



SIMULAÇÃO HÍBRIDA NO DOMÍNIO DO TEMPO – INTEGRAÇÃO ENTRE
FERRAMENTAS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E
ELETROMECAÂNICOS

Pedro Henrique Lourenço dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Rio de Janeiro

Junho de 2014

SIMULAÇÃO HÍBRIDA NO DOMÍNIO DO TEMPO – INTEGRAÇÃO ENTRE
FERRAMENTAS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E
ELETROMECAÑICOS

Pedro Henrique Lourenço dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc

Dr. Jorge Luiz de Araújo Jardim, Ph.D.

Dr. Nelson Martins, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2014

Santos, Pedro Henrique Lourenço dos

Simulação Híbrida no Domínio do Tempo – Integração entre Ferramentas de Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos / Pedro Henrique Lourenço dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XV, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glauco Nery Taranto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 78 – 82.

1. Transitórios Eletromagnéticos. 2. Transitórios Eletromecânicos. 3. Simulação Híbrida. I. Taranto, Glauco Nery. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico este trabalho aos meus
pais Valdezio e Carmen Lúcia.*

AGRADECIMENTOS

À Coppe – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação pela oportunidade de realizar o curso de mestrado e, em especial, aos professores do Programa de Engenharia Elétrica por todos os conhecimentos transmitidos.

Ao meu orientador Glauco Nery Taranto pelos ensinamentos ao longo do curso de mestrado e pelas contribuições e correções deste trabalho.

Ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS por viabilizar a minha participação e por fornecer um ambiente propício ao desenvolvimento dessa dissertação.

Aos engenheiros Alex de Castro, Dr. Carlos Alberto da Silva Neto, Dra. Karen Caino Salim, Henildo Medeiros de Barros, Dr. Maurício Campos Passaro, Dr. Marcelos Groetaers dos Santos e Dr. Roberto Nogueira Fontoura Filho pelas grandes contribuições para realização desse trabalho.

Ao engenheiro Dr. Jorge Luiz de Araújo Jardim da HPPA – *High Performance Power Applications*, responsável pelo desenvolvimento da ferramenta utilizada neste trabalho, pelos esclarecimentos e pelas significativas colaborações.

À minha esposa Ivia Carla Bencke Gonçalves pelo companheirismo, compreensão e incentivo nos momentos de dificuldade.

À minha filha Lorena Bencke Lourenço dos Santos que chegou recentemente enchendo nossas vidas de felicidade.

Aos meus pais Valdezio Pedro dos Santos e Carmen Lúcia Lourenço dos Santos por toda a dedicação, amor incondicional e incentivo ao longo da minha vida.

Aos amigos de curso Eduardo Jubini, Elder Campos, Yuri Roseblum e Thassiana Batista pela parceria, ajuda e troca de conhecimentos durante essa jornada.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SIMULAÇÃO HÍBRIDA NO DOMÍNIO DO TEMPO – INTEGRAÇÃO ENTRE
FERRAMENTAS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS E
ELETROMECAÂNICOS

Pedro Henrique Lourenço dos Santos

Junho/2014

Orientador: Glauco Nery Taranto

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho tem como objetivo apresentar a simulação híbrida no domínio do tempo, que consiste na integração de uma ferramenta de Transitórios Eletromagnéticos – TEM com uma ferramenta de Estabilidade Transitória – ET. Neste desenvolvimento o sistema de potência é representado parcialmente em cada uma das ferramentas, que são processadas simultaneamente com a troca regular de informações, através de equivalentes, durante o tempo de simulação. O desenvolvimento da simulação híbrida foi motivado pela possibilidade de se aliar a capacidade de representação detalhada de componentes da ferramenta de TEM com a eficiência computacional de análise de redes de grande porte das ferramentas de ET, sendo útil na avaliação do desempenho dinâmico de redes com sistema de transmissão CCAT, geradores eólicos e dispositivos FACTS. Neste trabalho foram realizados experimentos com o objetivo de avaliar a metodologia de cálculo utilizada na determinação dos equivalentes transferidos entre as ferramentas e avaliar as características do protocolo de comunicação, responsável por coordenar a integração entre elas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

HYBRID TIME DOMAIN SIMULATION – INTEGRATION OF
ELECTROMAGNETIC AND ELECTROMECHANICAL TRANSIENT
PROGRAMS

Pedro Henrique Lourenço dos Santos

June/2014

Advisor: Glauco Nery Taranto

Department: Electrical Engineering

This work presents the hybrid time domain simulation, which consists on the integration of an Electromagnetic Transient Program – EMT and a Transient Stability Program – TSP. In this development the power system is partially represented in each program that are simultaneously processed with a regular exchange of data during simulation time. The development of the hybrid simulation was motivated by the possibility of combining the capacity of detailed equipment representation in the EMT with the efficiency of large power systems analysis in the TSP, thus providing more fidelity of some transient phenomena and dynamic assessment of HVDC transmission systems, wind farms and FACTS devices. In this work experiments were made with the objective of evaluate the methodology in determining the equivalent transferred between the programs, as well as the communication protocol characteristics, responsible for coordinating their integration.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução.....	1
I.1 Considerações Iniciais.....	1
I.2 Motivação e Objetivo da Dissertação.....	5
I.3 Revisão Bibliográfica.....	7
I.4 Estrutura da Dissertação.....	11
I.5 Publicação Gerada por esta Dissertação.....	12
CAPÍTULO II – Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos.....	13
II.1 Considerações Iniciais.....	13
II.2 Transitórios Eletromagnéticos – TEM.....	14
II.2.1 Modelos Matemáticos de Componentes para TEM.....	15
II.2.2 Método de Solução Numérica.....	18
II.3 Estabilidade Transitória – ET.....	19
II.3.1 Modelos Matemáticos de Componentes para ET.....	21
II.3.2 Métodos de Solução Numérica.....	27
CAPÍTULO III – Simulação Híbrida no Domínio do Tempo.....	29
III.1 Considerações Iniciais.....	29
III.2 Equivalente do Sistema Detalhado.....	31
III.2.1 Conversão de Forma de Onda para Fasor.....	32
III.3 Equivalente do Sistema Externo.....	35
III.3.1 Conversão de Fasor para Forma de Onda.....	36
III.4 Protocolo de Comunicação.....	39
III.4.1 Implementação.....	42
CAPÍTULO IV – Experimentos e Resultados.....	46
VI.1 Considerações Iniciais.....	46
VI.2 Experimento #1 – Sistema Radial com Um Gerador.....	48
VI.3 Experimento #2 – Sistema Radial com Dois Geradores.....	53
VI.4 Sistema 39 Barras.....	55
IV.4.1 Experimento #3 – Frequência do Equivalente do Sistema Externo..	57
IV.4.2 Experimento #4 – Local da Perturbação.....	62
IV.4.3 Experimento #5 – Métodos de Conversão da Forma de Onda.....	63
IV.4.4 Experimento #6 – Intervalo de Tempo do Protocolo Serial.....	64
IV.4.5 Experimento #7 – Influência do Passo Integração.....	65
VI.5 Sistema 39 Barras com HVDC.....	67
IV.5.1 Experimento #8 – Perturbações no Sistema Externo.....	68

IV.5.2	Experimento #9 – Perturbações no Sistema Detalhado	71
CAPÍTULO V – Conclusões e Trabalhos Futuros		75
V.1	Conclusões	75
V.2	Proposições para Trabalhos Futuros	76
BIBLIOGRAFIA		78
APÊNDICE A – Métodos de Conversão de Forma de Onda para Fasor		83
A.1	<i>Curve Fitting</i> com Mínimos Quadrados.....	83
A.2	Transformada Rápida de Fourier – FFT.....	85
APÊNDICE B – Dados dos Sistemas Teste Utilizados.....		87
B.1.	Sistema #1 – Sistema Radial com Um Gerador	87
B.2.	Sistema #2 – Sistema Radial com Dois Geradores.....	90
B.3.	Sistema #3 – Sistema IEEE 39	92
B.4.	Sistema #4 – Sistema IEEE 39 com HVDC	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 – Escala de tempo dos fenômenos elétricos e controle envolvidos	2
Figura I.2 – Principais Interligações entre Subsistemas do SIN.....	5
Figura II.1 – Sistema CCAT bipolar com pontes de doze pulsos.	16
Figura II.2 – Diagrama com característica do sistema de controle CCAT.....	16
Figura II.3 – Conversão das equações diferenciais em equações algébricas.....	18
Figura II.4 – Classificação da estabilidade de sistemas de potência	20
Figura II.5 – Relação entre forma de onda e fasor	21
Figura II.6 – Modelo π de linha de transmissão para ET	22
Figura II.7 – Modelo π do transformador com tap $1:t$ para ET	22
Figura II.8 – Modelo do gerador síncrono para ET.....	24
Figura II.9 – Sistemas CCAT para ET	25
Figura II.10 – Linha de transmissão CC.....	26
Figura III.1– Objetivo principal da simulação híbrida	30
Figura III.2 – Interface entre os sistemas detalhado e externo	30
Figura III.3 – Equivalente do sistema detalhado	31
Figura III.4 – Componente para realização da FFT.....	34
Figura III.5 – Equivalente Thévenin do sistema externo.....	35
Figura III.6 – Equivalente Thévenin trifásico do sistema externo	37
Figura III.7 – Filtro da frequência de barra	38
Figura III.8 – Inicialização da simulação híbrida.....	39
Figura III.9 – Diagrama esquemático do protocolo de comunicação.....	40
Figura III.10 – Construção da forma de onda e cálculo dos fasores	42
Figura III.11 – Atualização da frequência do equivalente do sistema externo.....	43
Figura III.12 – Fluxograma de implementação da simulação híbrida.....	44
Figura IV.1 – Experimento #1 - Diagrama unifilar do sistema radial com 1 gerador....	48
Figura IV.2 – Experimento #1 - Tensão terminal do gerador	49
Figura IV.3 – Experimento #1 - Potência ativa do gerador.....	49
Figura IV.4 – Experimento #1 - Potência reativa do gerador.....	49
Figura IV.5 – Experimento #1 - Tensão da barra de carga.....	50
Figura IV.6 – Experimento #1 - Potência ativa da barra de carga.....	50
Figura IV.7 – Experimento #1 - Potência reativa da carga	50
Figura IV.8 – Experimento #1 - Corrente injetada na barra de interface	51

Figura IV.9 – Experimento #2 - Sistema radial com dois geradores.....	53
Figura IV.10 – Experimento #2 - Potência ativa do Gerador1	53
Figura IV.11 – Experimento #2 - Potência ativa do Gerador2.....	54
Figura IV.12 – Experimento #2 - Corrente injetada na barra de interface.	54
Figura IV.13 – Sistema 39 Barras	56
Figura IV.14 – Experimento #3 - Oscilações presentes na simulação híbrida.....	57
Figura IV.15 – Experimento #3 - Frequências do equivalente do sistema externo.....	58
Figura IV.16 – Experimento #3 - Resultados com diferentes frequências.....	59
Figura IV.17 – Comparação de protocolos de comunicação.....	60
Figura IV.18 – Experimento #3 - Potência ativa e reativa do Gerador 3	60
Figura IV.19 – Experimento #3 - Tensão terminal e frequência angular do Gerador 3 .	61
Figura IV.20 – Experimento #3 - Potência ativa e reativa do Gerador 6	61
Figura IV.21 – Experimento #3 - Tensão terminal e frequência angular do Gerador 6 .	61
Figura IV.22 – Experimento #4 - Corrente para diferentes locais da perturbação.....	63
Figura IV.23 – Experimento #5 - Resultados com diferentes métodos de conversão....	64
Figura IV.24 – Experimento #6 - Resultados com diferentes tempos de conversão.....	65
Figura IV.25 – Experimento #7 - Resultado com diferentes passos de integração.....	66
Figura IV.26 - Sistema 39 Barras com CCAT	67
Figura IV.27 – Experimento #8 - Potência ativa do Gerador 1	68
Figura IV.28 – Experimento #8 - Potência reativa do Gerador 1	69
Figura IV.29 – Experimento #8 - Tensão terminal e frequência do Gerador 1	69
Figura IV.30 – Experimento #8 - Ângulo de disparo do retificador	69
Figura IV.31 – Experimento #8 - Corrente contínua do inversor.....	70
Figura IV.32 – Experimento #8 - Potência ativa do inversor.....	70
Figura IV.33 – Experimento #8 - Corrente da barra de interface.....	71
Figura IV.34 – Experimento #9 - Corrente da barra de interface.....	72
Figura IV.35 – Protocolo de comunicação para perturbação no sistema detalhado.....	72
Figura IV.36 – Passo de integração na simulação híbrida.....	73
Figura A.1 – Aquisição adequada e inadequada com efeito de <i>aliasing</i>	86
Figura B.1 – Modelo de gerador de polos lisos.....	88
Figura B.2 – Diagrama de blocos do regulador automático de tensão e excitatriz	89
Figura B.3 – Diagrama de blocos da turbina e regulador de velocidade.....	90
Figura B.4 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade.....	96
Figura B.5 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade.....	97

Figura B.6 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade.....	98
Figura B.7 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade.....	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I.1 – Características das ferramentas de simulação.	3
Tabela II.1 – Espectro de Frequência dos TEM	14
Tabela II.2 – Características gerais dos modelos em função da frequência.....	15
Tabela II.3 – Harmônicos do sistema CCAT bipolar com pontes de 12 pulsos.....	17
Tabela II.4 – Espectro de frequência das oscilações eletromecânicas	21
Tabela IV.1 – Características dos sistemas teste	46
Tabela IV.2 – Descrição dos experimentos realizados.....	47
Tabela IV.3 – Experimento #1 - Tempos de processamento.....	52
Tabela IV.4 – Experimento #2 - Tempos de processamento.....	55
Tabela IV.5 – Experimento #3 - Tempos de processamento do Sistema 39 Barras.....	62
Tabela IV.6 – Experimento #7 - Tempos de processamento.....	66
Tabela IV.7 – Experimento #8 - Tempos de processamento.....	71
Tabela B.1 – Dados de geração do Sistema #1	87
Tabela B.2 – Parâmetros do transformador do Sistema #1	87
Tabela B.3 – Parâmetros das linhas de transmissão do Sistema #1	87
Tabela B.4 – Dados da carga do Sistema #1	88
Tabela B.5 – Parâmetros do gerador do Sistema #1	89
Tabela B.6 – Parâmetros do regulador de tensão e excitatriz do Sistema #1	89
Tabela B.7 – Parâmetros do regulador de velocidade do Sistema #1.....	90
Tabela B.8 – Dados de geração do Sistema #2	91
Tabela B.9 – Parâmetros dos transformadores do Sistema #2	91
Tabela B.10 – Parâmetros das linhas de transmissão do Sistema #2	91
Tabela B.11 – Dados da carga do Sistema #2	91
Tabela B.12 – Dados de geração do Sistema #3	92
Tabela B.13 – Parâmetros dos transformadores do Sistema #3	92
Tabela B.14 – Parâmetros das linhas de transmissão do Sistema #3	93
Tabela B.15 – Dados das cargas do Sistema #3	94
Tabela B.16 – Parâmetros dos geradores do Sistema #3.....	95
Tabela B.17 – Parâmetros do regulador de tensão do Sistema #3.....	96
Tabela B.18 – Parâmetros do regulador de velocidade do Sistema #3.....	97
Tabela B.19 – Parâmetros do regulador de velocidade e turbina	97
Tabela B.20 – Parâmetros do regulador de velocidade e turbina	98

Tabela B.21 – Parâmetros do regulador de velocidade e turbina 99

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CA	: Corrente Alternada
CAG	: Controle Automático da Geração
CC	: Corrente Contínua
CIGRE	: <i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
DFT	: <i>Discrete Fourier Transform</i>
EPE	: Empresa de Pesquisa Energética
ET	: Estabilidade Transitória
FACTS	: <i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FFT	: <i>Fast Fourier Transform</i>
HVDC	: <i>High Voltage Direct Current</i>
IEEE	: <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ONS	: Operador Nacional do Sistema Elétrico
RAT	: Regulador Automático de Tensão
RMS	: <i>Root Mean Square</i>
RTDS	: <i>Real Time Digital Simulator</i>
RV	: Regulador de Velocidade
SEP	: Sistema Elétrico de Potência
SIN	: Sistema Interligado Nacional
TE	.. Transitório Eletromecânico
TEM	: Transitório Eletromagnético

CAPÍTULO I

Introdução

I.1 Considerações Iniciais

A eletricidade é uma das fontes de energia mais utilizada pelas sociedades modernas e se tornou essencial para o crescimento econômico e desenvolvimento social das nações. Os Sistemas Elétricos de Potência – SEP são formados por todos os componentes envolvidos na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Seu objetivo básico é atender a todos os consumidores de forma ininterrupta, com qualidade e respeitando requisitos de desempenho [1].

A dimensão dos SEP e sua complexidade de operação aumentaram significativamente ao longo do tempo devido à exploração de potenciais energéticos distantes dos centros consumidores, o aumento das interligações entre subsistemas e a crescente utilização de equipamentos baseados em eletrônica de potência. Em função da quantidade de equipamentos envolvidos, os SEP estão constantemente sujeitos a fenômenos transitórios, que resultam de ações de controle normais como a operação de disjuntores ou a partir de distúrbios como descargas atmosféricas e curtos-circuitos. Estes fenômenos podem levar à operação em condições inadequadas, ocasionar danos em equipamentos, desligamento de consumidores ou em casos extremos provocar blecautes. Dois dos principais tipos de transitórios elétricos podem ser classificados de acordo com a sua escala de tempo de duração e as grandezas físicas envolvidas, os Transitórios Eletromagnéticos – TEM e os Transitórios Eletromecânicos – TE.

Os TEM são caracterizados predominantemente por interações entre os campos magnéticos das indutâncias e os campos elétricos das capacitâncias da rede elétrica. Os TEM possuem espectro de frequência amplo e duração que pode variar desde nanossegundos até centenas de milissegundos. Os TE são caracterizados por interações oscilatórias das energias cinéticas e potenciais presentes nos eixos dos geradores. A sua classificação é ampla e, dentre os diferentes tipos, destaca-se a Estabilidade Transitória – ET, que consiste na capacidade dos geradores de se manterem em sincronismo após perturbações severas, como curtos-circuitos, perdas de grandes blocos de carga ou geração e alterações significativas de topologia da rede elétrica. Esses transitórios causam

oscilações de baixa frequência e possuem duração que pode variar desde a ordem de dezenas de milissegundos até dezenas de segundos [2].

Os sistemas de proteção e controle dos equipamentos exercem papel fundamental na manutenção das condições adequadas de operação e no desempenho dinâmico do SEP durante o período transitório. São responsáveis por atuar de forma a controlar as grandezas sistêmicas mantendo seus valores dentro de faixas aceitáveis evitando que os equipamentos operem em condições inapropriadas. A Figura I.1 reúne as escalas de tempos de duração dos principais transitórios elétricos e os respectivos sistemas de controle envolvidos [3].

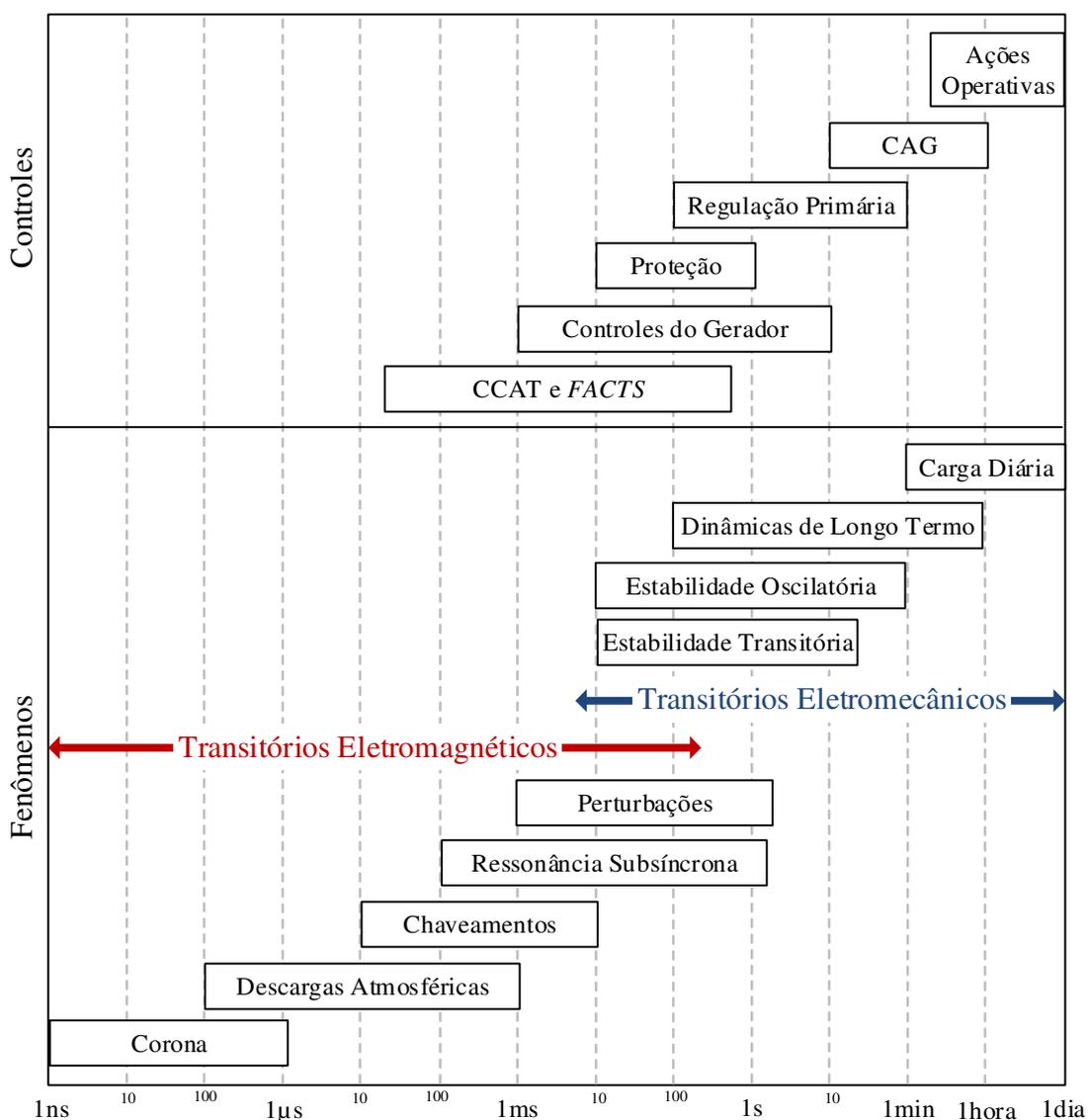


Figura I.1 – Escala de tempo dos fenômenos elétricos e controle envolvidos

A análise do período transitório é fundamental para a avaliação do nível de estresse que será imposto aos equipamentos e para o planejamento das condições de operação do SEP. As análises são realizadas por ferramentas computacionais de simulação capazes de reproduzir numericamente o comportamento dinâmico dos componentes do sistema no domínio do tempo ou da frequência.

