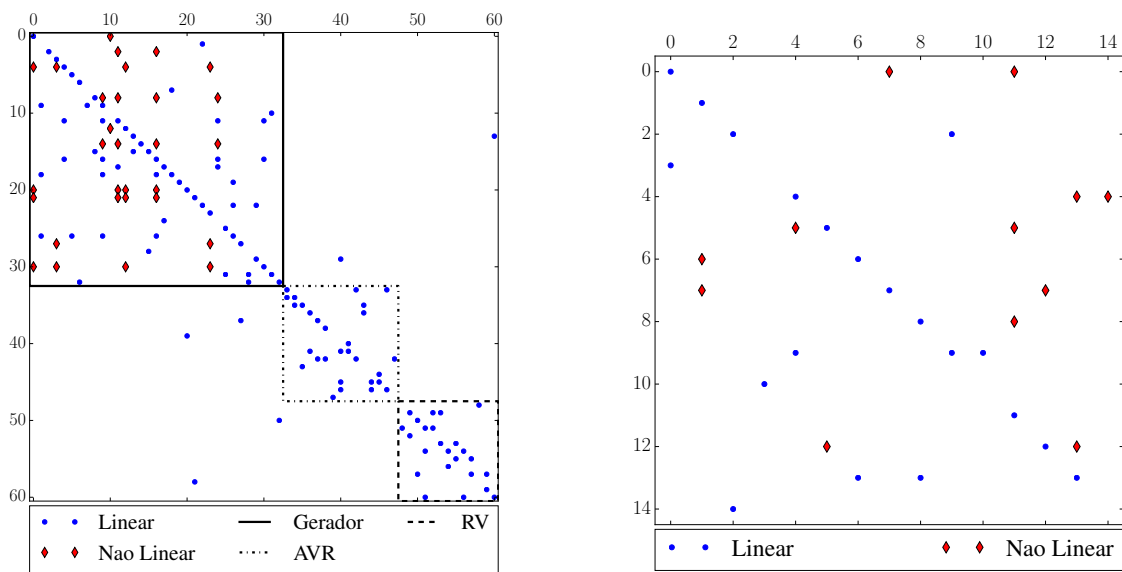


Figura 71 – Diagrama simplificado para o cálculo das condições iniciais da unidade geradora - Sistema *New England*.

entrada nula a estas entradas para auxiliar a inclusão das condições de contorno referente às correntes injetadas (I_r^k e I_m^k).

A matriz jacobiana definida para o cálculo das condições iniciais das unidades geradoras é altamente esparsa como mostrado na Figura 72(a), sendo possível observar que os elementos não lineares a serem atualizados são apenas referentes ao modelo das máquinas síncronas consideradas já que os reguladores são todos lineares. O grau de



(a) Unidade geradora

(b) Carga dinâmica

Figura 72 – Esparsidade da matriz jacobiana para cálculo das condições iniciais - Sistema *New England*:(a) Unidade Geradora (b) Carga dinâmica

Tabela 9 – Dimensionamento para a simulação - Sistema *New England*

Equipamento	Nº de Equipamento	Nº de nós/equações	Subtotal
Gerador Equivalente (5ª Ordem)	10	33	330
AVR	10	15	150
Reg. Velocidade	10	13	130
Carga dinâmica	1	15	15
Rede	1	78	78
$d\omega_{coi}$	1	1	1
Total			704

esparsidade dessa matriz é dado por (5.6).

$$GE[\%] = \frac{\text{número de elementos nulos}}{\text{numero total de elementos}} \cdot 100\% \quad (5.6)$$

$$GE[\%] = \frac{61 \cdot 61 - 150}{61 \cdot 61} \cdot 100\% = 95,97\%$$

Para o cálculo das condições iniciais da carga dinâmica o modelo considerado resultou num problema composto por quinze equações e quinze variáveis. A esparsidade da matriz jacobiana é representada na Figura 72(b) e o seu grau de esparsidade é dado em (5.7).

$$GE[\%] = \frac{15 \cdot 15 - 32}{15 \cdot 15} \cdot 100\% = 85,78\% \quad (5.7)$$

Na sequência ao cálculo das condições iniciais é definido a topologia do problema para o processo de simulação representada na Figura 73. O dimensionamento do problema é dado na Tabela 9. A dimensão do problema é dada pela soma das variáveis associadas às usinas e cargas dinâmicas, além do sistema de transmissão, que serve de elo entre geração e demanda. Além disso, a equação referente ao centro de inércia do sistema, dada em (5.8) tem por objetivo definir uma referência angular para o sistema quando não há uma barra infinita conectada ao sistema.

$$\Delta\omega_{coi} = \sum_{j=1:NG} \frac{H_j}{H_{total}} \Delta\omega_j \quad (5.8)$$

Onde:

$\Delta\omega_{coi}$: Variação da velocidade angular do sistema;

NG : Número de geradores;

H_{total} : Somatório de todas as constantes de inércia dos geradores;

H_j : Constante de inércia do gerador j ;

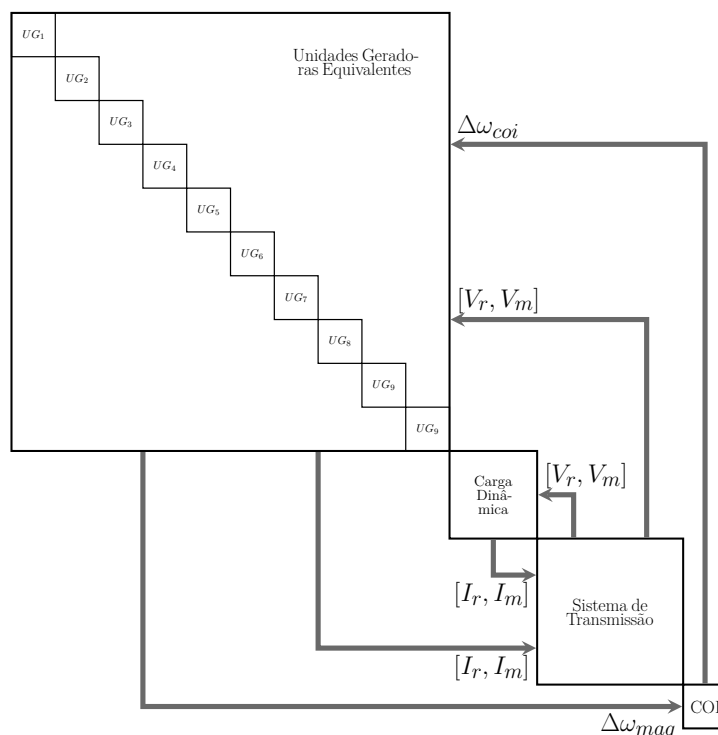


Figura 73 – Diagrama simplificado para a simulação do Sistema *New England*.

A esparsidade da matriz jacobiana para simulação é representada na Figura 74 e o seu grau de esparsidade é calculado em (5.9) considerando a equação definida em (5.6). Neste matriz jacobiana de simulação há 312 elementos não lineares que devem ser

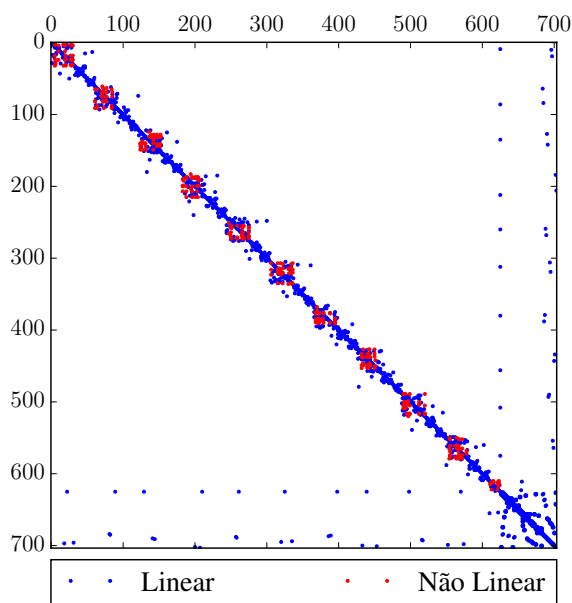


Figura 74 – Esparsidade da matriz jacobiana do processo de simulação - Sistema *New England*

atualizados de acordo com a estratégia de atualização definida.

$$GE[\%] = \frac{704 \cdot 704 - 2200}{704 \cdot 704} \cdot 100\% = 99,56\% \quad (5.9)$$

5.2.2 Resultados das Simulações

Como definido inicialmente, para este sistema são realizadas duas simulações com premissas distintas. Na primeira é realizada uma simulação considerando a ocorrência de um curto circuito em uma das barras do sistema. Na segunda simulação é avaliada uma variação de carga, sendo que este estudo é dividido em duas etapas, num primeiro momento todas as dinâmicas presentes nos modelos dos equipamentos são mantidas enquanto na sequência realiza-se uma simulação na qual as dinâmicas referentes aos geradores e seus reguladores são desconsideradas mantendo-se apenas as presentes no modelo da carga dinâmica.

• Estudo de curto prazo

Nesta simulação a perturbação aplicada ao sistema é um curto circuito franco aplicado a barra 17 com duração de 0,1s no instante de 1s, como consequência, ocorre a abertura da linha entre as barras 16 e 17. É considerado o tempo total de simulação $T_{FIM} = 20s$ e um passo de integração $\Delta t = 0,002s$.

Para fins de comparação foram selecionados alguns sinais que são mostrados nas Figuras 75 a 78, referentes ao gerador conectado a barra 33 e as tensões nas barras 16 e 17. Ao avaliar os gráficos observa-se que os resultados obtidos pela ferramenta são idênticos aos apresentados pelo programa ANATEM.

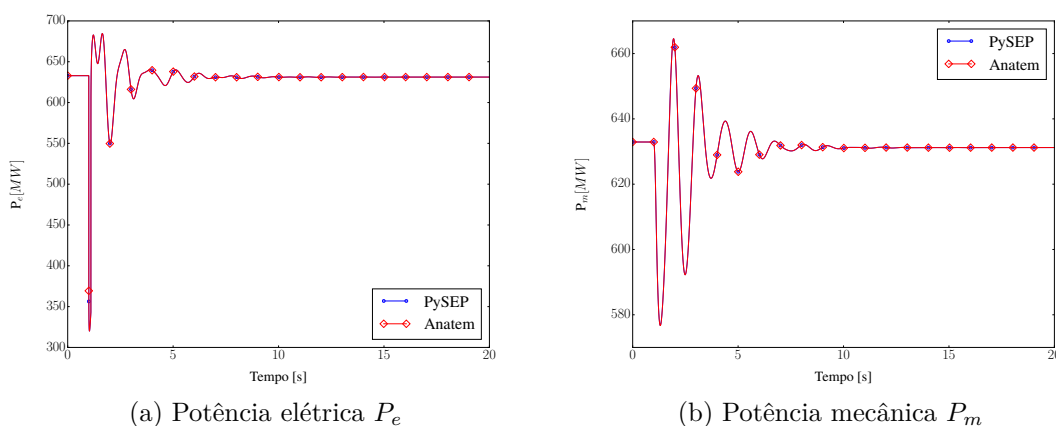


Figura 75 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*:(a) P_e (b) P_m

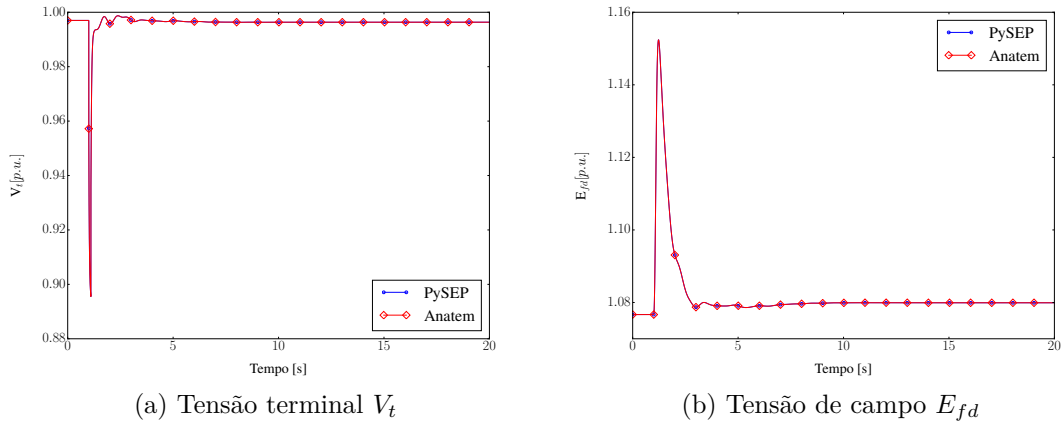


Figura 76 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*:(a) V_t (b) E_{fd}

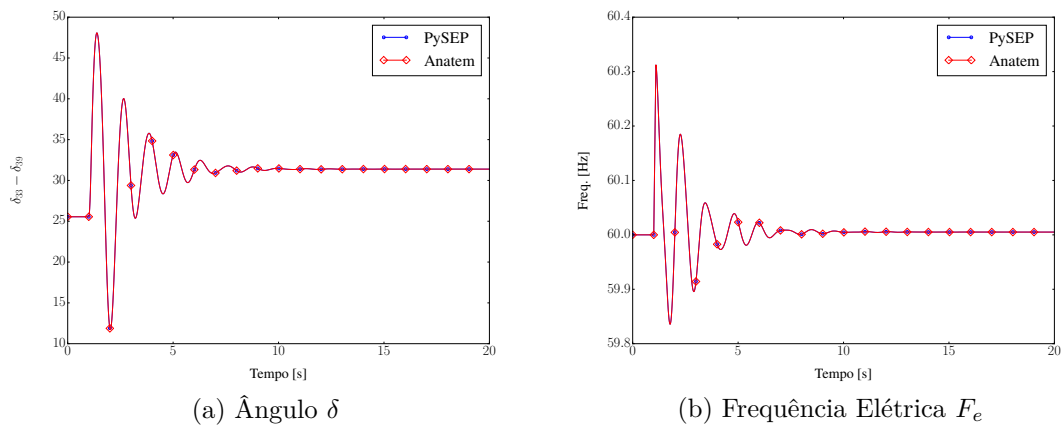


Figura 77 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*:(a) δ (b) F_e

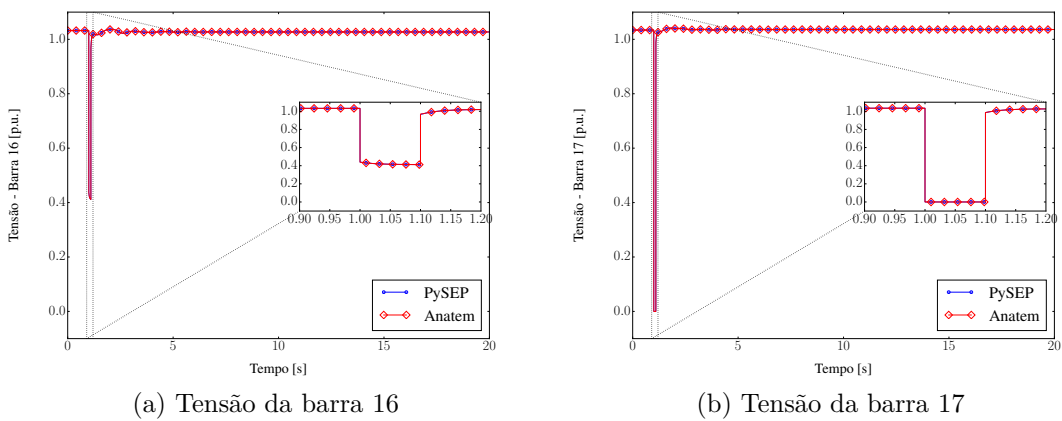


Figura 78 – Estudo de curto prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*.

• Estudo de longo prazo - 1ª Simulação

Nesta simulação é considerado a perturbação definida em (5.5), um tempo total de simulação $T_{FIM} = 600s$ e um passo de integração $\Delta t = 0,002s$.

Para fins de comparação também selecionou-se o gerador conectado a barra 33 do sistema *New England*, por ser o de vizinhança mais próxima a barra na qual a carga dinâmica está conectada. Avaliando todos os sinais mostrados nas Figuras 79 a 82 observa-se que os resultados obtidos pela ferramenta também são idênticos aos apresentados pelo programa ANATEM.

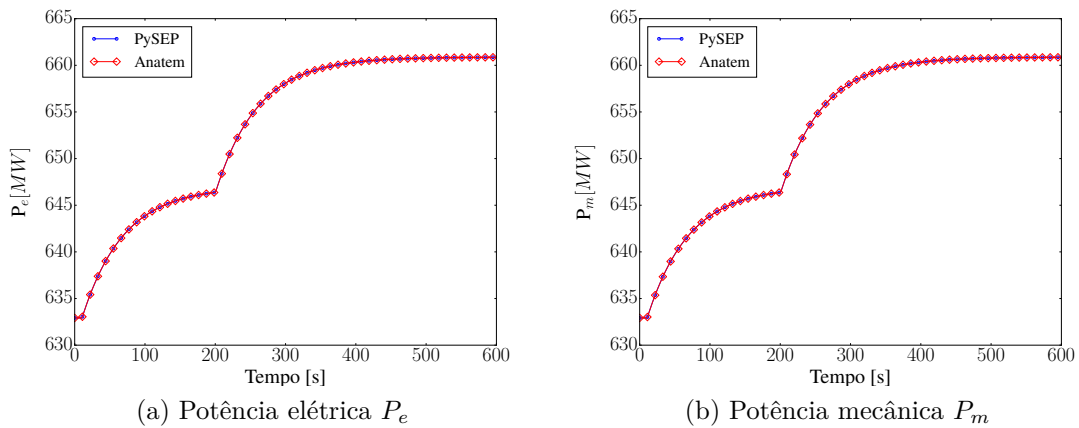


Figura 79 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*:(a) P_e (b) P_m

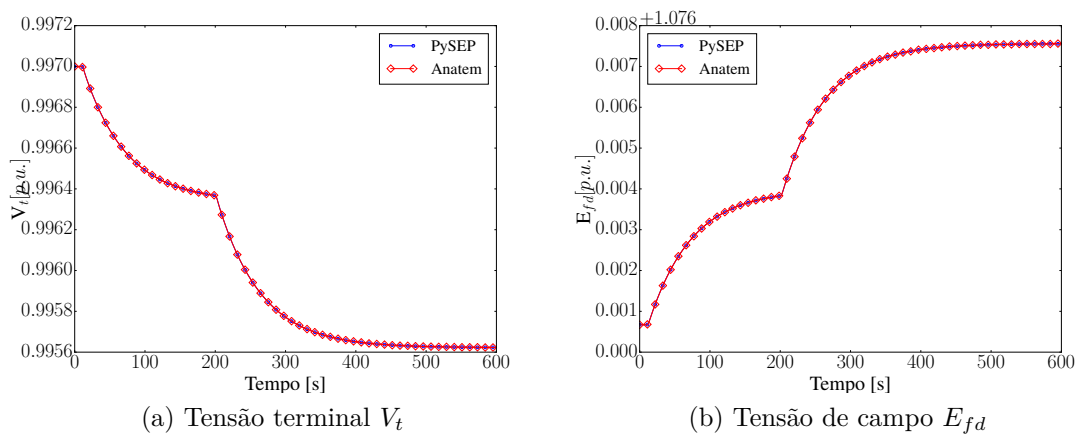


Figura 80 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*:(a) V_t (b) E_{fd}

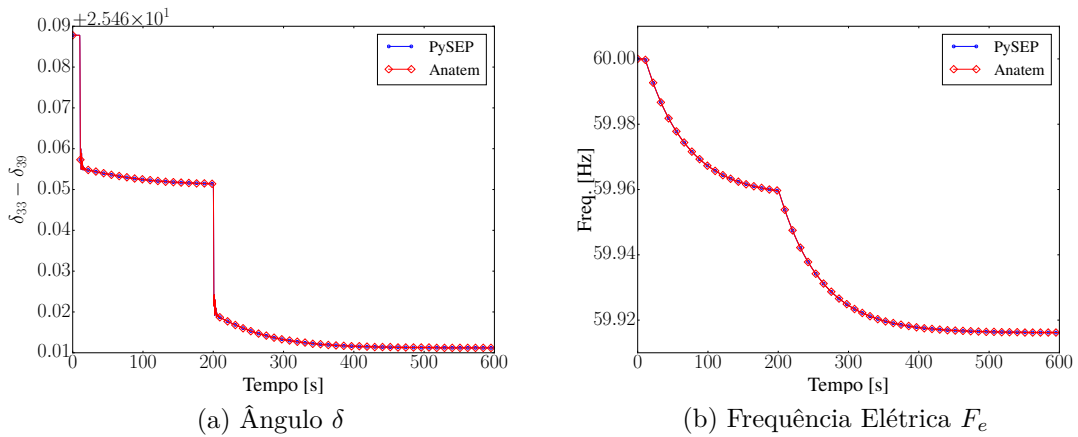


Figura 81 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*:(a) δ (b) F_e

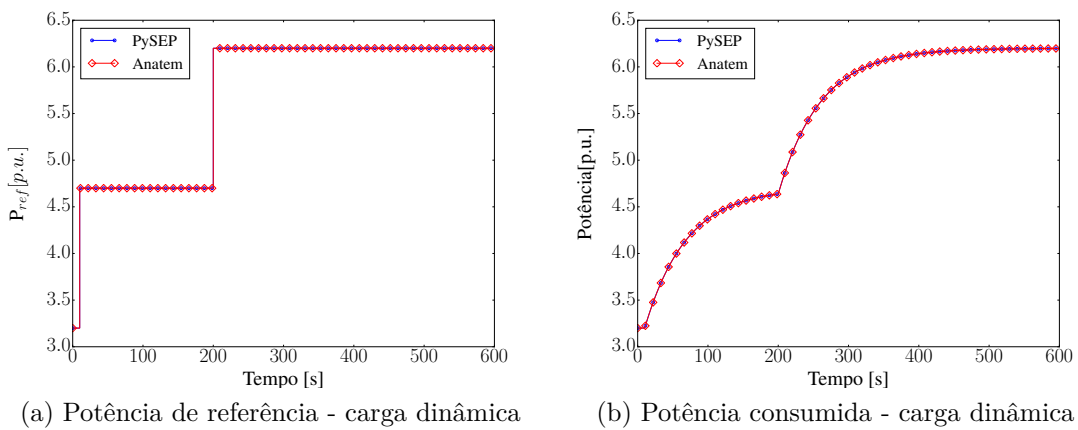


Figura 82 – Estudo de longo prazo - Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema *New England*.

• Estudo de longo prazo - 2ª Simulação

Nesta simulação também é considerado o evento definido na equação (5.5) e o tempo total de simulação $T_{FIM} = 600s$, no entanto, o passo de integração Δt adotado é igual a 10 segundos.

A adoção de um passo de integração muito maior do que na primeira deve-se ao fato das dinâmicas de resposta mais rápida terem sido consideradas estáveis e, portanto, puderam ser desconsideradas mantendo apenas as mais lentas caracterizadas no modelo da carga dinâmica. Como na simulação anterior busca-se capturar o comportamento de todas as dinâmicas presentes no sistema é necessário o emprego de um passo menor.

Igualmente à simulação anterior foram escolhidos os sinais referentes ao gerador conectado a barra 33 para que estes fossem comparados entre a simulação completa e rápida (dinâmicas desconsideradas). Os sinais estão representados nas Figuras 83 a 86.

Avaliando os gráficos dos sinais para o gerador conectado a barra 33 observa-se que a condição de regime alcançada pós perturbação em ambas as simulações são idênticas, validando a estratégia de eliminação de dinâmicas proposta. O gráfico da Figura 85(a) é o único a apresentar uma certa distinção entre os resultados pelo fato das dinâmicas mais rápidas, e portanto de conteúdo harmônico mais elevado, referente ao δ terem sido eliminadas.

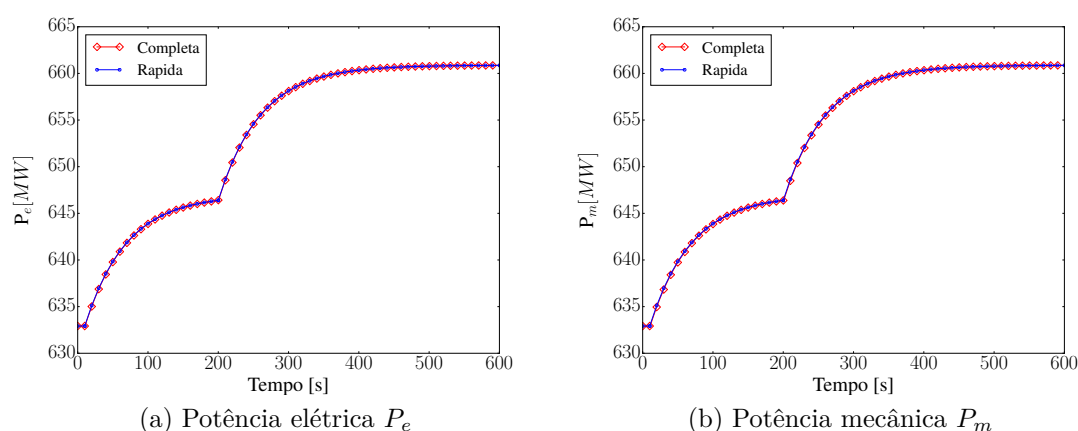


Figura 83 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema *New England*: (a) P_e
(b) P_m

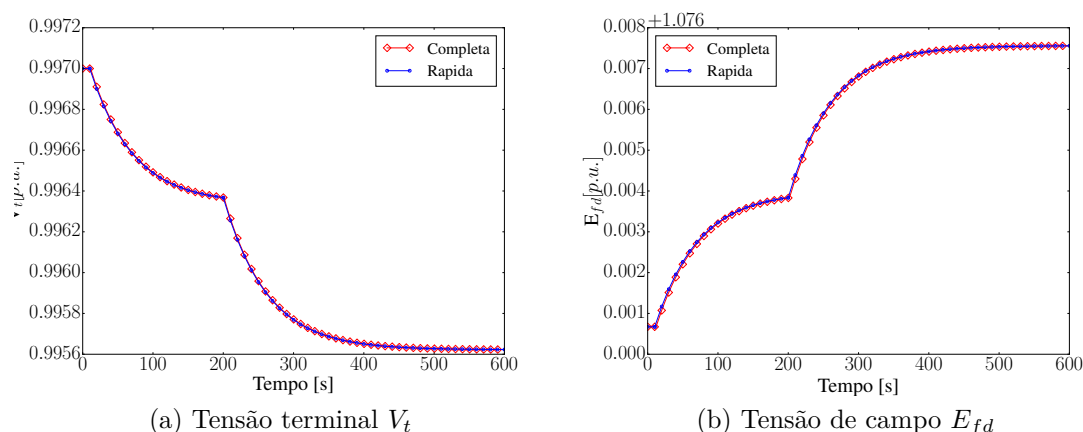


Figura 84 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema *New England*: (a) V_t
(b) E_{fd}

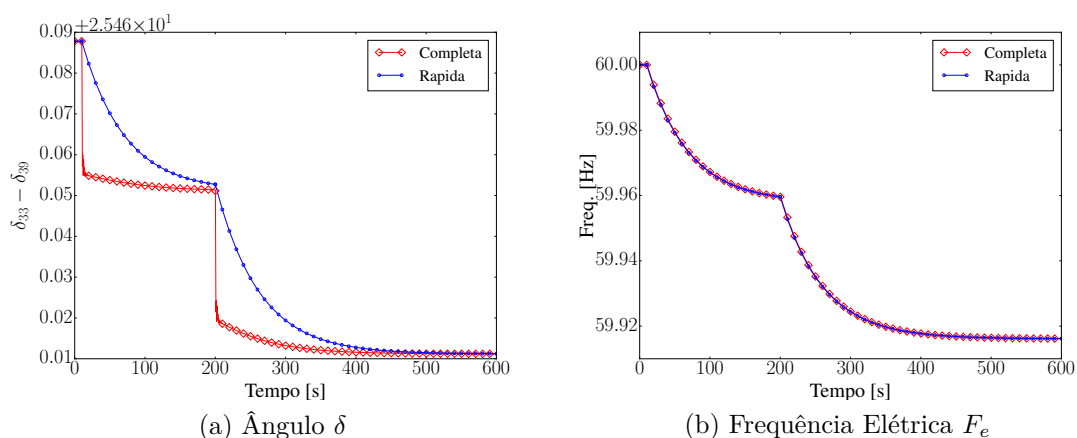


Figura 85 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema *New England*: (a) δ (b) F_e

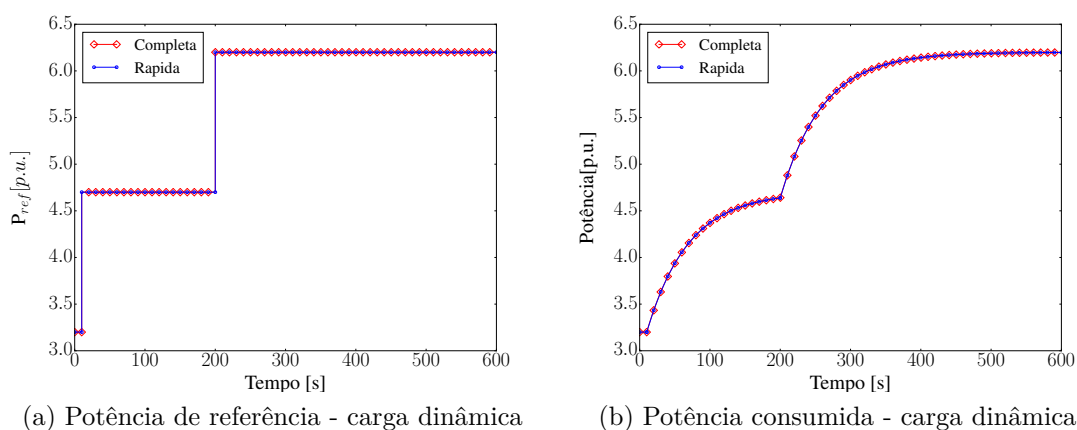


Figura 86 – Comparação de resultados completa x rápida - Sistema *New England*

5.2.3 Desempenho Computacional

Nesta seção é avaliado o desempenho computacional da ferramenta PySEP primeiramente comparando os seus tempos de simulação aos obtidos no programa ANATEM. Na sequência são feitas comparações considerando diferentes passos de integração e estratégias de atualização da matriz jacobiana.