Tradicionalmente, as simulações no domínio do tempo dos TEM e da ET são realizadas por ferramentas computacionais distintas. Esta separação é feita devido às particularidades dos modelos matemáticos dos componentes necessárias para a reprodução adequada de cada um dos fenômenos. A Tabela I.1 apresenta uma comparação das principais diferenças das características adotadas por cada uma das ferramentas de simulação.

Tabela I.1 – Características das ferramentas de simulação.

Característica	TEM	ET
Componentes	Trifásicos equilibrados ou desequilibrados	Monofásicos equilibrados
Tensões e Correntes	Formas de Onda Instantâneas	Fasores RMS
Frequência	Espectro elevado	Modos de baixa frequência
Passo de Integração	Microssegundos	Milissegundos

A reprodução adequada dos TEM requer um nível de detalhamento maior dos componentes e grandezas da rede elétrica, como tensões e correntes instantâneas, trifásicas e modelos válidos em uma faixa de frequência ampla (DC até MHz). Como são fenômenos de natureza muito rápida, é necessário que se utilizem passos de integração da ordem microssegundos. Estas características fazem com que essa classe de ferramentas tenha um custo de processamento computacional elevado, tornando ineficiente a simulação de redes elétricas complexas de grande porte. Normalmente, apenas uma pequena porção da rede elétrica de interesse é considerada e o restante do sistema é representado a partir de equivalentes.

As ferramentas computacionais de ET adotam premissas que simplificam a representação matemática do sistema de potência, como modelos de componentes monofásicos de sequência positiva na frequência fundamental e tensões e correntes

fasoriais. Como a ET é um fenômeno com dinâmica mais lenta que os TEM, os passos de integração podem ser maiores, da ordem de milissegundos. Essas características são suficientes para representação adequada desse fenômeno e possibilitam a simulação dos sistemas de potência de forma abrangente com eficiência computacional satisfatória.

A separação das ferramentas de acordo com o tipo de fenômeno estudado funciona bem para a grande maioria dos estudos. Porém, existem casos em que se pode ter uma maior fidelidade com uma representação detalhada de equipamentos sem desconsiderar a dinâmica de grande parte da rede elétrica. Esta condição ocorre na escala de tempo onde há uma sobreposição dos fenômenos e se deve principalmente à ação dos sistemas de proteção e controle dos equipamentos, conforme ilustrado na Figura I.1. Por exemplo, a análise do controle das conversoras de sistemas CCAT que dependem da representação da forma de onda e ao mesmo tempo a resposta destes controles influenciam e são influenciadas pelo desempenho dinâmico do sistema.

Uma forma de se tratar casos como estes, seria estender a utilização das ferramentas de TEM para a reprodução dos fenômenos eletromecânicos, porém mesmo com a existência de bibliotecas de modelos adaptados para utilização neste tipo de ferramenta [4], casos com número elevado de barras e componentes podem demandar um tempo de processamento proibitivo. Outra limitação é o fato de não existir uma base de dados consolidada com modelos no formato de ET para realizar análises em ferramentas de TEM. A representação dos TEM em ferramentas de ET, por sua vez, não pode ser realizada devido às premissas estabelecidas, que foram apresentadas na Tabela I.1. Uma solução para a abordagem de casos como estes é através da utilização de simulações híbridas no domínio do tempo, conforme definido a seguir.

A simulação híbrida consiste na integração de uma ferramenta computacional de TEM com uma ferramenta de ET. Nesta implementação a ferramenta de TEM contém a representação de uma pequena porção da rede elétrica com modelos de componentes detalhados e o restante do sistema de interesse é representado na ferramenta de ET. A simulação é executada simultaneamente em ambas as ferramentas com a troca regular de informação entre elas em instantes de tempo determinados. As particularidades de representação dos componentes e dos métodos de solução numérica tornam necessária a coordenação e compatibilização das informações que serão trocadas. A principal vantagem desta metodologia é incorporar as principais características de cada uma das ferramentas contornando suas restrições de utilização. Sendo assim, é possível em única

simulação preservar os transitórios rápidos com espectro de frequência estendido, mantendo as contribuições das dinâmicas mais lentas e de baixa frequência do sistema.

I.2 Motivação e Objetivo da Dissertação

O Sistema Interligado Nacional – SIN passa por um período de transformações significativas. As interligações dos sistemas Acre/Rondônia e Amapá/Manaus ao SIN, a exploração dos potenciais energéticos do Complexo do Rio Madeira e futuramente dos Complexos dos Rios Xingu, Tapajós e Teles Pires e a crescente inserção de usinas eólicas nas regiões Nordeste e Sul do país são os grandes desafios para o planejamento e operação do sistema elétrico brasileiro. A Figura I.2 apresenta as principais interligações entre subsistemas do SIN com suas respectivas tecnologias de transmissão [5] e [6].

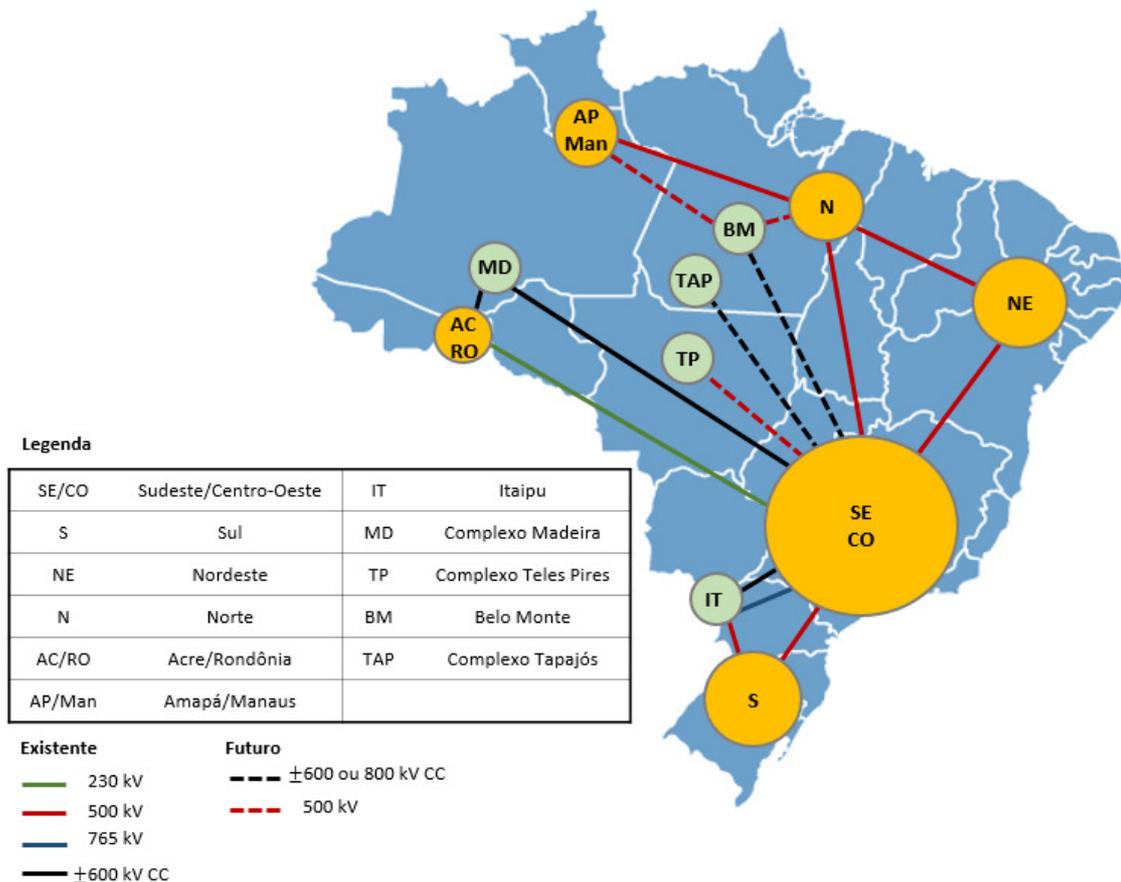


Figura I.2 – Principais Interligações entre Subsistemas do SIN

A transmissão da energia gerada pelas usinas de Itaipu e do Complexo do Rio Madeira para os centros consumidores é realizada por elos de Corrente Contínua em Alta Tensão – CCAT ou *High Voltage Direct Current* – HVDC. Esta tecnologia também será utilizada na integração das usinas do Complexo do Rio Xingu e possivelmente do Rio Tapajós (em fase de análise). Por serem troncos de transmissão que escoarão grandes blocos de energia com suas estações conversoras conectadas em pontos eletricamente próximos nos sistemas receptores, existe uma grande preocupação em relação ao funcionamento adequado destes equipamentos e dos seus sistemas de proteção e controle em diferentes condições de operação e frente a distúrbios. O desenvolvimento da simulação híbrida foi motivado pela possibilidade de contribuir com as seguintes análises:

- Avaliar os sistemas de transmissão CCAT através da representação detalhada dos equipamentos na ferramenta de TEM mantendo a representação precisa da dinâmica dos geradores e das cargas do restante do SIN na ferramenta de ET. Espera-se dessa forma, reproduzir com maior fidelidade o desempenho dos sistemas de proteção e controle, o impacto de falhas de comutação e a identificação de possíveis interações indesejadas entre diferentes estações conversoras presentes no SIN.
- Avaliar a dinâmica de parques eólicos através da representação detalhada dos aerogeradores na ferramenta de TEM considerando o restante da rede representada em uma ferramenta de ET.
- Dar suporte para as atividades e estudos elétricos realizados no simulador em escala real de tempo, o Real Time Digital Simulator – RTDS. Nessa ferramenta as simulações podem ser realizadas por longos períodos, sem um tempo de término específico, e possuem representação do sistema em espectro de frequência do eletromagnético ao eletromecânico. Este equipamento está sendo implantado no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.
- Contornar as dificuldades de transcrição de modelos para ET a partir de modelos detalhados fornecidos por fabricantes e que possuam confidencialidade de informação (engenharia proprietária). A simulação híbrida torna-se uma alternativa à utilização de modelos típicos ou simplificados nas simulações de ET.

O objetivo desta dissertação é verificar a validade das metodologias de cálculo adotadas na obtenção dos equivalentes transferidos entre as ferramentas e avaliar as características do protocolo de comunicação implementado, que é responsável por coordenar a integração entre elas. Neste trabalho serão apresentados os resultados obtidos nas simulações bem como, identificadas as possibilidades de aplicação, as possíveis restrições de utilização e necessidades de aperfeiçoamento.

A ferramenta de transitórios eletromagnéticos utilizada foi o PSCAD/EMTDC [7], por ser no formato dessa ferramenta que a maior parte dos fabricantes tem desenvolvido e disponibilizado os modelos matemáticos dos seus equipamentos. A ferramenta de estabilidade eletromecânica adotada foi o Organon [8], por possuir métodos de cálculo eficientes e ter sua manutenção evolutiva e código-fonte presentes no ONS.

I.3 Revisão Bibliográfica

Uma das primeiras proposições de integração de ferramentas de simulação de TEM e ET foi proposta em [9]. Nesse desenvolvimento um simulador de sistemas de corrente contínua fornece informações para um programa de ET convencional através da potência RMS e da tensão da barra de interface, obtida através da Transformada Rápida de Fourier – FFT e recebe informações através de um equivalente Thévenin. A barra de interface utilizada é o próprio terminal da estação conversora. O protocolo de comunicação utilizado é serial, com a execução sequencial das ferramentas. A dificuldade relatada neste desenvolvimento foi realizar a extração dos valores de tensão durante períodos transitórios, com as formas de onda distorcidas, aperiódicas e com a presença significativa de conteúdo harmônico.

Em [10], foi proposto como alternativa as dificuldades relatadas em [9] aumentar a representação da rede elétrica na ferramenta de TEM de forma a afastar a barra de interface dos terminais das estações conversores, reduzindo a presença de conteúdo harmônico e os desbalanços das formas de onda. A localização da barra de interface é realizada a partir da análise do conteúdo harmônico em regime permanente e dos desbalanços durante perturbações. Foram sugeridas diferentes formas de representar o equivalente da ferramenta de TEM no programa de ET, como através de fontes de tensão, equivalente Thévenin ou como uma carga variável. O equivalente na ferramenta de TEM foi representado através equivalente Norton na frequência fundamental. A conversão dos

dados trifásicos da ferramenta de TEM foi realizada através da metodologia de *Curve Fitting*, em alternativa ao FFT.

Em [11], foram sugeridas alterações nas propostas dos trabalhos anteriores. A primeira delas é a manutenção da representação dos sistemas CCAT em ambas as ferramentas, e utilizar a simulação híbrida apenas quando a comparação dos resultados apresentarem diferenças superiores a uma tolerância determinada. Esta estratégia foi adotada visando aumentar a eficiência computacional. A segunda proposta foi utilizar a potência de sequência positiva da frequência fundamental ao invés da potência RMS total, uma vez que essas grandezas podem ser significativamente diferentes durante transitórios. Foi relatada uma desvantagem da proposição de se expandir a representação da rede na ferramenta de TEM, uma vez que redes malhadas poderiam necessitar de mais de uma barra de interface, dificultando o cálculo dos equivalentes.

Em [12], propõe-se a utilização de um equivalente Norton dependente da frequência para transferir o comportamento da parte do sistema representada na ferramenta de ET para a ferramenta de TEM. Dessa forma é possível considerar o comportamento da rede elétrica externa para frequências elevadas. O equivalente dependente da frequência é composto por um conjunto de ramos RLC conectados em paralelo representando os pontos de ressonância da rede elétrica. O equivalente do sistema detalhado na ferramenta de ET foi implementado de duas maneiras, através de cargas variáveis ou através de injeções de corrente. Foi utilizado o protocolo de comunicação serial. Foram sugeridas duas formas de utilização, uma considerando a representação híbrida até o primeiro *swing* de oscilação e outra onde a representação híbrida é substituída pela representação convencional de ET após o primeiro *swing*.

O trabalho proposto em [13] utiliza um equivalente multiporta na frequência fundamental. Esta implementação permite a utilização em sistemas que necessitam de mais de uma barra de interface, contornando o problema apresentado em [11]. Os equivalentes utilizados são do tipo Norton e possuem além da impedância própria, impedâncias de transferência entre as barras de interface. Neste desenvolvimento o sistema de potência é representado integralmente na ferramenta de ET, com os dispositivos *FACTS* e CCAT representados por admitâncias variáveis, obtidas a partir dos valores de tensão e corrente calculadas na ferramenta de TEM.

Em [14], foi utilizado o simulador em escala real de tempo HYPERSIM [15] com modelos de componentes detalhados e utilizados equivalentes obtidos a partir de uma ferramenta de ET como alternativa à utilização de equivalentes dinâmicos. Os

equivalentes em ambas as ferramentas são representados por fontes de tensão controladas conectadas a um elemento série comum. Foram implementadas três metodologias de conversão de dados instantâneos: FFT, filtragem digital e *Curve Fitting*, sendo a última considerada mais adequada. Foi desenvolvido um algoritmo de predição para evitar possíveis atrasos no tempo devido à extração das variáveis e comunicação entre as ferramentas.

Em [16], [17], [18], [19] e [20] foram propostas a implementação de um protocolo de comunicação paralelo com objetivo de melhorar a eficiência computacional da simulação híbrida. Nesta proposição as ferramentas são executadas simultaneamente com tempos definidos para a troca de informação. A ferramenta de ET fornece um equivalente Norton composto por uma fonte de corrente em paralelo com ramos RLC com a resposta em frequência da rede. A ferramenta de TEM pode fornecer quatro formas de equivalente, fonte de tensão, fonte de corrente, impedância variável ou através de injeção de potência. Neste trabalho é mencionado a equivalência dos métodos de conversão FFT e *Curve Fitting*, sendo adotada a segunda opção. Foi proposto a verificação da qualidade das grandezas de sequência positiva extraídas durante transitórios como forma de determinação da localização da interface. Foi relatado a diferença de frequência entre as ferramentas durante períodos transitórios e sugerido um intervalo de comunicação adaptativo após perturbações, onde o intervalo de extração pode ser maior ou menor que um ciclo para extração das variáveis fasoriais.

Em [21] e [22] foram realizadas a adaptação do algoritmo de solução da ET para utilização em um simulador em escala real de tempo, o *Real Time Digital Simulator – RTDS*. Foi proposta a utilização de um equivalente multiporta dependente da frequência, possibilitando assim a redução da rede representada com modelos detalhados no RTDS. O equivalente dependente da frequência é obtido a partir do ajuste de uma função racional utilizando o método de *Vector Fitting*. O equivalente pode ser obtido a partir de dados típicos de fluxo de potência na frequência fundamental, através da conversão dos modelos de linhas de transmissão em modelos Bergeron para posterior obtenção da resposta em frequência ou a partir de modelos mais precisos caso se possuam os dados. O equivalente da ET enviado para o RTDS é uma fonte de corrente com uma matriz de impedância com a resposta em frequência da rede. O equivalente do RTDS utilizado na solução da ET é baseado na conservação de potência na barra de interface e utiliza uma fonte de corrente que injeta o mesmo montante de potência ativa e reativa calculado na ferramenta de TEM.

Em [23] e [24] são propostos uma alternativa para a representação da ferramenta de ET apresentada em [21] e [22]. Neste trabalho foi utilizado o método de geradores coerentes para reduzir os fenômenos de baixa frequência e dessa forma possibilitar a simulação de redes de grande porte no simulador em escala real de tempo. O desenvolvimento é realizado para simulação de perturbações no sistema detalhado e conta com equivalentes multiporta dependentes da frequência com as características da rede externa modelado na ferramenta de TEM e com as características de baixa frequência representadas através de fontes de corrente.

Em [25], foi proposto um método para desacoplar os programas de TEM e de ET baseado em canais de comunicação, ou *pipe* de comunicação, que são estruturas de memória que podem ser compartilhadas entre as ferramentas de simulação. Essa proposição foi realizada como uma alternativa aos desenvolvimentos anteriores que utilizam o algoritmo de solução da ET embutido na ferramenta de TEM, dificultando a utilização de ferramentas de ET complexas.

Em [26] e [30] foram propostos a resolução simultânea das equações da ferramenta de TEM e de ET através de um método de solução implícito. Este método foi implementado como uma alternativa ao problema de imprecisão provocado pela atualização dos equivalentes somente a cada passo de integração da ferramenta de ET. Também foi proposta a utilização de uma ferramenta de ET trifásica. Neste desenvolvimento a ferramenta de TEM recebe um equivalente Thévenin na frequência fundamental e envia para ferramenta de ET uma fonte de corrente com valores calculados via FFT com valores de um ciclo da forma de onda. Outra implementação adotada foi a possibilidade de uso da simulação híbrida apenas durante transitórios onde a comparação dos valores de tensão dos dois sistemas fique maior que uma tolerância determinada, dessa forma os tempos computacionais são reduzidos.

O trabalho apresentado em [27] busca estender a utilização da simulação híbrida como forma de enriquecer as análises de ET. As características de desenvolvimento são as mesmas utilizadas em [21], com equivalente do sistema da ferramenta de ET multiporta dependente da frequência e a extração dos valores da ferramenta de TEM a partir das potências ativa e reativa. Neste trabalho foi proposta uma análise de sensibilidade para avaliar o erro devido à atualização do equivalente dinâmico na ocorrência de alterações na rede da ferramenta de ET e introduzido o conceito de distância elétrica para identificar a possibilidade de se manter o equivalente dependente da frequência inalterado sem prejuízos dos resultados.

Em [28] é proposto um protocolo de comunicação iterativo entre as ferramentas de TEM e de ET. Neste protocolo um passo de integração é calculado mais de uma vez até que um teste de convergência seja satisfeito. Assim, a ferramenta de ET é simulada por um passo de integração e envia o equivalente para ferramenta de TEM que é executada até o mesmo instante de tempo e envia o seu equivalente para ferramenta de ET. O mesmo passo de integração é calculado na ferramenta de ET com o novo equivalente da ferramenta de TEM, que calculará um novo equivalente para a ferramenta de ET. O equivalente da ferramenta de ET é uma fonte de tensão e da ferramenta de TEM uma fonte de corrente. Neste trabalho é proposto um método para extração dos fasores a partir da projeção das formas de onda em eixos de referência (x,y) segunda uma transformada de Park.

I.4 Estrutura da Dissertação

Neste Capítulo foi apresentada uma introdução contextualizando a motivação e o objetivo da dissertação, bem como os principais destaques da revisão bibliográfica com os desenvolvimentos existentes no mesmo tema.

O Capítulo II descreve os transitórios eletromagnéticos e a estabilidade transitória, com suas particularidades, aplicações, e as características dos componentes e métodos de solução numérica adotados.

O Capítulo III apresenta a metodologia proposta, os conceitos e definições estabelecidos no desenvolvimento da ferramenta de simulação híbrida no domínio do tempo.

O Capítulo IV apresenta a análise dos resultados das simulações obtidos a partir da utilização da plataforma desenvolvida.

O Capítulo V apresenta as conclusões desta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

O APÊNDICE A descreve os métodos utilizados para realizar a conversão das formas de onda instantâneas em grandezas fasoriais, o *Curve Fitting* com mínimos quadrados e a Transformada Rápida de Fourier – FFT.

O APÊNDICE B fornece os dados completos dos sistemas teste utilizados na realização dos experimentos para obtenção dos resultados apresentados.

I.5 Publicação Gerada por esta Dissertação

Jardim, J. L. A.; Santos, P. H. L.; Casto, A.; Neto, C. A. S.; Barros, H. M.; Salim, K. C. O.; Santos, M. G.; Fontoura, R. N. “Simulação Híbrida – Forma de Onda e Fasorial”, XXII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, Outubro 2013

CAPÍTULO II

Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos

Este capítulo aborda os conceitos gerais dos transitórios eletromagnéticos e dos transitórios eletromecânicos, descrevendo as suas principais características, aplicações e as particularidades dos modelos de componentes e métodos de solução utilizados na simulação no domínio do tempo.

II.1 Considerações Iniciais

A utilização de ferramentas computacionais de simulação no domínio do tempo é essencial nas fases de projeto, planejamento e operação dos sistemas elétricos de potência. A reprodução dos fenômenos transitórios é realizada a partir da solução de um sistema de equações algébrico diferencial não-linear, que descreve numericamente o comportamento dinâmico dos principais equipamentos e sistemas de controle presentes no SEP. Esse sistema é composto pelas equações (II.1) e (II.2) e possui a seguinte forma [29]:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (\text{II.1})$$

$$0 = g(x, y) \quad (\text{II.2})$$

onde x representa o vetor de variáveis de estado, u o vetor de entradas, y o vetor de variáveis dependentes e t é o tempo.

Nas ferramentas de ET a rede de transmissão e as cargas estáticas são representadas por um conjunto de equações algébricas. As equações diferenciais descrevem o comportamento dinâmico dos geradores e seus reguladores, os sistemas de controle dos dispositivos *FACTS* e *CCAT* e as cargas dinâmicas. Nas ferramentas de TEM as equações do sistema são em sua grande maioria diferenciais, representando além dos geradores e sistemas de controle de equipamentos, a própria rede de transmissão do sistema. As equações algébricas representam apenas alguns circuitos resistivos [30].

II.2 Transitórios Eletromagnéticos – TEM

As ferramentas computacionais de simulação de TEM são utilizadas em diferentes tipos de análises, que vão desde a especificação das características elétricas de equipamentos até a avaliação do desempenho dinâmico dos SEP, como em estudos de coordenação de isolamento, análise do desempenho de sistemas de proteção e controle, impacto de chaveamentos de equipamentos e análise de perturbações [31].

Essa classe de ferramentas possui características que são necessárias para reprodução adequada dos transitórios, como a capacidade de descrever modelos de componentes polifásicos com valores instantâneos de tensões e correntes válidos para a faixa de frequência do fenômeno estudado, que pode variar do nível CC até dezenas de MHz, conforme apresentado na Tabela II.1 [32].

Tabela II.1 – Espectro de Frequência dos TEM

Origem	Espectro de Freqüência
Ferroressonância	0.1 Hz a 1 kHz
Rejeição de Carga	0.1 Hz a 3 kHz
Eliminação de Defeito	60 Hz a 3 kHz
Chaveamentos	60 Hz a 20 kHz
TRT – Tensão de Reestabelecimento Transitória	60 Hz a 100 kHz
Sobretensão por Descargas	10 kHz a 3 MHz
Abertura de Chaves Isoladas a Gás	100 kHz a 50 MHz
Efeito Corona na Propagação de Surto	1 MHz a 50 MHz

A representação trifásica dos componentes do SEP permite a análise das interações entre suas fases, a análise de desbalanços da rede, a reprodução de eventos assimétricos e a consideração de equipamentos baseados em eletrônica de potência no nível dos dispositivos semicondutores. A utilização dos valores instantâneos das tensões e correntes possibilita a reprodução das distorções das formas de onda durante transitórios e consequentemente o cálculo das distorções harmônicas na rede elétrica.

II.2.1 Modelos Matemáticos de Componentes para TEM

O tipo de fenômeno eletromagnético a ser analisado define as características dos modelos matemáticos de componentes utilizados nas simulações. A Tabela II.2 apresenta um resumo de algumas características generalizadas que devem ser consideradas nos modelos de linhas de transmissão, transformadores e geradores de acordo com a faixa de frequência em que o transitório se manifesta [33].

Tabela II.2 – Características gerais dos modelos em função da frequência.

Frequência	Linhas de Transmissão	Transformador	Gerador Síncrono
0.1 Hz a 3 kHz	Modelo π polifásico com parâmetros concentrados dependentes da frequência.	Representação dos efeitos da saturação, perdas no núcleo e nos enrolamentos.	Representação das partes elétricas e mecânicas, com efeito da saturação e ação dos controladores.
50 Hz a 20 kHz	Modelo polifásico com parâmetros distribuídos dependentes da frequência.	Representação dos efeitos da saturação, perdas no núcleo e nos enrolamentos.	Fonte em série com a impedância subtransitória do gerador síncrono
10 kHz a 3 MHz	Modelo polifásico com parâmetros distribuídos dependentes da frequência.	Representação do acoplamento capacitivo entre as fases	Circuito linear com a resposta em frequência vista dos terminais do gerador síncrono
100 kHz a 50 MHz	Modelo monofásico com parâmetros distribuídos dependentes da frequência.	Representação do acoplamento capacitivo e da impedância característica entre as fases	Representação através de um circuito linear capacitivo sem perdas

As ferramentas de TEM viabilizam a representação dos sistemas de transmissão CCAT com modelos extremamente detalhados, no nível dos dispositivos semicondutores e com toda a hierarquia dos sistemas de proteção e controle. A estação conversora frequentemente utilizada nos SEP é baseada na Ponte de Grätz com configuração de doze pulsos, que proporciona melhor utilização dos transformadores conversores, menor tensão reversa sobre os tiristores e menor distorção harmônica [34], conforme apresentado na Figura II.1.

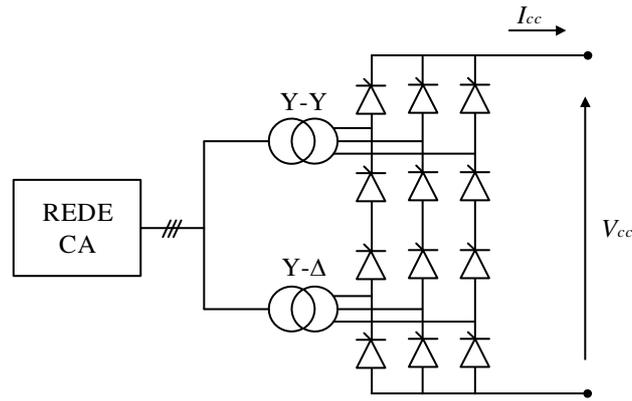


Figura II.1 – Sistema CCAT bipolar com pontes de doze pulsos.

Este modelo é utilizado nas diferentes configurações possíveis para transmissão CCAT como *back-to-back*, monopolar e bipolar e permite a reprodução das distorções das formas de onda da rede elétrica provocadas pelos chaveamentos das válvulas, a análise do fenômeno de falhas de comutação e a determinação das contribuições harmônicas.

Os sistemas de controle dos sistemas CCAT podem ser representados integralmente, com todos os seus níveis hierárquicos, considerando desde o Controle de Bipólo ao Controle da Conversora, responsável por coordenar o disparo dos dispositivos semicondutores, conforme ilustrado no diagrama da Figura II.2.

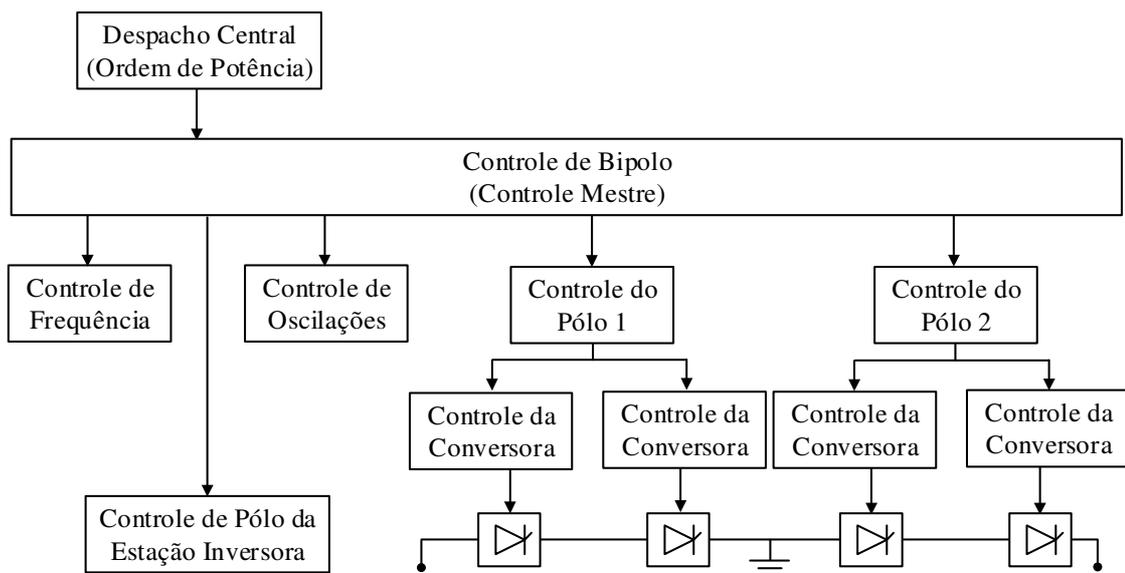


Figura II.2 – Diagrama com característica do sistema de controle CCAT

O Controle de Bipólo é responsável por determinar a ordem de corrente do sistema CCAT para atender a ordem de potência estabelecida. Este sistema pode conter ações de controle de frequência, realizado através da modificação da ordem de potência sistema e ações de controle de amortecimento de oscilações, estabelecido através da modulação da potência transmitida. O Controle de Pólo têm como objetivo controlar o ângulo de disparo das estações conversoras de forma a garantir que a corrente CC estipulada pelo Controle de Bipólo seja atendida. O Controle da Conversora é responsável por coordenar os pulsos de disparo para as válvulas [35].

A representação das formas de onda instantâneas viabiliza o cálculo das distorções harmônicas na rede CA e CC geradas pelo chaveamento dos dispositivos semicondutores das estações conversoras. Os harmônicos característicos são provenientes da operação normal em condições ideais. Os harmônicos não característicos são provenientes de desequilíbrios da tensão CA, diferenças entre os transformadores conversores e assimetrias nos instantes de disparo. Os componentes harmônicos mais significativos gerados pelo sistema CCAT na configuração bipolar com pontes de 12 pulsos encontram-se na Tabela II.3 [36], [37].

Tabela II.3 – Harmônicos do sistema CCAT bipolar com pontes de 12 pulsos

Harmônicos	Rede CA	Rede CC
Característicos	$n = 12k \pm 1$ $k = 1,2,3, \dots$	$n = 12k$ $k = 1,2,3, \dots$
Desequilíbrios e distorções da tensão CA	3°	2°
Diferenças entre os transformadores Y-Y e Y-Δ	5° e 7°	6°
Diferenças entre as fases de cada transformador	Todos os ímpares	Todos os pares
Assimetria nos instantes de disparos	Todas as ordens	Todas as ordens

As falhas de comutação são distúrbios com impacto significativo nos sistemas CCAT. Provocam estresse nas válvulas, reestabelecimento lento das condições de operação do elo após perturbações e a interrupção da potência transmitida. Essas condições tornam-se mais críticas em sistemas com estações inversoras conectadas em pontos eletricamente próximos, onde devem ser realizadas análises cuidadosas do impacto nas diferentes conversoras e as interações entre os respectivos sistemas de

controle. As falhas de comutação ocorrem quando a passagem da condução de corrente entre válvulas da estação conversora para o estado de bloqueio não ocorre adequadamente. Para uma comutação correta, as válvulas devem permanecer por um período mínimo com polarização negativa para dissipar as cargas armazenadas durante a condução e reestabelecer a capacidade de bloqueio com polarização direta. Este período é definido pelo ângulo de extinção mínimo e caso a válvula seja submetida a uma tensão direta em um período inferior ela irá conduzir mesmo sem o pulso de disparo. Por operar com ângulos de disparo elevados e ângulos de extinção reduzidos, ocorrem principalmente no terminal inversor devido a afundamentos de tensão na rede CA e aumento significativo da corrente CC.

II.2.2 Método de Solução Numérica

O método de solução numérica comumente adotado pelas ferramentas computacionais de TEM é baseado no algoritmo de Dommel que utiliza a regra de integração trapezoidal combinada com o Método de Bergeron ou Método das Características para representar as equações da rede elétrica com componentes monofásicos ou polifásicos com parâmetros concentrados e/ou distribuídos no domínio do tempo [38], [39]. As equações diferenciais dos componentes lineares são convertidas em equações algébricas utilizando o método de integração trapezoidal. Os componentes passam a ser representados por uma condutância constante em paralelo com uma fonte de corrente com valores históricos, conforme pode ser visto na Figura II.3.

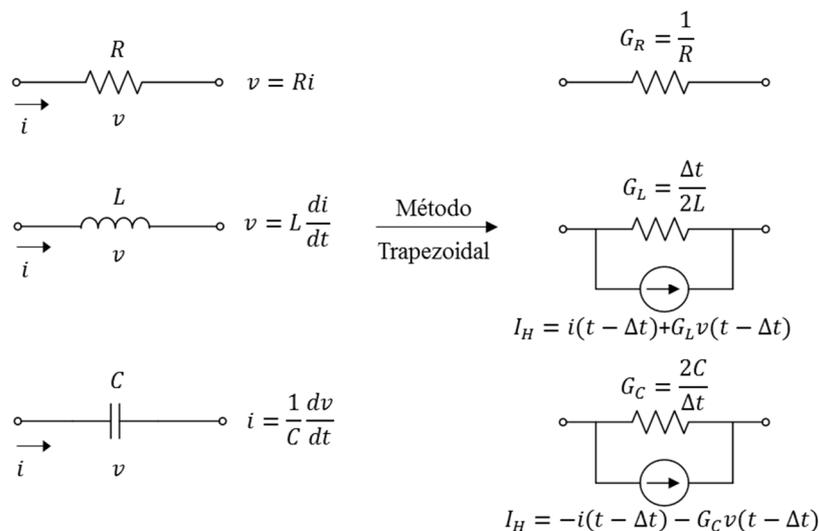


Figura II.3 – Conversão das equações diferenciais em equações algébricas

Após a aplicação do método trapezoidal, o equacionamento dos elementos da rede elétrica é baseado na formulação nodal, conforme (II.3):

$$[G][v(t)] = [i(t)] + [I_{HIST}] \quad (II.3)$$

onde, $[G]$ representa a matriz de condutância, $[v(t)]$ o vetor de tensões nodais no instante t , $[i(t)]$ o vetor de correntes nodais instante t e $[I_{HIST}]$ representa o vetor com os termos passados das correntes nodais.

Os geradores, elementos de controle e outros equipamentos são representados através de suas equações de estado que podem ser resolvidas simultaneamente com as equações da rede ou utilizando um método alternado [40].

II.3 Estabilidade Transitória – ET

A estabilidade de sistemas de potência é definida como a capacidade do sistema, para um determinado ponto de operação inicial, retornar a um estado de equilíbrio seguro com a maioria das variáveis do sistema dentro de valores aceitáveis após ser submetido a uma perturbação [41]. A estabilidade é um problema único, mas pode ser dividida e classificada de acordo a magnitude da perturbação, com a natureza física da instabilidade resultante ou com o intervalo de tempo a ser considerado na avaliação do fenômeno [42], conforme ilustrado no fluxograma da Figura II.4.

A Estabilidade de Frequência é definida como a habilidade do sistema de potência de se manter operando com a frequência dentro de uma faixa normal após ser submetido a perturbações. Nesse caso a instabilidade está ligada a desequilíbrios entre a carga e a geração. A Estabilidade de Tensão consiste da capacidade do sistema em manter a tensão dos barramentos com valores aceitáveis após perturbações. A instabilidade de tensão está associada a incapacidade de suprir a demanda de potência reativa. A Estabilidade Transitória – ET é a capacidade do sistema de potência de se manter em sincronismo após ser submetido a perturbações severas como curtos-circuitos, alterações significativas de topologia ou perda de grandes blocos de carga ou geração resultando em amplas excursões angulares dos rotores das unidades geradoras. Em sistemas de grande porte, a instabilidade transitória ocorre por desbalanços dos torques do gerador, provocando a aceleração/desaceleração do rotor com aberturas angulares crescentes devido à falta de

torque sincronizante ou por oscilações crescentes do rotor causadas pela insuficiência de amortecimento entre as unidades geradoras.

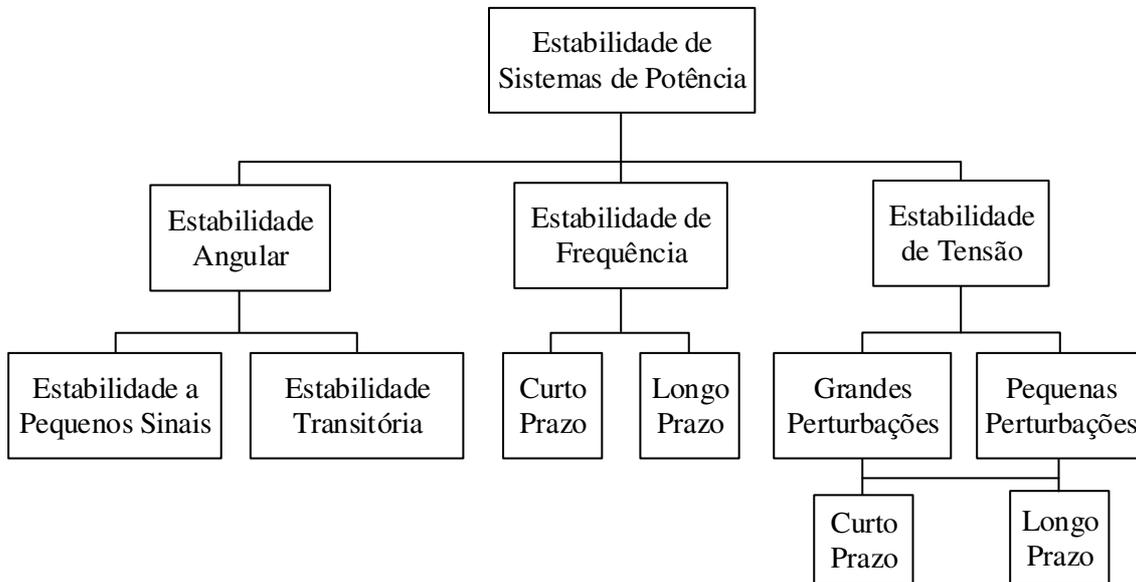


Figura II.4 – Classificação da estabilidade de sistemas de potência

As ferramentas computacionais de simulação de ET possuem a capacidade de reproduzir os fenômenos de curto prazo para grandes perturbações e são utilizadas em diferentes tipos de estudos como a proposição de ampliações e reforços para expansão da rede elétrica, definição dos limites de intercâmbio, energização de equipamentos, análise e definição de ajuste de proteções, otimização de controladores e análise de perturbações [43].

Essa classe de ferramentas adota premissas que permitem representar sistemas de grande porte com eficiência computacional satisfatória. Considera-se a rede de transmissão de alta tensão equilibrada, possibilitando a utilização de modelos monofásicos equilibrados de sequência positiva da frequência fundamental. Por envolver massas girantes de grande porte as oscilações das grandezas são de baixa frequência [44], como pode ser visto na Tabela II.4.

Tabela II.4 – Espectro de frequência das oscilações eletromecânicas

Origem	Espectro de Frequência		
Entre Áreas	0.1 Hz	a	1.0 Hz
Local	1.0 Hz	a	2.0 Hz
Intraplanta	2.0 Hz	a	3.0 Hz

As oscilações de baixa frequência, em torno da frequência nominal, possibilitam a representação das tensões e correntes através de grandezas fasoriais, transformando as relações trigonométricas em equações algébricas complexas, conforme ilustrado na Figura II.5.

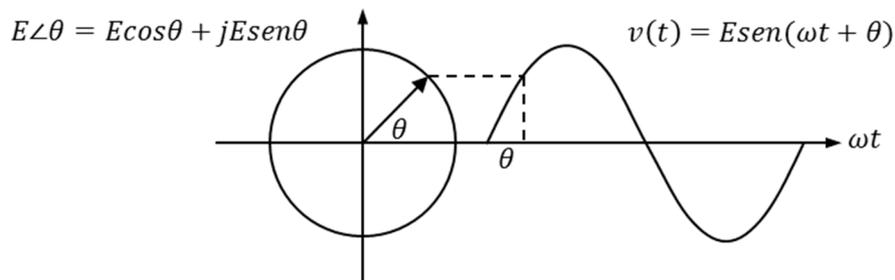


Figura II.5 – Relação entre forma de onda e fasor

Como as oscilações eletromecânicas são fenômenos de dinâmica mais lenta considera-se a rede de transmissão com parâmetros concentrados, invariantes com a frequência e algébrica. Como as constantes de tempo dos controles envolvidos são maiores que as dos transitórios eletromagnéticos é possível utilizar passos de integração de ordem mais elevada, da ordem de milissegundos, fazendo com que as simulações demandem menor esforço computacional.

II.3.1 Modelos Matemáticos de Componentes para ET

Os transformadores e linhas de transmissão são representados nas ferramentas de ET por modelos π -equivalente com parâmetros concentrados, invariantes com a frequência, como pode ser visto na Figura II.6 e Figura II.7.