Tabela 10 – Tempos computacionais - Sistema *New England*.

ESTUDO	ANATEM	SCIPY	CYTHON		
			KLU	UMFPACK	SUPERLU
Curto	1,07s	47,19s	37,11s	51,73s	41,97s
Longo	32,58s	957,82s	709,02s	1110,49s	831,07s

Tabela 11 – Fator de desempenho Implementação x Anatem - Sistema *New England*.

		FD	
		Curto Prazo	Longo Prazo
SCIPY		44,1	29,4
CYTHON	KLU	34,7	21,8
	UMFPACK	48,3	34,1
	SUPERLU	39,2	25,5

Na Tabela 10 são apresentados os tempos computacionais das simulações completas executadas tanto no programa ANATEM quanto na ferramenta considerando as diferentes bibliotecas de solução do sistema linear $Ax = b$. É possível observar que os tempos de simulação apresentados pela ferramenta são, de forma geral, maiores ao do ANATEM.

Na Tabela 11 são apresentados os fatores de desempenho (5.4) ao relacionar os tempos de simulação da ferramenta aos do programa ANATEM, os quais variam entre 21 e 35 vezes mais lento para os estudos de longo prazo e entre 34 e 49 vezes para o estudo de curto prazo, dependendo da biblioteca de solução empregada.

As simulações realizadas também confirmaram a eficiência da biblioteca KLU na solução do sistema linear $Ax = b$, já que o tempo total gasto foi significativamente menor do que utilizando apenas as bibliotecas disponibilizadas no Scipy, uma análise mais detalhada deste ganho é realizada na Seção 5.4 ao avaliar os perfis computacionais das simulações.

Como mencionado para o exemplo anterior, a diferença dos tempos entre a ferramenta e o programa ANATEM está relacionada as características de cada um dos programas, principalmente, pelo emprego do método simultâneo baseado no método de Newton.

Sendo assim, como a ferramenta desenvolvida emprega o método simultâneo isso permite a utilização de passos de integração maiores do que no método alternado. Buscando avaliar esta possibilidade foram realizadas simulações para o estudo de longo prazo

Tabela 12 – Tempo computacional com variação do passo - Estudo de Longo Prazo - Sistema *New England*.

Δt [s]	0,002	0,004	0,010	0,020
Tempo Total[s]	957,82	478,08	198,58	103,91
Fator de aceleração - FA	1,00	2,00	4,82	9,22
Média de iterações por passo	0,99	0,99	1,00	1,19
Número de atualizações da jacobiana	596646	299188	120404	65799
Número total de iterações	296643	149189	60405	35796

considerando passos 2, 5 e 10 vezes maiores, cujos resultados são descritos na Tabela 12. É importante destacar que no programa ANATEM o maior passo possível que pode ser utilizado para o estudo deste sistema foi 0,0026s. Na tentativa de se utilizar passos superiores a este valor surgiam problemas com relação ao número máximo de iterações no processo alternado de solução CA.

$$\begin{aligned}
 FA &= \frac{Tempo_{base}}{Tempo} \\
 FA &= \frac{957,82}{478,08} = 2,00 \\
 FA &= \frac{957,82}{198,58} = 4,82 \\
 FA &= \frac{957,82}{103,91} = 9,22
 \end{aligned}
 \tag{5.10}$$

Como esperado, com o aumento do passo de integração os tempos de simulação são reduzidos drasticamente, como mostrado pelo fator de aceleração (5.10). No entanto, este fator não é diretamente proporcional ao crescimento do passo. Essa não linearidade com relação aos tempos de simulação podem ser explicadas analisando o número médio de iterações em cada passo, por meio do qual, é possível observar que com aumento no passo de integração também pode ocorrer um acréscimo no número de iterações necessárias para o sistema convergir em cada instante de tempo, impedindo que o ganho fosse diretamente proporcional ao aumento do passo.

Na Tabela 12 também é mostrado o número total de iterações e atualizações da matriz jacobiana, estes números diferem-se em função de que em todo o passo de integração há pelo menos uma atualização e uma solução do sistema $Ax = b$ sem que haja atualização do vetor \mathbf{x} , isto pode ser observado por meio do fluxograma da Figura 57.

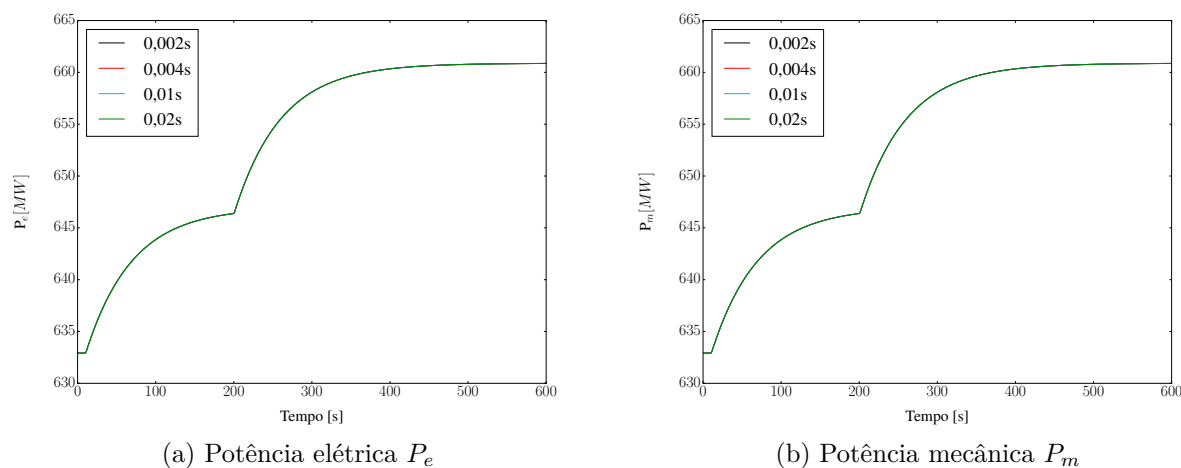


Figura 87 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema *New England*: (a) P_e (b) P_m

Nas Figuras 87 a 90 são apresentados alguns resultados comparando os sinais para os diferentes passos de integração considerados, sendo possível observar que os resultados são praticamente idênticos, o que valida a possibilidade da utilização de passos maiores sem que seja afetada a avaliação do comportamento dinâmico do sistema.

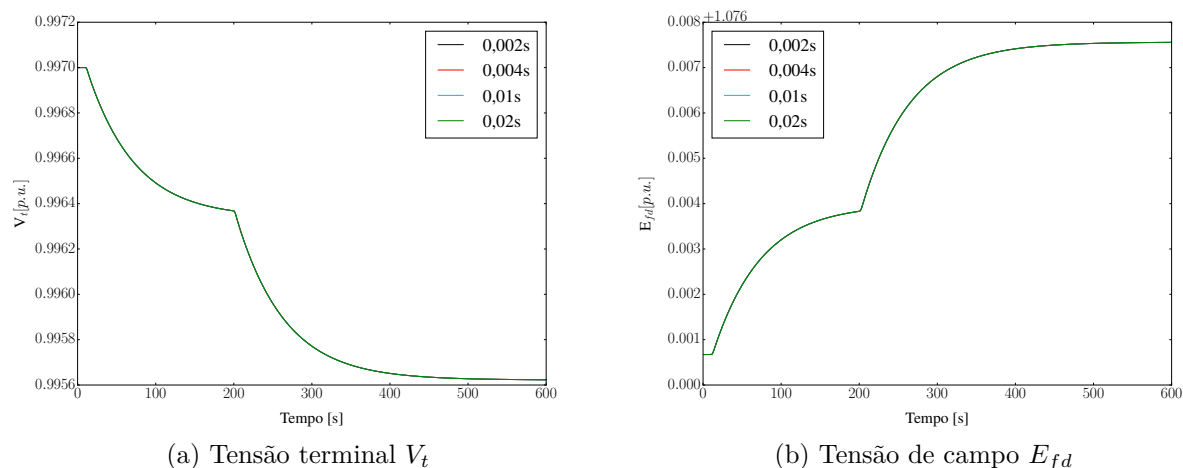


Figura 88 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema *New England*: (a) V_t (b) E_{fd}

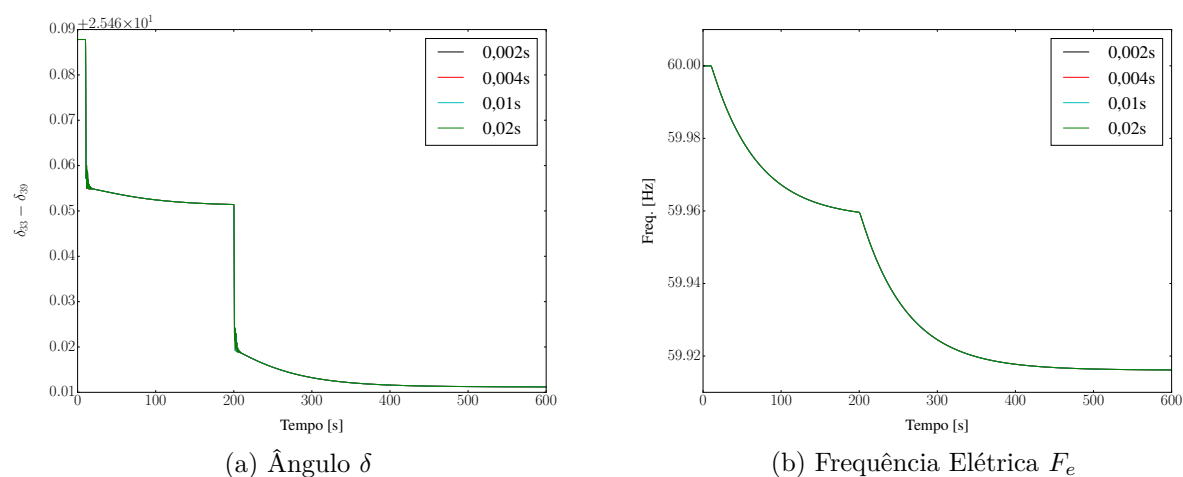


Figura 89 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema *New England*: (a) δ (b) F_e

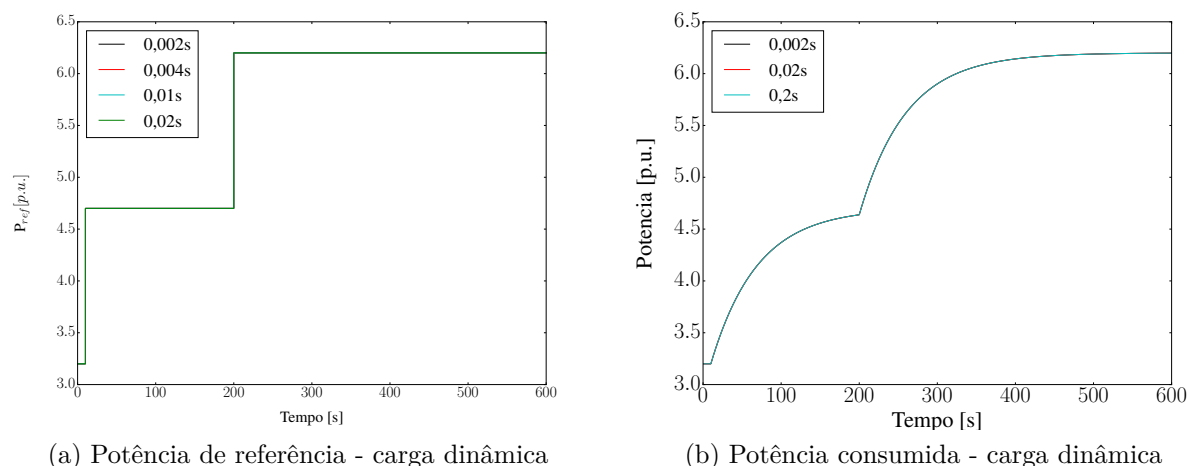


Figura 90 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Estudo de Longo Prazo - Sistema *New England*

Além da variação do passo de integração, no sistema *New England* também é avaliado o desempenho da ferramenta considerando as mesmas estratégias de atualização (*Dishonest-Newton*) empregadas para o sistema MBINF e os tempos são apresentados na Tabela 13.

- 1º Caso: Atualização em todos os passos e em todas as iterações.
- 2º Caso: Atualização no início de cada passo e a cada 5 iterações dentro do passo.
- 3º Caso: Atualização a cada 5 iterações, independente do passo

Tabela 13 – *Dishonest-Newton*: Tempos computacionais - Estudo de Longo Prazo - Sistema *New England*

Caso	Tempo [s]	%
1º	957,82	-
2º	839,59	-12,4
3º	795,85	-16,9

Igualmente ao sistema MBINF é possível observar um ganho de desempenho quando não há atualização em todas as iterações. Este ganho pode ser atribuído ao menor número de vezes que são calculadas as derivadas parciais das equações e também de acesso e atualização da matriz jacobiana e fatoração.

Nas Figuras 91 a 94 é mostrado que os resultados obtidos em todos os casos são idênticos, validando as possibilidades de atualização da matriz jacobiana empregando diferentes heurísticas de atualização.

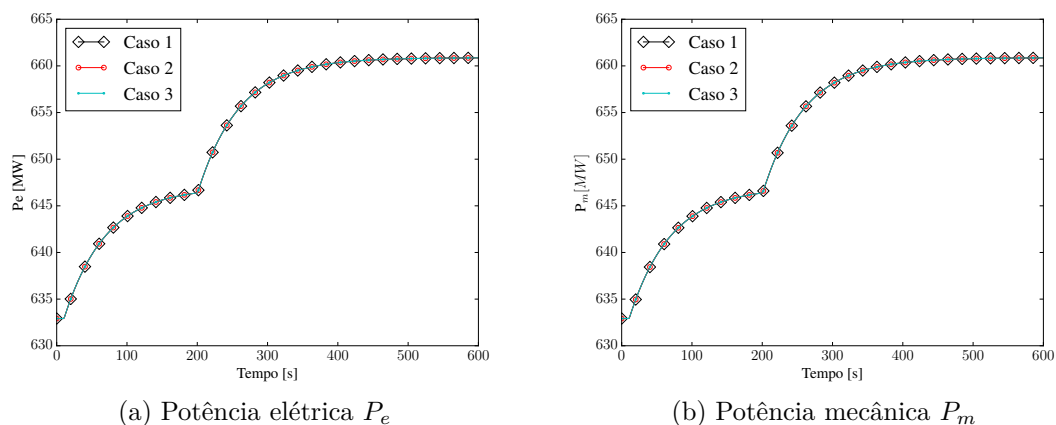


Figura 91 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - *New England*: (a) P_e (b) P_m

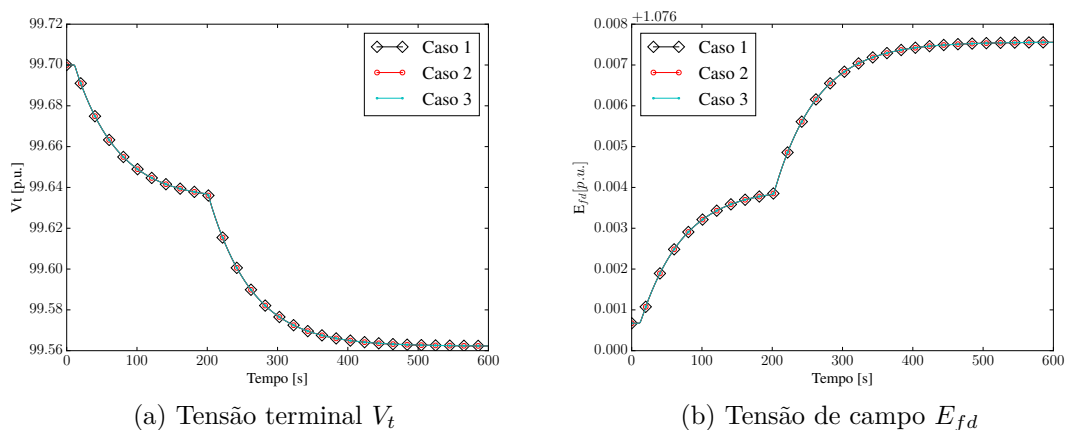


Figura 92 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - *New England*: (a) V_t (b) E_{fd}

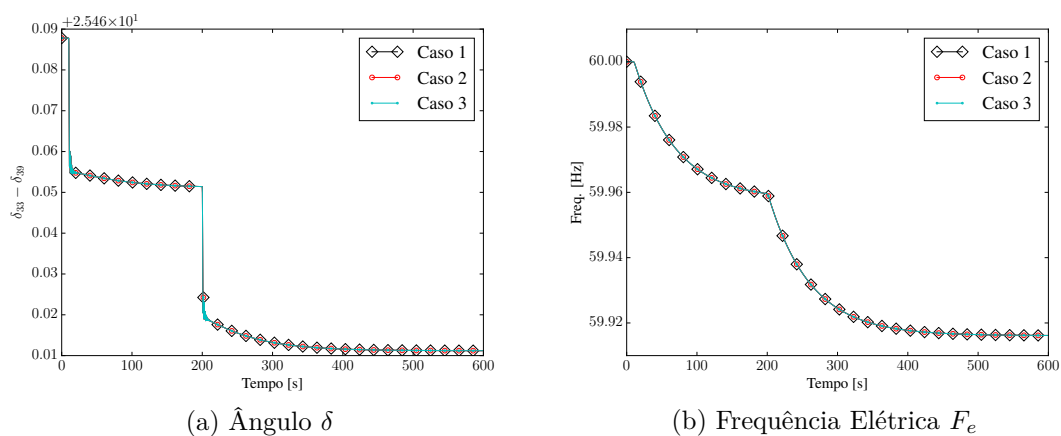


Figura 93 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - *New England*: (a) δ (b) F_e

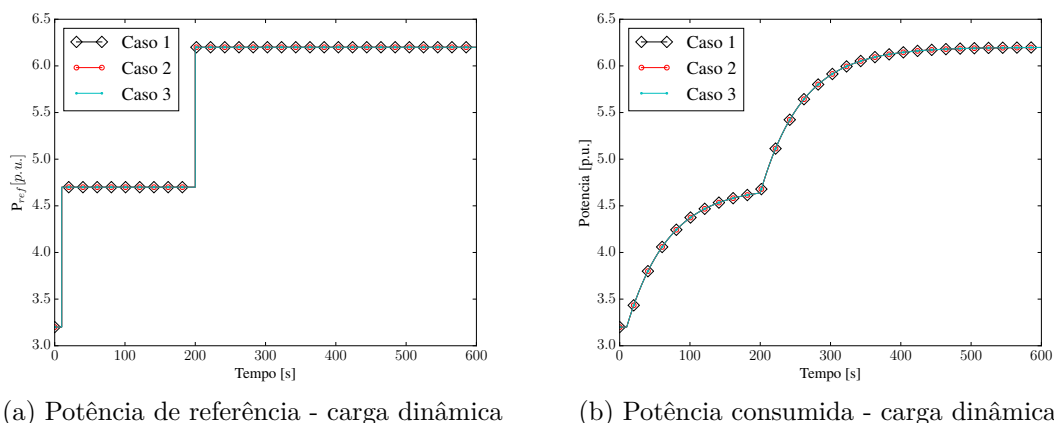


Figura 94 – Comparação de resultados para as diferentes estratégias de atualização da matriz jacobiana - Estudo de Longo Prazo - *New England*: Carga dinâmica

Por fim, é avaliado o desempenho para a simulação com eliminação de dinâmicas. Os tempos a serem comparados estão descritos na Tabela 14. É importante ressaltar que para esta simulação foram empregados também apenas as bibliotecas de solução próprias do Python.

Tabela 14 – Tempos computacionais para simulação com eliminação de dinâmicas - Sistema *New England*

	Completa	Rápida
Δt [s]	0,002	10,0
Tempo [s]	957,82	0,83
Média de Iterações por passo	0,9888	2,3810
Número de atualizações da jacobiana	596646	213
Número total de Iterações	296643	150

Neste estudo como as dinâmicas de curta duração foram desconsideradas, pode-se empregar um passo de integração muito maior do que o empregado na simulação completa, resultando um tempo total de simulação 1193 vezes menor. A comparação entre os resultados das duas simulações é apresentada nas Figuras 83 a 86.

5.3 Sistema Termelétrico Equivalente

O terceiro estudo de caso é um sistema termelétrico equivalente formado por 6 barras e 3 geradores como representado na Figura 95. Este sistema é definido por meio de um equivalente simplificado.

Neste sistema objetiva-se avaliar o desempenho do ciclo combinado formado pela turbina a vapor (TV) e duas turbinas a gás (TG11 e TG12), em situações de ilhamento do sistema.

Os distúrbios avaliados neste sistema correspondem à sequência de eventos descritos a seguir:

- Ilhamento do sistema com a abertura da linha entre as barras 4200 e 4201, no instante $t = 1,0s$.
- Ilhamento do gerador TG11 com a abertura da linha entre as barras 4205 e 4201, no instante $t = 1,1s$.
- Inclusão de elemento *shunt* a barra 4205 (10 Mvar), no instante $t = 1,1s$, apenas para evitar uma barra flutuante.
- Ilhamento do gerador TV com a abertura da linha entre as barras 4204 e 4201, no instante $t = 1,1s$.
- Inclusão de elemento *shunt* a barra 4204 (10 Mvar), no instante $t = 1,1s$, apenas para evitar uma barra flutuante.

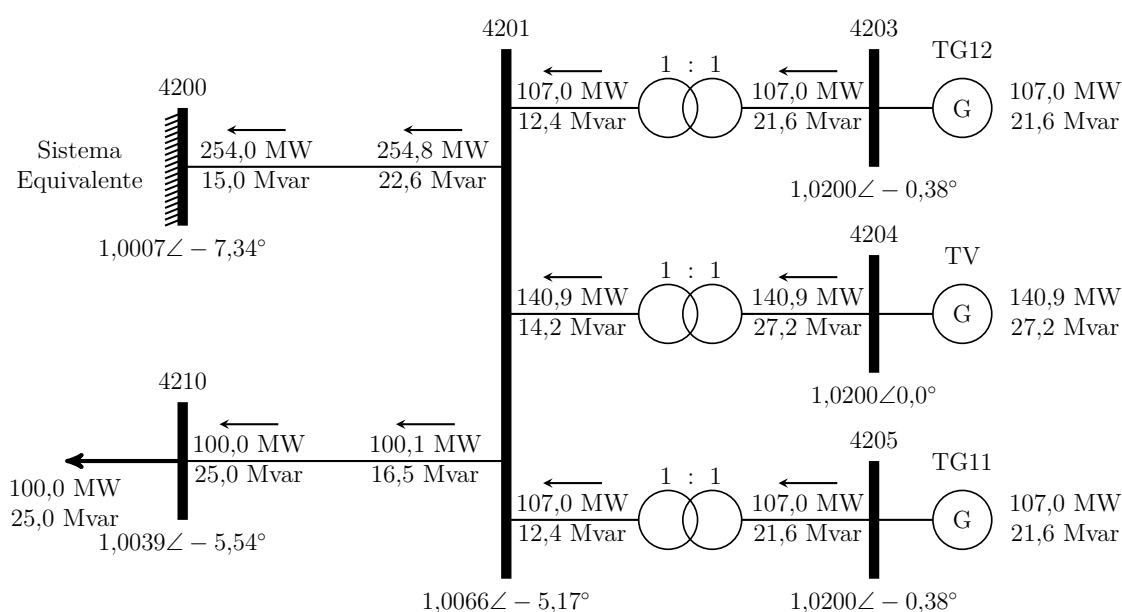


Figura 95 – Diagrama Unifilar: sistema termelétrico equivalente.

- Alternância do modo de operação para isócrono do regulador de velocidade da TG12, no instante $t = 1,1s$.

5.3.1 Estruturação do problema

Neste sistema há três unidades geradoras, portanto, seguindo os pontos apresentados na Seção 3.8 são realizados três cálculos das condições iniciais. Na Tabela 15 é apresentado o dimensionamento para cada um dos geradores considerados no sistema.

A topologia das matrizes jacobianas empregadas no cálculo das condições iniciais dos geradores é mostrada na Figura 96, sendo que (a) refere-se às barras 4203 e 4205 (geradores idênticos) e (b) à 4204. É possível observar que para este sistema além das não linearidades das equações do modelo do gerador há elementos não lineares nos modelos dos reguladores e turbinas associados. Os graus de esparsidade dessas matrizes são calculados em (5.11)

$$GE_a[\%] = \frac{275 \cdot 275 - 637}{275 \cdot 275} \cdot 100\% = 99,16\% \tag{5.11}$$

$$GE_b[\%] = \frac{287 \cdot 287 - 656}{287 \cdot 287} \cdot 100\% = 99,20\%$$

Após realizados os cálculos das condições iniciais e definido o ponto inicial para a simulação, o problema é redimensionado formando um único sistema composto pelas três unidades geradoras e pelo sistema de transmissão que resulta no total de 850 equações e variáveis. A esparsidade da matriz jacobiana resultante deste problema é mostrada na

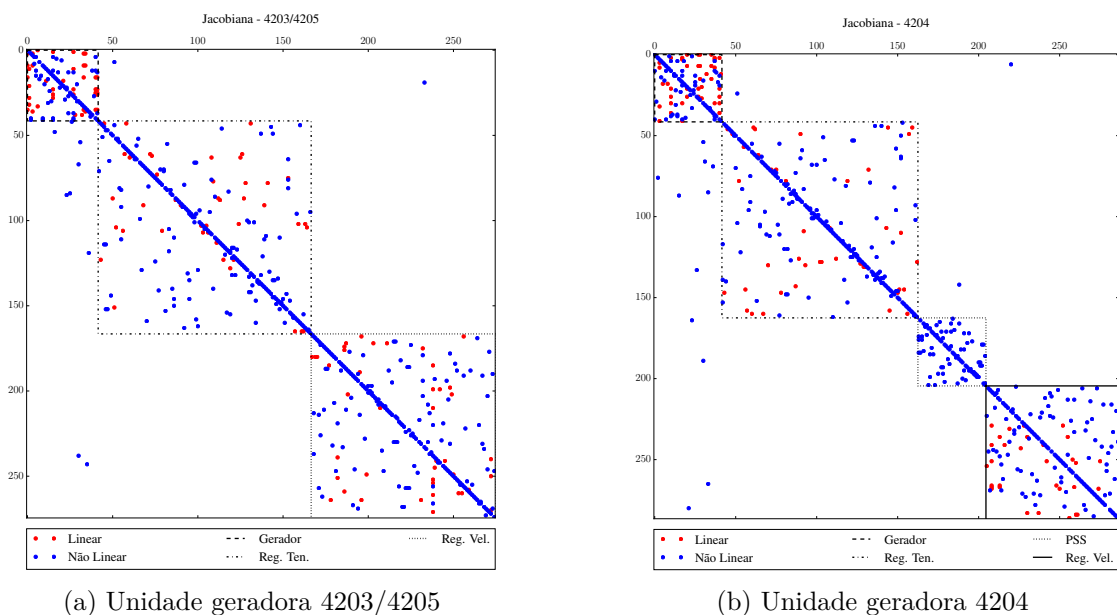


Figura 96 – Esparsidade da matriz jacobiana para cálculo das condições iniciais - Sistema Termelétrico:(a) Unidade Geradora 4203 e 4205 (b) Unidade Geradora 4204

Tabela 15 – Dimensionamento - Sistema Termelétrico

Unidade Geradora	Equipamento	Nº de nós/equações	Subtotal
4203	Gerador Equivalente (6ª Ordem)	42	275
	AVR	125	
	RV+Turbina	108	
4204	Gerador Equivalente (6ª Ordem)	42	287
	AVR	121	
	PSS	42	
	RV+Turbina	82	
4205	Gerador Equivalente (6ª Ordem)	42	275
	AVR	108	
	RRV+Turbina	125	
	Rede		12
	$\Delta\omega_{sys}$		1
Total			850

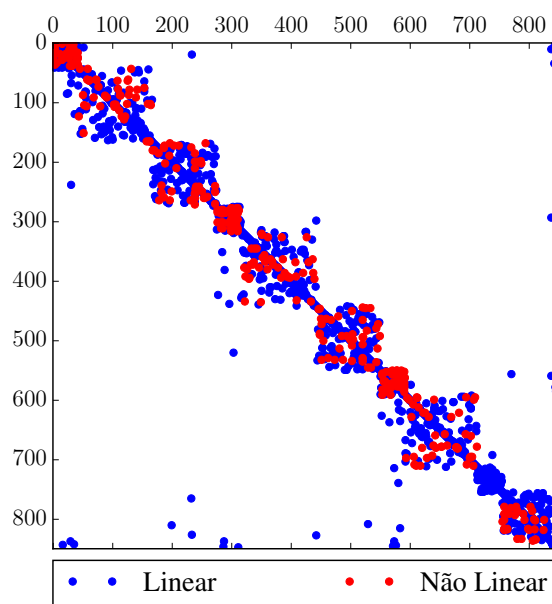


Figura 97 – Esparsidade da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico

Figura 97 e o seu grau de esparsidade calculado na equação (5.12). Dos 2109 elementos não nulos, 372 são devido as funções não lineares e precisam ser atualizados de acordo com a heurística de atualização estabelecida para a matriz jacobiana.

$$GE[\%] = \frac{850 \cdot 850 - 2109}{850 \cdot 850} \cdot 100\% = 99,71\% \tag{5.12}$$

5.3.2 Resultados da Simulação

Para a simulação dos eventos descritos previamente, empregou-se um tempo total de simulação $T_{FIM} = 300s$ com um passo $\Delta t = 0,002s$. Devido aos eventos, os resultados apresentados são referentes ao gerador TG12 conectado à barra 4203 já que os outros são desconectados.