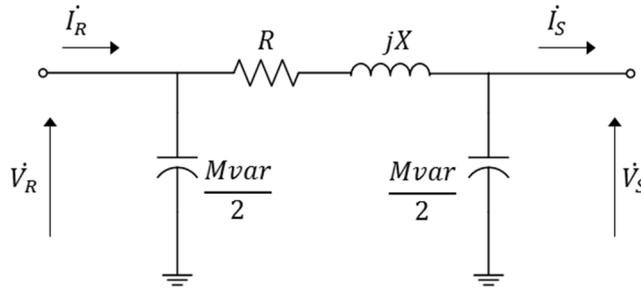


Figura II.6 – Modelo π de linha de transmissão para ET

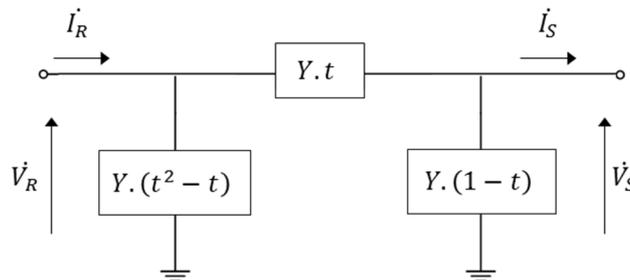


Figura II.7 – Modelo π do transformador com tape 1:t para ET

As cargas do sistema são representadas por modelos com potência constante, corrente constante, impedância constante ou por uma composição com parcelas de cada um dos tipos. Os valores da potência ativa e reativa da carga estão relacionados com a tensão do sistema de acordo com as equações (II.4) à (II.7),

$$P = (p_z \cdot V^2 + p_i \cdot V + p_p) \cdot P_{nominal} \quad (II.4)$$

$$p_z + p_i + p_p = 1 \quad (II.5)$$

onde P é a potência ativa efetiva da carga, $P_{nominal}$ a potência ativa nominal da carga, p_z a parcela da carga ativa representada como impedância constante, p_i a parcela da carga ativa representada como corrente constante e p_p a parcela da carga ativa representada como potência constante.

$$Q = (q_z \cdot V^2 + q_i \cdot V + q_p) \cdot Q_{nominal} \quad (II.6)$$

$$q_z + q_i + q_p = 1 \quad (II.7)$$

onde Q é a potência reativa efetiva da carga, $Q_{nominal}$ a potência reativa nominal da carga, q_z a parcela da carga reativa representada como impedância constante, q_i a parcela da

carga reativa representada como corrente constante e q_p a parcela da carga reativa representada como potência constante.

A representação dos sistemas de transmissão convencionais é realizada através da matriz de admitâncias nodal, conforme pode ser visto em (II.8),

$$\begin{bmatrix} I_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_a + Y_{lg} & Y_b \\ Y_c & Y_d + Y_{ll} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_g \\ V_l \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

onde I_g é o vetor de injeções de correntes nos terminais dos geradores, V_g é o vetor das tensões terminais dos geradores, V_l é o vetor de tensões nas barras de carga do sistema, Y_a é a submatriz de admitâncias para as barras de geração, Y_b e Y_c são as submatrizes de admitâncias de conexão das barras de geração e carga, Y_d é a submatriz de admitância para as barras de carga do sistema e Y_{lg} e Y_{ll} são as matrizes diagonais que correspondem às admitâncias das cargas do sistema e que são adicionadas às submatrizes das barras de geração e de carga.

Os geradores são representados por um conjunto de equações algébricas descrevem as características elétricas do estator e as interações com a rede elétrica e um conjunto de equações diferenciais que descrevem as características eletromecânicas do rotor e dos seus reguladores, conforme apresentado na Figura II.8.

A equação de oscilação dos rotores (II.9) é a principal responsável por definir o comportamento eletromecânico dos geradores e do sistema elétrico de potência,

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e) \quad (\text{II.9})$$

onde δ é o ângulo de rotor do gerador, ω é a velocidade de rotação do gerador, H é a constante de inércia do gerador, T_m é o torque mecânico do gerador, T_e é o torque elétrico do gerador e t é o tempo.

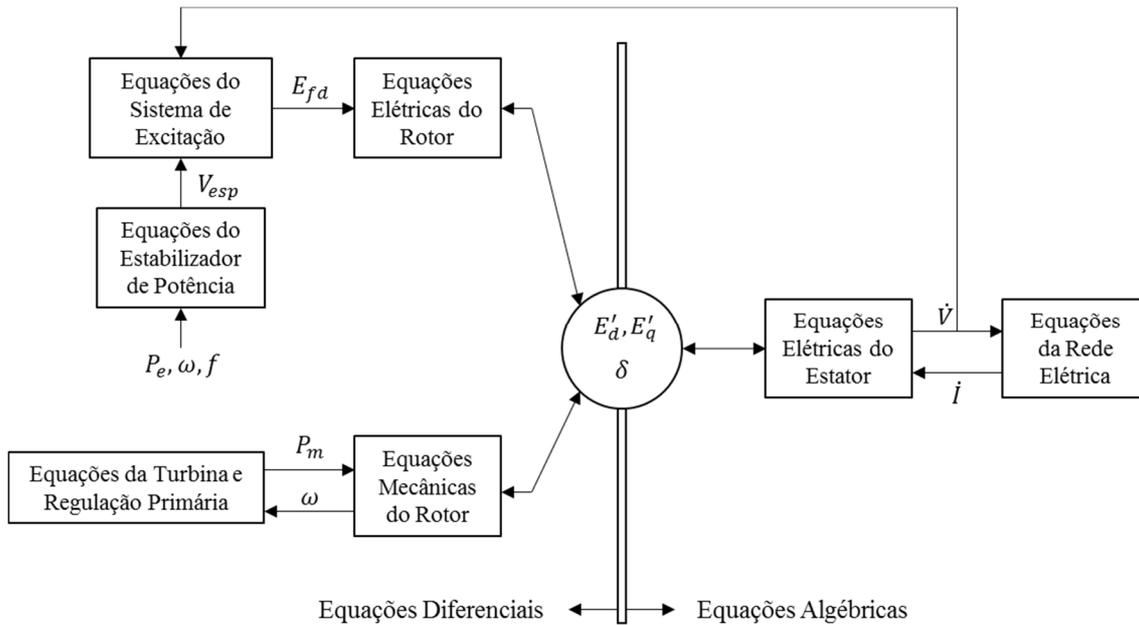


Figura II.8 – Modelo do gerador síncrono para ET

O torque mecânico é fornecido por uma fonte primária de energia que corresponde à turbina do gerador e é controlado pela ação dos reguladores de velocidade. O torque elétrico está associado à potência elétrica do gerador, que pode ser calculada conforme a equação (II.10) obtida a partir da Transformação de Park,

$$P = \frac{3}{2} \left[\left(i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} + 2i_0 \frac{d\psi_0}{dt} \right) + (i_q \omega_r \psi_d - i_d \omega_r \psi_q) - r(i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2) \right] \quad (\text{II.10})$$

onde ψ_d, ψ_q e ψ_0 são os enlaces de fluxo da armadura em componentes $d, q, 0$. As correntes de armadura em componentes $d, q, 0$ são representadas por i_d, i_q e i_0 . r é a resistência elétrica do estator, ω_r é a velocidade angular do gerador e $d, q, 0$ é a conversão que proporciona um eixo de referência fixo para as variáveis da máquina, mas que gira à frequência síncrona do sistema.

O primeiro termo da equação (II.10) corresponde à variação da energia magnética da armadura, o segundo, à transferência de potência através do entreferro e o terceiro, às perdas devido à resistência elétrica da armadura. Essas condições variam de acordo com o modelo de máquina síncrona utilizado e os sistemas de controle associados.

A representação dos sistemas de transmissão CCAT nas ferramentas de ET possuem simplificações em relação aos modelos utilizados nas ferramentas de TEM. As estações conversoras são representadas por equivalentes monofásicos, devido as características da

ferramenta de ET que considera apenas modelos baseados na sequência positiva. A Figura II.9 apresenta o modelo das estações conversoras.

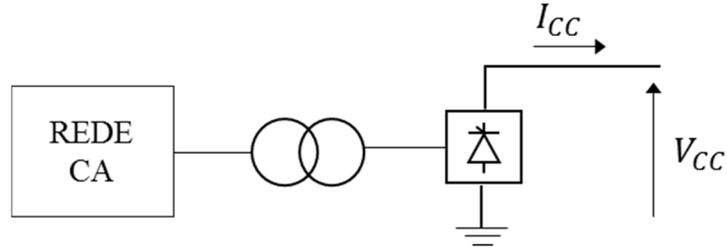


Figura II.9 – Sistemas CCAT para ET

O seu comportamento é descrito a partir de um conjunto de equações algébricas que relacionam as grandezas da rede CA com as grandezas da rede CC. As equações das estações retificadoras estão apresentadas em (II.11) e (II.12),

$$V_{cc_r} = V_{co_r} \cos \alpha_r - \frac{3}{\pi} X_{c_r} I_{cc} \quad (\text{II.11})$$

$$V_{co_r} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_{c_r} T_{ap_r} E_r \quad (\text{II.12})$$

onde V_{cc_r} é a tensão CC do retificador, I_{cc} é a corrente CC, α_r é o ângulo de disparo do retificador, N_{c_r} é o número de pontes conversoras conectadas em série, T_{ap_r} indica o tap do transformador retificador, E_r é a tensão CA do transformador retificador e X_{c_r} é a reatância de comutação do retificador.

As potências ativa e reativa transmitidas pelas estações retificadoras são determinadas a partir das equações (II.13) à (II.15),

$$P_r = V_{cc_r} I_{cc} \quad (\text{II.13})$$

$$Q_r = P_r \tan \phi_r \quad (\text{II.14})$$

$$\cos \phi_r = \cos \alpha_r - \frac{3X_{c_r} I_{cc}}{\pi V_{co_r}} \quad (\text{II.15})$$

onde P_r é a potência ativa do retificador, Q_r é a potência reativa e ϕ_r é o ângulo do fator de potência.

As grandezas da estação inversora são determinadas a partir das equações algébricas (II.16) e (II.17),

$$V_{cc_i} = V_{co_i} \cos \gamma_i - \frac{3}{\pi} X_{c_i} I_{cc} \quad (\text{II.16})$$

$$V_{co_i} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} N_{c_i} T_{ap_i} E_i \quad (\text{II.17})$$

onde V_{cc_i} é a tensão CC do inversor, I_{cc} é a corrente CC, γ_i é o ângulo de extinção do inversor, N_{c_i} é o número de pontes conversoras conectadas em série, T_{ap_i} é o tap do transformador inversor, E_i é a tensão CA do transformador inversor e X_{c_i} é a reatância de comutação do inversor.

As potências ativa e reativa das estações inversoras são determinadas a partir das equações (II.18) à (II.20),

$$P_i = -V d_i I_d \quad (\text{II.18})$$

$$Q_i = -P_i \tan \phi_i \quad (\text{II.19})$$

$$\cos \phi_i = \cos \gamma_i - \frac{3X_{c_i} I_{cc}}{\pi V_{co_i}} \quad (\text{II.20})$$

onde P_i é a potência ativa do inversor, Q_i é a potência reativa do inversor e ϕ_i é o ângulo do fator de potência do inversor.

O sistema de transmissão em corrente contínua é representado através de elementos com parâmetros concentrados, conforme a Figura II.10.

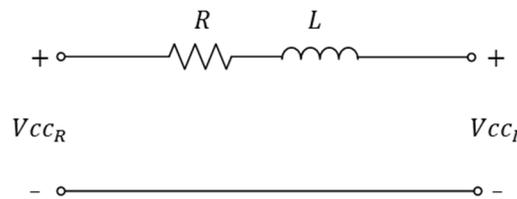


Figura II.10 – Linha de transmissão CC

O comportamento da linha CC é definido pela equação diferencial (II.21),

$$I_{cc} = -\frac{1}{L} (R_l + R_{c_r} + R_{c_i}) I_{cc} + V_{co_r} \cos \alpha_r + V_{co_i} \cos \gamma_i \quad (\text{II.21})$$

onde R_l é a resistência da linha CC, L é indutância da linha CC, R_{c_r} é a resistência do terminal retificador e R_{c_i} é a resistência do terminal inversor.

Como a representação das estações conversoras é monofásica, não é possível representar o chaveamento dos dispositivos semicondutores, a análise dos efeitos de desequilíbrios no sistema e o cálculo das distorções harmônicas.

A reprodução das falhas de comutação é realizada de forma simplificada, a partir do cálculo do ângulo de extinção ou definida de forma forçada pelo usuário para ocorrer por um instante de tempo definido. Na primeira condição, caso o valor calculado do ângulo de extinção seja inferior a um valor de referência pré-definido ou as condições do sistema resultarem em valores que não seja possível calcular um valor de ângulo de extinção positivo que satisfaça a equação (II.22) é caracterizada a falha de comutação,

$$\alpha + \mu + \gamma = 180^\circ \quad (\text{II.22})$$

onde α é o ângulo de disparo, μ é o ângulo de comutação e γ representa o ângulo de extinção.

Com a detecção das condições de falha de comutação a injeção de potência ativa e reativa e a tensão CC das estações conversoras são levadas para zero por um instante de tempo definido pelo usuário. Normalmente considera-se o tempo correspondente a um ciclo da forma de onda da frequência fundamental (aproximadamente 16,7 ms).

Os sistemas de controle podem ser representados com bom nível de detalhe, porém não podem ser representados com todos os níveis hierárquicos. São considerados o Controle de Bipólo e o Controle de Pólo que são os principais responsáveis pelo comportamento dinâmico dos sistemas CCAT. Os controles das estações conversoras não são possíveis de ser representados, uma vez que não há representação explícita das pontes de tiristores.

II.3.2 Métodos de Solução Numérica

Nas ferramentas de ET a solução do conjunto de equações (II.1) e (II.2) que descrevem o comportamento do SEP pode ser realizada por diferentes métodos de integração numérica. A ferramenta de ET utilizada no desenvolvimento da plataforma de simulação híbrida adota um método de integração numérica simultâneo, onde as equações algébricas e diferenciais são resolvidas em conjunto, com passo de integração e ordem

variáveis. O passo de integração variável proporciona mais precisão, robustez e desempenho computacional nas simulações realizadas.

O método utilizado é uma combinação dos métodos “*Linear Multistep - LM*” do tipo “Adams-Bashforth-Moulton – ABM” - e “*Backward Differentiation Formulae – BDF*”. A fórmula genérica para os métodos integração numérica do tipo LM é descrita pela equação (II.23) [45],

$$\sum_{i=0}^j \alpha_i y_{n+1} = h \sum_{i=0}^j \beta_i f_{n+1} \quad (\text{II.23})$$

onde α e β são parâmetros que dependem do método de integração adotado, j é o número de passos do método de integração e h representa o passo de integração.

A aplicação do método de integração numérica nas equações (II.1) e (II.2) com a escolha adequada dos parâmetros acima resulta em um sistema de equações algébricas descritos por (II.23) e (II.24),

$$0 = y_n - \beta_n h f(y_n, x_n) - C \quad (\text{II.24})$$

$$0 = g(y_n, x_n) \quad (\text{II.25})$$

onde n é o índice do instante de tempo atual e C é a soma ponderada dos valores da função y e de sua derivada em instantes de tempo anteriores.

O sistema de equações algébricas obtido a partir do método de integração numérica é solucionado a cada passo através do método iterativo de Newton-Raphson.

CAPÍTULO III

Simulação Híbrida no Domínio do Tempo

Neste capítulo será descrita a metodologia adotada no desenvolvimento da simulação híbrida, com suas características e os termos e as definições consolidadas na literatura.

III.1 Considerações Iniciais

A simulação híbrida no domínio do tempo consiste na integração de uma ferramenta de Transitórios Eletromagnéticos – TEM com uma ferramenta de Estabilidade Transitória – ET no nível de solução da rede elétrica. Neste desenvolvimento o SEP é dividido em dois subsistemas com cada um sendo representado em uma das ferramentas. A execução é realizada simultaneamente com a troca regular de informações entre elas em instantes de tempo pré-determinados. O objetivo desta metodologia é aliar as principais vantagens de cada uma das ferramentas, permitindo a utilização de modelos detalhados de elos de corrente contínua, dispositivos *FACTS (Flexible AC Transmission Systems)* e geradores eólicos da simulação eletromagnética, considerando, entretanto, a contribuição da dinâmica dos geradores e cargas das redes elétricas de grande porte da simulação eletromecânica.

A parte do sistema de potência que possui modelos de componentes com representação detalhada, como forma de onda trifásica e espectro de frequência amplo é descrita na ferramenta de TEM. Geralmente, considera-se apenas uma pequena parte da rede elétrica neste subsistema, que é denominado de *Sistema Detalhado ou Sistema Interno*. Os demais componentes que normalmente correspondem à maior parte do sistema são representados na ferramenta de ET utilizando modelos fasoriais de sequência positiva na frequência fundamental. Este subsistema é denominado de *Sistema Externo*.

As informações são transferidas entre os sistemas através da *Barra de Interface* que está presente em ambos subsistemas e representa a fronteira entre o sistema externo e o sistema detalhado. A Figura III.1 ilustra o objetivo principal de utilização da simulação híbrida.

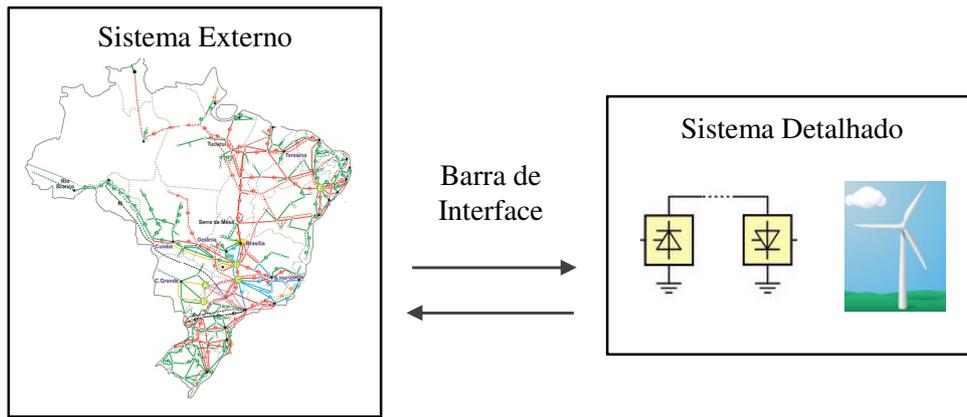


Figura III.1– Objetivo principal da simulação híbrida

As diferenças dos tempos de processamento computacional e dos métodos de solução numérica, que utilizam passos de integração de ordem distinta, exige que as trocas de informações na barra de interface sejam coordenadas para que ocorram nos instantes de tempo adequados. Esta coordenação é realizada pelo *Protocolo de Comunicação*.

As informações de cada subsistema são transferidas de uma ferramenta para a outra através de equivalentes. A ferramenta de ET provê informações para atualizar o sistema detalhado através de um *Equivalente do Sistema Externo*, enquanto a ferramenta de TEM provê informações para atualizar o sistema externo através de um *Equivalente do Sistema Detalhado*. Como a ferramenta de ET utiliza modelos fasoriais de sequência positiva na frequência fundamental e a ferramenta de TEM é baseada na forma de onda trifásica instantânea, as grandezas dos equivalentes precisam ser compatibilizadas para viabilizar a integração. Essa compatibilização, pode ser melhor compreendida pelo diagrama apresentado nas Figura III.2.

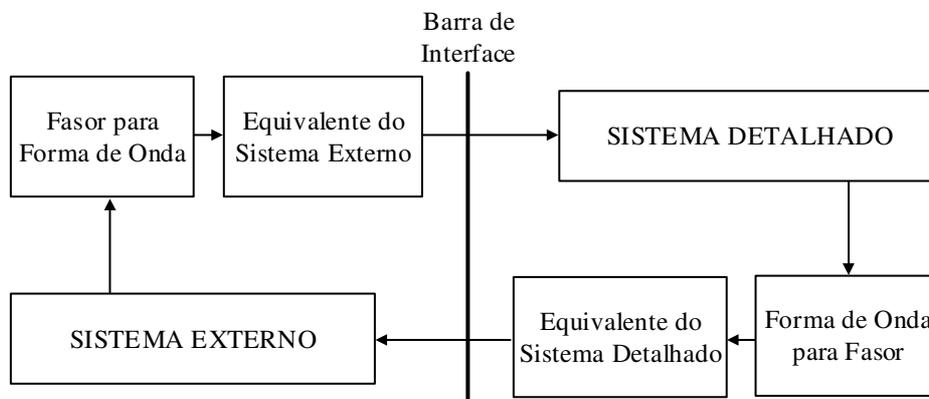


Figura III.2 – Interface entre os sistemas detalhado e externo

Nas seções seguintes serão descritas as formas de cálculo do equivalente do sistema detalhado e do equivalente do sistema externo, além da metodologia adotada no protocolo de comunicação.

III.2 Equivalente do Sistema Detalhado

Na literatura existem diferentes propostas para se transferir as características do sistema detalhado para o sistema externo, através de equivalentes Thévenin, Norton, cargas variáveis e impedâncias variáveis. No desenvolvimento realizado, as informações do sistema detalhado são transferidas para o sistema externo através de uma fonte de corrente, conforme apresentado na Figura III.3.

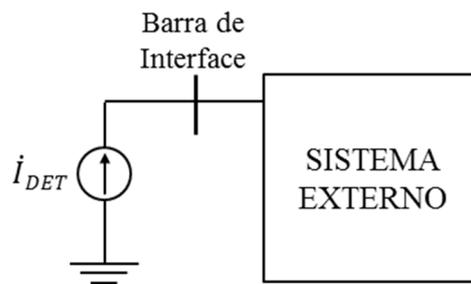


Figura III.3 – Equivalente do sistema detalhado

A corrente da fonte é a própria corrente do circuito que liga o sistema detalhado à barra de interface, porém a utilização direta dos seus valores pode não apresentar bons resultados devido possibilidade de presença de níveis CC durante transitórios [16]. A solução adotada foi utilizar a potência aparente de sequência positiva da frequência fundamental injetada na barra de interface, uma vez que esta grandeza contém as informações tanto de tensão como de corrente. Ressalta-se a importância de se utilizar a potência de sequência positiva de forma a se manter o balanço de potência com a ferramenta de ET. A potência RMS total pode apresentar diferenças na presença de componentes harmônicas [11].

O cálculo da potência aparente é realizado utilizando os fasores de tensão e corrente de sequência positiva na frequência fundamental, obtidos a partir da conversão dos valores trifásicos instantâneos da barra de interface, de acordo com a equação (III.1),

$$\dot{S}_{DET} = \dot{V}_{DET} \dot{I}_{DET}^* \quad (III.1)$$

onde \dot{S}_{DET} é a potência aparente de sequência positiva da frequência fundamental injetada na barra de interface do sistema detalhado, \dot{V}_{DET} é o fasor de tensão de sequência positiva da frequência fundamental obtido a partir das formas de onda trifásicas e \dot{I}_{DET}^* é o conjugado do fasor de corrente de sequência positiva da frequência fundamental obtido a partir das formas de onda trifásicas.