Nas Figuras 98 a 100 são apresentados os resultados obtidos tanto pela ferramenta PySEP quanto pelo programa ANATEM. Pode-se constatar que os resultados alcançados são idênticos ao do ANATEM, validando assim as presentes simulações.

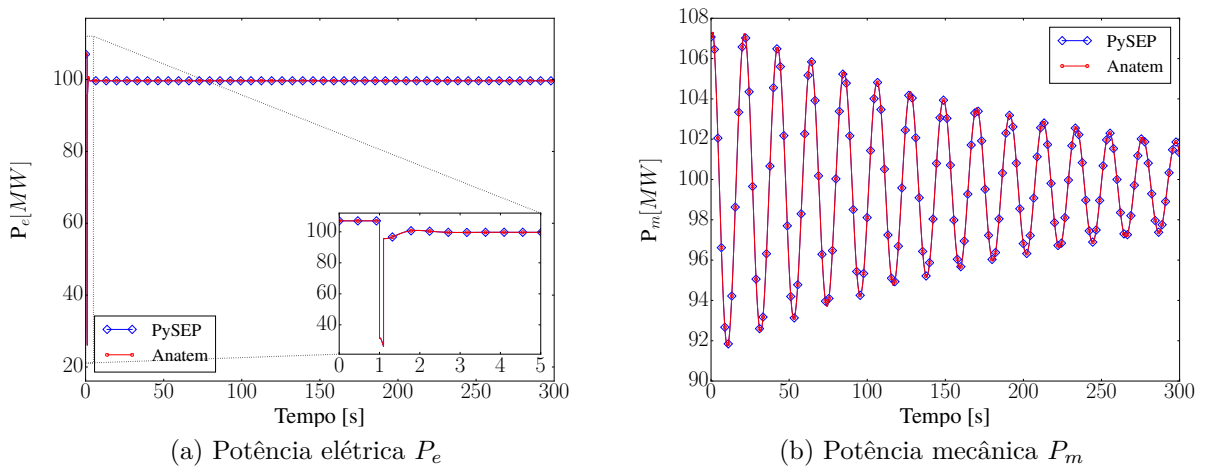


Figura 98 – Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Termelétrico:(a) P_e (b) P_m

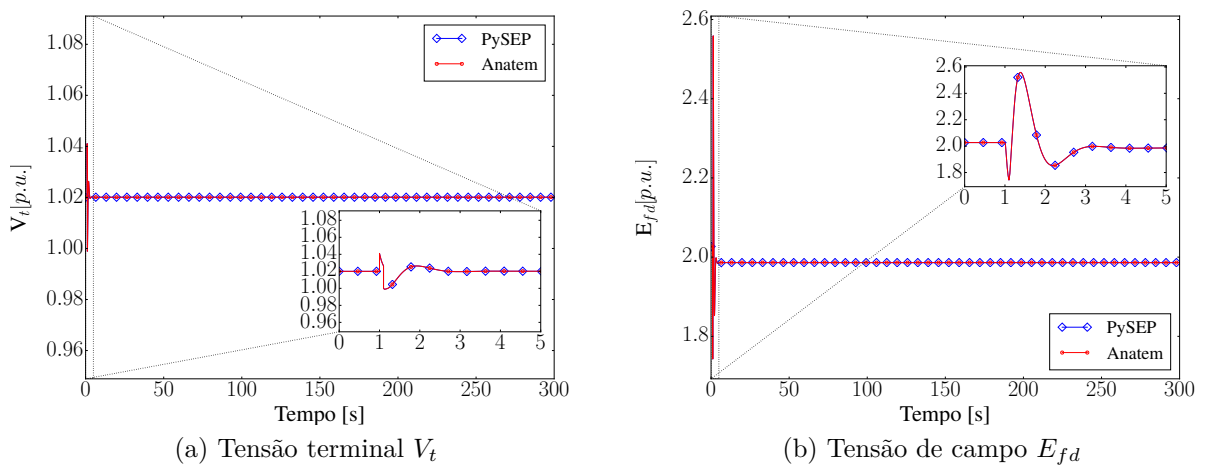
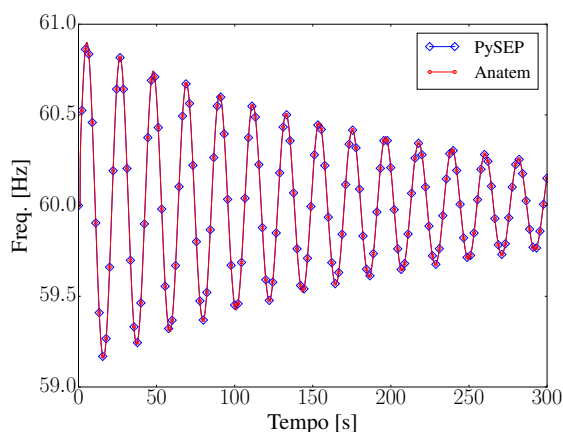


Figura 99 – Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Termelétrico:(a) V_t (b) E_{fd}



(a) Frequência Elétrica F_e

Figura 100 – Comparação de resultados ANATEM x PySEP - Sistema Termelétrico:(a) F_e

5.3.3 Desempenho Computacional

Validados os resultados obtidos com a ferramenta implementada na sequência é realizada uma avaliação do seu desempenho computacional. Na Tabela 16 são apresentados os tempos de simulação e na Tabela 17 os fatores de desempenho em comparação ao programa ANATEM.

Igualmente a todos os outros sistemas testes avaliados a ferramenta mostrou-se mais lenta do que o programa ANATEM, desta vez variando entre 53 e 80 vezes. Como já mencionado, esta diferença, em parte, deve-se ao método simultâneo empregado além de diferenças de técnicas de programação.

Além disso, para este caso, os modelos dos reguladores também apresentam características não lineares enquanto nos anteriores as não linearidades estão confinadas apenas ao modelo do gerador. Dessa forma, enquanto para os sistemas anteriores as não

Tabela 16 – Tempos computacionais - Sistema Termelétrico.

ANATEM	SCIPY	CYTHON		
		KLU	UMFPACK	SUPERLU
18,25s	1259,90s	967,55s	1456,79s	1128,26s

Tabela 17 – Fator de desempenho Implementação x Anatem - Sistema Termelétrico.

		FD
SCIPY		69,0
CYTHON	KLU	53,0
	UMFPACK	79,8
	SUPERLU	61,8

linearidades surgiam em função de blocos multiplicadores, divisores, módulo, cálculo de potência, entre outros, para este sistema, em especial, há diversos outros blocos, tais como: funções de mínimo, máximo, funções definidas por pontos, blocos seletores, entre outros, além, de funções comparadoras.

Outras avaliações de desempenho foram realizadas, primeiramente utilizando outros passos de integração e, posteriormente, variando as condições de atualização da matriz jacobiana de simulação.

Como o método simultâneo empregado permite o emprego de passos maiores sem que os resultados sejam comprometidos, os passos de integração 2, 4, 10 e 20 ms foram testados. Os tempos obtidos para estas simulações são descritos na Tabela 18. É importante destacar que no programa ANATEM a variação do passo de integração foi limitada em 0,0023s, restringindo o emprego de valores superiores.

Avaliando os resultados apresentados na Tabela 18 observa-se que ao multiplicar o passo há ganhos consideráveis nos tempos de simulação. Além disso, como observado para o sistema anterior, o ganho não é proporcional ao aumento do passo e, isto, pode ser explicado pelo número médio de iterações necessárias em cada passo. Nesta tabela ainda são apresentados o número total de atualizações da matriz jacobiana e o total de iterações ao longo do processo de simulação.

As Figuras 101 a 103 mostram as curvas para os sinais referentes ao gerador conectado a barra 4203 obtidas com os diferentes passos de integração, sendo possível observar que as respostas são praticamente idênticas para todos os passos de integração considerados.

Tabela 18 – Tempo computacional com variação do passo - Sistema Termelétrico.

$\Delta t[s]$	0,002	0,004	0,01	0,020
Tempo Total[s]	1259,90	837,88	280,91	132,74
Fator de aceleração - FA	1,00	1,50	4,48	9,49
Média de iterações por passo	2,99	2,99	2,99	3,20
Número de atualizações da jacobiana	598146	299241	119806	21065
Número total de iterações	448143	224244	89809	48064

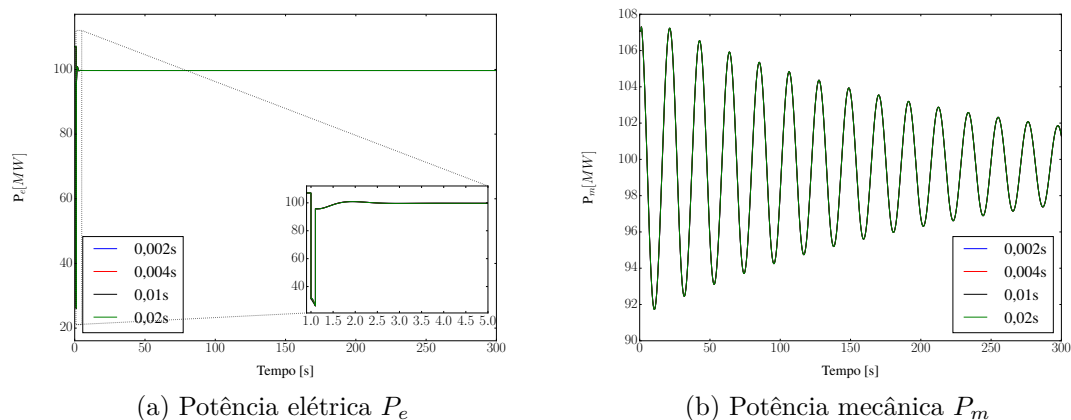


Figura 101 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Sistema Termelétrico:(a) P_e (b) P_m

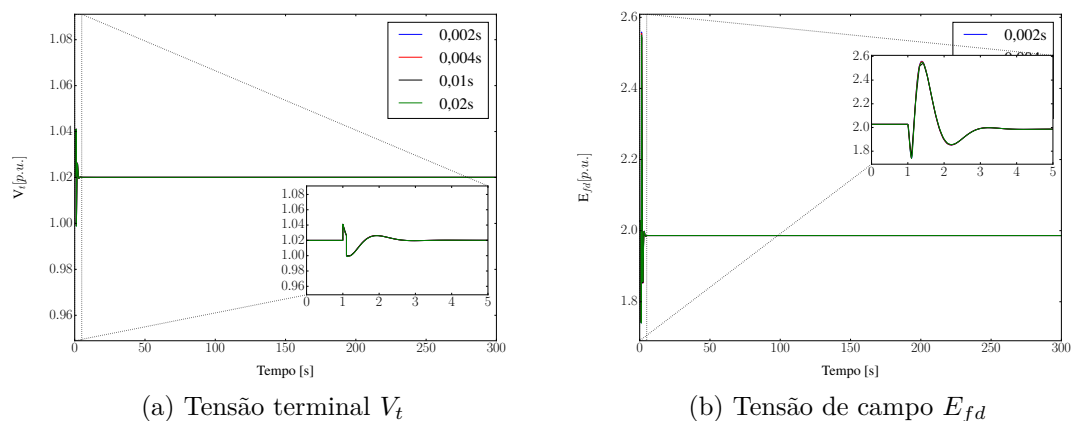


Figura 102 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Sistema Termelétrico:(a) V_t (b) E_{fd}

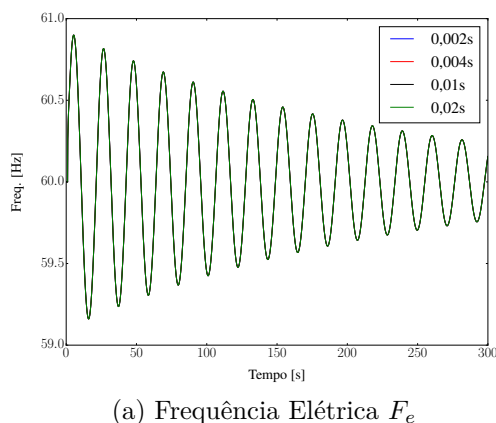


Figura 103 – Comparação de resultados para diferentes passos de integração - Sistema Termelétrico:(a) F_e

Por fim, foram realizadas simulações considerando as mesmas condições de atualização empregadas nos casos anteriores. O tempos computacionais obtidos são apresentados na Tabela 19 e os resultados para cada caso são comparados nas Figuras 104 a 106. É possível observar que os resultados alcançados com os três métodos são idênticos. Além disso, confirmou-se que ao ser adotado um passo de integração relativamente pequeno pode-se empregar estratégias diferenciadas para atualização da matriz jacobiana (*Dishonest-Newton*). O passo de integração adotado é de 2ms.

- 1º Caso: Atualização em todos os passos e em todas as iterações, como realizado anteriormente.
- 2º Caso: Atualização no início de cada passo e a cada 5 iterações dentro do passo, por exemplo nas iterações 0, 5, 10 e assim por diante.
- 3º Caso: Atualização a cada 5 iterações, independente do passo

Tabela 19 – Tempos computacionais considerando diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico

Caso	Tempo [s]	%
1º	1259,90	-
2º	989,03	-21,5
3º	833,91	-33,8

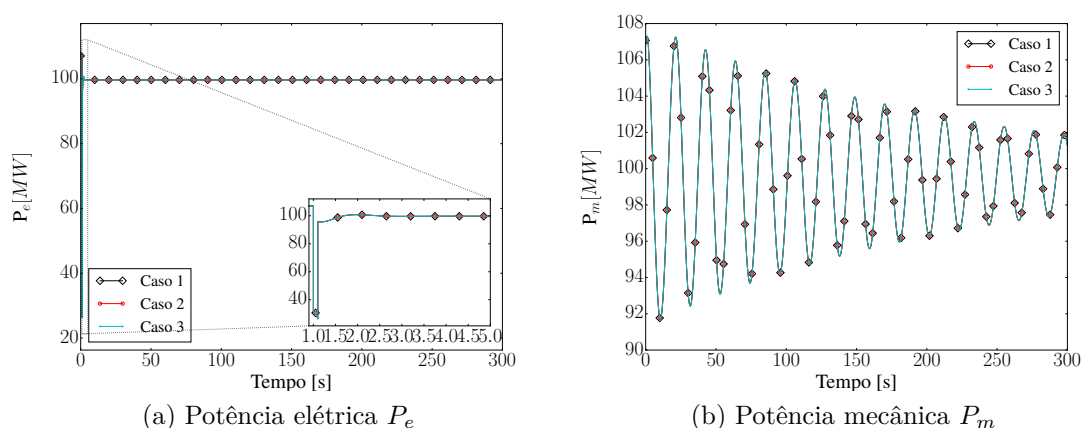


Figura 104 – Comparação de resultados para diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico: (a) P_e (b) P_m

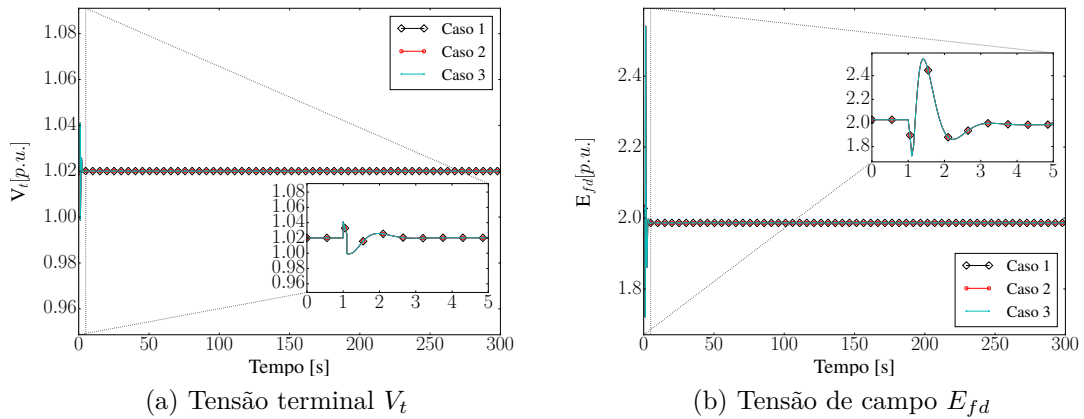


Figura 105 – Comparação de resultados para diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico: (a) V_t (b) E_{fd}

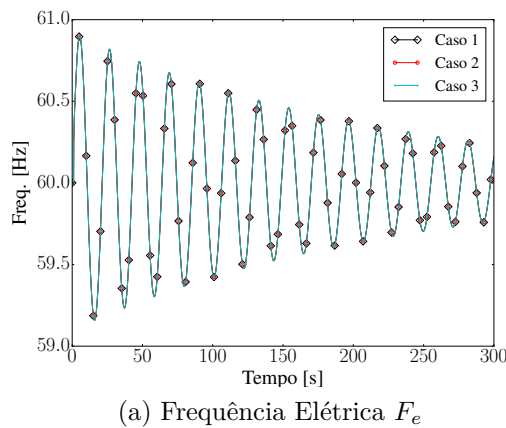


Figura 106 – Comparação de resultados para diferentes métodos de atualização da matriz jacobiana - Sistema Termelétrico:(a) F_e

5.4 Perfil Computacional das Simulações

Nesta seção são apresentados detalhes dos perfis computacionais para cada simulação realizada. Os resultados apresentados ao longo desta seção foram obtidos empregando o *plugin profiler* presente no *Spyder*. Este *plugin* mostra o tempo gasto em cada função/método durante a execução do programa.

As Tabelas 20 a 23 apresentam os perfis computacionais para a simulação dos sistemas testes considerando as diferentes bibliotecas de solução adotando a seguinte divisão:

- 1ª Parte - Engloba o tempo gasto para leitura dos arquivos de dados e processamento das informações lidas, equivalente as etapas 1,2 e 3 apresentadas na Figura 59.

- 2ª Parte - Refere-se ao tempo gasto para o cálculo das condições iniciais dos componentes presentes no sistema de potência (geradores e cargas dinâmicas).
- 3ª Parte - Está associada ao tempo gasto para a simulação do sistema frente a alguma perturbação.

Tabela 20 – Perfil computacional - Sistema MBINF

SISTEMA MBINF			
	1ª Parte	2ª Parte	3ª Parte
SCIPY	3,05%	0,27%	96,68%
KLU	3,82%	0,34%	95,84%
UMFPACK	3,00%	0,29%	96,71%
SUPERLU	3,76%	0,32%	95,92%

Tabela 21 – Perfil computacional - Sistema *New England* - Curto Prazo

SISTEMA NEW ENGLAND - CURTO PRAZO			
	1ª Parte	2ª Parte	3ª Parte
SCIPY	0,93%	0,28%	98,78%
KLU	1,19%	0,36%	98,45%
UMFPACK	0,97%	0,27%	98,76%
SUPERLU	1,09%	0,33%	95,57%

Tabela 22 – Perfil computacional - Sistema *New England* - Longo Prazo

SISTEMA NEW ENGLAND - LONGO PRAZO			
	1ª Parte	2ª Parte	3ª Parte
SCIPY	0,05%	0,01%	99,94%
KLU	0,10%	0,02%	99,88%
UMFPACK	0,04%	0,01%	99,95%
SUPERLU	0,06%	0,02%	99,92%

Tabela 23 – Perfil computacional - Sistema Termelétrico Equivalente

SISTEMA TERMELÉTRICO EQUIVALENTE			
	1ª Parte	2ª Parte	3ª Parte
SCIPY	0,03%	0,01%	99,96%
KLU	0,04%	0,02%	99,94%
UMFPACK	0,03%	0,01%	99,96%
SUPERLU	0,06%	0,02%	99,92%

Avaliando os resultados apresentados nas Tabelas 20 a 23 constata-se que a maior parcela do tempo gasto na avaliação do comportamento dinâmico dos sistemas elétricos está associada a fase de simulação do sistema. Observa-se ainda que esta parcela cresce com o aumento do tempo total de simulação (T_{FIM}) e com o aumento número de componentes presentes no sistema (geradores, controladores e cargas dinâmicas).

Buscando avaliar detalhadamente a parcela mais significativa para determinar possíveis gargalos computacionais são estruturados os gráficos das Figuras 107 a 110. Esta parcela é desmembrada em duas partes, a primeira está associada as funções implementadas em Python empregando as estruturas de classes definidas no Capítulo 4. Já a segunda está associada a fatoração/refatoração e solução dos sistemas esparsos $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ empregando as diferentes bibliotecas (Scipy, KLU, UMFPACK e SUPERLU).

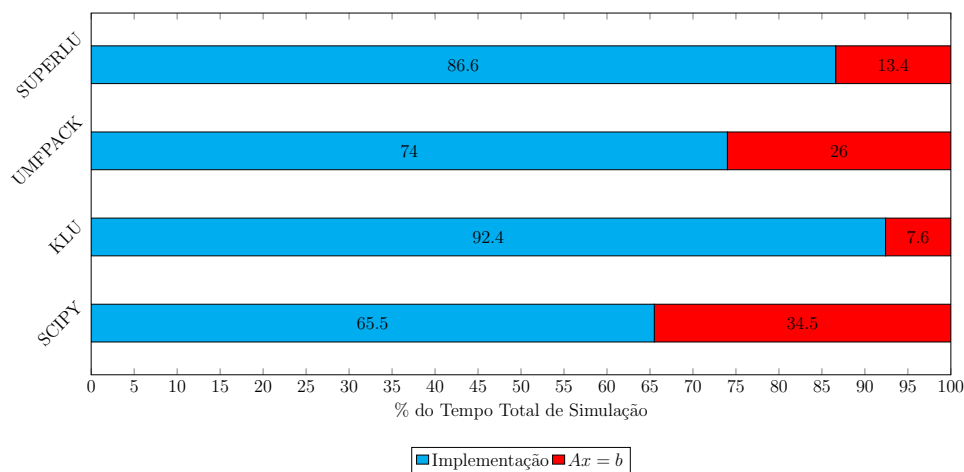


Figura 107 – Perfil computacional da Simulação - Sistema MBINF.

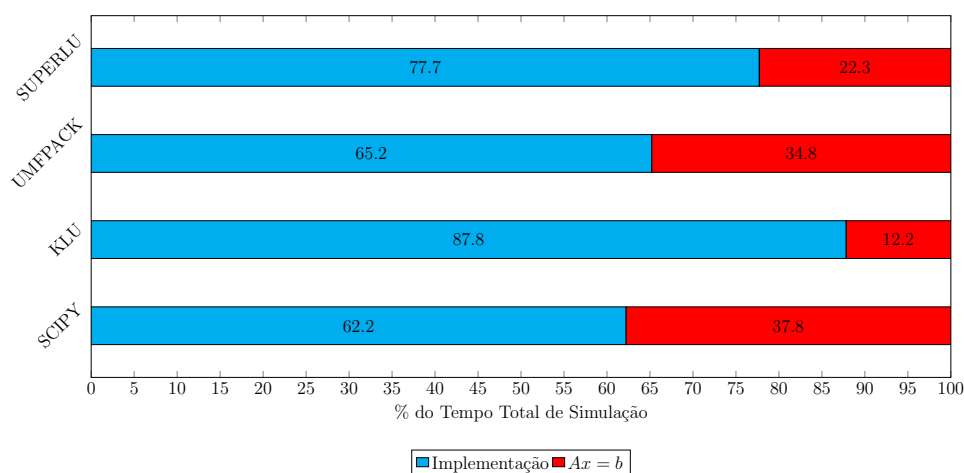


Figura 108 – Perfil computacional da Simulação - Curto Prazo - New England.

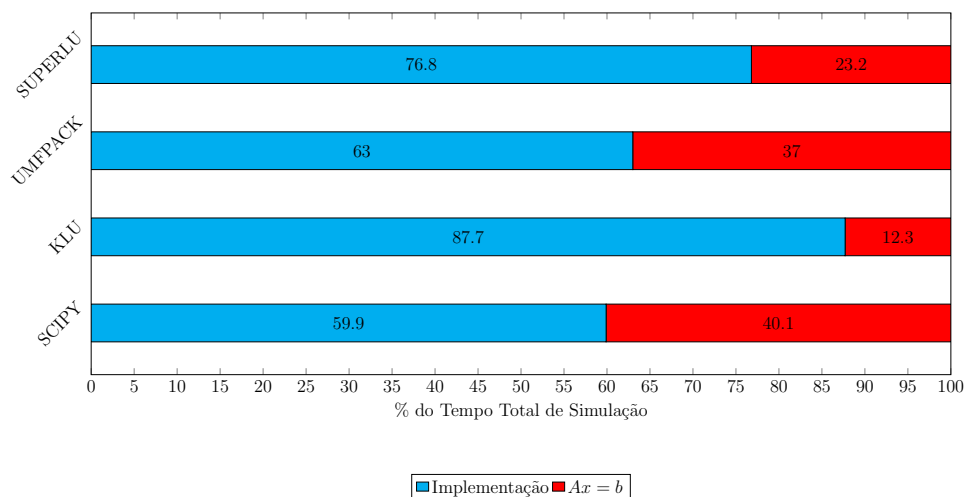


Figura 109 – Perfil computacional da Simulação - Longo Prazo - *New England*.

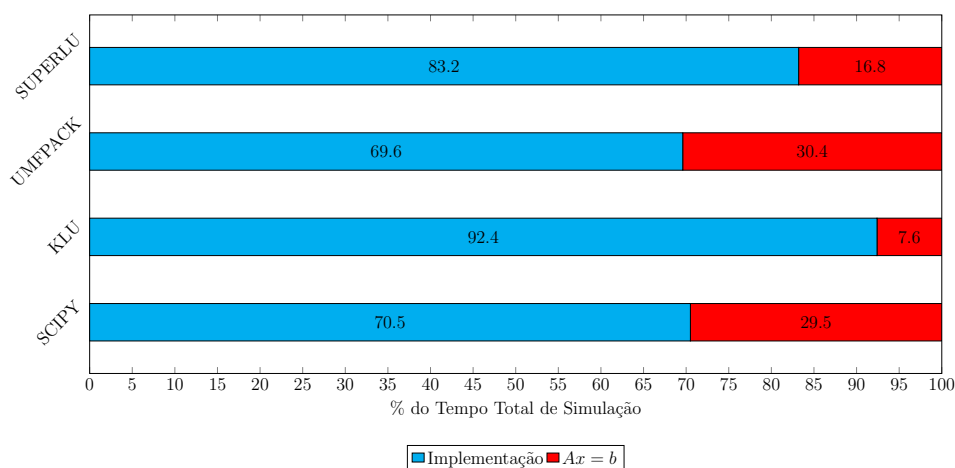


Figura 110 – Perfil computacional da Simulação - Sistema Termelétrico Equivalente.

Avaliando os resultados apresentados nestes gráficos, em todas as simulações a menor parcela de tempo corresponde a etapa de fatoração/refatoração da matriz jacobiana \mathbf{A} e solução do sistema esparsos $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Além disso, é possível observar que o emprego das bibliotecas C/C++ compiladas mostraram-se mais eficientes do que a biblioteca própria do Python, o Scipy.

Isto deve-se ao fato da adoção de uma topologia fixa para a matriz jacobiana \mathbf{A} . Este aspecto permitiu empregar apenas a refatoração em cada nova iteração já que somente ocorria a atualização dos elementos não nulos. No entanto, a biblioteca Scipy não disponibilizava ferramentas para executar a refatoração, sendo necessário realizar a fatoração completa em todas as iterações.

Outro aspecto importante a ser ressaltado, é a eficiência da biblioteca KLU na solução de sistemas esparsos. Isto pode ser comprovado ao analisar estes resultados apresentados em conjunto aos fatores de desempenho. Mesmo apresentando os menores

fatores, a biblioteca KLU é a que apresenta os menores índices de participação, variando entre 7,0 e 13,0% do tempo total.

Buscando avaliar de forma ainda mais detalhada a fase de simulação, esta é subdividida em 12 etapas não sequências como descrito nos tópicos a seguir.

- Etapa 1 - Análise do evento, aplicação da perturbação ao sistema. Ex: Aplicação de função degrau, curto circuito em barras, entre outros.
- Etapa 2 - Cálculo do valor histórico referentes ao elementos integradores.
- Etapa 3 - Cálculo do *mismatch* (vetor \mathbf{b}) dos blocos lineares.
- Etapa 4 - Cálculo do *mismatch* (vetor \mathbf{b}) dos blocos não-lineares e lógicos.
- Etapa 5 - Cálculo das derivadas dos blocos não lineares para atualização da matriz jacobiana \mathbf{A} .
- Etapa 6 - Processo de fatoração (Scipy) e refatoração (KLU, UMFPACK, SUPERLU) da matriz jacobiana \mathbf{A} .
- Etapa 7 - Solução do sistema esparso $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$.
- Etapa 8 - Análise do critério de convergência.
- Etapa 9 - Verificação dos limites, análise da faixa de operação blocos limitados, além da atualização da matriz jacobiana quando necessário.
- Etapa 10 - Outras funções/métodos presentes na etapa de simulação.
- Etapa 11 - Varredura do vetor \mathbf{x} para a realização dos cálculos referentes aos blocos não lineares e lógicos.
- Etapa 12 - Conversão do tipo de variável do vetor \mathbf{x} , para utilização das bibliotecas C/C++ compiladas em conjunto com as estruturas próprias do Python.

Ao empregar os critérios definidos anteriormente são gerados os gráficos das Figuras 111 a 114.

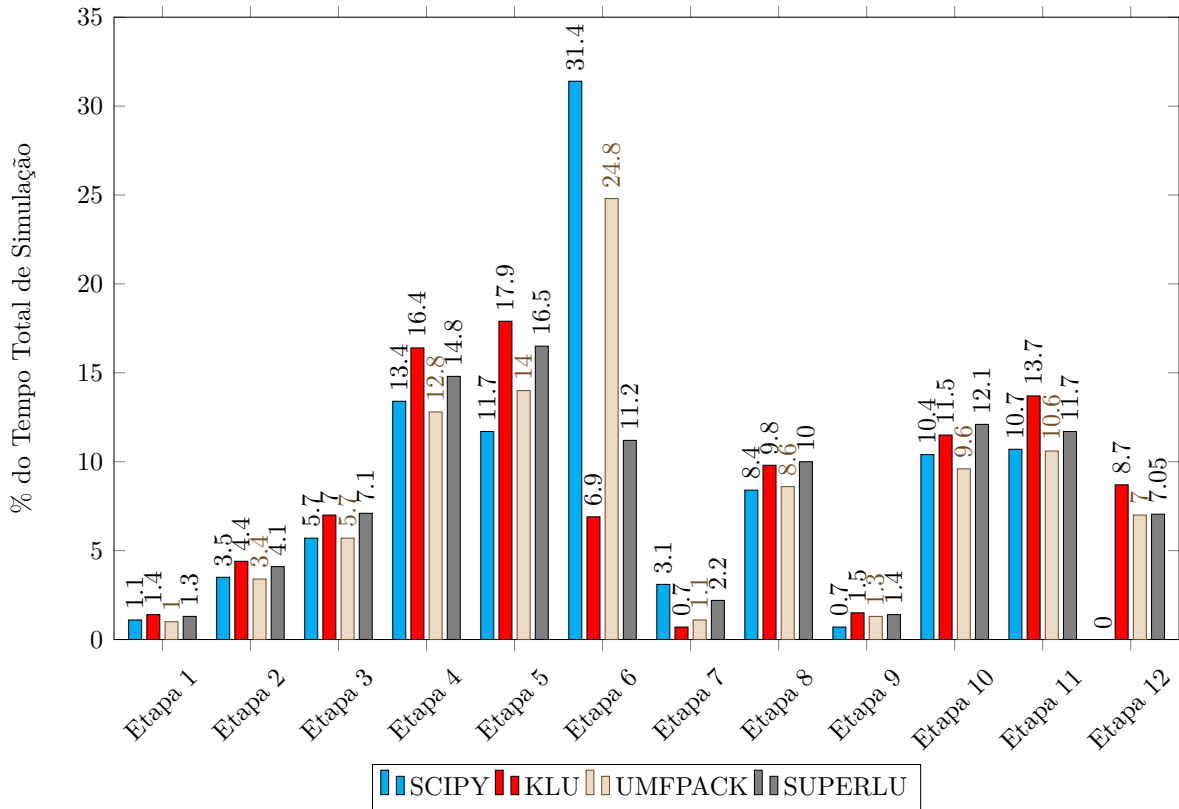


Figura 111 – Perfil computacional - Sistema MBINF.

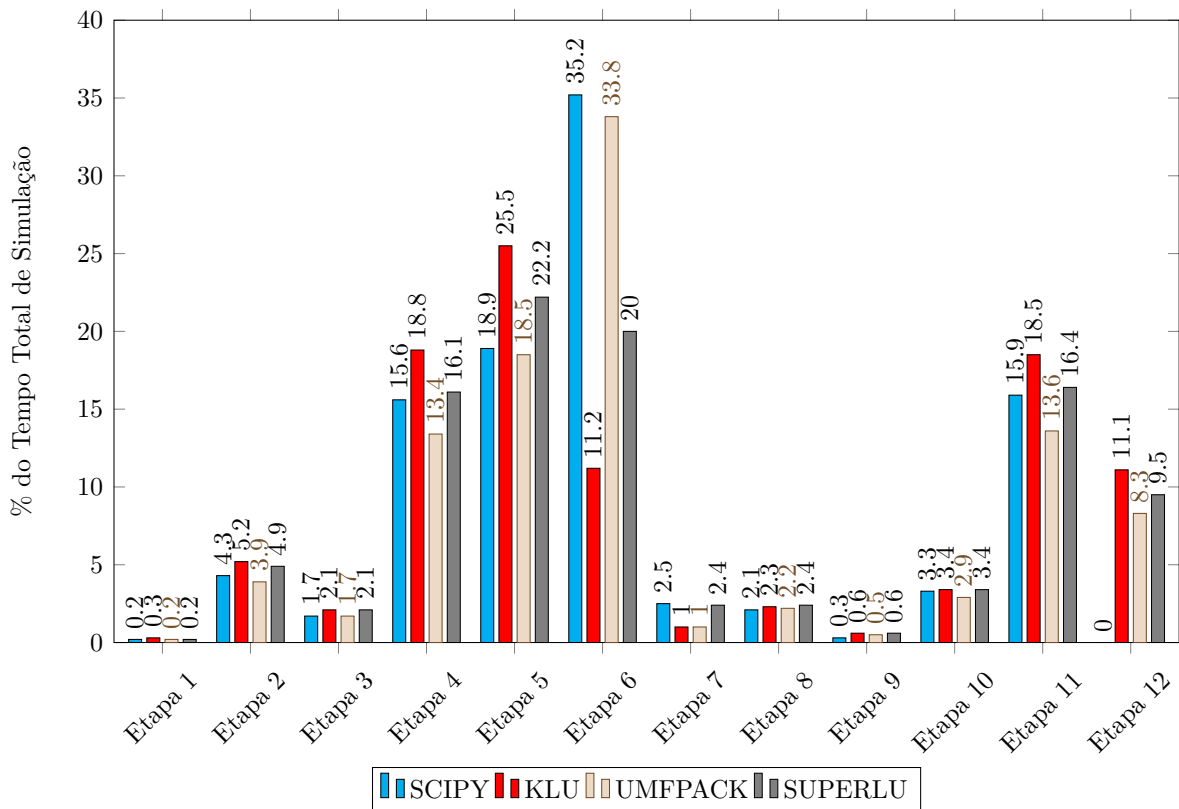


Figura 112 – Perfil computacional - Curto Prazo - *New England*.

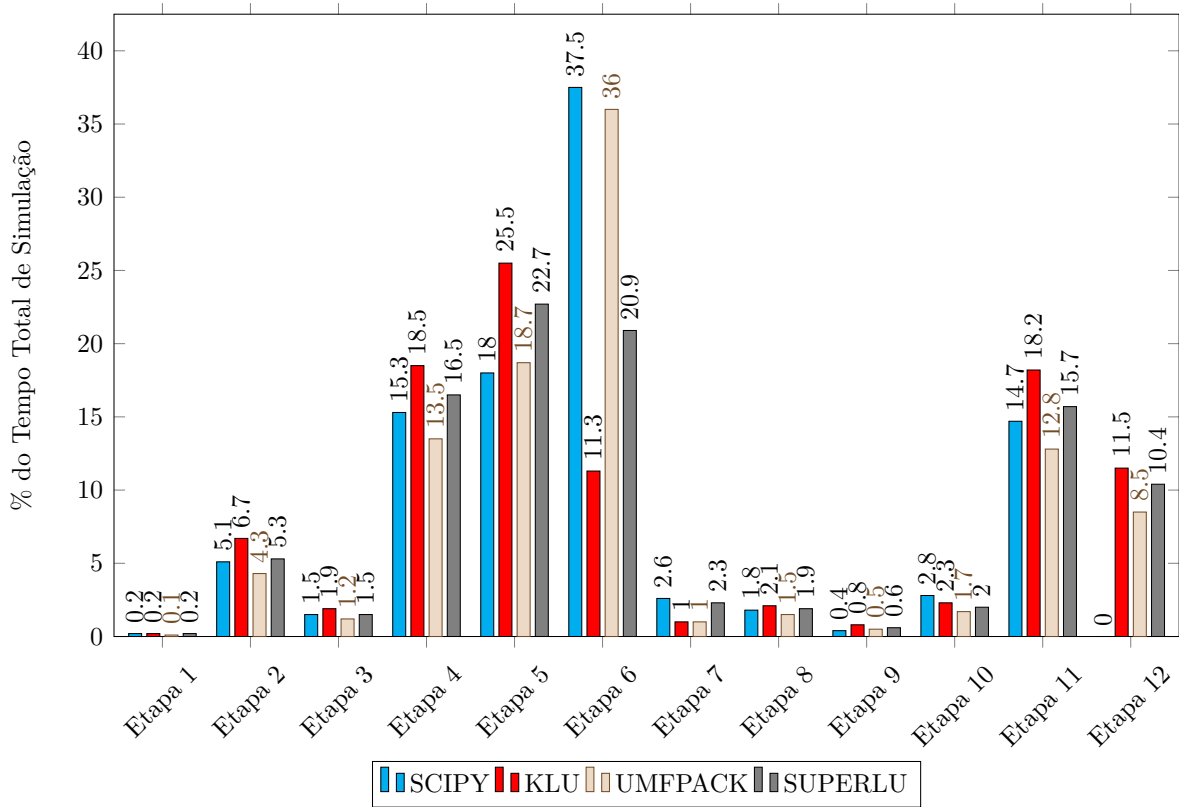


Figura 113 – Perfil computacional - Longo Prazo - *New England*.

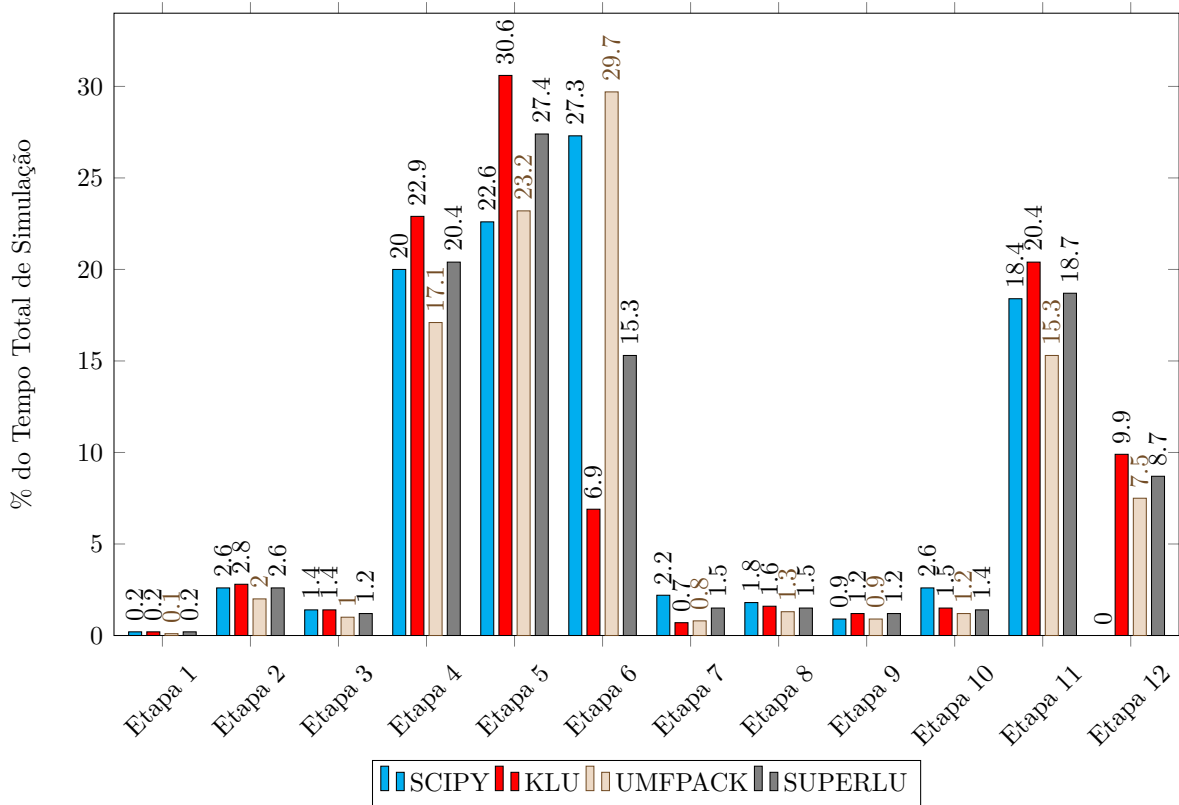


Figura 114 – Perfil computacional - Sistema Termelétrico Equivalente.

As etapas mais significativas são a 4, 5, 6, 11 e 12. As etapas 4, 5 e 11, em geral, estão associadas entre si e ao número total de iterações realizadas durante a simulação.

A parcela da solução de sistemas esparsos é dividida nas etapas 6 e 7. Como pode ser observado em todas as bibliotecas de solução a maior parcela do tempo gasto está associada a fatoração/refatoração da matriz jacobiana. Por isso o emprego das bibliotecas compiladas C/C++, que são mais eficientes para executar tais operações, apresentou significativos ganhos. No entanto, é importante observar a Etapa 12. Esta etapa é exclusiva das simulações empregando as bibliotecas compiladas, as quais empregam estruturas próprias para a montagem da matriz jacobiana \mathbf{A} e dos vetores \mathbf{b} e \mathbf{x} .

Por este motivo, é necessária a conversão de determinadas informações durante a execução do programa para adequá-las a estruturas próprias do Python. Portanto, é possível concluir que o ganho empregando as diferentes bibliotecas compiladas pode ser ainda maior caso seja eliminado este problema de interface.

5.5 Estratégia para Cálculo das Condições Iniciais

Nesta seção são descritas algumas vantagens e desvantagens referente a estratégia descrita para o cálculo das condições iniciais neste trabalho quando comparada aos cálculos realizados pelo programa ANATEM que considera um processo de cálculo bloco a bloco para os CDU's [25]. Ao adotar esse processo, em algumas situações pode não ser possível calcular as condições iniciais de todos os blocos automaticamente sendo necessário o fornecimento de informações adicionais por parte do usuário como entrada do problema.

O próprio manual do programa traz duas situações que ocorrem problemas de inicialização, as quais estão representadas na Figuras 115 e 116.

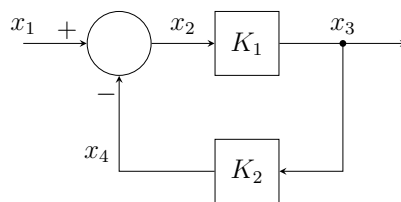


Figura 115 – Sistema linear com realimentação com o cálculo das condições iniciais ocorrendo da entrada para saída.

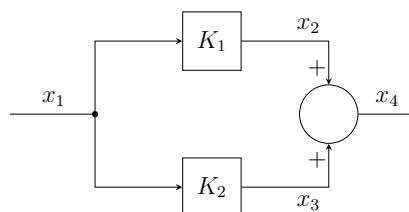


Figura 116 – Sistema linear com realimentação com o cálculo das condições iniciais ocorrendo da saída para entrada.

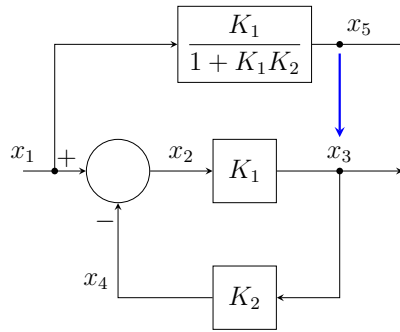


Figura 117 – Diagrama equivalente para o cálculo das condições iniciais da entrada para saída.

Estes problemas surgem devido a realimentação presente no diagrama de blocos que impedem que o cálculo ocorra corretamente bloco a bloco. Dessa forma, para que o problema seja solucionado é necessário realizar uma análise deste diagrama de forma a resolver o canal de realimentação manualmente obtendo um diagrama equivalente como representados nas Figuras 117 e 118.

Na Figura 117 o sinal x_5 estabelece a relação para obtenção do sinal x_3 , já no caso da Figura 118 o sinal x_5 define a relação para o x_1 , sendo possível assim realizar o cálculo das condições iniciais no programa ANATEM.

No entanto, quando é empregada a formulação proposta na Seção 3.3 com a aplicação do método de Newton, os problemas com a relação à realimentação são eliminados já que todos os blocos são calculados simultaneamente. É importante destacar que adotar o processo descrito neste trabalho não descarta uma avaliação cuidadosa por parte do usuário/engenheiro, pois é preciso avaliar se as condições de contorno pré-estabelecidas são suficientes para a realização do cálculo com sucesso. Além disso, devido as características intrínsecas ao método de Newton, é necessário que o ponto inicial adotado esteja bem condicionado as características do problema. Caso contrário, a convergência fica comprometida podendo inclusive não ser alcançada.

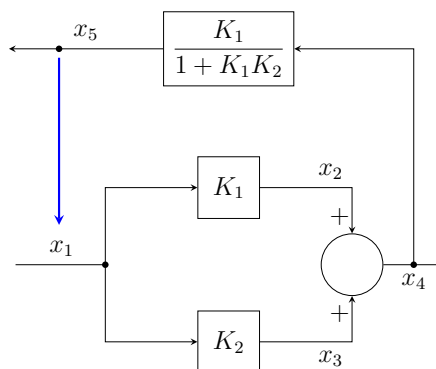


Figura 118 – Diagrama equivalente para o cálculo das condições iniciais da saída para entrada.

Na sequência são apresentados detalhes da solução para o diagrama de blocos das Figuras 115 e 116 mostrando que para a formulação apresentada neste trabalho não são necessários os blocos adicionais.

- **Primeiro caso: Sistema com realimentação com o cálculo das condições iniciais ocorrendo da entrada para saída.**

Considerando a condição de contorno $x_1 = x_1^0$ e a formulação estabelecida na Seção 3.3 define-se as equações em (5.13).

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^0 \\ x_2 - x_1 + x_4 \\ x_3 - K_1 x_2 \\ x_4 - K_2 x_3 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Aplicando o método de Newton para resolver as equações em (5.13) estrutura-se a matriz jacobiana definida em (5.15).

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_0}{\partial x_1} & \frac{\partial g_0}{\partial x_2} & \frac{\partial g_0}{\partial x_3} & \frac{\partial g_0}{\partial x_4} \\ \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_3} & \frac{\partial g_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \frac{\partial g_2}{\partial x_3} & \frac{\partial g_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x_1} & \frac{\partial g_3}{\partial x_2} & \frac{\partial g_3}{\partial x_3} & \frac{\partial g_3}{\partial x_4} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1,0 & & & \\ -1,0 & 1,0 & & -1,0 \\ & -K_1 & 1,0 & \\ & & -K_2 & 1,0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Portanto, adotando $x_1^0 = 1,0$, $K_1 = 0,5$, $K_2 = 0,5$ e $\mathbf{x}^0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$ como ponto inicial para o método de Newton tem-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}^0) = -[\mathbf{J}(\mathbf{x}^0)] \cdot \Delta \mathbf{x}^0 \quad (5.16)$$

$$\begin{bmatrix} -1,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1,0 & & & \\ -1,0 & 1,0 & & -1,0 \\ & -0,5 & 1,0 & \\ & & -0,5 & 1,0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^0 + \Delta \mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,8 \\ 0,4 \\ 0,2 \end{bmatrix} = \quad (5.18)$$

Como este sistema é linear e quando o método de Newton é empregado neste tipo de sistema a convergência ocorre em uma única iteração.

- **Segundo caso: Sistema com realimentação com o cálculo das condições iniciais ocorrendo da saída para entrada.**

Considerando a condição de contorno $x_4 = x_4^0$ e a formulação estabelecida na Seção 3.3 define-se as equações em (5.19). Sendo necessário destacar que de acordo com a formulação proposta o diagrama de blocos é modificado internamente à ferramenta realizando o acréscimo de um bloco integrador com entrada nula em x_1 por este sinal de entrada ser desconhecido, o que resulta no diagrama da Figura 119.

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ x_4 - x_4^0 \\ x_2 - K_1 x_1 \\ x_3 - K_2 x_1 \\ x_4 - x_2 - x_3 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

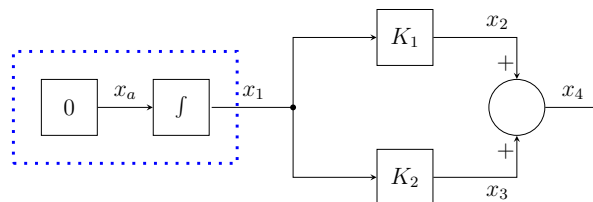


Figura 119 – Diagrama equivalente para o cálculo das condições iniciais da saída para entrada.

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_0}{\partial x_1} & \frac{\partial g_0}{\partial x_2} & \frac{\partial g_0}{\partial x_3} & \frac{\partial g_0}{\partial x_4} & \frac{\partial g_0}{\partial x_a} \\ \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_3} & \frac{\partial g_1}{\partial x_4} & \frac{\partial g_1}{\partial x_a} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \frac{\partial g_2}{\partial x_3} & \frac{\partial g_2}{\partial x_4} & \frac{\partial g_2}{\partial x_a} \\ \frac{\partial g_3}{\partial x_1} & \frac{\partial g_3}{\partial x_2} & \frac{\partial g_3}{\partial x_3} & \frac{\partial g_3}{\partial x_4} & \frac{\partial g_3}{\partial x_a} \\ \frac{\partial g_4}{\partial x_1} & \frac{\partial g_4}{\partial x_2} & \frac{\partial g_4}{\partial x_3} & \frac{\partial g_4}{\partial x_4} & \frac{\partial g_4}{\partial x_a} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} & & & & 1,0 \\ & & & 1,0 & \\ -K_1 & 1,0 & & & \\ -K_2 & & 1,0 & & \\ & -1,0 & -1,0 & 1,0 & \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Adotando $x_4^0 = 1,0$, $K_1 = 0,5$, $K_2 = 0,5$ e $\mathbf{x}^0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ como ponto inicial para o método de Newton tem-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}^0) = -[\mathbf{J}(\mathbf{x}^0)] \cdot \Delta \mathbf{x}^0 \quad (5.22)$$

$$\begin{bmatrix} 0,0 \\ -1,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} & & & & 1,0 \\ & & & 1,0 & \\ -0,5 & 1,0 & & & \\ -0,5 & & 1,0 & & \\ & -1,0 & -1,0 & 1,0 & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \\ \Delta x_4 \\ \Delta x_a \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^0 + \Delta \mathbf{x}^0 = \begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,5 \\ 0,5 \\ 1,0 \\ 0,0 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

5.6 Considerações Finais

Nesta seção foram apresentados os resultados obtidos para o estudo de três sistemas teste empregando a ferramenta de simulação desenvolvida a partir da modelagem descrita nos capítulos anteriores.

Os resultados das simulações completas destes estudos de casos foram comparados e validados com os obtidos no programa ANATEM que é uma ferramenta consolidada e amplamente empregada nos estudos de estabilidade de sistemas de potência no Brasil.

Na sequência, foram realizadas avaliações do desempenho computacional da ferramenta comparando os tempos computacionais com o programa ANATEM. Como esperado mostrou-se mais lento em função do emprego do método simultâneo além da linguagem de *script* Python. Avaliou-se também o emprego de diferentes bibliotecas de solução do sistema linear esparso $Ax = b$ resultante da aplicação do método de Newton.

Constatou-se que o emprego de bibliotecas compiladas em C são mais eficientes que a biblioteca Scipy com destaque para a solução empregando a biblioteca KLU que se mostrou bastante eficiente se comparadas ao SUPERLU ou UMFPACK. O ganho de desempenho deve-se ao fato das bibliotecas compiladas diferentemente da biblioteca Scipy, darem acesso a rotinas de mais baixo nível, principalmente para refatoração. No caso do Scipy era necessário realizar a fatoração completa em todas as iterações diferentemente das outras bibliotecas que permitiam apenas refatorar a matriz jacobiana quando esta fosse atualizada já que a estrutura (posições dos elementos não nulos) mantinha-se constante. No entanto, o ganho computacional não pode ser atribuído apenas ao emprego destas bibliotecas de solução mas também de uma estrutura esparsa desenvolvida em C para a matriz jacobiana que permitiu acelerar o processo de acesso e atualização em comparação a biblioteca do Python.

Nas simulações realizadas também foram mostrados como a estratégia de atualização (*Dishonest-Newton*) adotada para a matriz jacobiana pode influenciar no desempenho computacional da ferramenta. Além disso, constatou-se que para o emprego em estudos de estabilidade para os quais são realizadas simulações completas com passos de integração relativamente pequenos não é necessário atualizar a matriz jacobiana em todas as iterações. Mostrou-se ainda que o emprego do método simultâneo possibilitou a adoção de passos de integração maiores sem que sejam afetados os resultados da simulação, já que para este método não há erros de interface entre as variáveis algébricas e de estado.

Em um dos estudos de caso, foi aplicada a modelagem para eliminação de dinâmicas sem que fosse necessário alterar os modelos dos equipamentos sendo apenas eliminados os elementos integradores que descrevem as dinâmicas de curta duração e mantidos aqueles referentes às dinâmicas de longa duração modeladas neste estudo pelo modelo da carga dinâmica considerado.

Ao final, foi apresentado como a modelagem adotada para o cálculo das condições iniciais com a aplicação do método de Newton, com solução simultânea dos blocos, torna-se vantajosa por não apresentar problemas com relação aos canais de realimentação, geralmente presentes nos modelos dos reguladores nos sistemas elétricos de potência.

Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas as características do desenvolvimento de uma metodologia para a generalização da modelagem matemática e simulação numérica das dinâmicas de curto e longo prazo em sistemas elétricos de potência. Ao longo do trabalho foi mostrado como é possível flexibilizar a solução dinâmica ao tornar os elementos integradores explícitos.

Ao explicitar o elemento integrador é possível empregar diferentes métodos de integração, o cálculo das condições iniciais e o processo de eliminação de dinâmicas de acordo com os estudos a serem realizados, já que a simples modificação na equação considerada para o integrador permite desconsiderar o comportamento da dinâmica sem que a estrutura adotada para os estudos com todas as dinâmicas seja modificada.