A corrente do equivalente do sistema detalhado é obtida a partir da divisão da potência aparente pela tensão da barra de interface do sistema externo, conforme a equação (III.2).

$$\dot{I}_{EQD} = \frac{\dot{S}_{DET}}{\dot{V}_{EXT}} \quad (III.2)$$

onde \dot{I}_{EQD} é o fasor da fonte de corrente do equivalente do sistema detalhado, \dot{S}_{DET} é a potência aparente de sequência positiva da frequência fundamental injetada na barra de interface e \dot{V}_{EXT} é o fasor de tensão da barra de interface do sistema externo.

Após o cálculo da corrente da fonte o equivalente do sistema detalhado é enviado para o sistema externo e inserido como um componente na simulação eletromecânica.

III.2.1 Conversão de Forma de Onda para Fasor

A integração das ferramentas requer que os valores trifásicos instantâneos sejam convertidos em grandezas fasoriais de sequência positiva. Neste desenvolvimento foram avaliados dois métodos, o *Curve Fitting* utilizando mínimos quadrados e a Transformada Rápida de Fourier – FFT, descritos brevemente a seguir e com maiores detalhes no APÊNDICE A.

O *Curve Fitting* determina as características do sinal senoidal que melhor se ajusta a um sinal medido qualquer. Este método baseia-se na tentativa de minimização do erro quadrático obtido da comparação do sinal medido em relação a um sinal de referência, de acordo com as equações (III.3) e (III.4),

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 0 \quad (III.3)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \{x_i - y_i\}^2 \quad (\text{III.4})$$

onde E é o erro quadrático em relação ao sinal de referência, x é o sinal de referência na frequência fundamental, x_i são os valores discretos do sinal de referência, y_i são os valores discretos do sinal distorcido e n é o número de pontos do vetor do sinal medido.

Este método é aplicado para as tensões e correntes das fases A, B e C da barra de interface e retorna os valores de amplitude e defasagem angular da forma de onda da frequência fundamental, que serão utilizados no cálculo dos fasores. Os valores de sequência positiva são obtidos pelo método de componentes simétricas a partir dos fasores das fases A, B e C, de acordo com as equações (III.5) a (III.9),

$$[\dot{V}_{012}] = [T]^{-1}[\dot{V}_{abc}] \quad (\text{III.5})$$

$$[\dot{I}_{012}] = [T]^{-1}[\dot{I}_{abc}] \quad (\text{III.6})$$

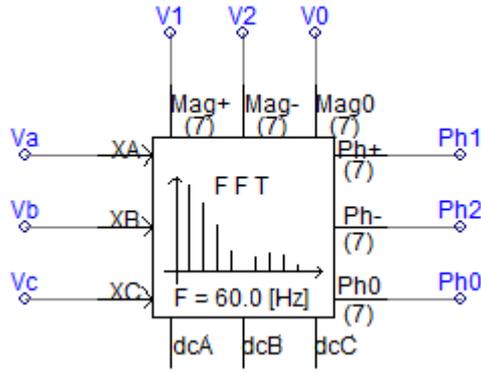
$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix}; a = 1 \angle 120^\circ \quad (\text{III.7})$$

$$\dot{V}_1 = \frac{1}{3}(\dot{V}_a + \dot{a} \cdot \dot{V}_b + \dot{a}^2 \cdot \dot{V}_c) \quad (\text{III.8})$$

$$\dot{I}_1 = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{a} \cdot \dot{I}_b + \dot{a}^2 \cdot \dot{I}_c) \quad (\text{III.9})$$

onde $[\dot{V}_{012}]$ é o vetor com os fasores de tensão de sequência zero, positiva e negativa, $[\dot{V}_{abc}]$ é o vetor com os fasores de tensão das fases A, B e C e $[T]$ é a matriz de transformação.

Os fasores de sequência positiva também podem ser obtidos a partir da Transformada Rápida de Fourier – FFT, que retorna os valores de amplitude e defasagem angular da frequência fundamental e seus harmônicos. O cálculo da FFT é realizado através de um componente disponível na ferramenta de TEM utilizada, conforme Figura III.4. Os detalhes sobre este método encontram-se no APÊNDICE A.



Legenda:

V_a, V_b, V_c : Grandezas instantâneas;

V_1, V_2, V_0 : Magnitude dos fasores de sequência positiva, negativa e zero;

Ph_1, Ph_2, Ph_0 : Fase dos fasores de sequência positiva, negativa e zero.

Figura III.4 – Componente para realização da FFT

Os valores de tensão e correntes instantâneos das fases A, B e C são utilizados como entrada do componente e as saídas são os módulos e ângulos de fase dos fasores de sequência da frequência fundamental e seus harmônicos.

Como os fasores de sequência positiva calculados no sistema detalhado estão em kA e kV fase-neutro é preciso calcular os valores fase-fase, RMS e em p.u. para a correta integração das ferramentas, conforme as equações (III.10) à (III.12),

$$\dot{V}_{DET} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2} V_{base}} \dot{V}_1 \quad (III.10)$$

$$\dot{I}_{DET} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot I_{base}} \cdot \dot{I}_1 \quad (III.11)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (III.12)$$

onde \dot{V}_{DET} é o fasor da tensão fase-fase RMS em p.u. de sequência positiva da frequência fundamental da barra de interface do sistema detalhado, \dot{I}_{DET} é o fasor da corrente de linha RMS em p.u. de sequência positiva da frequência fundamental injetado na barra de interface do sistema detalhado, V_{base} é a base de tensão da barra de interface, S_{base} é a base de potência do sistema e I_{base} é a base de corrente.

Após a conversão esses valores são utilizados no cálculo da potência aparente de sequência positiva da frequência fundamental, indicado anteriormente na equação (III.1).

III.3 Equivalente do Sistema Externo

Existem diferentes proposições para o cálculo do equivalente do sistema externo, a partir de equivalentes Norton ou Thévenin, na frequência fundamental ou válido para uma faixa ampla de frequência e simples ou multiporta. Nesse trabalho as informações do sistema externo são transferidas para o sistema detalhado através de um equivalente Thévenin simples na frequência fundamental, que é composto por uma fonte de tensão em série com a impedância equivalente do sistema externo [3], conforme a Figura III.5.

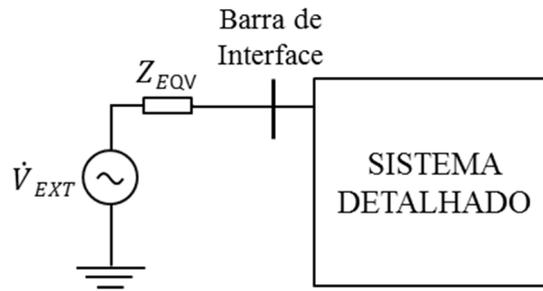


Figura III.5 – Equivalente Thévenin do sistema externo

A impedância do equivalente do sistema externo é obtida a partir de um curto-circuito trifásico na barra de interface, desconsiderando a rede do sistema detalhado. As fontes de tensão são curto-circuitadas e o vetor de correntes injetadas é igualado à zero, mantendo-se uma injeção unitária na barra de interface, conforme as equações (III.13) à (III.16),

$$[i] = [Y_{Barra}][\dot{V}] \quad (III.13)$$

$$[\dot{V}] = [Y_{Barra}]^{-1} \cdot [i] \quad (III.14)$$

$$[\dot{V}] = [Z_{Barra}][\dot{I}] \quad (III.15)$$

$$[\dot{V}] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 + j0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

onde $[\dot{I}]$ é o vetor de injeção de correntes do sistema externo, $[\dot{V}]$ é o vetor das tensões de barra do sistema externo, $[Y_{Barra}]$ é a matriz de admitâncias de barra do sistema externo

incluindo as admitâncias das fontes controladas e $[Z_{Barra}]$ é a matriz de impedâncias de barra do sistema externo incluindo as impedâncias das fontes controladas.

Ao se estabelecer o valor do vetor de corrente conforme a equação (III.16), a tensão da barra de interface possuirá o mesmo valor da impedância de curto-circuito, que é a própria impedância do equivalente do sistema externo, conforme a equação (III.17),

$$Z_{EQV} = V_{INT} \quad (III.17)$$

onde Z_{EQV} é a impedância do equivalente vista a partir da barra de interface e V_{INT} é a tensão obtida do cálculo do curto-circuito.

A tensão da fonte de Thévenin é calculada a partir da tensão e corrente da barra de interface, conforme a equação (III.18),

$$\dot{E}_{EXT} = \dot{V}_{INT} + Z_{EQV} \cdot \dot{I}_{INT} \quad (III.18)$$

onde \dot{E}_{EXT} é a tensão de Thévenin do equivalente do sistema externo, \dot{V}_{INT} é a tensão da barra de interface, Z_{EQV} é a impedância do equivalente vista a partir da barra de interface e \dot{I}_{INT} é a corrente injetada na barra de interface.

Como a tensão obtida está na forma fasorial com valores RMS, fase-fase e em p.u., é necessário converter os seus valores para grandezas trifásicas instantâneas fase-neutro para que a integração com a ferramenta de TEM seja viável.

III.3.1 Conversão de Fazor para Forma de Onda

A obtenção da forma de onda trifásica com valores instantâneos é necessária para a compatibilização do equivalente do sistema externo com as grandezas do sistema detalhado, esta conversão é feita de forma direta, de acordo com as equações (III.19) a (III.21),

$$v_a = \frac{V_{base}\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E_{EXT} \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_E) \quad (III.19)$$

$$v_b = \frac{V_{base}\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E_{EXT} \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_E - 120^\circ) \quad (III.20)$$

$$v_c = \frac{V_{base}\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E_{EXT} \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_E + 120^\circ) \quad (\text{III.21})$$

onde v_a , v_b e v_c são as tensões instantâneas fase-neutro das fases A, B e C do equivalente de Thévenin do sistema externo, E_{EXT} é o módulo da tensão RMS, fase-fase, de sequência positiva da frequência fundamental em p.u., V_{base} é a base de tensão da barra de interface, δ_E é o ângulo do fasor de tensão da barra de interface e ω é a frequência angular do equivalente do sistema externo.

O equivalente trifásico do sistema externo enviado para o sistema detalhado é apresentado na Figura III.6.

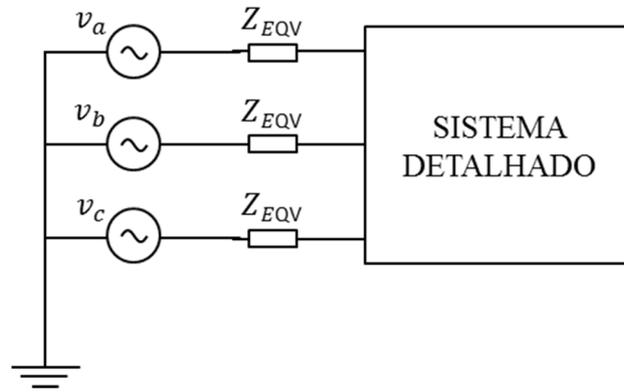


Figura III.6 – Equivalente Thévenin trifásico do sistema externo

A utilização do ângulo da tensão e da frequência fundamental fixa não são suficientes para transportar o efeito das oscilações eletromecânicas para o sistema detalhado. No intuito de representar esse efeito, os argumentos das formas de onda de tensão do equivalente são calculados considerando a frequência angular do centro de inércia ou da barra de interface. A frequência do centro de inércia é obtida a partir da média ponderada da inércia de todos os geradores do sistema de acordo com a equação (III.22),

$$\omega_{CI} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (\text{III.22})$$

onde ω_{CI} é a frequência angular do centro de inércia do sistema externo, H_i é a constante de inércia do gerador i do sistema externo e ω_i é a frequência angular do gerador i do sistema externo em p.u..

A frequência de barra é obtida a partir da variação angular do fasor de tensão. Como os fasores do sistema são referidos ao centro de inércia, considera-se também a variação angular do mesmo, conforme as equações (III.23) e (III.24),

$$\omega_{Barra} = \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial \delta_{CI}}{\partial t} \quad (III.23)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{V_r}{V_i} \right) \quad (III.24)$$

Adicionalmente o sinal de frequência é filtrado conforme ilustrado na Figura III.7 e apresentado na equação (III.25),

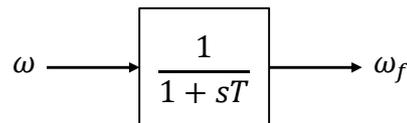


Figura III.7 – Filtro da frequência de barra

$$\dot{\omega}_f = \frac{1}{T} (\omega - \omega_f) \quad (III.25)$$

onde δ é o ângulo do fasor de tensão da barra, ω é a velocidade angular não filtrada, ω_f é a velocidade angular filtrada, V_r é a componente real do fasor de tensão da barra de interface, V_i é a componente imaginária do fasor de tensão da barra de interface e δ_{coi} é o ângulo do centro de inércia do sistema externo.

Dessa forma o equivalente do sistema externo deixa de ser puramente algébrico e passa a incorporar a dinâmica associada à inércia do sistema externo no seu cálculo. Com essa modelagem é esperado que as oscilações eletromecânicas sejam transmitidas do sistema externo para o sistema detalhado.

III.4 Protocolo de Comunicação

O protocolo de comunicação é responsável pela coordenação da integração das ferramentas, determinando os instantes de tempo e a forma como as informações são transferidas. A comunicação entre as ferramentas de TEM e ET na simulação híbrida é realizada de duas formas, através de protocolos seriais ou paralelos.

No protocolo serial as ferramentas são executadas sequencialmente, ou seja, a cada instante de tempo somente uma é processada enquanto a outra permanece em estado de espera. No protocolo paralelo as ferramentas são processadas simultaneamente trocando informações em instantes de tempo pré-determinados. Neste desenvolvimento foi implementado uma combinação dos dois protocolos. Por ser intrinsecamente mais eficiente do ponto de vista computacional, o protocolo paralelo é utilizado durante a maior parte do tempo, sendo substituído pelo protocolo serial apenas durante a ocorrência de perturbações no sistema. Ressalta-se que todos os trabalhos propostos na literatura utilizam ferramentas de ET com passo de integração fixo, tipicamente na faixa de 2 ms a 8 ms. O desenvolvimento apresentado nesta dissertação é único neste aspecto, pois utiliza uma ferramenta de ET com passo de integração variável.

O requisito para se iniciar a simulação híbrida é estabelecer uma condição de equilíbrio na barra de interface de forma a possibilitar a sincronização das ferramentas. Na ferramenta de ET, a inicialização das variáveis de estado é realizada no início da simulação dinâmica a partir dos valores obtidos no fluxo de potência. Na ferramenta de TEM utilizada, a inicialização é feita em tempo de execução a partir das condições iniciais estabelecidas pelo usuário. O processo de inicialização da simulação híbrida é ilustrado na Figura III.8.

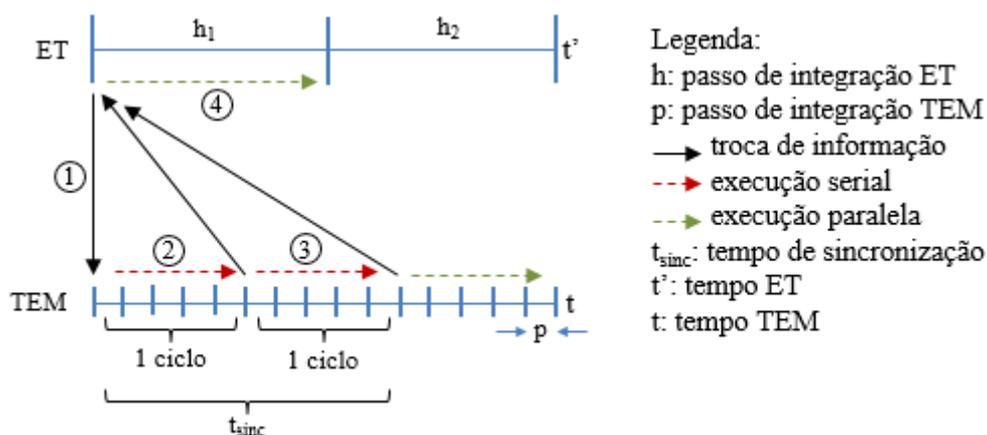


Figura III.8 – Inicialização da simulação híbrida

A interpretação da Figura III.8 é descrita nos passos a seguir:

- Em (1) a ferramenta de ET inicializa suas variáveis de estado, efetua o cálculo do equivalente do sistema externo, envia para o sistema detalhado e entra em estado de espera.
- Em (2) o sistema detalhado recebe o equivalente do sistema externo e começa a ser processado, realizando a inicialização das variáveis do sistema. A cada intervalo de tempo com duração de um ciclo (aproximadamente 16,7 ms) o equivalente do sistema detalhado é enviado para ferramenta de ET, como nos instantes (2) e (3). Este processo se repete até que a diferença entre o valor da corrente no instante atual comparado com o valor calculado no instante anterior esteja abaixo de uma tolerância (10^{-3}), indicando que a corrente da barra de interface encontra-se em regime permanente.
- No instante (4), com as condições de sincronização atendidas, a ferramenta de ET sai do estado de espera e é executada simultaneamente com a ferramenta de TEM. O protocolo de comunicação após a sincronização e durante a ocorrência de perturbações no sistema encontra-se na Figura III.9 e é explicado em seguida.

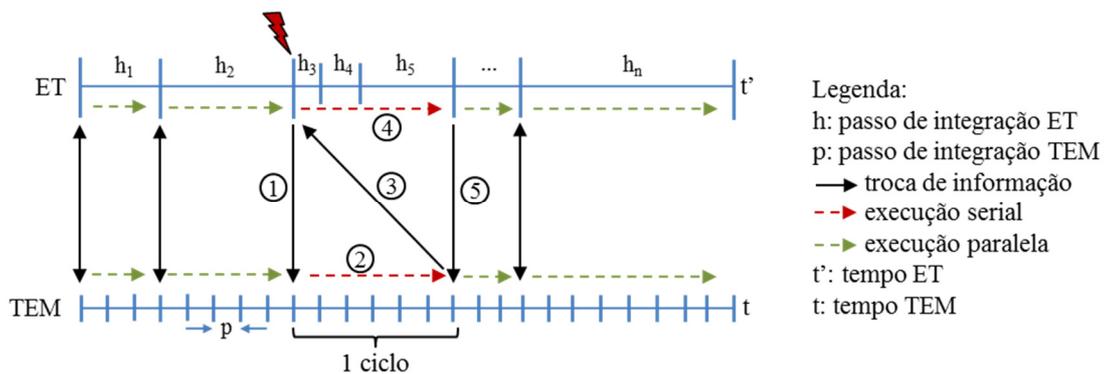


Figura III.9 – Diagrama esquemático do protocolo de comunicação

Após a sincronização, a transferência dos equivalentes passa a ser realizada a cada passo de integração da ferramenta de ET utilizando o protocolo paralelo. Como os tempos de processamento e os passos de integração são diferentes, uma das ferramentas pode ter de aguardar para realizar uma nova troca e seguir adiante. Este processo se repete até que ocorra alguma perturbação no sistema. Conforme detalhado a seguir:

- Em (1) uma perturbação é aplicada no sistema externo. Neste instante o protocolo paralelo é substituído pelo protocolo serial. A ferramenta de ET calcula um novo equivalente com a rede em perturbação, envia à ferramenta de TEM e entra em estado de espera.
- Em (2) a ferramenta de TEM é executada por um intervalo de tempo correspondente a um ciclo da forma de onda (aproximadamente 16,7 ms) e calcula um novo equivalente do sistema detalhado. O tempo de um ciclo é necessário para que a conversão dos valores instantâneos em fasores seja adequada já que o defeito imposto ao sistema externo refletido através do seu equivalente provocará distorções na forma de onda do sistema detalhado.
- No instante de tempo (3) a ferramenta de TEM envia o equivalente para o sistema externo e entra em estado de espera.
- Em (4) a ferramenta de ET retorna o processamento com o equivalente do sistema detalhado e é executada por um intervalo de tempo correspondente a um ciclo, utilizando quantos passos de integração forem necessários (h3, h4 e h5), atingindo o mesmo instante de tempo em que a ferramenta de TEM encontra-se em estado de espera.
- Em (5) as ferramentas, já no mesmo instante de tempo, as ferramentas retornam ao protocolo paralelo com execução simultânea e troca de informação a cada passo de integração da ferramenta de ET.

Caso a perturbação ocorra na rede do sistema detalhado o processo deve ser o mesmo. O protocolo de comunicação deve ser modificado para serial, a ferramenta de ET entra em estado de espera enquanto a ferramenta de TEM é processada por um ciclo, envia o novo equivalente entra em estado de espera. A ferramenta de ET será processada por um ciclo até atingir o mesmo instante de tempo da ferramenta de TEM, onde o protocolo paralelo será retomado.

É importante ressaltar que o protocolo de comunicação só é capaz de identificar os defeitos ou alterações de topologia programados pelo usuário. É necessário avaliar se

existe a necessidade de se adequar o protocolo para identificar alterações na matriz de admitância (sistema externo) ou na matriz de condutância (sistema de detalhado) devido à ação de sistemas de proteção, por exemplo.

III.4.1 Implementação

A implementação da simulação híbrida foi desenvolvida em sua quase totalidade na ferramenta de ET. Foram criadas novas rotinas para realizar o cálculo dos equivalentes do sistema externo e do sistema detalhado, o método de conversão das grandezas fasoriais em trifásicas e das grandezas trifásicas em fasoriais e todas as características do protocolo de comunicação. Isto permite que a integração com outras ferramentas de TEM seja realizada sem a necessidade de muitos ajustes. Na ferramenta de TEM foi necessário descrever um componente que recebe os valores trifásicos do equivalente Thévenin do sistema externo e envia as informações de tensão e corrente do sistema detalhado.

Na simulação híbrida as ferramentas trocam equivalentes a cada passo de integração da ferramenta de ET, entretanto a cada passo de integração da ferramenta de TEM, esta envia as variáveis trifásicas da interface para a realização do cálculo das grandezas fasoriais e recebe os valores da forma de onda trifásica do equivalente do sistema externo. Caso o passo de integração da ferramenta de ET seja maior que um ciclo, somente os valores correspondentes ao ciclo anterior ao instante de troca dos equivalentes serão utilizados no cálculo das grandezas fasoriais, conforme ilustrado na Figura III.10.