Os principais aspectos referentes as etapas de cálculo das condições iniciais, de simulação e análise de descontinuidades foram discutidas detalhadamente. Destacou-se principalmente a formulação empregada para o cálculo das condições iniciais através do Método de Newton-Raphson, o qual minimiza problemas relacionados aos canais de realimentação e não-linearidades, no entanto, destaca-se a necessidade da avaliação cuidadosa do ponto inicial a ser considerado. Caso este ponto não esteja bem condicionado para as características do problema é possível que não seja alcançada a convergência. Na sequência foram apresentados os aspectos referentes ao desenvolvimento e implementação da ferramenta de simulação PySEP mostrando as estruturas adotadas para as classes básicas empregadas na descrição das equações algébrico diferenciais no formato de diagrama de blocos.

Na ferramenta desenvolvida foi possível implementar as características de eliminação de dinâmicas empregando a mesma estrutura pré-definida para a simulação completa sem a necessidade de remodelar completamente o problema, já que a modificação ocorre apenas com a alteração da equação considerada para o bloco integrador. Além disso, a estrutura adotada para a implementação dos blocos não lineares, permite que qualquer outra função não linear seja implementada diretamente sem que seja necessário alterar a estrutura pré-estabelecida já que esta independe da função modelada internamente no bloco.

A linguagem Python empregada no desenvolvimento da ferramenta, mostrou-se extremamente adequada para o manuseio das informações referentes aos equipamentos dos

sistemas elétricos de potência, permitindo uma rápida implementação das ideias propostas. Outras características puderam ser destacadas como a facilidade do emprego de bibliotecas desenvolvidas em linguagens tradicionais, como Fortran e C/C++, o que permitiu aliar a flexibilidade do Python para o tratamento das informações com a eficiência computacional das linguagens compiladas, principalmente empregando bibliotecas otimizadas para a solução do sistema linear $Ax = b$, como KLU, SUPERLU e UMFPACK, que em geral, demonstraram-se mais eficientes que as estruturas disponíveis no pacote Scipy do Python. Além disso, o emprego das ferramentas disponíveis em Cython, ainda permitiu adotar uma estrutura para matrizes esparsas desenvolvida em C/C++ que tornou o processo de acesso e atualização da matriz jacobiana mais eficiente.

Por fim, a ferramenta foi empregada no estudo de três sistemas testes, cada um com suas peculiaridades e complexidades. Os resultados obtidos são condizentes, pois puderam ser validados ao serem comparados com o programa ANATEM, que, conseqüentemente, valida as estratégias adotadas para os estudos de estabilidade empregando a ferramenta desenvolvida.

Por meio da avaliação destes estudos de caso foi possível realizar avaliações de desempenho computacional da ferramenta, que mostrou-se mais lenta do que o Programa ANATEM em todas as situações. No entanto, é importante destacar que isto ocorre pelo emprego do método simultâneo de solução e de uma linguagem de *script* que, em geral, são menos eficientes que as linguagens tradicionais compiladas. Além disso, foram avaliados as possibilidades de serem adotados métodos diferenciados para atualização da matriz jacobiana (*Dishonest-Newton*) e o emprego de maiores passos de integração já que no método simultâneo não há erros de interface entre as variáveis. Em ambas as situações, os resultados obtidos se mostraram satisfatórios por serem praticamente idênticos.

Além disso, no sistema *New England* é realizado um estudo de longo prazo, por meio do qual as dinâmicas de curta/média duração são eliminadas. Os resultados obtidos com a eliminação de dinâmica foram similares aos alcançados com a simulação completa, permitindo validar a metodologia apresentada.

6.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros são apresentados alguns pontos a seguir:

- Otimizar as funções implementadas para os blocos não lineares e comparadores/lógicos empregando a biblioteca Cython que possibilita a compilação prévia de funções em C/C++ visando obter um ganho de desempenho computacional.
- Aprimorar o cálculo das condições iniciais, primeiramente, buscando otimizar a definição do chute inicial das variáveis adotado para o método de Newton-Raphson

já que o método é fortemente dependente dos valores iniciais (não convergência).

- Paralelizar o cálculo das condições iniciais quando possível em substituição aos cálculos sequenciais.
- Realizar o cálculo das condições iniciais com todos os elementos simultaneamente ou pelo menos parcialmente quando há dependência de sinais entre os diferentes equipamentos.
- Estudos de técnicas de integração com passo variável e, posterior, implementação dessas técnicas na ferramenta desenvolvida.
- Estudos referentes ao emprego do método alternado visando, primeiramente, avaliar as adaptações a serem realizadas na metodologia ao empregar este método para posterior implementação computacional.
- Aprimorar e otimizar a simulação rápida (eliminação/desconsideração de dinâmicas), se possível automatizar o processo com estudos de autovalores e autovetores para que não seja necessária eliminar a dinâmica manualmente.
- Aprimorar o tratamento dos limites dentro da ferramenta, principalmente para as regiões de fronteira, em especial, para os elementos integradores limitados quando suas dinâmicas forem desconsideradas.
- Inclusão de outros equipamentos dos sistemas de potência (controle de tape, OXLs, CAGs, entre outros elementos)

REFERÊNCIAS

- 1 DOMMEL, H. W.; SATO, N. Fast transient stability solutions. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-91, n. 4, p. 1643–1650, July 1972. ISSN 0018-9510.
- 2 STOTT, B. Power system dynamic response calculations. **Proceedings of the IEEE**, v. 67, n. 2, p. 219–241, Feb 1979. ISSN 0018-9219.
- 3 HEMMAPLARDH, K. *et al.* Considerations for a long term dynamics simulation program. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, n. 1, p. 129–135, Feb 1986. ISSN 0885-8950.
- 4 VANTI, M. R. V. **Implementação Orientada para Objeto de um Simulador para a Dinâmica Lenta de um Sistema de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1994.
- 5 CUTSEM, T. V. *et al.* A comprehensive analysis of mid-term voltage stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 3, p. 1173–1182, Aug 1995. ISSN 0885-8950.
- 6 CUTSEM, T. V.; VOURNAS, C. D. Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 1, p. 146–154, Feb 1996. ISSN 0885-8950.
- 7 MANZONI, A. **Desenvolvimento de um Módulo Dinâmico para Simuladores de Ensino e Treinamento em Sistemas de Energia Elétrica usando Programação Orientada a Objetos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1995.
- 8 MANZONI, A. **Desenvolvimento de um Sistema Computacional Orientado a Objetos para Sistemas Elétricos de Potência: Aplicação a Simulação Rápida e Análise da Estabilidade de Tensão**. Tese (Doutorado) — COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- 9 MILANO, F. A python-based software tool for power system analysis. In: **2013 IEEE Power Energy Society General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. ISSN 1932-5517.
- 10 PYTHON. 2016. Disponível em: <<https://www.python.org/>>.
- 11 STEVENSON, W. **Elementos de análise de sistemas de potencia**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986.
- 12 KUNDUR, P. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. (EPRI power system engineering series). ISBN 9780070359581.
- 13 SAUER, P.; PAI, M. **Power System Dynamics and Stability**. [S.l.]: Prentice Hall, 1998. ISBN 9780136788300.

- 14 MACHOWSKI, J.; BIALEK, J.; BUMBY, D. J. **Power System Dynamics: Stability and Control**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2009.
- 15 IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. **IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992)**, p. 1–85, 2006.
- 16 KUNDUR, P. *et al.* Definition and classification of power system stability iee/cigre joint task force on stability terms and definitions. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, Aug 2004. ISSN 0885-8950.
- 17 WATSON, N.; ARRILLAGA, J.; ENGINEERS, I. of E. **Power Systems Electromagnetic Transients Simulation**. 1. ed. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2003. (Energy Engineering Series). ISBN 9780852961063.
- 18 MANZONI, A.; TARANTO, G. N.; FALCAO, D. M. **FastSim-Simulação de Média e Longa Duração para Estudos de Controle e Estabilidade de Tensão**. 2002.
- 19 MARINHO, J. M. T. **Simulação em Sistemas de Energia Elétrica com Modelagem Flexível - Monofásica e Trifásica**. Tese (Doutorado) — COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- 20 CUTSEM, T. V.; VOURNAS, C. **Voltage Stability of Electric Power Systems**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 21 OGATA, K.; MAYA, P. I.; LEONARDI, F. **Engenharia de controle moderno**. [S.l.]: Prentice Hall, 2003.
- 22 D'AZZO, J. J.; HOUPIS, C. H. **Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares**. [S.l.]: Editora Guanabara Dois S.A., 1984.
- 23 GEAR, C. W. **Numerical initial value problems in ordinary differential equations**. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1971. (Prentice-Hall series in automatic computation).
- 24 ALVARADO, F. L.; LASSETER, R. H.; SANCHEZ, J. J. Testing of trapezoidal integration with damping for the solution of power transient problems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-102, n. 12, p. 3783–3790, Dec 1983. ISSN 0018-9510.
- 25 CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA. **Programa ANATEM - Análise de Transitórios Eletromecânicos - Manual do Usuário**. [S.l.], 2010.
- 26 NISE, N. **Engenharia de sistemas de controle**. [S.l.]: LTC, 2002. ISBN 9788521613015.
- 27 MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. [S.l.]: Editora Edgard Blucher LTDA, 1983.
- 28 MILANO, F. **Power System Modelling and Scripting**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2010. (Power Systems). ISBN 9783642136696.

- 29 LUTZ, M. **Learning Python**. 2. ed. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly & Associates, Inc., 2003. ISBN 0596002815.
- 30 NUMPY COMMUNITY. **NumPy Reference**. 1.10.1. ed. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/numpy-1.10.1/numpy-ref-1.10.1.pdf>>.
- 31 SCIPY COMMUNITY. **SciPy Reference Guide**. [S.l.], 2015. Disponível em: <<http://docs.scipy.org/doc/scipy-0.16.0/scipy-ref-0.16.0.pdf>>.
- 32 HAGBERG, A.; SCHULT, D.; SWART, P. **NetworkX Reference**. 1.11. ed. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://media.readthedocs.org/pdf/networkx/networkx-1.11/networkx.pdf>>.
- 33 BEHNEL, S. *et al.* **Cython Reference Guide**. 0.25.0. ed. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://media.readthedocs.org/pdf/cython/latest/cython.pdf>>.
- 34 DAVIS, T. A. **UMFPACK User Guide**. 5.5.2. ed. Gainesville, FL, 2011. Disponível em: <http://hpc.wm.edu/SciClone/documentation/software/math/suitesparse-3.7.1/UMFPACK_UserGuide.pdf>.
- 35 LI, X. S. *et al.* **SuperLU Users Guide**. [S.l.], 2011. Disponível em: <http://crd-legacy.lbl.gov/~xiaoye/SuperLU/superlu_ug.pdf>.
- 36 DAVIS, T. A.; NATARAJAN, E. P. **User Guide for KLU and BTF**. 1.3.8. ed. [S.l.], 2016. Disponível em: <http://fossies.org/linux/SuiteSparse/KLU/Doc/KLU_UserGuide.pdf>.
- 37 RANGEL, R. D. *et al.* Recent developments in anatem - a comprehensive program for the analysis of electromechanical stability of large power systems. **VII SYMPOSIUM OF SPECIALISTS IN ELECTRIC OPERATIONAL AND EXPANSION PLANNING**, 2000.
- 38 TOMIM, M. A. **Parallel Computation of Large Power System Networks Using the Multi-Area Thévenin Equivalents**. Tese (Doutorado) — The University Of British Columbia, 2009.

APÊNDICE **A**

Representação de sistemas dinâmicos no espaço de estados

$$Y(s) = \left(\frac{As + B}{Cs + D} \right) U(s) \quad (\text{A.1})$$

A representação da função de transferência (A.1) no espaço de estados pode ser obtida seguindo alguns passos. Inicialmente, é realizada a multiplicação entre os termos obtendo:

$$CsY(s) + DY(s) = AsU(s) + BU(s) \quad (\text{A.2})$$

Na sequência, o termo Cs é isolado resultando em:

$$Cs \left[Y(s) - \left(\frac{A}{C} \right) U(s) \right] = BU(s) - DY(s) \quad (\text{A.3})$$

Da equação (A.3) define-se:

$$X(s) = Y(s) - \left(\frac{A}{C} \right) U(s) \quad (\text{A.4a})$$

$$Y(s) = X(s) + \left(\frac{A}{C} \right) U(s) \quad (\text{A.4b})$$

Retorna à equação (A.3), obtendo:

$$CsX(s) = BU(s) - DX(s) + \left(\frac{DA}{C} \right) U(s) \quad (\text{A.5})$$

Organizando os termos em (A.5), obtém-se:

$$sX(s) = \left(\frac{BC - AD}{C^2} \right) U(s) - \left(\frac{D}{C} \right) X(s) \quad (\text{A.6})$$

Posteriormente, converte-se a equação (A.6) no domínio de Laplace em equação diferencial, resultando em:

$$\dot{x}(t) = \left(\frac{BC - AD}{C^2} \right) u(t) - \left(\frac{D}{C} \right) x(t) \quad (\text{A.7})$$

Dessa forma, considerando (A.4b) e (A.6) obtêm-se o conjunto algébrico-diferencial referente a função de transferência em (A.1):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = -\left(\frac{D}{C}\right)x(t) + \left(\frac{BC - AD}{C^2}\right)u(t) \\ y(t) = x(t) + \left(\frac{A}{C}\right)u(t) \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

APÊNDICE B

Modelo do gerador síncrono

Matematicamente, os geradores síncronos podem ser modelados de diferentes formas, levando em consideração suas características construtivas (polos lisos ou salientes) e aos efeitos que são representados no modelo (transitório e/ou subtransitório) [13, 14, 25]. Sendo que neste trabalho, os modelos pré-definidos considerados e que estão descritos a seguir são:

- Equação de Oscilação:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H} [P_m - P_e - D\Delta\omega] \\ \frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \cdot \omega_s \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

- Potência elétrica ativa (P_e) e reativa (Q_e):

$$\begin{cases} P_e = E_q'' I_q + E_d'' I_d + (X_d'' - X_q'') I_d I_q \\ Q_e = E_q'' I_d - E_d'' I_q - X_d'' I_d^2 - X_q'' I_q^2 \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

- Corrente de Armadura de eixo em quadratura (I_q) e direto (I_d):

$$\begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} = \frac{1}{R_a^2 + X_q'' X_d''} \begin{bmatrix} R_a & -X_d'' \\ X_q'' & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_q'' - V_q \\ E_d'' - V_d \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

- Tensão terminal de eixo em quadratura (V_q) e direto (V_d):

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \text{sen } \delta \\ \text{sen } \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \\ V_m \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

- Corrente injetadas componente real (I_r) e imaginária (I_m):

$$\begin{bmatrix} I_r \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \text{sen } \delta \\ \text{sen } \delta & -\cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

B.1 Modelo de 5ª Ordem (modelo de polos salientes)

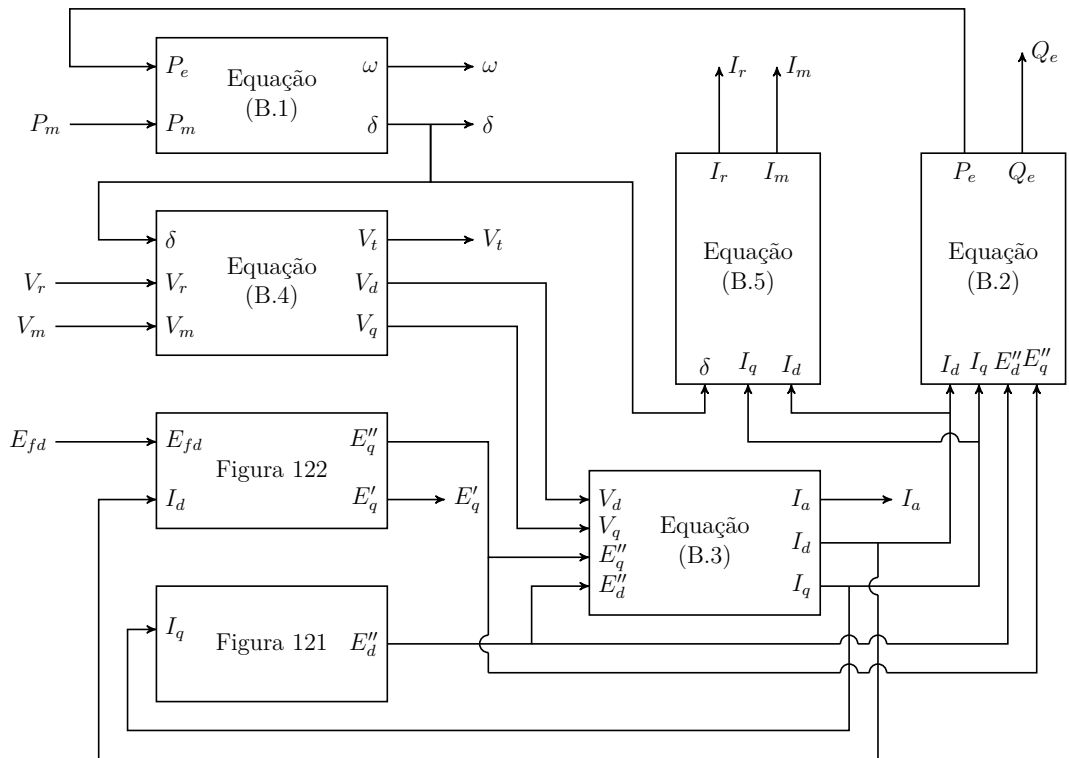


Figura 120 – Modelo gerador polos salientes (E_q'').

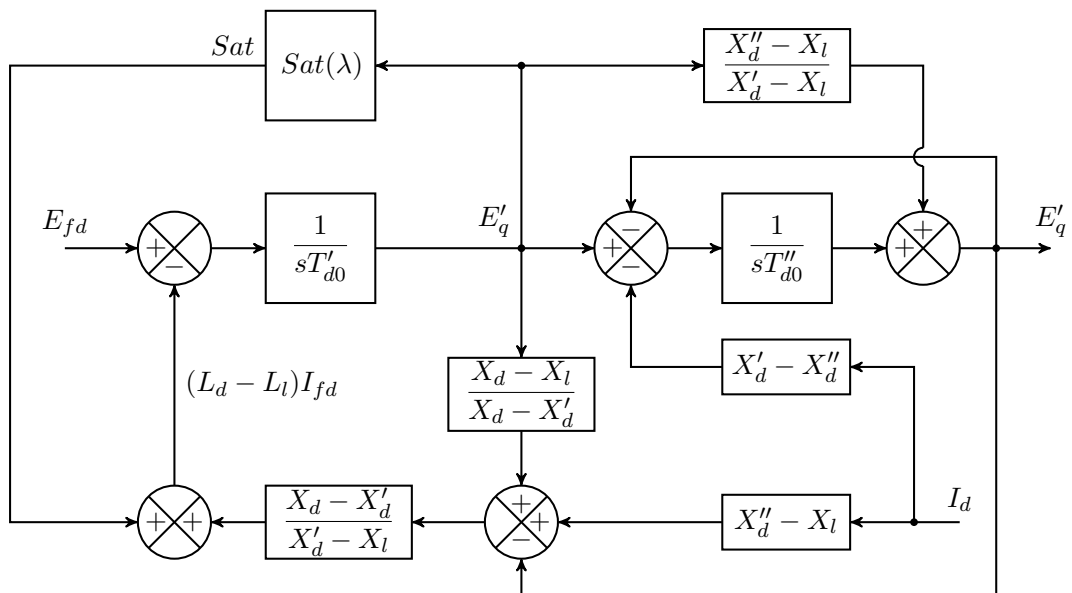


Figura 121 – Diagrama para as equações de eixo direto - polos salientes.

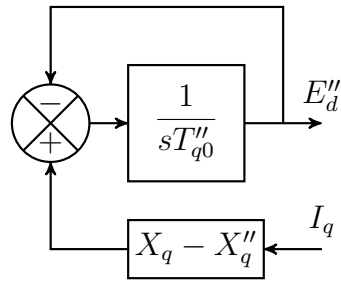


Figura 122 – Diagrama para as equações de eixo em quadratura - polos salientes.

B.2 Modelo de 6ª Ordem (modelo de polos lisos)

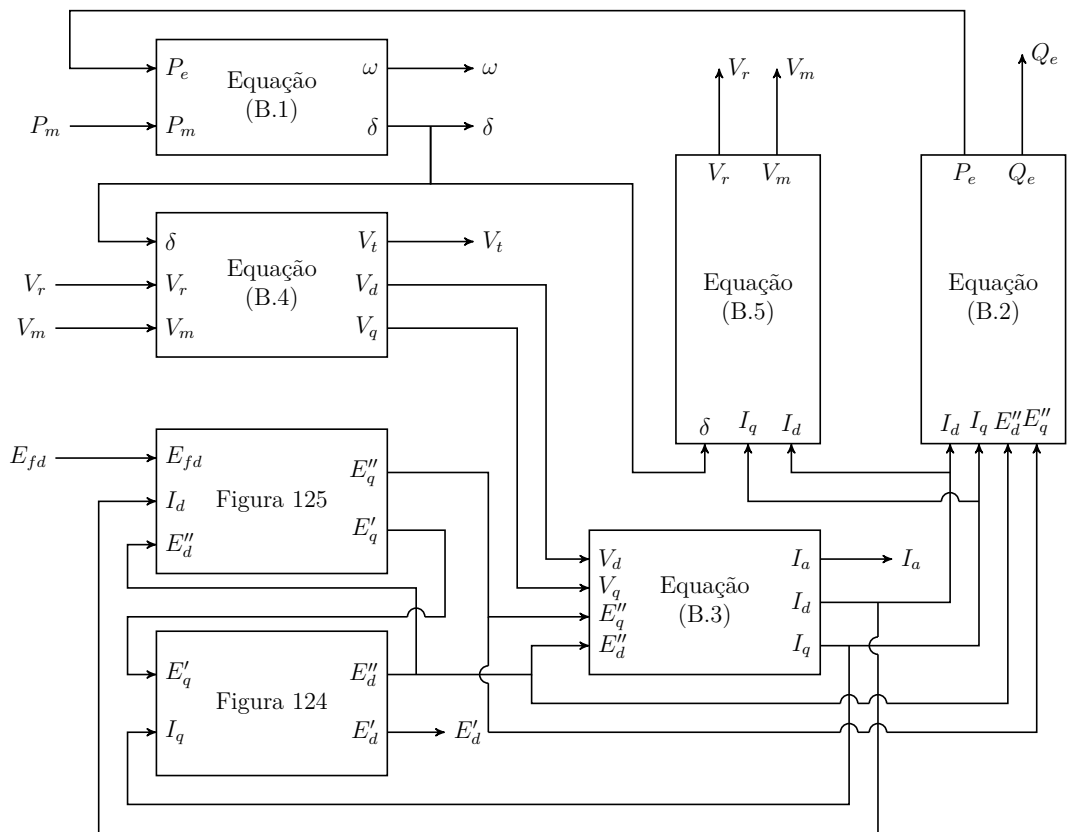


Figura 123 – Modelo Gerador Pólos Lisos (E''_q).

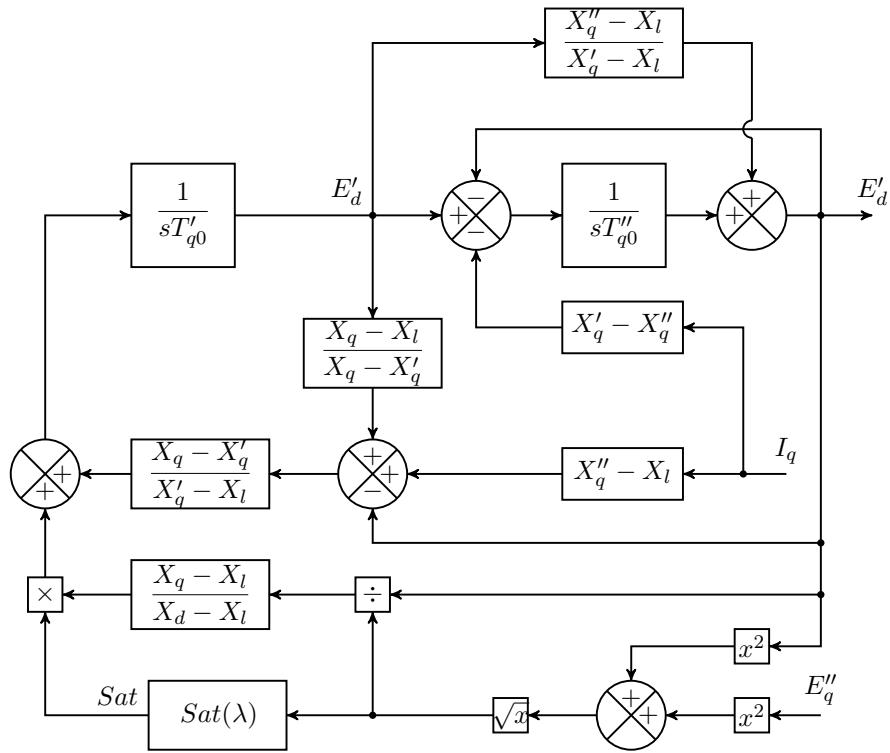


Figura 124 – Diagrama para as equações de eixo em quadratura - polos lisos.

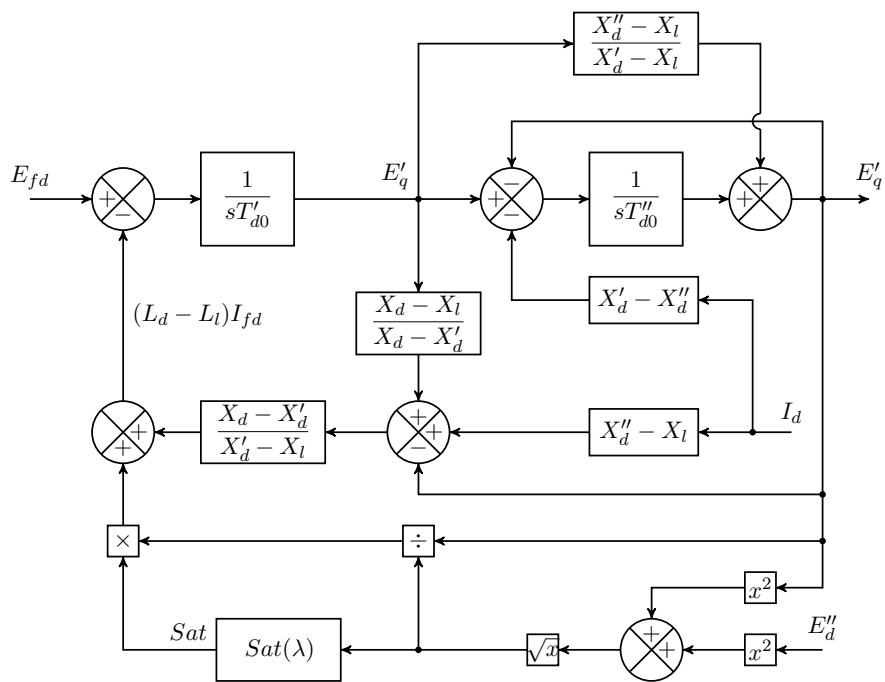


Figura 125 – Diagrama para as equações de eixo direto - polos lisos.

APÊNDICE C

Sistema de transmissão

O sistema de transmissão é composto basicamente por linhas de transmissão e transformadores, sendo empregado para ambos os componentes o modelo π . Consideradas esses modelos constrói-se a matriz de admitância da rede (Y_{bus}) idêntica a empregada nos estudos de fluxo de potência [27]. Dessa forma as equações nodais da rede elétrica podem ser formuladas como injeções de corrente utilizando coordenadas retangulares.

Considerando os modelos π dos elementos passivos da rede e um sistema com k barras monta-se a matriz de admitância da rede representada em (C.1).

$$\mathbf{Y}_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1k} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \dots & Y_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} + jB_{11} & G_{12} + jB_{12} & \dots & G_{1k} + jB_{1k} \\ G_{21} + jB_{21} & G_{22} + jB_{22} & \dots & G_{2k} + jB_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{k1} + jB_{k1} & G_{k2} + jB_{k2} & \dots & G_{kk} + jB_{kk} \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

Onde:

- Y_{bus} : Matriz de admitância da rede.
- Y_{ij} : Admitância equivalente entre as barras i e j .
- G_{ij} : Condutância equivalente entre as barras i e j .
- B_{ij} : Susceptância equivalente entre as barras i e j .

O equacionamento adotado para a rede leva em consideração a lei de Ohm que define a equação (C.2).

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{bus} \cdot \mathbf{V} \quad (\text{C.2})$$

Onde:

- \mathbf{I} : Vetor de corrente injetada nas barras em (C.4);
- \mathbf{V} : Vetor de tensão das barras definido em (C.3);

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I^1 \\ I^2 \\ \vdots \\ I^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r^1 + jI_m^1 \\ I_r^2 + jI_m^2 \\ \vdots \\ I_r^k + jI_m^k \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V^1 \\ V^2 \\ \vdots \\ V^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r^1 + jV_m^1 \\ V_r^2 + jV_m^2 \\ \vdots \\ V_r^k + jV_m^k \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

Onde:

- I_r^k : Componente real da corrente injetada na barra k ;
- I_m^k : Componente imaginária da corrente injetada na barra k ;
- V_r^k : Componente real da tensão da barra k ;
- V_m^k : Componente imaginária da tensão da barra k ;

Substituindo (C.1),(C.3) e (C.4) em (C.2) e separando as componentes real e imaginária tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_r^1 \\ I_m^1 \\ I_r^2 \\ I_m^2 \\ \vdots \\ I_r^k \\ I_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} & G_{12} & -B_{12} & \dots & G_{1k} & -B_{1k} \\ B_{11} & G_{11} & B_{12} & G_{12} & \dots & B_{1k} & G_{1k} \\ G_{21} & -B_{21} & G_{22} & -B_{22} & \dots & G_{2k} & -B_{2k} \\ B_{21} & G_{21} & B_{22} & G_{22} & \dots & B_{2k} & G_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{k1} & -B_{k1} & G_{k2} & -B_{k2} & \dots & G_{kk} & -B_{kk} \\ B_{k1} & G_{k1} & B_{k2} & G_{k2} & \dots & B_{kk} & G_{kk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r^1 \\ V_m^1 \\ V_r^2 \\ V_m^2 \\ \vdots \\ V_r^k \\ V_m^k \end{bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

APÊNDICE D

Representação de curto circuito em barra CA

Nesta seção é descrita a representação adotada para a aplicação de curto circuito em barras CA do sistema de potência. Para isto utiliza-se a estrutura definida para o sistema de transmissão, o qual é definido em (C.5).

Portanto, considerando a ocorrência de um curto na barra k com uma impedância de curto $Z = R + jX$, define-se:

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB \quad (\text{D.1})$$

Dessa forma, separa-se as componentes reais e imaginárias da admitância de curto resultante. Na sequência, os valores são adicionados à matriz definida (C.5) em suas posições correspondentes, resultando em:

$$\begin{bmatrix} I_r^1 \\ I_m^1 \\ I_r^2 \\ I_m^2 \\ \vdots \\ I_r^k \\ I_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & -B_{11} & G_{12} & -B_{12} & \dots & G_{1k} & -B_{1k} \\ B_{11} & G_{11} & B_{12} & G_{12} & \dots & B_{1k} & G_{1k} \\ G_{21} & -B_{21} & G_{22} & -B_{22} & \dots & G_{2k} & -B_{2k} \\ B_{21} & G_{21} & B_{22} & G_{22} & \dots & B_{2k} & G_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ G_{k1} & -B_{k1} & G_{k2} & -B_{k2} & \dots & G_{kk} + G & -B_{kk} - B \\ B_{k1} & G_{k1} & B_{k2} & G_{k2} & \dots & B_{kk} + B & G_{kk} + G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r^1 \\ V_m^1 \\ V_r^2 \\ V_m^2 \\ \vdots \\ V_r^k \\ V_m^k \end{bmatrix} \quad (\text{D.2})$$

APÊNDICE E

Modelo de carga

Neste apêndice são descritos os dois modelos de cargas que podem ser empregados nos estudos de estabilidade, sendo o primeiro estático (impedância constante) e o segundo dinâmico.

E.1 Carga Estática - Impedância constante

A formulação por meio de impedância constante é a representação de carga mais comumente empregada em estudos de estabilidade, isto deve-se ao fato da atenção estar voltada, em geral, para o comportamento dinâmico do sistema e não ao da carga.

Para a formulação matemática, considerando uma potência de carga (E.1a) e tensão (E.1b) na barra k , define-se Y_L^k em (E.1c).

$$S_L^k = P_L^k + jQ_L^k \quad (\text{E.1a})$$

$$V^k = V_r^k + jV_m^k \quad (\text{E.1b})$$

$$Y_L^k = G_L^k + jB_L^k = \frac{S_L^k}{V_k} \quad (\text{E.1c})$$

Onde:

- S_L^k : Potência aparente da carga na barra k ;
- P_L^k : Potência ativa da carga na barra k ;
- Q_L^k : Potência reativa da carga na barra k ;
- V^k : Tensão na barra k ;
- V_r^k : Componente ativa da tensão na barra k ;
- V_m^k : Componente reativa da tensão na barra k ;
- Y_L^k : Impedância de carga na barra k ;
- G_L^k : Condutância de carga na barra k ;
- B_L^k : Susceptância de carga na barra k ;

Definida (E.1c), a impedância de carga Y_L^k é adicionada diretamente na diagonal k

da matriz Y_{bus} definida no Apêndice C pela expressão (C.1), definindo assim:

$$\mathbf{Y}_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1k} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \dots & Y_{kk} + Y_L^k \end{bmatrix} \quad (\text{E.2})$$

E.2 Carga Dinâmica

O modelo de carga dinâmica é definido como uma entrada do problema, portanto, não há nenhum modelo pré-definido. Contudo, pode-se adotar o esquema representativo da Figura 126 por meio do qual é possível observar quais grandezas são consideradas para que seja realizada a interface do modelo à rede do sistema. As tensões V_r^k e V_m^k são entradas para o modelo e as correntes I_r^k e I_m^k são saídas e, portanto, injetadas à rede. Este modelo é similar ao adotado para o geradores síncronos.

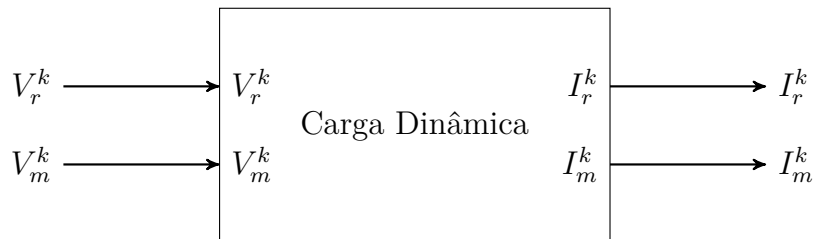


Figura 126 – Esquema representativo para a carga dinâmica.

APÊNDICE F

Método de integração trapezoidal

Os métodos de integração numérica são aplicados sobre as equações diferenciais, que podem ser lineares ou não, tais como apresentado em (F.1):

$$\dot{x} = f(t) \quad (\text{F.1})$$

O método de integração trapezoidal é baseado na integral aproximada da função $f(t)$. Primeiramente, integra-se (F.1) no tempo entre os instantes $t - \Delta t$ e t , resultando em (F.2).

$$x(t) - x(t - \Delta t) = \int_{t-\Delta t}^t f(\xi) d\xi \quad (\text{F.2})$$

A partir da Figura 127, pode-se observar que a integral em (F.2) pode ser aproximada pela área de um trapézio como expresso na (F.3).

$$x(t) = x(t - \Delta t) + \left[\frac{f(t - \Delta t) + f(t)}{2} \right] \cdot \Delta t \quad (\text{F.3})$$

Nota-se que a equação diferencial original torna-se uma equação algébrica de diferenças discretas, implícita no tempo. Caso a função f seja linear, é possível obter a solução $x(t)$ de forma explícita. No entanto, a função f é normalmente não-linear e depende da variável de estado x . Estes aspectos requerem, então, que a (F.3) seja solucionada numericamente para $x(t)$, conhecendo-se a priori $x(t - \Delta t)$ e $f(t - \Delta t)$.

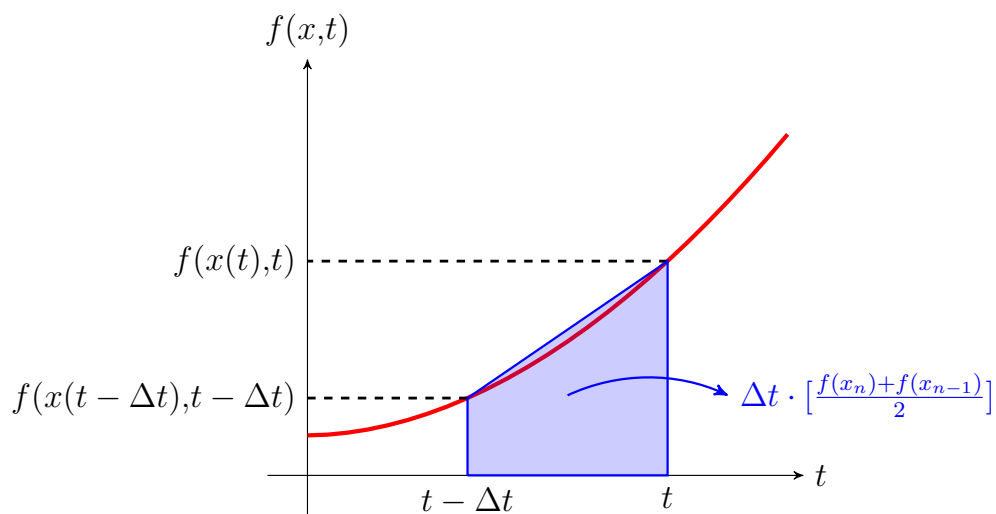


Figura 127 – Representação gráfica do método Trapezoidal.

APÊNDICE G

Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é um método iterativo pelo qual um conjunto de equações não lineares é aproximado simultaneamente por um conjunto de equações lineares usando expansão por séries de Taylor. As principais vantagens do Método de Newton-Raphson é que este método apresenta convergência quadrática e o número de iterações para convergência independe do número de variáveis [27].

Neste método procura-se solucionar um problema onde $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$, ou seja, por meio de um processo iterativo deseja-se determinar o ponto referente as raízes da função.

Considerando-se um sistema n -dimensional de equações, tem-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{cases} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (\text{G.1})$$

Onde:

$$\begin{aligned} \mathbf{g} = [g_1, g_2, \dots, g_n] & : \text{ Conjunto de funções do problema;} \\ \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] & : \text{ Variáveis do problema;} \end{aligned}$$

Definido o sistema (G.1) é necessário linearizar a função vetorial $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ considerando uma correção $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n]$ para o vetor \mathbf{x} . Nesta linearização são considerados apenas os dois primeiros termos da série de Taylor, resultado a expressão (G.2)

$$\mathbf{g}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) \approx \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (\text{G.2})$$

A matriz $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ é a jacobiana do sistema formada pelas derivadas parciais da função

$\mathbf{g}(\mathbf{x})$ em relação à \mathbf{x} , que resulta em (G.3):

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial g_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial g_2(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial g_n(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial g_n(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{G.3})$$

Considerando que $\mathbf{g}(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = \mathbf{0}$, tem-se:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}) \cdot \Delta \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (\text{G.4})$$

Portanto, para obter $\Delta \mathbf{x}$ faz-se:

$$\Delta \mathbf{x} = -[\mathbf{J}(\mathbf{x})]^{-1} \cdot \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (\text{G.5})$$

Com isso obtêm-se a atualização do valor de \mathbf{x} , fazendo $\mathbf{x}^{v+1} = \mathbf{x}^v + \Delta \mathbf{x}^v$, onde v representa a iteração. Sendo assim para determinar a convergência do método faz-se que a diferença entre o valor anterior e o valor atual de \mathbf{x} seja menor que uma tolerância absoluta ε_{abs} e a razão entre esta diferença ou o valor anterior seja menor que uma tolerância relativa ε_{rel}

$$|\mathbf{x}^{v+1} - \mathbf{x}^v| \leq \varepsilon_{abs} \quad (\text{G.6a})$$

$$|\mathbf{x}^{v+1} - \mathbf{x}^v| \leq \mathbf{x}^v \varepsilon_{rel} \quad (\text{G.6b})$$

APÊNDICE H

Fatoração LU

H.1 Formulação do problema

Em (H.1) está representado genericamente um sistema linear, onde, em geral, \mathbf{A} é uma matriz esparsa ($n \times n$), \mathbf{x} é o vetor dependente ($n \times 1$) e \mathbf{b} é vetor independente ($n \times 1$). No caso de soluções para l vetores independentes com a mesma matriz \mathbf{A} , tanto \mathbf{x} como \mathbf{b} passam a ser matrizes densas de dimensão $n \times l$ [27].

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \tag{H.1}$$

O sistema (H.1) poderia ser solucionado obtendo a matriz inversa de \mathbf{A} explicitamente (\mathbf{A}^{-1}). No entanto, obter esta matriz é computacionalmente pouco eficiente além de impraticável em matrizes com elevadas dimensões. Em geral, como a matriz \mathbf{A} é altamente esparsa a sua inversa (\mathbf{A}^{-1}) é cheia. Portanto, para evitar a utilização da matriz inversa na resolução dos sistemas lineares são utilizadas técnicas de fatoração, como a fatoração LU [27].

Dessa forma, a matriz \mathbf{A} pode ser fatorada em duas matrizes triangulares, nomeadas de \mathbf{L} e \mathbf{U} , definindo (H.2). Onde \mathbf{P}^r e \mathbf{P}^c são matrizes de permutação de linhas e colunas, respectivamente. Como \mathbf{A} é esparsa, a matriz \mathbf{P}^r é responsável por realizar o pivoteamento parcial durante a fatoração, já \mathbf{P}^c é selecionado de forma a reduzir o número de elementos não nulos adicionados (*fill-ins*) na estrutura $\mathbf{P}^r\mathbf{A}\mathbf{P}^c$, e conseqüentemente, em \mathbf{LU} [38].

$$\mathbf{P}^r\mathbf{A}\mathbf{P}^c = \mathbf{LU} \tag{H.2}$$

Retornando a equação (H.1), multiplicando-a por \mathbf{P}^r e fazendo $\mathbf{x} = \mathbf{P}^c\mathbf{z}$, tem-se:

$$(\mathbf{P}^r\mathbf{A}\mathbf{P}^c)\mathbf{z} = \mathbf{P}^r\mathbf{b} \tag{H.3}$$

Substituindo $(\mathbf{P}^r\mathbf{A}\mathbf{P}^c)$ pelo produto \mathbf{LU} , define-se:

$$\mathbf{LUz} = \mathbf{P}^r\mathbf{b} \tag{H.4}$$

O sistema linear definido em (H.4) pode ser dividido em dois sistemas triangulares interdependentes também lineares, definidos por \mathbf{L} e \mathbf{U} que podem ser resolvidos por meio

de substituições (*forward* e *backward*). Como resultado define-se as seguintes etapas:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{P}^r \mathbf{A} \mathbf{P}^c = \mathbf{L} \mathbf{U} & \text{Fatoração LU} \\ \mathbf{L} \mathbf{y} = \mathbf{P}^r \mathbf{b} & \text{Substituição } \textit{forward} \\ \mathbf{U} \mathbf{z} = \mathbf{w} & \text{Substituição } \textit{backward} \\ \mathbf{x} = \mathbf{P}^c \mathbf{z} & \end{array} \right. \quad (\text{H.5})$$

APÊNDICE I

Dados dos sistemas testes

I.1 SISTEMA MÁQUINA - BARRA INFINITA

I.1.1 Dados das barra e rede

Tabela 24 – Dados das barras do Sistema Máquina-Barra Infinita.

Barra		Tensão		Geração		Carga	
Número	Nome	Mód.[pu]	Fase [°]	MW	Mvar	MW	Mvar
1	Maq.5GW	1,0000	22,9545	5000,00	1015,90	0,0	0,0
2	Barra Inf.	1,0000	0,0	-5000,00	1015,90	0,0	0,0

Tabela 25 – Dados dos ramos do Sistema Máquina-Barra Infinita.

Nº Cir- cuito	Barra De	Barra Para	R[%]	X [%]	B [Mvar]	Tap
1	1	2	0,0	0,78	0,0	-
2	1	2	0,0	0,78	0,0	-

I.1.2 Dados dos Geradores - Máquina Síncrona

Tabela 26 – Dados dos geradores - polos salientes

Gerador	G_1
Barra	1
Grupo	10
MVA	5200
$H[s]$	3,84
$D[]$	0,0
$X_d[\%]$	272,0
$X_q[\%]$	260,0
$X'_d[\%]$	36,0
$X'_q[\%]$	-
$X''_d[\%]$	26,0
$X''_q[\%]$	26,0
$X_l[\%]$	12,0
$T'_{d0}[s]$	8,5
$T'_{q0}[s]$	-
$T''_{d0}[s]$	0,03
$T''_{q0}[s]$	0,9
$R_a[\%]$	-
Frequência [Hz]	60

I.1.3 Modelo do Regulador de Tensão

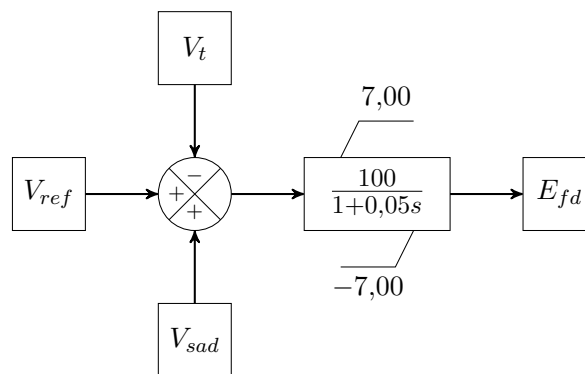


Figura 128 – Modelo regulador de tensão - Sistema Máquina/Barra Infinita.

I.1.4 Modelo do PSS

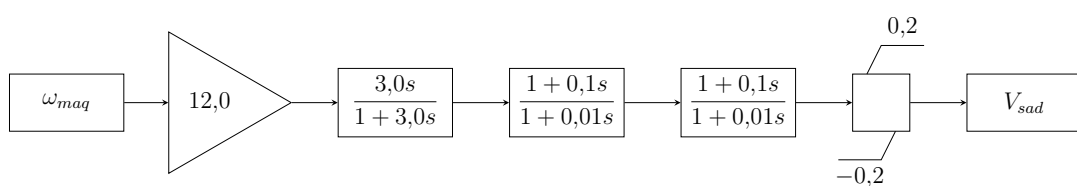


Figura 129 – Modelo estabilizador de potência - Sistema Máquina/Barra Infinita.

I.2 SISTEMA NEW ENGLAND

I.2.1 Dados das barra e rede

Tabela 27 – Dados das barras do Sistema New England.

Barra		Tensão		Geração		Carga	
Número	Nome	Módulo [pu]	Fase [°]	MW	Mvar	MW	Mvar
1	BARRA-001	1.0476	-9.4636	-0.00	0.00	0.00	0.00
2	BARRA-002	1.0492	-6.9069	-0.00	0.00	0.00	0.00
3	BARRA-003	1.0306	-9.7522	-0.00	0.00	322.00	2.40
4	BARRA-004	1.0039	-10.5468	0.00	0.00	500.00	184.00
5	BARRA-005	1.0050	-9.3595	-0.00	0.00	0.00	0.00
6	BARRA-006	1.0074	-8.6573	-0.00	-0.00	0.00	0.00
7	BARRA-007	0.9967	-10.8608	0.00	0.00	233.80	84.00
8	BARRA-008	0.9957	-11.3669	0.00	0.00	522.00	176.00
9	BARRA-009	1.0281	-11.1910	-0.00	0.00	0.00	0.00
10	BARRA-010	1.0170	-6.2729	-0.00	-0.00	0.00	0.00
11	BARRA-011	1.0125	-7.0863	-0.00	0.00	0.00	0.00
12	BARRA-012	1.0000	-7.1020	0.00	0.00	8.50	88.00
13	BARRA-013	1.0142	-6.9876	-0.00	0.00	0.00	0.00
14	BARRA-014	1.0117	-8.6574	-0.00	0.00	0.00	0.00
15	BARRA-015	1.0158	-9.0759	0.00	-0.00	320.00	153.00
16	BARRA-016	1.0323	-7.6729	0.00	0.00	329.40	32.30
17	BARRA-017	1.0340	-8.6705	0.00	0.00	0.00	0.00
18	BARRA-018	1.0314	-9.5106	0.00	-0.00	158.00	30.00
19	BARRA-019	1.0499	-3.0473	0.00	0.00	0.00	0.00
20	BARRA-020	0.9907	-4.4591	0.00	0.00	680.00	103.00
21	BARRA-021	1.0321	-5.2673	0.00	0.00	274.00	115.00
22	BARRA-022	1.0499	-0.8199	-0.00	-0.00	0.00	0.00
23	BARRA-023	1.0451	-1.0187	-0.00	0.00	247.50	84.60
24	BARRA-024	1.0378	-7.5532	0.00	-0.00	308.60	-92.20
25	BARRA-025	1.0578	-5.5455	-0.00	0.00	224.00	47.20
26	BARRA-026	1.0524	-6.8022	-0.00	-0.00	139.00	17.00
27	BARRA-027	1.0381	-8.8128	0.00	0.00	281.00	75.50
28	BARRA-028	1.0506	-3.2934	0.00	0.00	206.00	27.60
29	BARRA-029	1.0504	-0.5367	-0.00	0.00	283.50	26.90
30	BARRA-030	1.0480	-4.4894	250.00	146.34	0.00	0.00
31	BARRA-031	0.9820	0.1152	573.20	207.06	9.20	4.60
32	BARRA-032	0.9830	1.7251	650.00	205.30	0.00	0.00
33	BARRA-033	0.9970	2.1718	632.00	108.56	0.00	0.00
34	BARRA-034	1.0120	0.7341	508.00	166.49	0.00	0.00
35	BARRA-035	1.0490	4.1427	650.00	209.30	0.00	0.00
36	BARRA-036	1.0640	6.8283	560.00	102.10	0.00	0.00
37	BARRA-037	1.0280	1.2364	540.00	0.41	0.00	0.00
38	BARRA-038	1.0270	6.5199	830.00	23.02	0.00	0.00
39	BARRA-039	1.0300	-11.0000	1000.02	87.43	1104.00	250.00

Tabela 28 – Dados dos ramos do Sistema New England.

Nº	DE	PARA	R[%]	X [%]	B [Mvar]	Tap
1	1	2	0,35	4,11	69,87	-
2	1	39	0,10	2,50	75,00	-
3	2	3	0,13	1,51	25,72	-
4	2	25	0,70	0,86	14,60	-
5	2	30	0,0	1,81	0,0	1,025
6	3	4	0,13	2,13	22,14	-
7	3	18	0,11	1,33	21,38	-
8	4	5	0,08	1,28	13,42	-
9	4	14	0,08	1,29	13,82	-
10	5	6	0,02	0,26	4,34	-
11	5	8	0,08	1,12	14,76	-
12	6	7	0,06	0,92	11,30	-
13	6	11	0,07	0,82	13,89	-
14	6	31	0,0	2,50	0,0	1,070
15	7	8	0,04	0,46	7,80	-
16	8	9	0,23	3,63	38,04	-
17	9	39	0,10	2,50	120,00	-
18	10	11	0,04	0,43	7,29	-
19	10	13	0,04	0,43	7,29	-
20	10	32	0,0	2,00	0,0	1,070
21	12	11	0,16	4,35	0,0	1,006
22	12	13	0,16	4,35	0,0	1,006
23	13	14	0,09	1,01	17,23	-
24	14	15	0,18	2,17	36,60	-
25	15	16	0,09	0,94	17,10	-
26	16	17	0,07	0,89	13,42	-
27	16	19	0,16	1,95	30,40	-
28	16	21	0,08	1,35	25,48	-
29	16	24	0,03	0,59	6,80	-
30	17	18	0,07	0,82	13,19	-
31	17	27	0,13	1,73	32,16	-
32	19	20	0,07	1,38	0,0	1,060
33	19	33	0,07	1,42	0,0	1,070
34	20	34	0,09	1,80	0,0	1,009
35	21	22	0,08	1,40	25,65	-
36	22	23	0,06	0,96	18,46	-
37	22	35	0,0	1,43	0,0	1,025
38	23	24	0,22	3,50	36,10	-
39	23	36	0,05	2,72	0,0	1,000
40	25	26	0,32	3,23	51,30	-
41	25	37	0,06	2,32	0,0	1,025
42	26	27	0,14	1,47	23,96	-
43	26	28	0,43	4,74	78,02	-
44	26	29	0,57	6,25	102,90	-
45	28	29	0,14	1,51	24,90	-
46	29	38	0,08	1,56	0,0	1,025

I.2.2 Dados das Máquina

Tabela 29 – Dados dos geradores - polos salientes

Gerador	G_{30}	G_{31}	G_{32}	G_{33}	G_{34}	G_{35}	G_{36}	G_{37}	G_{38}	G_{39}
Barra	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Grupo	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
MVA	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
$H[s]$	4,20	3,03	3,58	2,86	2,60	3,48	2,64	2,43	3,45	50,0
$D[]$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$X_d[\%]$	15,91	46,95	39,70	41,69	106,6	40,42	46,95	46,15	33,51	3,183
$X_q[\%]$	10,98	44,88	37,71	41,06	98,67	38,35	46,47	44,56	32,62	3,023
$X'_d[\%]$	4,933	11,09	8,451	6,939	21,00	7,957	7,798	9,071	9,071	0,954
$X'_q[\%]$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$X''_d[\%]$	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	0,318
$X''_q[\%]$	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	3,183	0,318
$X_l[\%]$	1,989	5,570	4,838	4,695	8,594	3,565	5,124	4,456	4,742	0,477
$T'_{d0}[s]$	10,200	6,560	5,700	5,690	5,400	7,300	5,660	6,700	4,790	7,000
$T'_{q0}[s]$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$T''_{d0}[s]$	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$T''_{q0}[s]$	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
$R_a[\%]$	0,140	2,700	0,386	0,222	0,140	6,150	0,268	0,686	0,300	0,100
Freq.[Hz]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

I.2.3 Dados de Regulador de Velocidade

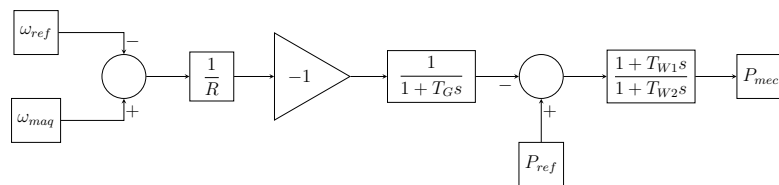


Figura 130 – Modelo regulador de velocidade - Sistema New England.

Tabela 30 – Dados dos reguladores de velocidade - Sistema New England.

Número	Gerador	R	T_G	T_{W1}	T_{W2}
41	30	0,05	0,5	1,0	0,5
42	31	0,05	0,5	1,0	0,5
43	32	0,05	0,5	1,0	0,5
44	33	0,05	0,5	1,0	0,5
45	34	0,05	0,5	1,0	0,5
46	35	0,05	0,5	1,0	0,5
47	36	0,05	0,5	1,0	0,5
48	37	0,05	0,5	1,0	0,5
49	38	0,05	0,5	1,0	0,5
50	39	0,05	0,5	1,0	0,5

I.2.4 Dados de Regulador de Tensão

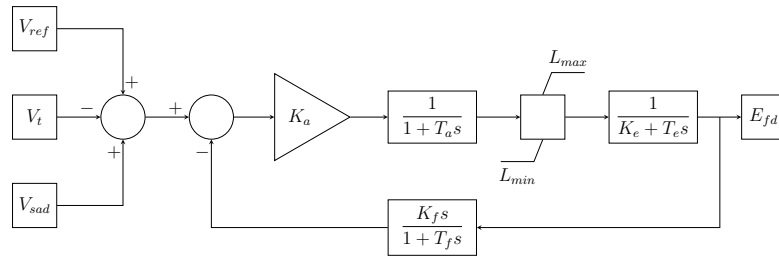


Figura 131 – Modelo regulador de tensão - Sistema New England.

Tabela 31 – Dados dos reguladores de tensão - Sistema New England.

Número	Gerador	K_a	K_e	K_f	T_a	T_e	T_f	L_{min}	L_{max}
1	30	5,00	1,00	0,040	0,06	0,250	1,00	-99.	99.
2	31	6,00	1,00	0,057	0,05	0,410	0,50	-99.	99.
3	32	5,00	1,00	0,080	0,06	0,500	1,00	-99.	99.
4	33	5,00	1,00	0,080	0,06	0,500	1,00	-99.	99.
5	34	40,00	1,00	0,030	0,02	0,785	1,00	-99.	99.
6	35	5,00	1,00	0,075	0,02	0,471	1,24	-99.	99.
7	36	40,00	1,00	0,030	0,02	0,730	1,00	-99.	99.
8	37	5,00	1,00	0,084	0,02	0,528	1,26	-99.	99.
9	38	40,00	1,00	0,030	0,02	1,400	1,00	-99.	99.
10	39	5,00	1,00	0,080	0,06	0,500	1,00	-99.	99.