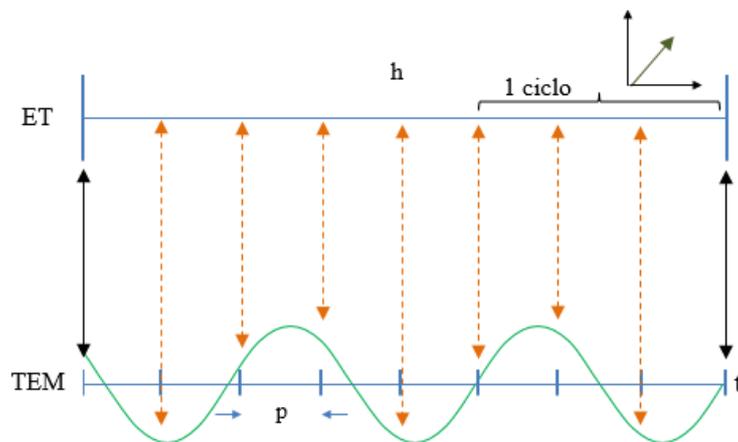


Figura III.10 – Construção da forma de onda e cálculo dos fasores

A frequência do equivalente do sistema externo é atualizada a cada passo de integração da ferramenta de TEM, segundo a taxa de variação calculada a partir dos valores do passo de integração anterior e atual da ferramenta de ET, conforme a equação (III.26):

$$\omega_{rate} = \frac{\omega_n - \omega_{n-1}}{h_n - h_{n-1}} \quad (III.26)$$

onde ω_{rate} é a taxa de variação da frequência angular entre dois passos de integração, ω_n é a frequência do passo atual, ω_{n-1} é a frequência do passo anterior, h_n é o passo de integração atual e h_{n-1} é o passo de integração anterior.

Com a taxa de variação, os valores do argumento da forma de onda senoidal são atualizados de acordo com o passo de integração da ferramenta de TEM, segundo a equação (III.27) e ilustrado na Figura III.11.

$$\delta = \delta_0 + \omega_n \cdot t + \omega_{rate} \cdot p \quad (III.27)$$

onde δ é o argumento da forma de onda senoidal, ω_n é a frequência angular do equivalente, δ_0 é a defasagem angular inicial e p é o passo de integração da ferramenta de TEM.

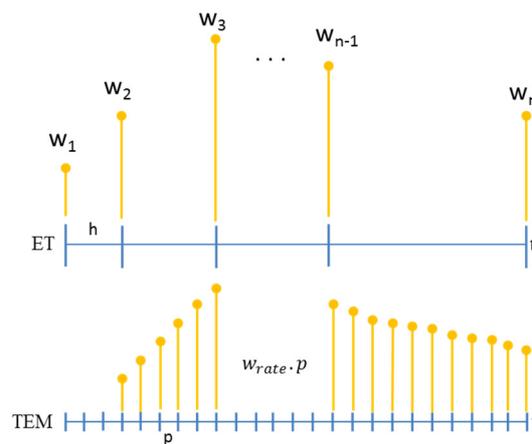


Figura III.11 – Atualização da frequência do equivalente do sistema externo

O protocolo de comunicação foi implementado através da criação de uma *Thread* (conjunto de instruções) na ferramenta de ET para coordenar a troca de informação entre

as ferramentas. Esta *Thread* conecta diretamente as ferramentas de ET e TEM através de um canal de comunicação ou *pipe* de comunicação [25], que compartilha uma seção de memória que é utilizada pelos programas para trocar as informações geradas. Uma chamada para receber dados bloqueia a execução da ferramenta que aguarda até o dado seja recebido ou enviado. O fluxograma de integração das ferramentas encontra-se na Figura III.12.

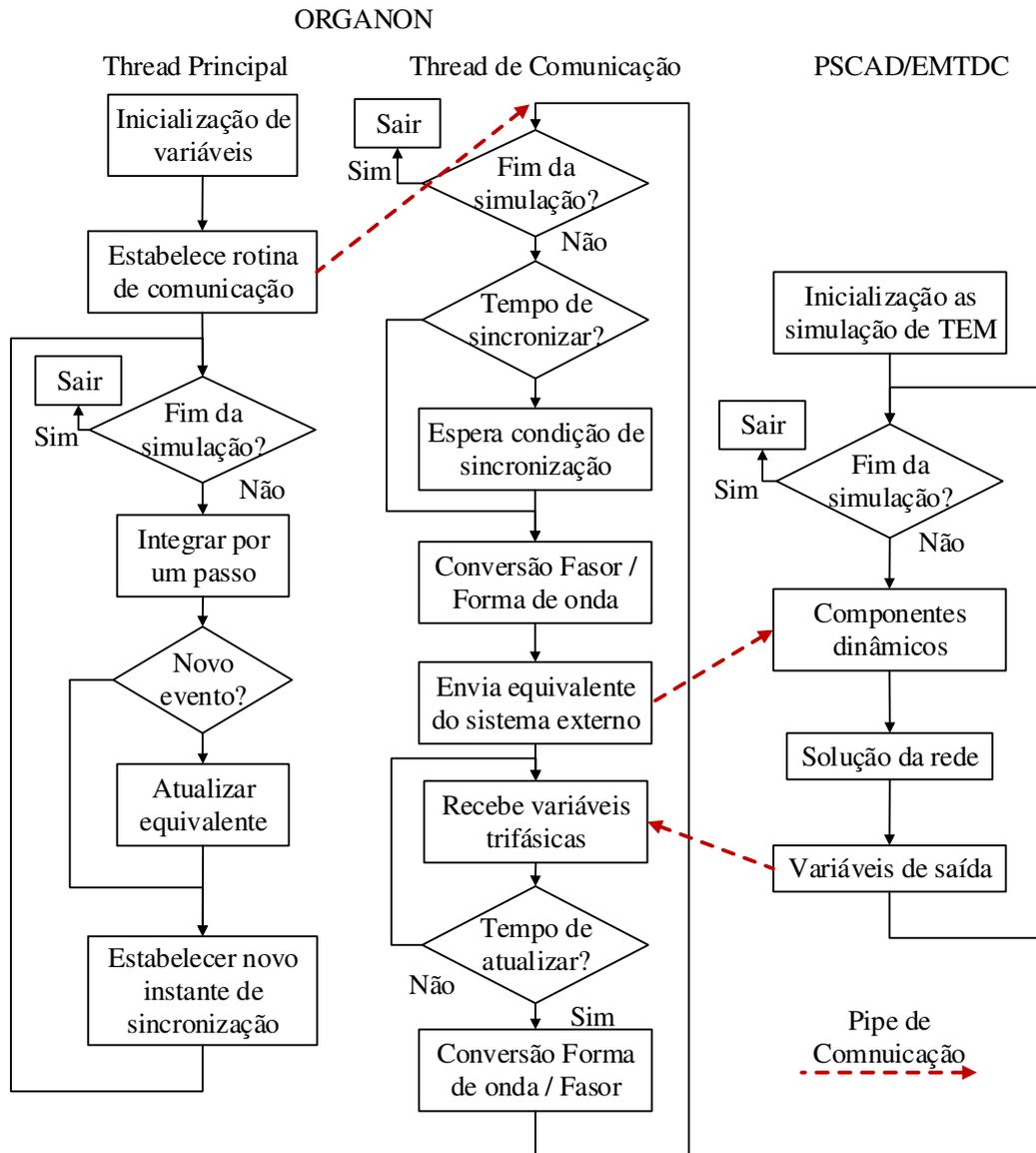


Figura III.12 – Fluxograma de implementação da simulação híbrida

A Figura III.12 apresenta a arquitetura da plataforma de simulação híbrida criada na ferramenta de ET e sua forma de integração com a ferramenta de TEM. A *Thread* de

comunicação coordena a integração das ferramentas realizando o envio/recebimento das informações do sistema externo para o detalhado e do sistema detalhado para o sistema externo.

CAPÍTULO IV

Experimentos e Resultados

Este capítulo apresenta a descrição dos experimentos realizados e os resultados obtidos com a simulação híbrida no domínio do tempo.

VI.1 Considerações Iniciais

O principal objetivo dos experimentos realizados com a simulação híbrida foi confirmar a validade da metodologia proposta. Foram avaliados o protocolo de comunicação, ou seja, se as informações estão sendo enviadas e recebidas nos instantes de tempo corretos e a metodologia de cálculo dos equivalentes. Além disso, foram identificadas possíveis restrições de utilização e necessidades de aperfeiçoamento.

Os experimentos foram realizados utilizando quatro sistemas teste com diferente grau de complexidade. A Tabela IV.1 apresenta uma breve descrição das principais características de cada um destes sistemas. Os dados detalhados encontram-se no APÊNDICE B.

Tabela IV.1 – Características dos sistemas teste

Sistema	Barras	Geradores	Cargas	Circuitos	HVDC
Radial com 1 Gerador	4	1	1	3	0
Radial com 2 Geradores	6	2	1	5	0
39 Barras	39	10	19	46	0
39 Barras – HVDC	40	9	19	47	1

Os experimentos realizados na análise da simulação híbrida foram efetuados em duas etapas. Em um primeiro momento, os sistemas teste utilizados foram representados integralmente na ferramenta de TEM e na ferramenta de ET, quando viável, para uma comparação inicial das simulações individualizadas. Dessa forma, foi possível compatibilizar os modelos de componentes utilizados, identificar diferenças de resposta inerentes às ferramentas e se estabelecer uma referência confiável para análise dos resultados obtidos.

A segunda etapa consistiu em realizar a preparação dos dados para execução da simulação híbrida, com a seleção da barra de interface, a definição do sistema externo representado na ferramenta de ET e a definição do sistema detalhado representado na ferramenta de TEM.

No processo de avaliação da simulação híbrida foram realizados 9 experimentos, resumidos na Tabela IV.2 e com os respectivos sistemas teste utilizados e o objetivo principal de cada um deles.

Tabela IV.2 – Descrição dos experimentos realizados

Experimento	Sistema	Objetivo da Avaliação
1	Radial com 1 Gerador	Condições necessárias para sincronização entre as ferramentas e trocas de informação
2	Radial com 2 Geradores	Representação de componentes dinâmicos no sistema externo e detalhado
3	39 Barras	Frequência do equivalente do sistema externo
4	39 Barras	Local da perturbação
5	39 Barras	Método de conversão de valores trifásicos instantâneos para fasores
6	39 Barras	Intervalo de espera após a ocorrência de distúrbios
7	39 Barras	Influência do passo variável da ferramenta de ET
8	39 Barras com HVDC	Análise de perturbação no sistema externo
9	39 Barras com HVDC	Análise de perturbação no sistema detalhado

Em todos os experimentos realizados, o equivalente do sistema externo foi representado pelo equivalente Thévenin apresentado no item III.3 e o equivalente do sistema detalhado por uma fonte de corrente apresentada no item III.2. A descrição de cada um dos experimentos e a interpretação dos resultados obtidos encontra-se nas seções seguintes.

VI.2 Experimento #1 – Sistema Radial com Um Gerador

O sistema teste utilizado no Experimento #1 é composto por um gerador alimentando uma carga através de um sistema de transmissão radial, contendo um transformador e duas linhas de transmissão em série. O gerador foi representado por um modelo de máquina síncrona de polos lisos com regulador de tensão e regulador de velocidade. A carga ativa e reativa é representada por um modelo de impedância constante.

O objetivo de se utilizar um sistema de pequeno porte para as simulações iniciais foi minimizar as variáveis envolvidas, facilitando o processo de análise dos resultados. A Barra102 foi definida como a barra de interface com o gerador permanecendo no sistema externo e a carga permanecendo no sistema detalhado, conforme a Figura IV.1.

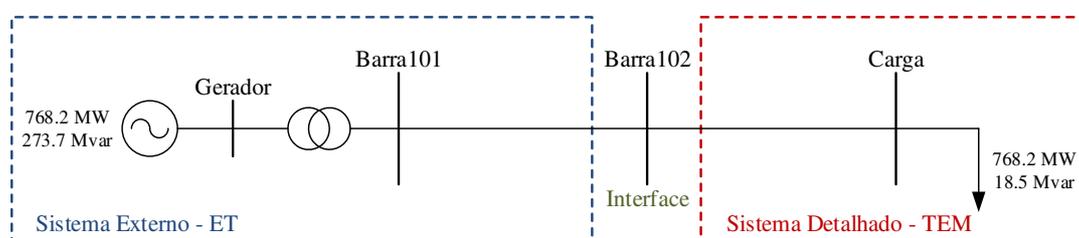


Figura IV.1 – Experimento #1 - Diagrama unifilar do sistema radial com 1 gerador

Para que a sincronização entre as ferramentas ocorra de forma adequada é necessário que a tensão da barra interface possua o mesmo valor de módulo e fase nos dois subsistemas. Com o sistema representado integralmente na ferramenta de ET os valores de regime permanente são obtidos a partir da solução do fluxo de potência. Esses valores são utilizados para definir as condições iniciais da ferramenta de TEM. Dessa forma, ao iniciar a simulação híbrida as ferramentas estabelecerão as mesmas condições na barra de interface permitindo a sincronização adequada entre elas.

Neste experimento foi simulada a aplicação de um curto-circuito trifásico na Barra101 com duração de 100 ms. Utilizou-se o *Curve Fitting* para o cálculo das grandezas fasoriais do equivalente do sistema detalhado, conforme o item III.2.1 e a frequência do centro de inércia no cálculo do equivalente do sistema externo, conforme o item III.3.1.

O comportamento das grandezas do gerador e da carga são apresentados da Figura IV.2 à Figura IV.7. As curvas em vermelho representam as grandezas do sistema completo na ferramenta de TEM, as curvas azuis tracejadas as grandezas do sistema

completo na ferramenta de ET e as curvas verdes as grandezas resultantes da simulação híbrida. O item (a) apresenta o comportamento dinâmico do gerador e as grandezas da carga e o item (b) apresenta o detalhe das grandezas durante o curto-circuito.

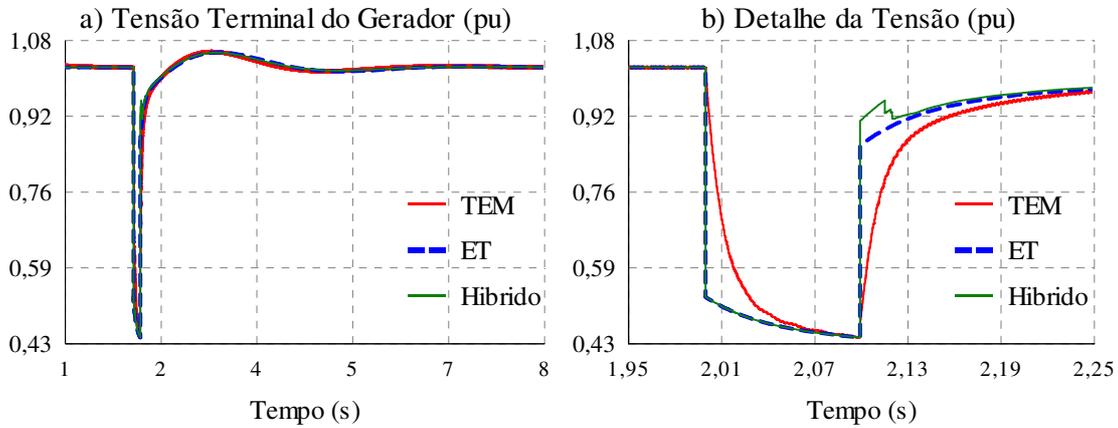


Figura IV.2 – Experimento #1 - Tensão terminal do gerador

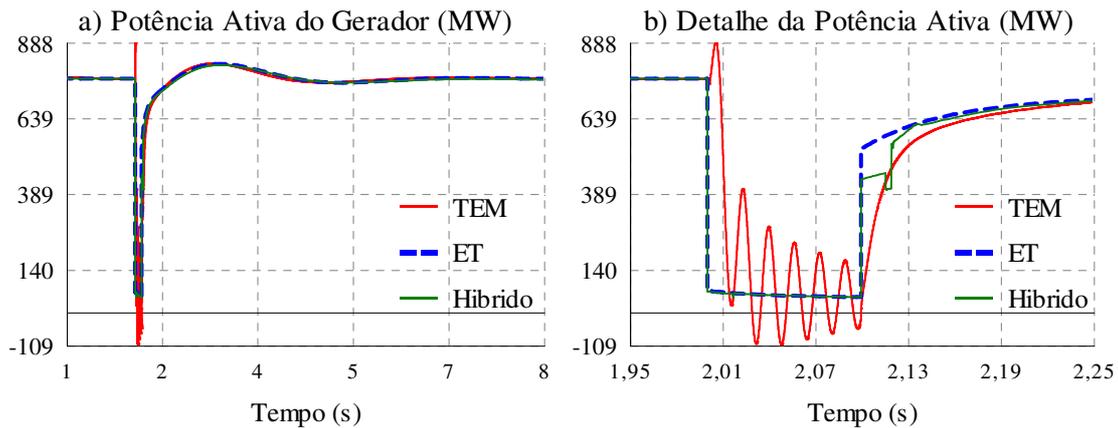


Figura IV.3 – Experimento #1 - Potência ativa do gerador

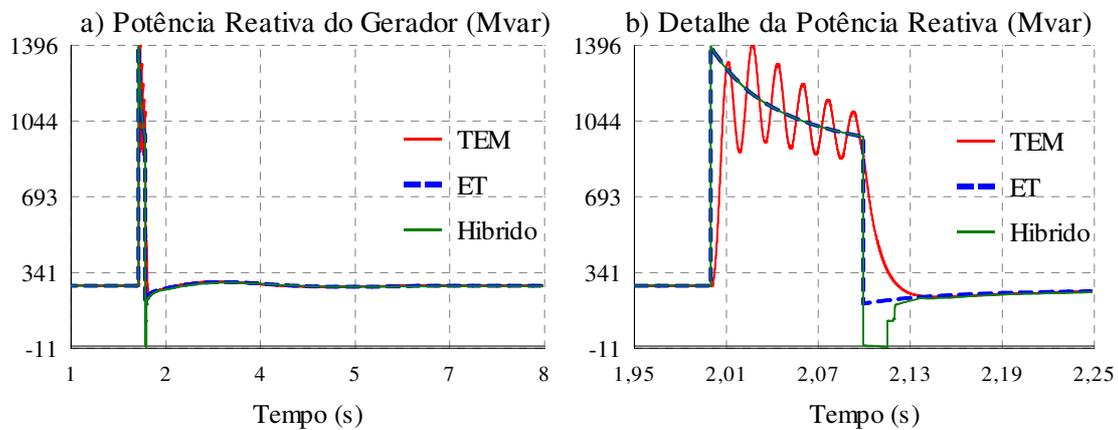


Figura IV.4 – Experimento #1 - Potência reativa do gerador

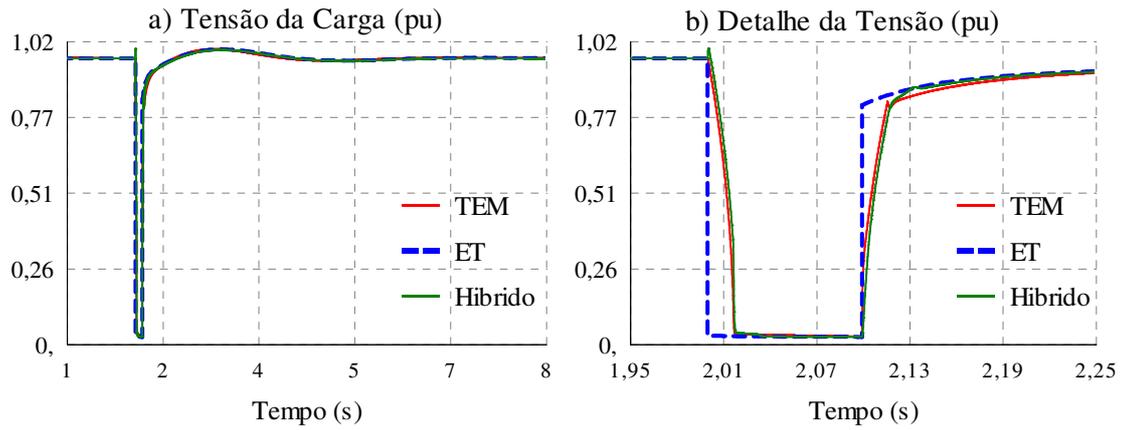


Figura IV.5 – Experimento #1 - Tensão da barra de carga

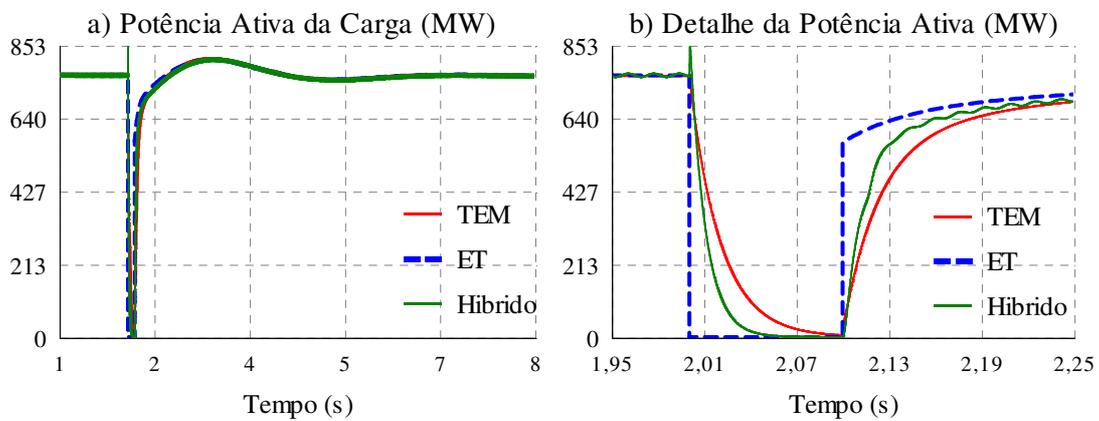


Figura IV.6 – Experimento #1 - Potência ativa da barra de carga

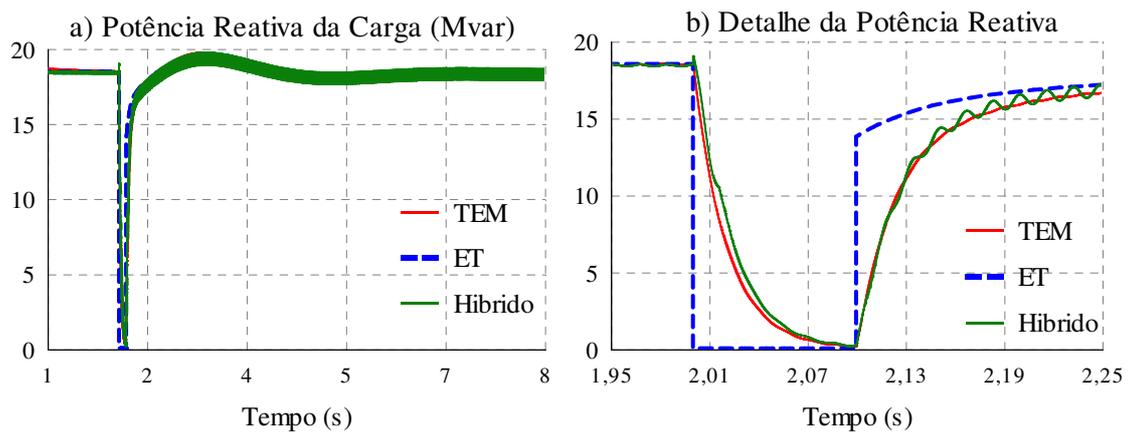


Figura IV.7 – Experimento #1 - Potência reativa da carga

A análise do item (a) das figuras acima indica que o comportamento dinâmico do gerador e as grandezas da carga estão aderentes em todas as simulações. O item (b) apresenta o detalhe das grandezas durante o curto-circuito, onde se identificam algumas diferenças entre os resultados obtidos.

As discrepâncias entre os resultados das ferramentas de TEM e ET ocorrem devido às diferenças de representação dos modelos de componentes. Na ferramenta de ET a rede elétrica é algébrica, logo as variações de tensão e potência após a aplicação do curto-circuito são instantâneas, o que não ocorre na ferramenta de TEM que possui a rede representada por equações diferenciais, resultando em variações não instantâneas, segundo uma constante de tempo.

Os resultados da simulação híbrida apresentaram diferenças nos instantes seguintes à aplicação do curto-circuito e após a sua extinção. Na ferramenta de ET, as cargas representadas como impedância constante são inseridas na matriz de admitância do sistema. Quando o curto-circuito é aplicado ou removido, as equações da rede são resolvidas e os novos valores das tensões e potências são obtidos considerando uma variação instantânea. Na simulação híbrida, como a carga pertence ao sistema detalhado, ela passa a ser representada como uma fonte de corrente e no cálculo do novo equivalente do sistema externo com a aplicação do curto-circuito, os seus valores são mantidos constantes, gerando assim uma diferença em relação à simulação na ferramenta de ET individualizada. O equivalente do sistema externo calculado e que não considerou a variação da carga com o quadrado da tensão é enviado ao sistema detalhado, que será processado na ferramenta de TEM pelo tempo de um ciclo e retornará um novo equivalente para o sistema externo, que por sua vez também conterá uma parcela de erro. Após receber o equivalente do sistema detalhado, o sistema externo será processado pelo tempo de um ciclo e torna a realizar a troca dos equivalentes a cada passo da ferramenta de ET. À medida que os equivalentes são atualizados o erro no cálculo diminui e os valores das grandezas convergem para o valor correto, conforme pode ser observado na Figura IV.8.

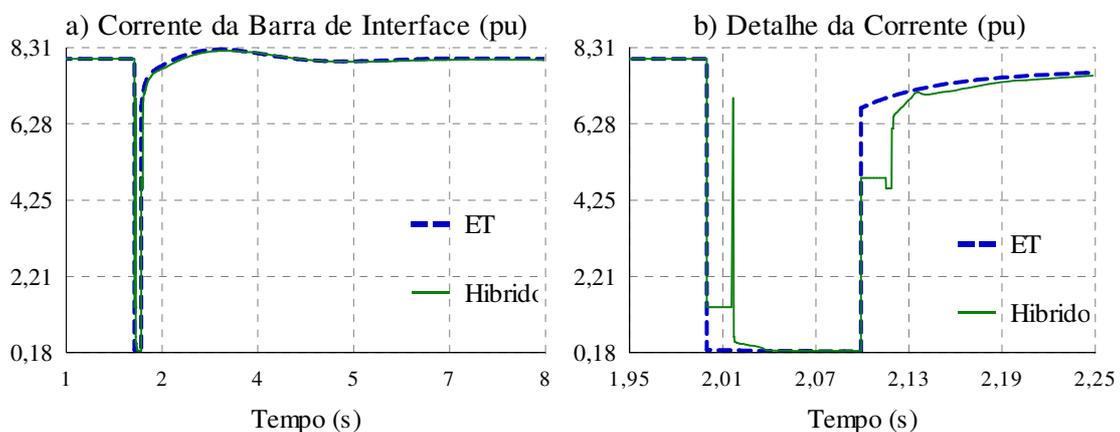


Figura IV.8 – Experimento #1 - Corrente injetada na barra de interface

A Figura IV.8, com a corrente da barra de interface, mostra de forma mais clara este problema. Desta forma, é possível verificar que há um erro nas grandezas da barra de interface inerente do protocolo de comunicação adotado e que ocorre de forma mais significativa pelo tempo de um ciclo após uma descontinuidade e reduz nos instantes seguintes. Esse erro ocorre por não se contabilizar as variações do outro subsistema durante o cálculo do novo equivalente da rede com defeito. Outra fonte de discrepâncias é o fato de as variações provocadas por descontinuidades não ocorrem de forma instantânea no sistema detalhado, necessitando de um intervalo de tempo de um ciclo para serem calculadas pelos métodos de conversão de forma de onda em fasor e serem passadas ao sistema externo. Neste caso, mesmo com a existência do erro da corrente a simulação híbrida apresentou resultados satisfatórios sendo capaz de transferir a dinâmica da rede de um subsistema para o outro [13].

Outro aspecto importante avaliado foram os tempos de processamento das simulações realizadas em cada uma das ferramentas. Os valores obtidos encontram-se na Tabela IV.3.

Tabela IV.3 – Experimento #1 - Tempos de processamento

Ferramenta	Simulação (segundos)	Processamento (segundos)
TEM	10	10,625
ET		0,027
Híbrido		14,234

O tempo de processamento da ferramenta de ET é significativamente inferior ao da ferramenta de TEM, isto se deve às características de cada uma das ferramentas mencionadas no Capítulo II. O tempo de processamento da simulação híbrida não se mostrou vantajoso nesta situação, sendo superior ao da ferramenta de TEM. Isto ocorre devido às trocas de informação e a construção do equivalente do sistema externo no sistema detalhado serem menos eficientes do que a representação do gerador na ferramenta de TEM.

VI.3 Experimento #2 – Sistema Radial com Dois Geradores

No Experimento #2 foi utilizado um sistema teste composto por dois geradores conectados radialmente a uma carga através de transformadores e linhas de transmissão em série. Este sistema teste foi utilizado com o objetivo de avaliar a simulação híbrida com componentes dinâmicos tanto no sistema detalhado como no sistema externo. A Barra103 foi definida como a barra de interface com o sistema detalhado e o sistema externo indicados na Figura IV.9

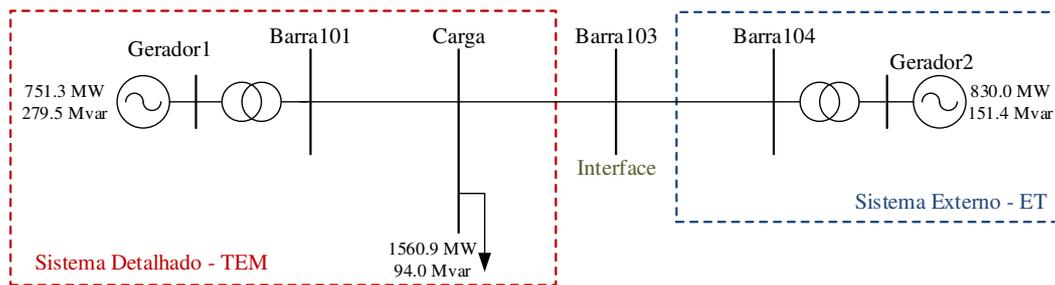


Figura IV.9 – Experimento #2 - Sistema radial com dois geradores

Foi realizada a aplicação de um curto-circuito trifásico na Barra104 com duração de 100 ms. Neste experimento foi utilizado o *Curve Fitting* para o cálculo do equivalente do sistema detalhado, conforme o item III.2.1 e a frequência do centro de inércia no cálculo do equivalente do sistema externo, conforme o item III.3.1. A Figura IV.10 e a Figura IV.11 apresentam as grandezas dos geradores com a aplicação da perturbação.

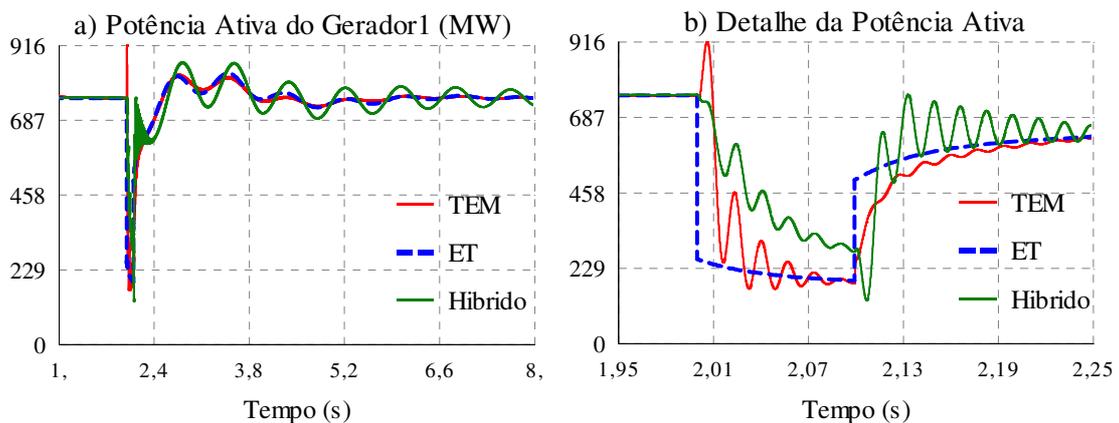


Figura IV.10 – Experimento #2 - Potência ativa do Gerador1

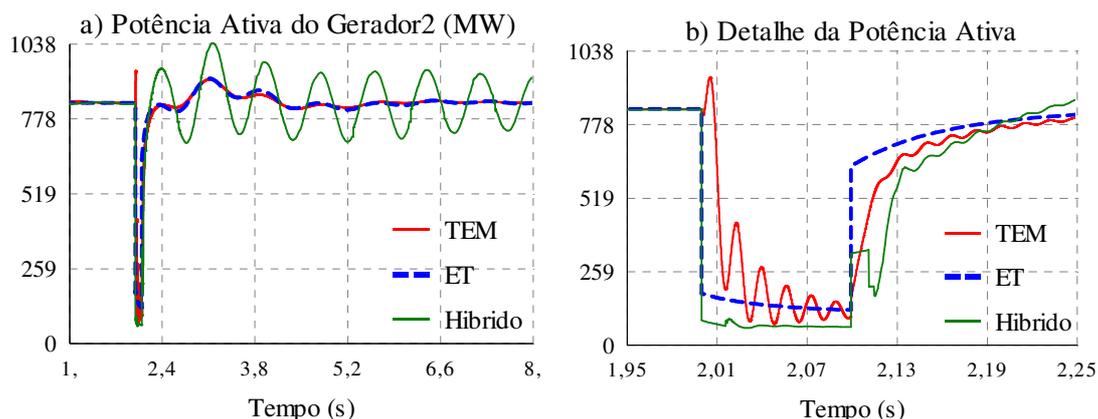


Figura IV.11 – Experimento #2 - Potência ativa do Gerador2

As simulações individualizadas na ferramenta de TEM e na ferramenta de ET apresentadas nos itens (a) e (b) da Figura IV.10 e da Figura IV.11 possuem resultados satisfatórios, indicando que os modelos de componentes em cada uma das simulações são compatíveis. Os resultados da simulação híbrida apresentaram oscilações que não são provenientes da perturbação aplicada, uma vez que as mesmas não ocorreram nas simulações individualizadas. A análise do item (b) das figuras indica um erro no valor da potência de ambos geradores durante o curto-circuito.

Este erro ocorre pelo mesmo motivo citado no item VI.2, ou seja, devido à falta de precisão dos valores de tensão e corrente da barra de interface durante o cálculo do equivalente da rede em perturbação. Neste caso o erro durante a aplicação da perturbação é mais significativo, uma vez que os dois sistemas possuem elementos ativos que contribuem para a corrente de curto-circuito. Este fato pode ser melhor observado através da Figura IV.12, que apresenta o detalhe da corrente na barra de interface.

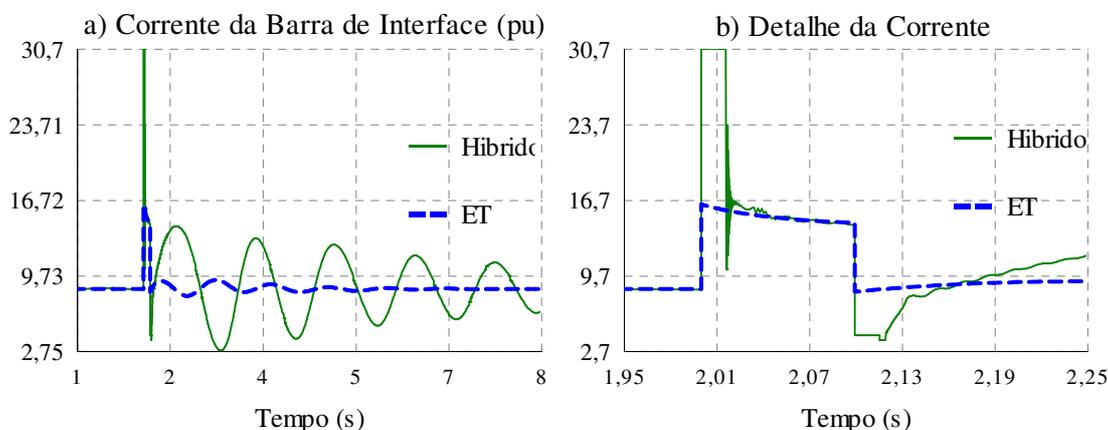


Figura IV.12 – Experimento #2 - Corrente injetada na barra de interface.

A partir da Figura IV.12, observa-se que a magnitude do erro de corrente é consideravelmente maior, chegando a aproximadamente o dobro do valor correto. Isso faz com que os geradores sejam submetidos à desbalanços de energia e passem a oscilar um contra o outro.

Em casos como este, onde há contribuição do sistema detalhado ou do sistema externo para a corrente de curto-circuito é necessário afastar o local da perturbação do local da barra de interface [10], de forma a minimizar o erro no cálculo dos equivalentes. Como este sistema é de pequeno porte, não há possibilidade de realizar este tipo de avaliação, sendo necessária a utilização de um sistema de maior porte. Neste experimento os tempos de processamento das simulações também foram avaliados, conforme a Tabela IV.4.

Tabela IV.4 – Experimento #2 - Tempos de processamento

Ferramenta	Simulação (segundos)	Processamento (segundos)
TEM	10	13,156
ET		0,043
Híbrido		36,034

A simulação na ferramenta de ET mostrou-se significativamente mais eficaz que a ferramenta de TEM, conforme esperado. O tempo de processamento da simulação híbrida aumentou consideravelmente, uma vez que o erro da corrente na interface provoca a redução do passo de integração da ferramenta de ET e conseqüentemente o aumento do tempo de processamento.

VI.4 Sistema 39 Barras

O Sistema 39 Barras foi utilizado nos Experimentos 3, 4, 5, 6 e 7. Este sistema é composto por uma rede contendo 10 geradores e 19 cargas conectados através de 34 linhas de transmissão e 12 transformadores de tap fixo.

Este sistema foi constituído a partir de modificações do sistema IEEE 39 Barras, como a conversão das cargas para impedância constante e a substituição do gerador equivalente da Barra39 por um modelo de gerador de polos lisos. Estas modificações foram realizadas de forma a compatibilizar as respostas das simulações individualizadas

na ferramenta de TEM com a ferramenta de ET. Os parâmetros da rede elétrica e dos modelos dinâmicos são apresentados no APÊNDICE B.

Para a realização da simulação híbrida, a Barra 16 foi definida como a barra de interface. O sistema detalhado é composto por quatro geradores e quatro cargas e o sistema externo é composto por seis geradores e um total de quinze cargas, conforme apresentado na Figura IV.13.

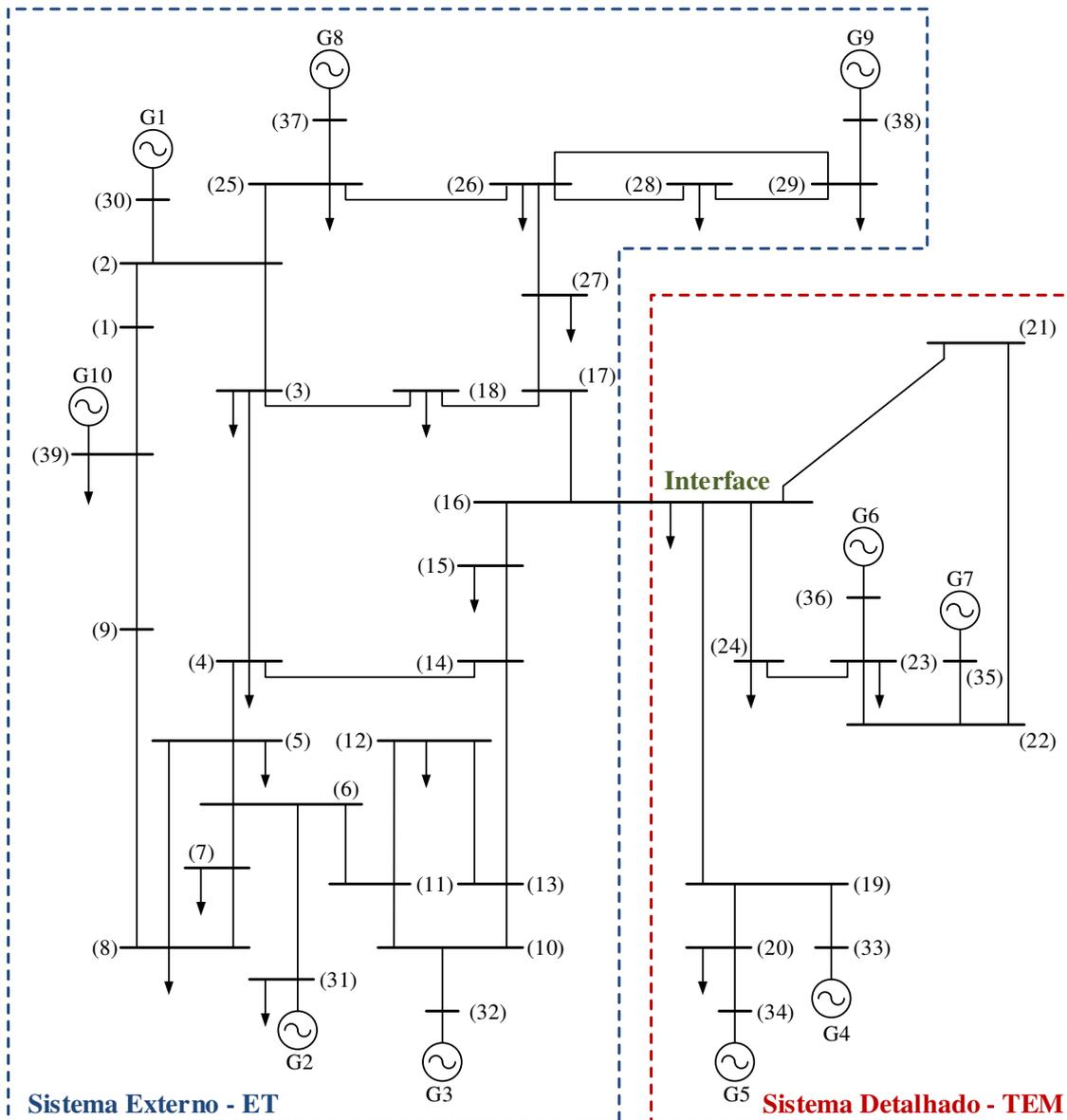


Figura IV.13 – Sistema 39 Barras

Os Experimentos 3 a 7 tiveram como objetivo avaliar a influência frequência do equivalente do sistema externo, a localização da perturbação, o método de conversão das

formas de onda em fasores e a influência do passo de integração variável nas simulações. Estes experimentos são descritos nas seções seguintes.

IV.4.1 Experimento #3 – Frequência do Equivalente do Sistema Externo

Um dos objetivos de utilização do Sistema 39 Barras foi avaliar a influência da proximidade do local da perturbação em relação ao local da barra de interface, em função dos resultados obtidos no Experimento #2. Neste experimento foi utilizado o *Curve Fitting* para o cálculo do equivalente do sistema detalhado, conforme o item III.2.1 e a frequência do centro de inércia no cálculo do equivalente do sistema externo, conforme o item III.3.1.

O teste inicial consistiu em aplicar um curto-circuito trifásico na Barra 13, que está na terceira vizinhança da barra de interface. Com o afastamento do local da perturbação o erro das informações na barra de interface é menor e era esperado que as oscilações das grandezas do sistema, provenientes da integração das ferramentas, deixassem de ocorrer. Porém, os resultados obtidos indicaram a permanência dessas oscilações, mesmo que com menor amplitude. Na Figura IV.14 é apresentado o resultado da potência elétrica ativa dos geradores mais próximos da barra de interface do sistema detalhado (Gerador 6) no item (a) e do sistema externo (Gerador 3) no item (b).

As curvas em vermelho representam as grandezas do sistema completo na ferramenta de TEM, as curvas azuis tracejadas as grandezas do sistema completo na ferramenta de ET e as curvas verdes as grandezas resultantes da simulação híbrida.