I.2.5 Dados do Modelo da Carga Dinâmica

Para as simulações considerou-se o valor de $K_i = 60,0$, sendo que esta carga está conectada a barra 15 do sistema.

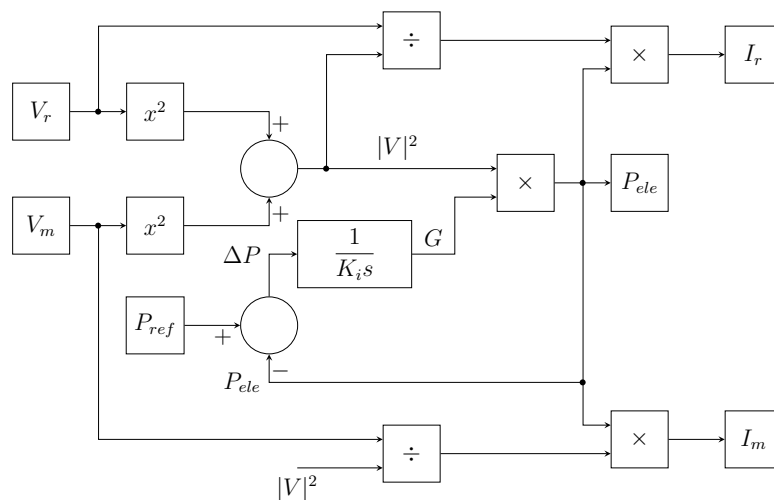


Figura 132 – Modelo de carga dinâmica - Sistema New England.

I.3 SISTEMA TERMELÉTRICO EQUIVALENTE

I.3.1 Dados das barra e rede

Tabela 32 – Dados das barras.

Barra		Tensão		Geração		Carga	
Número	Nome	Mód.[pu]	Fase [°]	MW	Mvar	MW	Mvar
4200	Barra 4200	1,0000	-7,34	0,0	0,0	254,0	15,0
4201	Barra 4201	1,0000	-5,17	0,0	0,0	0,0	0,0
4203	Barra 4203	1,0000	-0,38	107,0	21,6	0,0	0,0
4204	Barra 4204	1,0000	0,00	140,9	27,2	0,0	0,0
4205	Barra 4205	1,0000	-0,38	107,0	21,6	0,0	0,0
4210	Barra 4210	1,0000	-5,54	0,0	0,0	100,0	25,0

Tabela 33 – Dados do sistema de transmissão.

Nº Cir- cuito	Barra De	Barra Para	R[%]	X [%]	B [Mvar]	Tap
1	4201	4200	0,12	1,51	2,13	-
2	4201	4203	0,00	8,00	0,00	1,0
3	4201	4204	0,00	6,56	0,00	1,0
4	4201	4205	0,00	8,00	0,00	1,0
5	4201	4210	0,13	0,69	9,15	-

I.3.2 Dados de Máquina

Tabela 34 – Dados dos geradores de polos lisos.

Gerador	G_{4203}	G_{4205}	G_{4204}
Barra	4203	4205	4204
Grupo	10	10	10
MVA	145,0	145,0	208,0
$H[s]$	6,39	6,39	4,522
$D[]$	0,0	0,0	0,0
$X_d[\%]$	199,0	199,0	214,0
$X_q[\%]$	185,0	185,0	200,0
$X'_d[\%]$	20,0	20,0	21,0
$X'_q[\%]$	33,0	33,0	34,0
$X''_d[\%]$	15,0	15,0	16,0
$X''_q[\%]$	15,0	15,0	16,0
$X_l[\%]$	13,0	13,0	14,0
$T'_{d0}[s]$	8,39	8,39	9,79
$T'_{q0}[s]$	0,81	0,81	0,93
$T''_{d0}[s]$	0,019	0,019	0,021
$T''_{q0}[s]$	0,029	0,029	0,032
$R_a[\%]$	0,0912	0,0912	0,0854
Freq.[Hz]	60	60	60
Curva Sat.	1900	1900	1901

Tabela 35 – Dados das curvas de saturação - modelos ANATEM.

Numero	Tipo	Y_1	Y_2	X_1
1900	2	0,0169953	7,385287	0,8
1901	2	0,0498555	6,804975	0,8

I.3.3 Dados dos controladores

Os modelos dos controladores deste sistema teste são definidos no formato dos arquivos DCDU do programa ANATEM apresentados na sequência.

Tabela 36 – Associação modelos dos controladores e geradores.

Gerador	G_{4203}	G_{4205}	G_{4204}
Reg. Tensão	1900	1903	1902
Reg. Velocidade	2	3	1
Est. Potência	-	-	1972

```

DCDU
(-----)
(ncdu) ( nome cdu )
      1900 Ctrl_1900
(-----)
(EFPAR (npar) (      valpar      )
(-----)
DEFPAR #KR-          -0.00866
DEFPAR #KR+           0.01
DEFPAR #Lmin         -0.0866
DEFPAR #Lmax          0.1
DEFPAR #LminU        -0.0866
DEFPAR #LmaxU         0.1
DEFPAR #LminO        -0.0866
DEFPAR #LmaxO         0.1
DEFPAR #TR            0.02
DEFPAR #TS            0.004
DEFPAR #KR            500.0
DEFPAR #KE            1.0
DEFPAR #TE            0.63
DEFPAR #TC1           1.0
DEFPAR #TB1           10.0
DEFPAR #TC2           0.45
DEFPAR #TB2           0.09
DEFPAR #TUC1          1.0
DEFPAR #TUB1          10.0
DEFPAR #TUC2           0.45
DEFPAR #TUB2           0.09
DEFPAR #TOC1          1.0
DEFPAR #TOB1          10.0
DEFPAR #TOC2           0.45
DEFPAR #TOB2           0.09
DEFPAR #Up-          -4.33
DEFPAR #Up+           5.00
DEFPAR #Efmin         0.0
DEFPAR #Efmax         3.95
DEFPAR #KIR           0.00
DEFPAR #KVHZ          1.15
DEFPAR #Utmax         1.15
DEFPAR #IFmax         2.39312
DEFPAR #IFth          1.570485
DEFPAR #KHF           22.06325
DEFPAR #KCF           2.206325
DEFPAR #EmaxF         149.308
DEFPAR #KIFmx         0.5
DEFPAR #ITmax         1.60
DEFPAR #ITth          1.05
DEFPAR #KHS           33.0
DEFPAR #KCS           3.30
DEFPAR #EmaxS         99.825
DEFPAR #KInd          0.5
DEFPAR #KCap          0.5
DEFPAR #IFmn          0.0
DEFPAR #KIFmn         0.5
DEFPAR #KPQ           0.5
(-----)
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0001 IMPORT VTR          Vt

```


0002	IMPORT	VSAD		Vsad				
0003	LEDLAG	Vt	Vtf	1.0	1.0#TR			
0004	MIN	VHZ	X4					
		X44	X4					
0005	SOMA	X4	X5					
		-Vtf	X5					
0006	MAX	ITcap	X6					
		IFmin	X6					
		Vuel	X6					
0007	MAX	X5	X7					
		X6	X7					
0008	MIN	Voel	X8					
		ITind	X8					
0009	MIN	X7	X9					
		X8	X9					
0010	SOMA	X9	X10					
		Vsad	X10					
0011	SOMA	X10	X11					
		-X14	X11					
		X15	X11					
0012	FRACAO	X11	X12	#TC2	#TB2			
0013	LIMITA	X12	X13			Lmin	Lmax	
0014	LEDLAG	X13	X14	1.0	1.0#TC2			
0015	FRACAO	X14	X15	#TB2	#TC2			
0016	SOMA	X13	X16					
		-X21	X16					
		X22	X16					
0019	FRACAO	X16	X19	#TC1	#TB1			
0020	LIMITA	X19	X20			KR-	KR+	
0021	LEDLAG	X20	X21	1.0	1.0#TC1			
0022	FRACAO	X21	X22	#TB1	#TC1			
1011	SOMA	X10	X1011					
		-X1014	X1011					
		X1015	X1011					
1012	FRACAO	X1011	X1012	#TUC2	#TUB2			
1013	LIMITA	X1012	X1013			LminU	LmaxU	
1014	LEDLAG	X1013	X1014	1.0	1.0#TUC2			
1015	FRACAO	X1014	X1015	#TUB2	#TUC2			
1016	SOMA	X1013	X1016					
		-X1021	X1016					
		X1022	X1016					
1019	FRACAO	X1016	X1019	#TUC1	#TUB1			
1020	LIMITA	X1019	X1020			KR-	KR+	
1021	LEDLAG	X1020	X1021	1.0	1.0#TUC1			
1022	FRACAO	X1021	X1022	#TUB1	#TUC1			
1023	COMPAR	.LT.	X5	UNDER				
			X6	UNDER				
1024	SELET2	X20	X1024					
		X1020	X1024					
		UNDER	X1024					
2011	SOMA	X10	X2011					
		-X2014	X2011					
		X2015	X2011					
2012	FRACAO	X2011	X2012	#TOC2	#TOB2			
2013	LIMITA	X2012	X2013			LminO	LmaxO	
2014	LEDLAG	X2013	X2014	1.0	1.0#TOC2			
2015	FRACAO	X2014	X2015	#TOB2	#TOC2			
2016	SOMA	X2013	X2016					
		-X2021	X2016					

		X2022	X2016					
2019	FRACAO	X2016	X2019	#TOC1	#TOB1			
2020	LIMITA	X2019	X2020			KR-	KR+	
2021	LEDLAG	X2020	X2021	1.0	1.0#TOC1			
2022	FRACAO	X2021	X2022	#TOB1	#TOC1			
2023	COMPAR .GT.	X5	OVER					
		X8	OVER					
2024	SELET2	X1024	X2024					
		X2020	X2024					
		OVER	X2024					
(
0023	GANHO	X2024	X23	#KR				
0024	LIMITA	X23	X24			Up-	Up+	
0025	LEDLAG	X24	X25	1.0	1.0#TS			
0026	SOMA	X25	X26					
		-SE	X26					
0027	LEDLAG	X26	Efd	#KE	1.0#TE	Efmin	Efmax	
0028	FUNCAO PONTOS	Efd	SE	0.0	0.02.9625.00001			
				3.95	0.07			
0029	EXPORT EFD	Efd						
0040	ENTRAD		Vref					
0041	IMPORT QELE		Qe					
0042	LEDLAG	Qe	Qef	1.0	1.0#TR			
0043	GANHO	Qef	X43	#KIR				
0044	SOMA	Vref	X44					
		X43	X44					
0050	IMPORT WMAQ		w					
0051	ENTRAD		Zero					
0052	LEDLAG	w	wf	1.0	1.0#TR			
0053	GANHO	wf	X53	#KVHZ				
0054	SOMA	Vt	X54					
		-X53	X54					
0055	COMPAR .GT.	X54	X55					
		Zero	X55					
0056	DELAY	X55	X56					
0057	ENTRAD		Utmax					
0058	SELET2	X53	X58					
		Utmax	X58					
		X56	X58					
0059	LIMITA	X58	VHZ			Zero	Utmax	
0060	IMPORT IFD		Ifd					
0061	ENTRAD		IFth					
0062	ENTRAD		KCF					
0063	ENTRAD		KHF					
0064	ENTRAD		IFmax					
0065	ENTRAD		EmaxF					
0066	LEDLAG	Ifd	Ifdf	1.0	1.0#TR			
0067	SOMA	Ifdf	X67					
		-IFth	X67					
0068	FUNCAO X**2	X67	X68					
0069	COMPAR .GT.	X67	X69					
		Zero	X69					
0070	SELET2	KCF	X70					
		KHF	X70					
		X69	X70					
0071	MULTPL	X68	X71					
		X70	X71					
0072	PROINT	X71	X72	1.0	1.0	Zero	Inf	
0073	COMPAR .GT.	X72	X73					

		E _{max} F	X73						
0074	SELET2	I _{Fmax}	X74						
		I _{Fth}	X74						
		X73	X74						
0075	SOMA	X74	X75						
		-I _{fdf}	X75						
0076	GANHO	X75	Voel	#KIF _{mx}					
0080	IMPORT IMQS		Ia						
0081	ENTRAD		I _{Tth}						
0082	ENTRAD		KCS						
0083	ENTRAD		KHS						
0084	ENTRAD		I _{Tmax}						
0085	ENTRAD		E _{max} S						
0086	LEDLAG	Ia	Iaf	1.0		1.0#TR			
0087	SOMA	Iaf	X87						
		-I _{Tth}	X87						
0088	FUNCAO X**2	X87	X88						
0079	COMPAR .GT.	X87	X89						
		Zero	X89						
0090	SELET2	KCS	X90						
		KHS	X90						
		X89	X90						
0091	MULTPL	X88	X91						
		X90	X91						
0092	PROINT	X91	X92	1.0		1.0	Zero	Inf	
0093	COMPAR .GT.	X92	X93						
		E _{max} S	X93						
0094	SELET2	I _{Tmax}	X94						
		I _{Tth}	X94						
		X93	X94						
0095	SOMA	X94	X95						
		-Iaf	X95						
0096	GANHO	X95	I _{Tind}	#KInd					
0097	GANHO	X95	I _{Tcap}	-#KCap					
0100	FUNCAO RETA	I _{fdf}	X100	-1.0#IF _{mn}					
0101	GANHO	X100	IF _{min}	#KIF _{mn}					
0102	IMPORT PELE		Pe						
0103	LEDLAG	Pe	Pef	1.0		1.0#TR			
0104	FUNCAO X**2	Vt	Vt2						
0105	FUNCAO PONTOS	Pef	X105	0.00 -0.45	0.25 -0.47				
				0.50 -0.45	0.75 -0.43				
				1.00 -0.41					
0106	LIMITA	X105	X106				mInf	Zero	
0107	MULTPL	X106	X107						
		Vt2	X107						
0108	SOMA	X107	X108						
		-Qef	X108						
0109	GANHO	X108	Vuel	#KPQ					
(------)									
(DEFVA (stip) (vdef) (d1)									
(------)									
DEFVAL	Up+	#Up+							
DEFVAL	Up-	#Up-							
DEFVAL	E _{fmin}	#E _{fmin}							
DEFVAL	E _{fmax}	#E _{fmax}							
DEFVAL	Zero	0.0							
DEFVAL	U _{tmax}	#U _{tmax}							
DEFVAL	KCF	-#KCF							
DEFVAL	KHF	#KHF							

```

DEFVAL      IFth      #IFth
DEFVAL      IFmax     #IFmax
DEFVAL      EmaxF     #EmaxF
DEFVAL      KCS       -#KCS
DEFVAL      KHS       #KHS
DEFVAL      ITth      #ITth
DEFVAL      ITmax     #ITmax
DEFVAL      EmaxS     #EmaxS
DEFVAL      Inf       99999.
DEFVAL      mInf      -99999
DEFVAL      X72       0.0
DEFVAL      X92       0.0
DEFVAL VAR   X1024    X2024
DEFVAL VAR   X20      X1024
DEFVAL VAR   X1020    X1024
DEFVAL VAR   X2020    X1024
DEFVAL      KR-       #KR-
DEFVAL      KR+       #KR+
DEFVAL      Lmin      #Lmin
DEFVAL      Lmax      #Lmax
DEFVAL      LminU     #LminU
DEFVAL      LmaxU     #LmaxU
DEFVAL      LminO     #LminO
DEFVAL      LmaxO     #LmaxO
FIMCDU

```

```

-----
(ncdu) ( nome cdu )
      1902 Ctrl_1902

```

```

-----
(EFPAR (npar) (      valpar      )
-----

```

```

DEFPAR #KR-          -0.00866
DEFPAR #KR+           0.01
DEFPAR #Lmin         -0.0866
DEFPAR #Lmax          0.1
DEFPAR #LminU        -0.0866
DEFPAR #LmaxU         0.1
DEFPAR #LminO        -0.0866
DEFPAR #LmaxO         0.1
DEFPAR #TR            0.02
DEFPAR #TS            0.004
DEFPAR #KR            500.0
DEFPAR #TC1           1.0
DEFPAR #TB1           10.0
DEFPAR #TC2           1.0
DEFPAR #TB2           1.0
DEFPAR #TUC1          1.0
DEFPAR #TUB1          10.0
DEFPAR #TUC2          1.0
DEFPAR #TUB2          1.0
DEFPAR #TOC1          1.0
DEFPAR #TOB1          10.0
DEFPAR #TOC2          1.0
DEFPAR #TOB2          1.0
DEFPAR #Up-           -4.33
DEFPAR #Up+           5.00
DEFPAR #KIR           0.00
DEFPAR #KVHZ          1.15
DEFPAR #Utmax         1.15

```

```

DEFPAR #IFmax          2.48832
DEFPAR #IFth          1.63296
DEFPAR #KHF          21.219136
DEFPAR #KCF          2.1219136
DEFPAR #EmaxF          155.248
DEFPAR #KIFmx          0.5
DEFPAR #ITmax          1.60
DEFPAR #ITth          1.05
DEFPAR #KHS          33.0
DEFPAR #KCS          3.30
DEFPAR #EmaxS          99.825
DEFPAR #KInd          0.5
DEFPAR #KCap          0.5
DEFPAR #IFmn          0.0
DEFPAR #KIFmn          0.5
DEFPAR #KPQ          0.5
    
```

```

(-----)
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0001 IMPORT VTR          Vt
0002 IMPORT VSAD        Vsad
0003 LEDLAG          Vt      Vtf      1.0      1.0#TR
0004 MIN              VHZ     X4
                   X44     X4
0005 SOMA             X4      X5
                   -Vtf     X5
0006 MAX              ITcap   X6
                   IFmin   X6
                   Vuel    X6
0007 MAX              X5      X7
                   X6      X7
0008 MIN              Voel    X8
                   ITind   X8
0009 MIN              X7      X9
                   X8      X9
0010 SOMA             X9      X10
                   Vsad    X10
0011 SOMA             X10     X11
                   -X14    X11
                   X15     X11
0012 FRACAO          X11     X12     #TC2     #TB2
0013 LIMITA          X12     X13
0014 LEDLAG          X13     X14     1.0     1.0#TC2     Lmin     Lmax
0015 FRACAO          X14     X15     #TB2     #TC2
0016 SOMA             X13     X16
                   -X21    X16
                   X22     X16
0019 FRACAO          X16     X19     #TC1     #TB1
0020 LIMITA          X19     X20
0021 LEDLAG          X20     X21     1.0     1.0#TC1     KR-     KR+
0022 FRACAO          X21     X22     #TB1     #TC1
1011 SOMA             X10     X1011
                   -X1014  X1011
                   X1015  X1011
1012 FRACAO          X1011  X1012  #TUC2     #TUB2
1013 LIMITA          X1012  X1013
0014 LEDLAG          X1013  X1014  1.0     1.0#TUC2     LminU    LmaxU
1015 FRACAO          X1014  X1015  #TUB2     #TUC2
1016 SOMA             X1013  X1016
    
```

		-X1021	X1016					
		X1022	X1016					
1019	FRACAO	X1016	X1019	#TUC1	#TUB1			
1020	LIMITA	X1019	X1020			KR-	KR+	
1021	LEDLAG	X1020	X1021	1.0	1.0#TUC1			
1022	FRACAO	X1021	X1022	#TUB1	#TUC1			
1023	COMPAR .LT.	X5	UNDER					
		X6	UNDER					
1024	SELET2	X20	X1024					
		X1020	X1024					
		UNDER	X1024					
2011	SOMA	X10	X2011					
		-X2014	X2011					
		X2015	X2011					
2012	FRACAO	X2011	X2012	#TOC2	#TOB2			
2013	LIMITA	X2012	X2013			LminO	LmaxO	
2014	LEDLAG	X2013	X2014	1.0	1.0#TOC2			
2015	FRACAO	X2014	X2015	#TOB2	#TOC2			
2016	SOMA	X2013	X2016					
		-X2021	X2016					
		X2022	X2016					
2019	FRACAO	X2016	X2019	#TOC1	#TOB1			
2020	LIMITA	X2019	X2020			KR-	KR+	
2021	LEDLAG	X2020	X2021	1.0	1.0#TOC1			
2022	FRACAO	X2021	X2022	#TOB1	#TOC1			
2023	COMPAR .GT.	X5	OVER					
		X8	OVER					
2024	SELET2	X1024	X2024					
		X2020	X2024					
		OVER	X2024					
0023	GANHO	X2024	X23	#KR				
0024	LIMITA	X23	X24			Up-	Up+	
0025	LEDLAG	X24	Efd	1.0	1.0#TS			
0029	EXPORT EFD	Efd						
0040	ENTRAD		Vref					
0041	IMPORT QELE		Qe					
0042	LEDLAG	Qe	Qef	1.0	1.0#TR			
0043	GANHO	Qef	X43	#KIR				
0044	SOMA	Vref	X44					
		X43	X44					
0050	IMPORT WMAQ		w					
0051	ENTRAD		Zero					
0052	LEDLAG	w	wf	1.0	1.0#TR			
0053	GANHO	wf	X53	#KVHZ				
0054	SOMA	Vt	X54					
		-X53	X54					
0055	COMPAR .GT.	X54	X55					
		Zero	X55					
0056	DELAY	X55	X56					
0057	ENTRAD		Utmax					
0058	SELET2	X53	X58					
		Utmax	X58					
		X56	X58					
0059	LIMITA	X58	VHZ			Zero	Utmax	
0060	IMPORT IFD		Ifd					
0061	ENTRAD		IFth					
0062	ENTRAD		KCF					
0063	ENTRAD		KHF					
0064	ENTRAD		IFmax					

0065	ENTRAD			EmaxF				
0066	LEDLAG	Ifd	Ifdf	1.0	1.0#TR			
0067	SOMA	Ifdf	X67					
		-IFth	X67					
0068	FUNCAO	X**2	X67	X68				
0069	COMPAR	.GT.	X67	X69				
			Zero	X69				
0070	SELET2		KCF	X70				
			KHF	X70				
			X69	X70				
0071	MULTPL		X68	X71				
			X70	X71				
0072	PROINT		X71	X72	1.0	1.0	Zero	Inf
0073	COMPAR	.GT.	X72	X73				
			EmaxF	X73				
0074	SELET2		IFmax	X74				
			IFth	X74				
			X73	X74				
0075	SOMA		X74	X75				
			-Ifdf	X75				
0076	GANHO		X75	Voel	#KIFmx			
0080	IMPORT	IMQS		Ia				
0081	ENTRAD			ITth				
0082	ENTRAD			KCS				
0083	ENTRAD			KHS				
0084	ENTRAD			ITmax				
0085	ENTRAD			EmaxS				
0086	LEDLAG	Ia	Iaf	1.0	1.0#TR			
0087	SOMA	Iaf	X87					
		-ITth	X87					
0088	FUNCAO	X**2	X87	X88				
0079	COMPAR	.GT.	X87	X89				
			Zero	X89				
0090	SELET2		KCS	X90				
			KHS	X90				
			X89	X90				
0091	MULTPL		X88	X91				
			X90	X91				
0092	PROINT		X91	X92	1.0	1.0	Zero	Inf
0093	COMPAR	.GT.	X92	X93				
			EmaxS	X93				
0094	SELET2		ITmax	X94				
			ITth	X94				
			X93	X94				
0095	SOMA		X94	X95				
			-Iaf	X95				
0096	GANHO		X95	ITind	#KInd			
0097	GANHO		X95	ITcap	-#KCap			
0100	FUNCAO	RETA	Ifdf	X100	-1.0#IFmn			
0101	GANHO		X100	IFmin	#KIFmn			
0102	IMPORT	PELE		Pe				
0103	LEDLAG	Pe	Pef	1.0	1.0#TR			
0104	FUNCAO	X**2	Vt	Vt2				
0105	FUNCAO	PONTOS	Pef	X105	0.00-0.400	0.25-0.378		
					0.50-0.355	0.75-0.335		
					1.00-0.310			
0106	LIMITA	X105	X106				mInf	Zero
0107	MULTPL	X106	X107					
		Vt2	X107					

```

0108 SOMA          X107  X108
                   -Qef  X108
0109 GANHO        X108  Vuel  #KPQ
(-----)
(DEFVA (stip) (vdef) ( d1 )
(-----)
DEFVAL           Up+   #Up+
DEFVAL           Up-   #Up-
DEFVAL           Zero  0.0
DEFVAL           Utmax #Utmax
DEFVAL           KCF   -#KCF
DEFVAL           KHF   #KHF
DEFVAL           IFth  #IFth
DEFVAL           IFmax #IFmax
DEFVAL           EmaxF #EmaxF
DEFVAL           KCS   -#KCS
DEFVAL           KHS   #KHS
DEFVAL           ITth  #ITth
DEFVAL           ITmax #ITmax
DEFVAL           EmaxS #EmaxS
DEFVAL           Inf   99999.
DEFVAL           mInf  -99999
DEFVAL           X72   0.0
DEFVAL           X92   0.0
DEFVAL VAR       X1024 X2024
DEFVAL VAR       X20   X1024
DEFVAL VAR       X1020 X1024
DEFVAL VAR       X2020 X1024
DEFVAL           KR-   #KR-
DEFVAL           KR+   #KR+
DEFVAL           Lmin  #Lmin
DEFVAL           Lmax  #Lmax
DEFVAL           LminU #LminU
DEFVAL           LmaxU #LmaxU
DEFVAL           LminO #LminO
DEFVAL           LmaxO #LmaxO
FIMCDU
(-----)
(ncdu) ( nome cdu )
      1903 RT_LBRG21-22
(-----)
(EFPAR (npar) (   valpar   )
(-----)
DEFPAR #KR-          -0.00866
DEFPAR #KR+           0.01
DEFPAR #Lmin         -0.0866
DEFPAR #Lmax          0.1
DEFPAR #LminU        -0.0866
DEFPAR #LmaxU         0.1
DEFPAR #LminO        -0.0866
DEFPAR #LmaxO         0.1
(
DEFPAR #TR            0.02
DEFPAR #TS            0.004
DEFPAR #KR            500.0
DEFPAR #KE            1.0
DEFPAR #TE            0.63
DEFPAR #TC1           1.0
DEFPAR #TB1           10.0

```



```

DEFFPAR #TC2          0.45
DEFFPAR #TB2          0.09
DEFFPAR #TUC1         1.0
DEFFPAR #TUB1        10.0
DEFFPAR #TUC2         0.45
DEFFPAR #TUB2         0.09
DEFFPAR #TOC1         1.0
DEFFPAR #TOB1        10.0
DEFFPAR #TOC2         0.45
DEFFPAR #TOB2         0.09
DEFFPAR #Up-         -4.33
DEFFPAR #Up+          5.00
DEFFPAR #Efmin        0.0
DEFFPAR #Efmax        3.95
DEFFPAR #KIR          0.00
DEFFPAR #KVHZ        1.15
DEFFPAR #Utmax        1.15
DEFFPAR #IFmax        2.39312
DEFFPAR #IFth         1.570485
DEFFPAR #KHF          22.06325
DEFFPAR #KCF          2.206325
DEFFPAR #EmaxF        149.308
DEFFPAR #KIFmx        0.5
DEFFPAR #ITmax        1.60
DEFFPAR #ITth         1.05
DEFFPAR #KHS          33.0
DEFFPAR #KCS          3.30
DEFFPAR #EmaxS        99.825
DEFFPAR #KInd         0.5
DEFFPAR #KCap         0.5
DEFFPAR #IFmn         0.0
DEFFPAR #KIFmn        0.5
DEFFPAR #KPQ          0.5
(-----)
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0001 IMPORT VTR          Vt
0002 IMPORT VSAD        Vsad
0003 LEDLAG            Vt   Vtf      1.0      1.0#TR
0004 MIN              VHZ   X4
                   X44   X4
0005 SOMA             X4    X5
                   -Vtf  X5
0006 MAX              ITcap X6
                   IFmin X6
                   Vuel  X6
0007 MAX              X5    X7
                   X6    X7
0008 MIN              Voel  X8
                   ITind  X8
0009 MIN              X7    X9
                   X8    X9
0010 SOMA             X9    X10
                   Vsad  X10
0011 SOMA             X10   X11
                   -X14  X11
                   X15   X11
0012 FRACAO          X11   X12   #TC2      #TB2
0013 LIMITA          X12   X13                Lmin  Lmax

```

0014	LEDLAG	X13	X14	1.0	1.0#TC2		
0015	FRACAO	X14	X15	#TB2	#TC2		
0016	SOMA	X13	X16				
		-X21	X16				
		X22	X16				
0019	FRACAO	X16	X19	#TC1	#TB1		
0020	LIMITA	X19	X20			KR-	KR+
0021	LEDLAG	X20	X21	1.0	1.0#TC1		
0022	FRACAO	X21	X22	#TB1	#TC1		
1011	SOMA	X10	X1011				
		-X1014	X1011				
		X1015	X1011				
1012	FRACAO	X1011	X1012	#TUC2	#TUB2		
1013	LIMITA	X1012	X1013			LminU	LmaxU
1014	LEDLAG	X1013	X1014	1.0	1.0#TUC2		
1015	FRACAO	X1014	X1015	#TUB2	#TUC2		
1016	SOMA	X1013	X1016				
		-X1021	X1016				
		X1022	X1016				
1019	FRACAO	X1016	X1019	#TUC1	#TUB1		
1020	LIMITA	X1019	X1020			KR-	KR+
1021	LEDLAG	X1020	X1021	1.0	1.0#TUC1		
1022	FRACAO	X1021	X1022	#TUB1	#TUC1		
1023	COMPAR .LT.	X5	UNDER				
		X6	UNDER				
1024	SELET2	X20	X1024				
		X1020	X1024				
		UNDER	X1024				
2011	SOMA	X10	X2011				
		-X2014	X2011				
		X2015	X2011				
2012	FRACAO	X2011	X2012	#TOC2	#TOB2		
2013	LIMITA	X2012	X2013			LminO	LmaxO
2014	LEDLAG	X2013	X2014	1.0	1.0#TOC2		
2015	FRACAO	X2014	X2015	#TOB2	#TOC2		
2016	SOMA	X2013	X2016				
		-X2021	X2016				
		X2022	X2016				
2019	FRACAO	X2016	X2019	#TOC1	#TOB1		
2020	LIMITA	X2019	X2020			KR-	KR+
2021	LEDLAG	X2020	X2021	1.0	1.0#TOC1		
2022	FRACAO	X2021	X2022	#TOB1	#TOC1		
2023	COMPAR .GT.	X5	OVER				
		X8	OVER				
2024	SELET2	X1024	X2024				
		X2020	X2024				
		OVER	X2024				
0023	GANHO	X2024	X23	#KR			
0024	LIMITA	X23	X24			Up-	Up+
0025	LEDLAG	X24	X25	1.0	1.0#TS		
0026	SOMA	X25	X26				
		-SE	X26				
0027	LEDLAG	X26	Efd	#KE	1.0#TE	Efmin	Efmax
0028	FUNCAO PONTOS	Efd	SE	0.0	0.02.9625.00001		
				3.95	0.07		
0029	EXPORT EFD	Efd					
0040	ENTRAD		Vref				
0041	IMPORT QELE		Qe				
0042	LEDLAG	Qe	Qef	1.0	1.0#TR		

0043	GANHO	Qef	X43	#KIR				
0044	SOMA	Vref	X44					
		X43	X44					
0050	IMPORT	WMAQ	w					
0051	ENTRAD		Zero					
0052	LEDLAG	w	wf	1.0		1.0#TR		
0053	GANHO	wf	X53	#KVHZ				
0054	SOMA	Vt	X54					
		-X53	X54					
0055	COMPAR	.GT.	X54	X55				
			Zero	X55				
0056	DELAY		X55	X56				
0057	ENTRAD			Utmax				
0058	SELET2		X53	X58				
			Utmax	X58				
			X56	X58				
0059	LIMITA		X58	VHZ		Zero	Utmax	
0060	IMPORT	IFD		Ifd				
0061	ENTRAD			IFth				
0062	ENTRAD			KCF				
0063	ENTRAD			KHF				
0064	ENTRAD			IFmax				
0065	ENTRAD			EmaxF				
0066	LEDLAG		Ifd	Ifdf	1.0		1.0#TR	
0067	SOMA		Ifdf	X67				
			-IFth	X67				
0068	FUNCAO	X**2	X67	X68				
0069	COMPAR	.GT.	X67	X69				
			Zero	X69				
0070	SELET2		KCF	X70				
			KHF	X70				
			X69	X70				
0071	MULTPL		X68	X71				
			X70	X71				
0072	PROINT		X71	X72	1.0		1.0	Zero Inf
0073	COMPAR	.GT.	X72	X73				
			EmaxF	X73				
0074	SELET2		IFmax	X74				
			IFth	X74				
			X73	X74				
0075	SOMA		X74	X75				
			-Ifdf	X75				
0076	GANHO		X75	Voel	#KIFmx			
0080	IMPORT	IMQS		Ia				
0081	ENTRAD			ITth				
0082	ENTRAD			KCS				
0083	ENTRAD			KHS				
0084	ENTRAD			ITmax				
0085	ENTRAD			EmaxS				
0086	LEDLAG		Ia	Iaf	1.0		1.0#TR	
0087	SOMA		Iaf	X87				
			-ITth	X87				
0088	FUNCAO	X**2	X87	X88				
0079	COMPAR	.GT.	X87	X89				
			Zero	X89				
0090	SELET2		KCS	X90				
			KHS	X90				
			X89	X90				
0091	MULTPL		X88	X91				

```

0092 PROINT          X90   X91
0093 COMPAR .GT.    X91   X92      1.0      1.0      Zero   Inf
                   X92   X93
                   EmaxS X93
0094 SELET2         ITmax X94
                   ITth X94
                   X93   X94
0095 SOMA           X94   X95
                   -Iaf  X95
0096 GANHO          X95   ITind #KInd
0097 GANHO          X95   ITcap -#KCap
0100 FUNCAO RETA   Ifdf  X100  -1.0#IFmn
0101 GANHO          X100  IFmin #KIFmn
0102 IMPORT PELE   Pe
0103 LEDLAG        Pe    Pef      1.0      1.0#TR
0104 FUNCAO X**2   Vt    Vt2
0105 FUNCAO PONTOS Pef    X105    0.00 -0.45  0.25 -0.47
                   0.50 -0.45  0.75 -0.43
                   1.00 -0.41
0106 LIMITA        X105  X106                                mInf   Zero
0107 MULTPL        X106  X107
                   Vt2   X107
0108 SOMA          X107  X108
                   -Qef  X108
0109 GANHO          X108  Vuel  #KPQ
(-----)
(DEFVAL (stip) (vdef) ( dl )
(-----)
DEFVAL      Up+    #Up+
DEFVAL      Up-    #Up-
DEFVAL      Efmin  #Efmin
DEFVAL      Efmax  #Efmax
DEFVAL      Zero   0.0
DEFVAL      Utmax  #Utmax
DEFVAL      KCF    -#KCF
DEFVAL      KHF    #KHF
DEFVAL      IFth   #IFth
DEFVAL      IFmax  #IFmax
DEFVAL      EmaxF  #EmaxF
DEFVAL      KCS    -#KCS
DEFVAL      KHS    #KHS
DEFVAL      ITth   #ITth
DEFVAL      ITmax  #ITmax
DEFVAL      EmaxS  #EmaxS
DEFVAL      Inf    99999.
DEFVAL      mInf   -99999
DEFVAL      X72    0.0
DEFVAL      X92    0.0
DEFVAL VAR   X1024 X2024
DEFVAL VAR   X20    X1024
DEFVAL VAR   X1020 X1024
DEFVAL VAR   X2020 X1024
DEFVAL      KR-    #KR-
DEFVAL      KR+    #KR+
DEFVAL      Lmin   #Lmin
DEFVAL      Lmax   #Lmax
DEFVAL      LminU  #LminU
DEFVAL      LmaxU  #LmaxU
DEFVAL      LminO  #LminO

```

```

DEFVAL          LmaxO  #LmaxO
FIMCDU
(-----)
(ncdu) ( nome cdu )
      1972 Ctrl_1972
(-----)
(EFPAR (npar) (   valpar   )
(-----)
DEFPAR #TR          0.02
DEFPAR #T7          3.0
DEFPAR #T8          0.4
DEFPAR #T9          0.1
DEFPAR #TW1         3.0
DEFPAR #TW2         3.0
DEFPAR #TW3         3.0
DEFPAR #T1          0.15
DEFPAR #T2          0.03
DEFPAR #T3          0.15
DEFPAR #T4          0.03
DEFPAR #KS1         5.0
DEFPAR #KS2         0.33
DEFPAR #KS3         1.0
DEFPAR #USTmn       -0.1
DEFPAR #USTmx       0.1
(-----)
(nb) (tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
(-----)
0001 IMPORT DWMAQ          Dw
0002 IMPORT PELE          Pe
0003 LEDLAG              Dw  Dwf      1.0          1.0#TR
0004 LEDLAG              Pe  Pef      1.0          1.0#TR
0005 WSHOUT              Dwf  X5      #TW1        1.0#TW1
0006 WSHOUT              X5   X6      #TW2        1.0#TW2
0007 WSHOUT              Pef  X7      #TW3        1.0#TW3
0008 LEDLAG              X7   X8      #KS2        1.0#T7
0009 GANHO               X8   X9      #KS3
0010 SOMA                X6   X10
                X9   X10
0011 LEDLAG              X10  X11     1.0#T8      1.0#T9
0012 LEDLAG              X11  X12     1.0          1.0#T9
0013 LEDLAG              X12  X13     1.0          1.0#T9
0014 LEDLAG              X13  X14     1.0          1.0#T9
0016 SOMA                X14  X16
                -X8   X16
0017 GANHO               X16  X17     #KS1
0018 SOMA                X17  X18
                -X21  X18
                X22  X18
0019 FRACAO              X18  X19     #T1          #T2
0020 LIMITA              X19  X20
                                USTmin USTmax
0021 LEDLAG              X20  X21     1.0          1.0#T1
0022 FRACAO              X21  X22     #T2          #T1
0023 SOMA                X20  X23
                -X26  X23
                X27  X23
0024 FRACAO              X23  X24     #T3          #T4
0025 LIMITA              X24  Vsad
                                USTmin USTmax
0026 LEDLAG              Vsad X26     1.0          1.0#T3
0027 FRACAO              X26  X27     #T4          #T3

```

```

0028 EXPORT VSAD  Vsad
(-----)
(DEFVA (stip) (vdef) ( d1 )
(-----)
DEFVAL      Vsad      0.0
DEFVAL      USTmin #USTmn
DEFVAL      USTmax #USTmx
FIMCDU
( nc ) ( nome cdu )
      1      Ctrl_1
(-----)
(      (nome) (      valor      )
(-----)
DEFPPAR #Rinv  20.
DEFPPAR #PMAX  1.17
DEFPPAR #ZERO  0.0
DEFPPAR #UM    1.0
DEFPPAR #VC_MX 0.1
DEFPPAR #VC_MN -1.0
DEFPPAR #FHP   0.21
DEFPPAR #FIP   0.38
DEFPPAR #FLP   0.41
DEFPPAR #PBT   225.83
DEFPPAR #PBG   208.0
DEFPPAR #K     20.
DEFPPAR #EPS   1e-4
DEFPPAR #PTGMN 0.6207
DEFPPAR #FQS   0.462
DEFPPAR #FWX   1.0
DEFPPAR #VPBAS 640.44
DEFPPAR #BETA  215.20
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
      1  ENTRAD          ZERO
     10  IMPORT CDU          PTG11  2001.
     11  IMPORT CDU          PTG12  1001.
     12  ENTRAD          PTGMN
     13  SOMA             PTG11  Qs2ON
                   -PTGMN  Qs2ON
     14  SOMA             -PTGMN  Qs1ON
                   PTG12  Qs1ON
    100  ENTRAD          wref
    101  IMPORT WMAQ      w
    102  SOMA             wref  DW
                   -w      DW
    103  LEDLAG          DW     RV   #K   0.   1.   0.1
    104  ENTRAD          PVref
    105  SOMA             PVref  PC
                   RV      PC
    106  LIMITA          PC     PCTRL          EPS   PMAX
    107  FUNCAO PONTOS  PCTRL  LC      0.   0.   0.013 0.001
                   0.552 0.261 0.77  0.348
                   0.792 0.359 0.812 0.37
                   0.829 0.381 0.845 0.392
                   0.86  0.402 0.885 0.424
                   0.906 0.446 0.924 0.467
                   0.931 0.478 0.938 0.489
                   0.944 0.5   0.95  0.51
                   0.959 0.53 0.967 0.55
                   0.973 0.57 0.98  0.6

```

				0.988	0.65	1.	1.		
108	SOMA	LC	EV						
		-EVI	EV						
109	LIMITA	EV	EVL					VC_MN	VC_MX
110	PROINT	EVL	EVI	1.	0.	1.		EPS	PMAX
111	FUNCAO	PONTOS	EVI	CV	0.	0.	0.001	0.013	
					0.261	0.552	0.348	0.77	
					0.359	0.792	0.37	0.812	
					0.381	0.829	0.392	0.845	
					0.402	0.86	0.424	0.885	
					0.446	0.906	0.467	0.924	
					0.478	0.931	0.489	0.938	
					0.5	0.944	0.51	0.95	
					0.53	0.959	0.55	0.967	
					0.57	0.973	0.6	0.98	
					0.65	0.988	1.	1.	
112	LIMITA	CV	POSV					ZERO	UM
200	IMPORT	CDU	Wx1	1000.					
201	ENTRAD		Wx1ON						
202	SELET2	ZERO	Wx1S						
		STG1	Wx1S						
		Wx1ON	Wx1S						
203	GANHO	Wx1S	Wx1SF	#FWX					
204	ENTRAD		Qs1						
205	SELET2	ZERO	Qs1S						
		Qs1	Qs1S						
		Qs1ON	Qs1S						
206	GANHO	Qs1S	Qs1F	#FQS					
207	SOMA	Qs1F	CR1						
		Wx1SF	CR1						
208	LEDLAG	CR1	CR1SA	1.	0.	1.	3.92		
209	LEDLAG	CR1SA	CR1EC	1.	0.	1.	1.59		
210	LEDLAG	CR1EC	CR1EV	1.	0.	1.	20.86		
211	GANHO	Wv1	FVCR1	0.5					
212	IMPORT	CDU	Wx2	2000.					
213	ENTRAD		Wx2ON						
214	SELET2	ZERO	Wx2S						
		STG2	Wx2S						
		Wx2ON	Wx2S						
215	GANHO	Wx2S	Wx2SF	#FWX					
216	ENTRAD		Qs2						
217	SELET2	ZERO	Qs2S						
		Qs2	Qs2S						
		Qs2ON	Qs2S						
218	GANHO	Qs2S	Qs2F	#FQS					
219	SOMA	Qs2F	CR2						
		Wx2SF	CR2						
220	LEDLAG	CR2	CR2SA	1.	0.	1.	3.92		
221	LEDLAG	CR2SA	CR2EC	1.	0.	1.	1.59		
222	LEDLAG	CR2EC	CR2EV	1.	0.	1.	20.86		
223	GANHO	Wv2	FVCR2	0.5					
224	SOMA	FVCR1	FVAP1						
		FVCR2	FVAP1						
225	GANHO	FVAP1	FVAP	0.697					
226	FUNCAO	RETA	Wx1	STG1	1.2238-	.3592			
227	FUNCAO	RETA	Wx2	STG2	1.2238-	.3592			
228	FUNCAO	RETA	CR1EV	Wv1	1.07960.	0.029			
229	FUNCAO	RETA	CR2EV	Wv2	1.07960.	0.029			
300	MULTPL	POSV	FVAPT						

```

301 LEDLAG          FVAP  FVAPT
                   FVAPT  FVAPT1 1.    0.    1.    0.25
302 ENTRAD          FEXT
303 FRACAO          FEXT  FEXTPU 1.    0.    #VPBAS0.
304 LEDLAG          FEXTPU EXTa   1.    0.    1.    0.2
305 SOMA            FVAPT1 CEXT
                   -EXTa  CEXT
306 GANHO           CEXT  CEXT1  1.
307 SELET2          ZERO  FVAPH
                   FVAPT1  FVAPH
                   CEXT   FVAPH
308 GANHO           FVAPH  PMHP   #FHP
309 SELET2          ZERO  FVAPIL
                   CEXT1  FVAPIL
                   CEXT   FVAPIL
310 GANHO           FVAPIL  PMIP   #FIP
311 LEDLAG          FVAPIL  FVL    1.    0.    1.    0.2
312 GANHO           FVL    PMLP   #FLP
313 SOMA            PMHP   PMTOT
                   PMIP   PMTOT
                   PMLP   PMTOT
314 LIMITA          PMTOT  PMT
315 FRACAO          PMT    PM     #PBT  0.    #PBG  0.    ZERO  PMAX
316 EXPORT P MEC    PM
317 SELET2          FVAP   EXPVPU
                   EXTa  EXPVPU
                   CEXT  EXPVPU
318 FRACAO          EXPVPU  EXPV   #VPBAS0.  1.    0.
319 SAIDA           EXPV
406 SOMA            X409   TQS1
                   TAT1   TQS1
407 GANHO           Qs1S  X407   #BETA
409 DIVSAO          X407   X409
                   Wx1    X409
410 SAIDA           TQS1
411 IMPORT CDU      TAT1   1002.

```

(-----)

((stip) (vdef) (d1)

(-----)

```

DEFVAL      PMAX   #PMAX
DEFVAL      ZERO   #ZERO
DEFVAL      wref   1.0
DEFVAL      UM     #UM
DEFVAL      VC_MX  #VC_MX
DEFVAL      VC_MN  #VC_MN
DEFVAL      Qs1    1.0
DEFVAL      Qs2    1.0
DEFVAL      Wx2ON  #UM
DEFVAL      Wx1ON  #UM
DEFVAL      EPS    #ZERO
DEFVAL      FEXT   200
DEFVAL      PTGMN  #PTGMN

```

FIMCDU

```

(
( nc ) ( nome cdu )
  3 Ctrl_3

```

(-----)

((nome) (valor)

(-----)


```

DEFFPAR #TA      22
DEFFPAR #K      20
DEFFPAR #PBG    145.0
DEFFPAR #PBT    106.0
DEFFPAR #WMIN   0.2574
DEFFPAR #ZERO   0.0
DEFFPAR #IGMIN  -41
DEFFPAR #IGMAX   5
DEFFPAR #RACEL  0.005
DEFFPAR #KACEL  100.
DEFFPAR #KI     1.4
DEFFPAR #KP     3.5
(
(nb)i(tipo) (stip)s(vent) (vsai) ( p1 )( p2 )( p3 )( p4 ) (vmin) (vmax)
 23 ENTRAD          ZERO
100 ENTRAD          W0
101 IMPORT WMAQ     W
102 SOMA           W0      DW
                    -W     DW
103 LEDLAG         DW      dRVQV #K    0.    1.    0.05
104 ENTRAD          Pele
105 FRACAO         Pele    Pref   #PBG      #PBT
106 SOMA           Pref    RQV
                    dRVQV  RQV
107 ENTRAD          SISOC
108 MULTPL         DW      DWISO
                    SISOC  DWISO
109 PROINT         X112    RVISO  1.    0.    1.          RVMIN RVMAX
110 SELET2         RQV     RV
                    RVISO  RV
                    SISOC  RV
111 LIMITA         RV      VCEn          RVMIN RVMAX
112 LEDLAG         DWISO  X112  #KI   #KP   1.    0.001
200 MIN           VCEt    VCEMIN
                    VCEn    VCEMIN
                    VCEa    VCEMIN
201 LIMITA         VCEMIN X201          RVMIN RVMAX
202 MULTPL         X201    X202
                    W      X202
203 GANHO         X202    X203  0.7426
204 ENTRAD          Wmin
205 SOMA           Wmin    VCE
                    X203    VCE
                    -ZERO  VCE
206 LEDLAG         VCE     X206  1.    0.    1.    0.1
207 LEDLAG         X206    Wf1   1.    0.    1.    0.8
208 POL(S)         Wf1     Wf2          -0.06 24.
                    0.1e-50.00060.18 24.
300 LEDLAG         Wf2     Wf     1.    0.    1.    0.4
301 FUNCAO RETA   Wf      Twf    1.3466-.3466
302 FUNCAO RETA   W       Tw     -0.5  0.5
303 SOMA           Twf     Tturb
                    Tw      Tturb
304 MULTPL         Tturb   Pturb
                    W       Pturb
305 FRACAO         Pturb   Pmec  #PBT  0.    #PBG  0.
306 EXPORT CDU    Pmec
307 EXPORT P MEC  Pmec
400 POL(S)         Wf2     Wfa          -0.24 24.

```

					.64e-40.00960.72	24.			
401	FUNCAO	PONTOS	Wfa	X401	0.	0.	.53125.53125		
					0.6842.635250.9394.90576				
					1.2	1.268			
402	FUNCAO	RETA		X401	X402	1.	-1.		
403	GANHO			X402	F13	362.4			
404	FUNCAO	X**2		W	X404				
405	FUNCAO	RETA		W	F12	-4.21	4.42		
406	SOMA			X404	F11				
					F12	F11			
407	MULTPL			F11	X407				
					F13	X407			
408	FUNCAO	RETA		W	F14	-722.	722.		
409	FUNCAO	RETA		VIGV	F15	-1.	5.		
410	GANHO			F15	X410	0.35			
411	ENTRAD				TREF1				
412	SOMA			TREF1	F1NUM				
					X410	F1NUM			
					X407	F1NUM			
					F14	F1NUM			
413	FUNCAO	X**K		LIGV	X413	0.572	1.		
414	FUNCAO	RETA		TA	X414	1.	273.15		
415	DIVSAO			X413	X415				
					X414	X415			
416	GANHO			X415	X416	295.15			
417	MULTPL			W	Wx				
					X416	Wx			
418	FUNCAO	RETA		TA	F16	-0.0051	1.11		
419	MULTPL			Wx	F1DEN				
					F16	F1DEN			
420	DIVSAO			F1NUM	Tx				
					F1DEN	Tx			
421	LEDLAG			Tx	Tx1	1.	12.	1.	15.
422	LEDLAG			Tx1	Tex	1.		1.	18.
423	EXPORT	CDU		Wx					
500	FUNCAO	RETA		Tex	X500	1.164	-1065.		
501	FUNCAO	RETA		Wfa	X501	270.6	190.		
502	SOMA			X500	DTIT				
					X501	DTIT			
503	FUNCAO	HISTE1		Wfa	X503	0.925	-7.	1.	
						0.9	7.		
504	SOMA			DTIT	SWTT				
					X503	SWTT			
505	ENTRAD				TA				
506	FUNCAO	RETA		TA	Tr	0.6	526.8		
507	SOMA			+Tex	DTAT				
				-Tr	DTAT				
508	SELET2			DTAT	X508				
					DTIT	X508			
					SWTT	X508			
509	LEDLAG			X508	X509	1.	4.	1.	0.001
510	PROINT			X509	VIGV1	1.	0.	4.	
511	LEDLAG			VIGV1	VIGV	1.	0.	1.	1.
513	FUNCAO	RETA		VIGV	LIGV	0.01170.9415			
514	GANHO			LIGV	X514	150.			
515	LIMITA			X514	X515				
516	SOMA			Tr	Tr1				
					X515	Tr1			
517	SOMA			-Tex	X517				

```

Tr1      X517
518 LEDLAG      X517      X518      1.      3.3      1.      0.001
519 PROINT      X518      VCET      1.      0.      250.      ZERO      TMAX
600*ENTRAD      IGMAX
601*ENTRAD      IGMIN
602*FUNCAO PONTOS Pref      X603      0.35821.      0.3688.98429
0.5747.767570.8798.20352
0.91840.08930.9737-.1215
603 GANHO      X603      IGVO      -41.
604*LIMITA      IGVO      IGVO0L      IGMIN      IGMAX
605*SAIDA      IGVO0L
700 WSHOUT      W      DWDT      1.      1.      0.001
701 ENTRAD      RACC
702 SOMA      -DWDT      EACEL
RACC      EACEL
703 GANHO      EACEL      X703      #KACEL
704 PROINT      X703      VCEa      1.      0.      1.      ZERO      AMAX
(-----)
(      (stip) (vdef) ( d1 )
(-----)
DEFVAL      RVMIN      0.0
DEFVAL      RVMAX      1.5
DEFVAL      Wmin      #WMIN
DEFVAL      W0      1.0
DEFVAL      RACC      #RACEL
DEFVAL      ZERO      0.0
DEFVAL      AMAX      1.5
DEFVAL      TMAX      1.5
DEFVAL      IGMIN      #IGMIN
DEFVAL      IGMAX      #IGMAX
DEFVAL      TRMAX      30
DEFVAL      TA      22
DEFVAL      TREF1      540
DEFVAL      VCEa      1.5
DEFVAL      VCET      1.5
DEFVAL VAR      VIGV1      IGVO0L
DEFVAL      SISOC      0.0
DEFVAL VAR      RVISO      Pref
DEFVAL      DWDT      0.0
FIMCDU
( nc ) ( nome cdu )
      2      Ctrl_2
(-----)
(      (nome) (      valor      )
(-----)
DEFPAR #TA      22
DEFPAR #K      20
DEFPAR #PBG      145.0
DEFPAR #PBT      106.0
DEFPAR #WMIN      0.2574
DEFPAR #ZERO      0.0
DEFPAR #IGMIN      -41
DEFPAR #IGMAX      5
DEFPAR #RACEL      0.005
DEFPAR #KACEL      100.
DEFPAR #KI      1.4
DEFPAR #KP      3.5
(nb) i(tipo) (stip) s(vent) (vsai) ( p1 ) ( p2 ) ( p3 ) ( p4 ) (vmin) (vmax)
      23 ENTRAD      ZERO

```

100	ENTRAD		W0						
101	IMPORT	WMAQ	W						
102	SOMA		W0	DW					
			-W	DW					
103	LEDLAG		DW	dRVQV	#K	0.	1.	0.05	
104	ENTRAD			Pele					
105	FRACAO		Pele	Pref	#PBG		#PBT		
106	SOMA		Pref	RQV					
			dRVQV	RQV					
107	ENTRAD			SISOC					
108	MULTPL		DW	DWISO					
			SISOC	DWISO					
109	PROINT		X112	RVISO	1.	0.	1.		RVMIN RVMAX
110	SELET2		RQV	RV					
			RVISO	RV					
			SISOC	RV					
111	LIMITA		RV	VCEn					RVMIN RVMAX
112	LEDLAG		DWISO	X112	#KI	#KP	1.	0.001	
200	MIN		VCEt	VCEMIN					
			VCEn	VCEMIN					
			VCEa	VCEMIN					
201	LIMITA		VCEMIN	X201					RVMIN RVMAX
202	MULTPL		X201	X202					
			W	X202					
203	GANHO		X202	X203	0.7426				
204	ENTRAD			Wmin					
205	SOMA		Wmin	VCE					
			X203	VCE					
			-ZERO	VCE					
206	LEDLAG		VCE	X206	1.	0.	1.	0.1	
207	LEDLAG		X206	Wf1	1.	0.	1.	0.8	
208	POL(S)		Wf1	Wf2				-0.06 24.	
					0.1e-50	0.00060	0.18	24.	
300	LEDLAG		Wf2	Wf	1.	0.	1.	0.4	
301	FUNCAO	RETA	Wf	Twf	1.3466	-0.3466			
302	FUNCAO	RETA	W	Tw	-0.5	0.5			
303	SOMA		Twf	Tturb					
			Tw	Tturb					
304	MULTPL		Tturb	Pturb					
			W	Pturb					
305	FRACAO		Pturb	Pmec	#PBT	0.	#PBG	0.	
306	EXPORT	CDU	Pmec						
307	EXPORT	PMEC	Pmec						
400	POL(S)		Wf2	Wfa				-0.24 24.	
					.64e-40	0.00960	0.72	24.	
401	FUNCAO	PONTOS	Wfa	X401	0.	0.	.53125	.53125	
					0.6842	.635250	.9394	.90576	
					1.2	1.268			
402	FUNCAO	RETA	X401	X402	1.	-1.			
403	GANHO		X402	F13	362.4				
404	FUNCAO	X**2	W	X404					
405	FUNCAO	RETA	W	F12	-4.21	4.42			
406	SOMA		X404	F11					
			F12	F11					
407	MULTPL		F11	X407					
			F13	X407					
408	FUNCAO	RETA	W	F14	-722.	722.			
409	FUNCAO	RETA	VIGV	F15	-1.	5.			
410	GANHO		F15	X410	0.35				


```

703 GANHO          EACEL  X703  #KACEL
704 PROINT         X703  VCEa  1.    0.    1.          ZERO  AMAX
800 EXPORT CDU    Tex
(-----)
(      (stip) (vdef) ( d1 )
(-----)
DEFVAL          RVMIN  0.0
DEFVAL          RVMAX  1.5
DEFVAL          Wmin   #WMIN
DEFVAL          W0     1.0
DEFVAL          RACC   #RACEL
DEFVAL          ZERO   0.0
DEFVAL          AMAX   1.5
DEFVAL          TMAX   1.5
DEFVAL          IGMIN  #IGMIN
DEFVAL          IGMAX  #IGMAX
DEFVAL          TRMAX  30
DEFVAL          TA     22
DEFVAL          TREF1  540
DEFVAL          VCEa   1.5
DEFVAL          VCET   1.5
DEFVAL VAR      VIGV1  IGV0L
DEFVAL          SISOC  0.0
DEFVAL VAR      RVISO  Pref
DEFVAL          DWDT   0.0
FIMCDU
999999
FIM

```