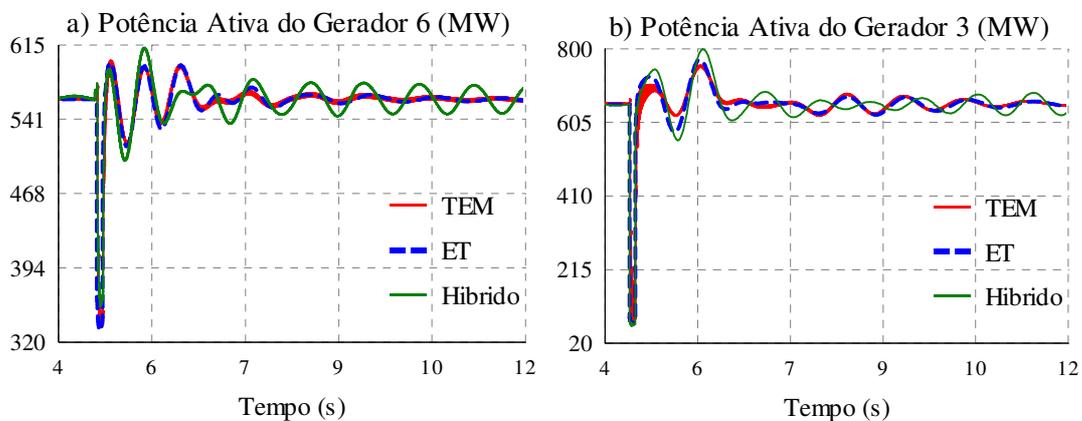


Figura IV.14 – Experimento #3 - Oscilações presentes na simulação híbrida

Esses resultados levaram à questionamentos sobre a frequência utilizada no cálculo do equivalente do sistema externo, de onde se obtém o argumento da forma de onda trifásica do mesmo. A utilização de valores inadequados para o cálculo do argumento da forma de onda senoidal pode introduzir defasagens indevidas entre os sistemas externo e detalhado, produzindo variações de fluxo e oscilações das grandezas da rede resultantes do cálculo impreciso do equivalente. A utilização da frequência do centro de inércia pode não representar o modo de oscilação mais dominante no ponto de conexão das ferramentas. Nesta etapa foram avaliadas duas alternativas para o cálculo do equivalente do sistema externo, utilizar a frequência da barra de interface ou o valor nominal fixo da frequência fundamental. A Figura IV.15 ilustra uma comparação destas grandezas obtidas a partir de uma simulação realizada na ferramenta de ET.

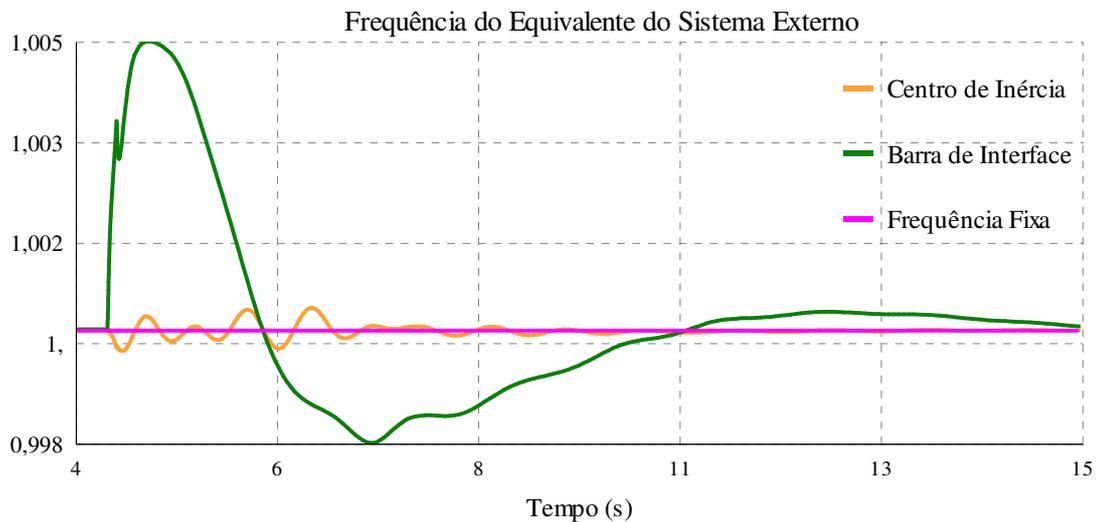


Figura IV.15 – Experimento #3 - Frequências do equivalente do sistema externo

A partir da Figura IV.15, é possível confirmar que de fato existem diferenças razoáveis entre essas frequências. Sendo assim, a simulação da perturbação foi realizada novamente considerando as alternativas citadas. Os resultados das simulações encontram-se na Figura IV.16.

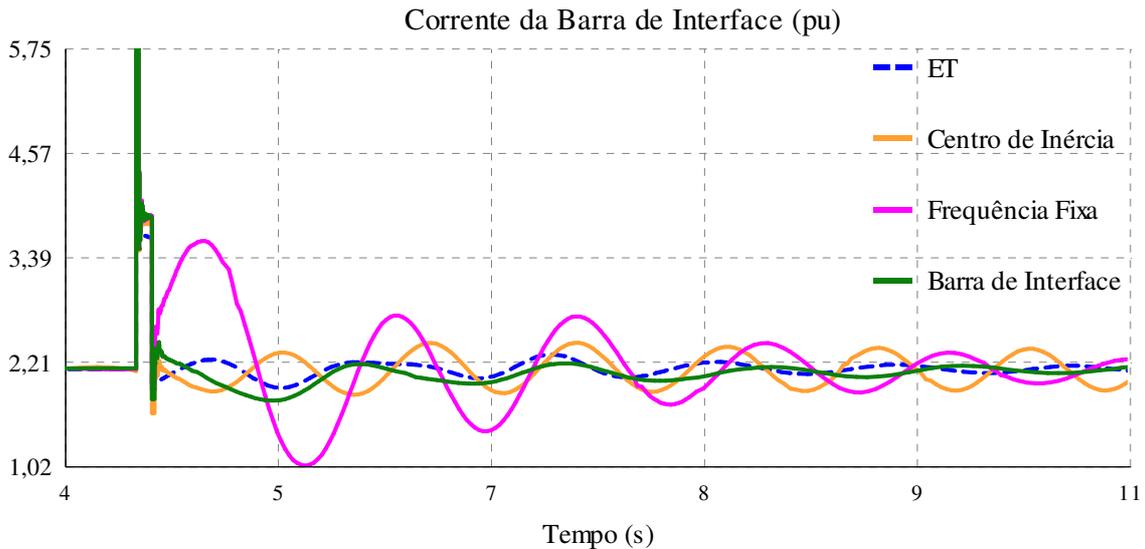


Figura IV.16 – Experimento #3 - Resultados com diferentes frequências

A partir da corrente da barra de interface apresentada na Figura IV.16 é possível observar que a frequência da barra de interface proporcionou um resultado melhor do que os obtidos utilizando a frequência fundamental ou do centro de inércia, estando mais aderente ao comportamento observado na simulação individualizada na ferramenta de ET.

Os resultados obtidos com a utilização da frequência da barra apresentaram o amortecimento das oscilações coerentes, mesmo com as diferenças no instante imediatamente após a eliminação do distúrbio e uma pequena defasagem no decorrer da simulação. As diferenças nos instantes seguintes às discontinuidades ocorrem devido ao erro da corrente e da tensão dos equivalentes provenientes do protocolo de comunicação, mencionados no item VI.2.

A diferença de fase pode ser provocada por alguns fatores. A primeira possibilidade é o fato dos métodos de conversão das grandezas senoidais instantâneas em fasores ser baseada na frequência fundamental, sendo assim, o equivalente do sistema detalhado pode não estar considerando de forma adequada as oscilações eletromecânicas presentes no sistema detalhado. Uma alternativa seria implementar no cálculo deste equivalente a mesma metodologia utilizada no equivalente do sistema externo, que considera as variações da frequência da barra de interface no cálculo das formas de onda instantâneas, conforme mencionado no item III.3.1.

Outra fonte de diferenças tem origem no intervalo de valores utilizados pelo método de conversão das formas de onda em fasores. No desenvolvimento realizado considera-se o intervalo de tempo correspondente a um ciclo da forma de onda anterior ao instante

em que há a troca dos equivalentes, conforme o item (a) da Figura IV.17. Alguns desenvolvimentos trabalham com a ferramenta de TEM adiantada de meio ciclo no tempo em relação à ferramenta de ET e utilizam os valores da forma de onda considerando meio ciclo à frente e meio ciclo anterior do instante de atualização dos equivalentes, conforme o item (b) da Figura IV.17.

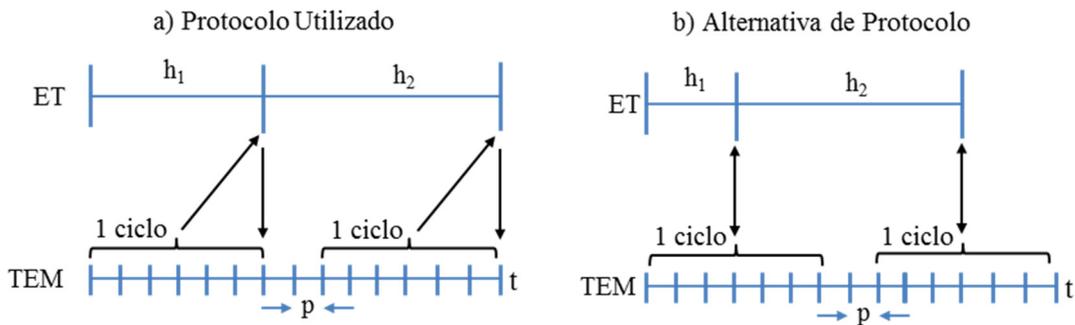


Figura IV.17 – Comparação de protocolos de comunicação.

Existe ainda o fato de se utilizar a frequência da barra de interface na fonte de tensão, sendo que a forma mais precisa seria estimar a frequência da fonte considerando a variação de frequência na impedância de Thévenin.

O desempenho dinâmico dos geradores mais próximos da barra de interface para a simulação utilizando a frequência da barra de interface no cálculo do equivalente do sistema externo estão apresentados na Figura IV.18 à Figura IV.21.

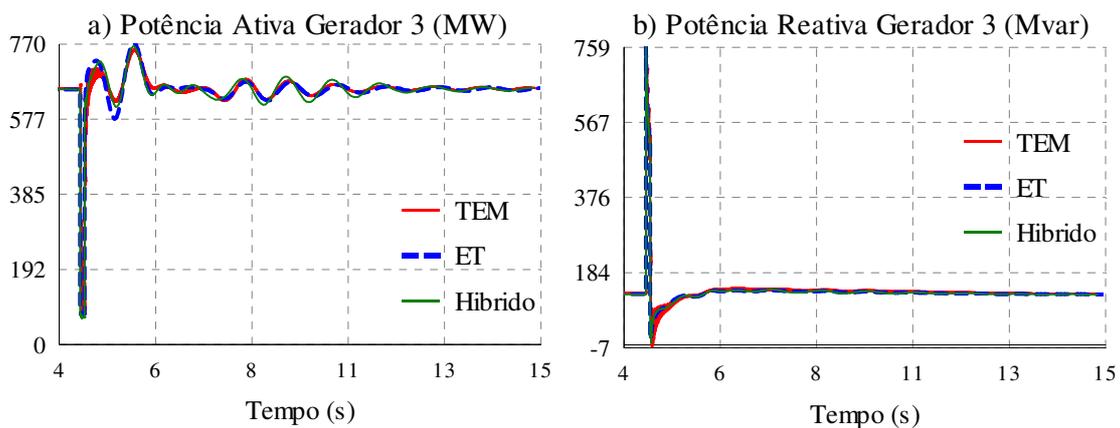


Figura IV.18 – Experimento #3 - Potência ativa e reativa do Gerador 3

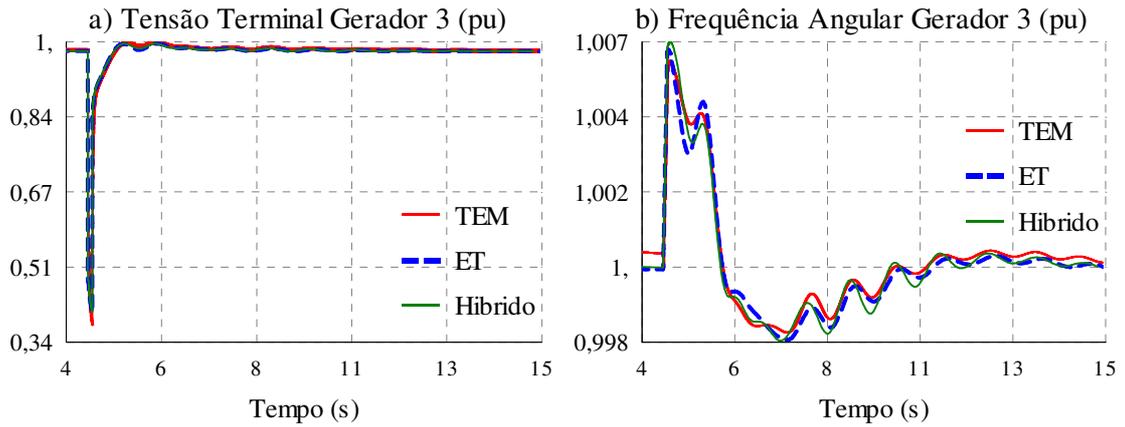


Figura IV.19 – Experimento #3 - Tensão terminal e frequência angular do Gerador 3

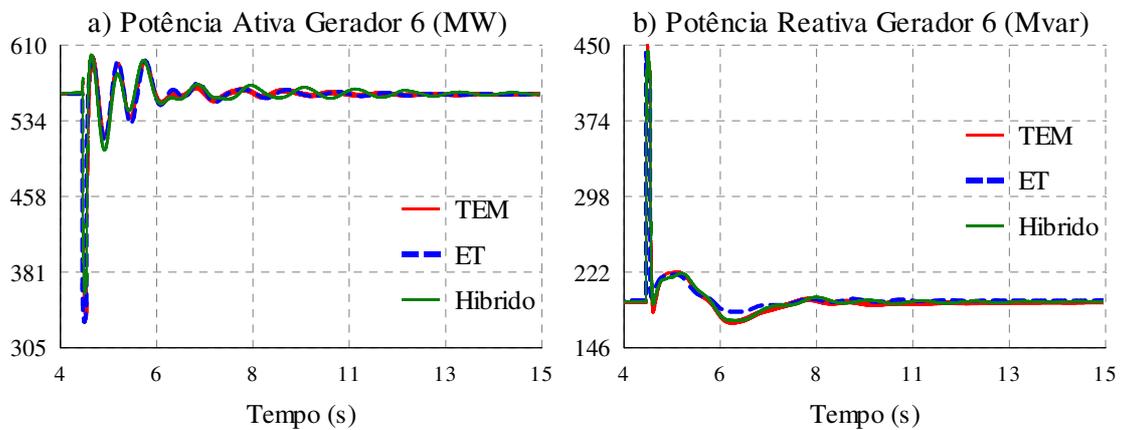


Figura IV.20 – Experimento #3 - Potência ativa e reativa do Gerador 6

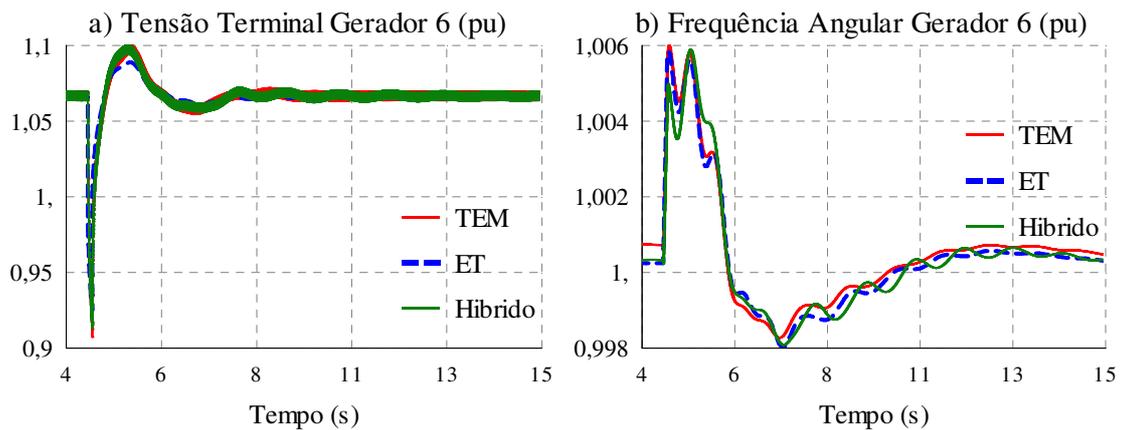


Figura IV.21 – Experimento #3 - Tensão terminal e frequência angular do Gerador 6

É possível verificar através das grandezas dos geradores que os resultados melhoraram significativamente e o desempenho dinâmico da simulação híbrida

apresentou-se compatível com os resultados obtidos a partir das simulações individualizadas mesmo com as diferenças da grandeza da interface mencionadas.

Neste experimento os tempos de processamento das simulações foram avaliados e encontram na Tabela IV.5.

Tabela IV.5 – Experimento #3 - Tempos de processamento do Sistema 39 Barras

Ferramenta	Simulação (segundos)	Processamento (segundos)
TEM	15	110,609
ET		0,0742
Híbrido		67,516

O tempo de processamento na ferramenta de TEM aumentou em proporções maiores se comparado ao tempo de processamento na ferramenta de ET. Esta característica é esperada e tende a ser mais crítica à medida que se aumenta a quantidade de componentes representados. Para este experimento, a simulação híbrida apresentou uma redução no tempo de processamento de 39%. Isto ocorre devido à uma parcela maior da rede elétrica ser representada no sistema externo reduzindo a quantidade de equações e consequentemente o esforço computacional da ferramenta de TEM.

Ressalta-se que a utilização da frequência do centro de inércia não invalida os resultados e conclusões dos Experimentos 1 e 2. Como nos sistemas teste anteriores o sistema externo possui somente um gerador, a frequência do centro de inércia é a própria frequência do gerador e é muito próxima da frequência da barra de interface.

IV.4.2 Experimento #4 – Local da Perturbação

No Experimento #2, a proximidade do local da perturbação do local da barra de interface fez com que a simulação híbrida apresentasse resultados inadequados. De forma a verificar se este problema também ocorre em sistemas de maior porte, foram realizadas simulações aproximando a perturbação da barra de interface. Foram aplicados curtos-circuitos trifásicos nas Barras 39, 13, 14, 15 e 16. Estas barras estão localizadas em ordem crescente de proximidade em relação à barra de interface.

Neste experimento foi utilizado o *Curve Fitting* para o cálculo do equivalente do sistema detalhado, conforme o item III.2.1 e a frequência barra de interface no cálculo do

equivalente do sistema externo, conforme o item III.3.1. Os resultados são apresentados na Figura IV.22.

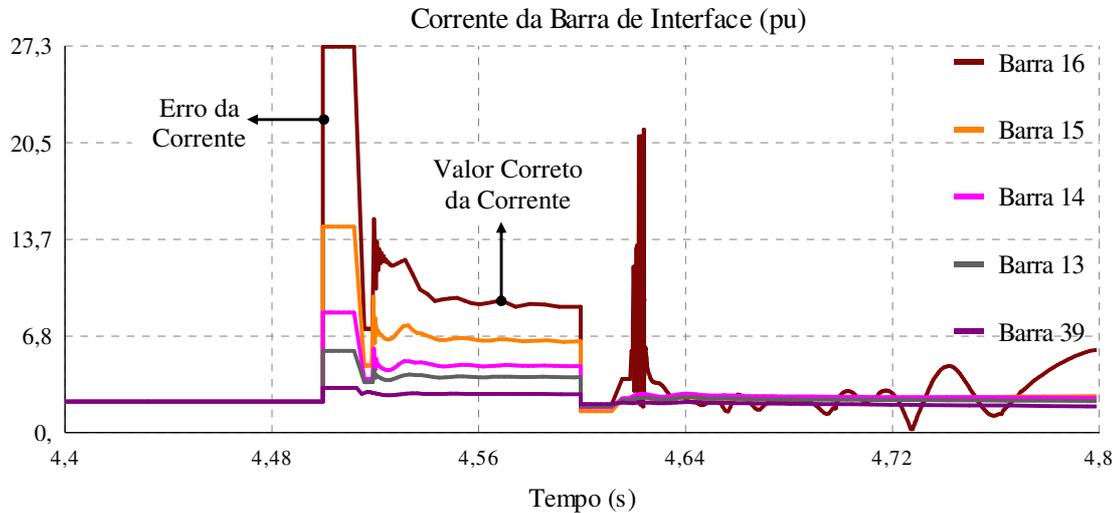


Figura IV.22 – Experimento #4 - Corrente para diferentes locais da perturbação

Na Figura IV.22, é possível observar que o erro da corrente medida na barra de interface aumenta à medida que a perturbação se aproxima dela. Isto ocorre devido à contribuição dos sistemas externo e detalhado para a corrente de curto-circuito ser maior quando se aproxima a perturbação em relação à barra de interface. Para o caso mais extremo, onde o curto é aplicado na própria barra de interface, a simulação apresenta um erro significativo causando problemas de convergência. Sendo assim, é recomendável que se estabeleça um critério para que estas diferenças não provoquem prejuízo nos resultados da simulação híbrida. Em [27] é proposto o conceito de distância elétrica baseado na sensibilidade da variação de tensão em uma barra do sistema em função da alteração da tensão em outra barra como critério para determinação do local da perturbação.

IV.4.3 Experimento #5 – Métodos de Conversão da Forma de Onda

O Experimento #5 teve como objetivo avaliar o método de conversão das formas de onda instantâneas para grandezas fasoriais utilizado no cálculo do equivalente do sistema detalhado, vide item III.2.1. No desenvolvimento realizado existe a possibilidade de se utilizar o *Curve Fitting* com mínimos quadrados ou a Transformada Rápida de Fourier – FFT.

O evento simulado corresponde a um curto-circuito trifásico na Barra 13 com duração de 100 ms, considerando a frequência barra de interface no cálculo do equivalente do sistema externo e variando o cálculo do equivalente do sistema detalhado, considerando o *Curve Fitting* ou a FFT. A grandeza definida para ilustrar os resultados foi a corrente da barra de interface, conforme ilustrado na Figura IV.23.

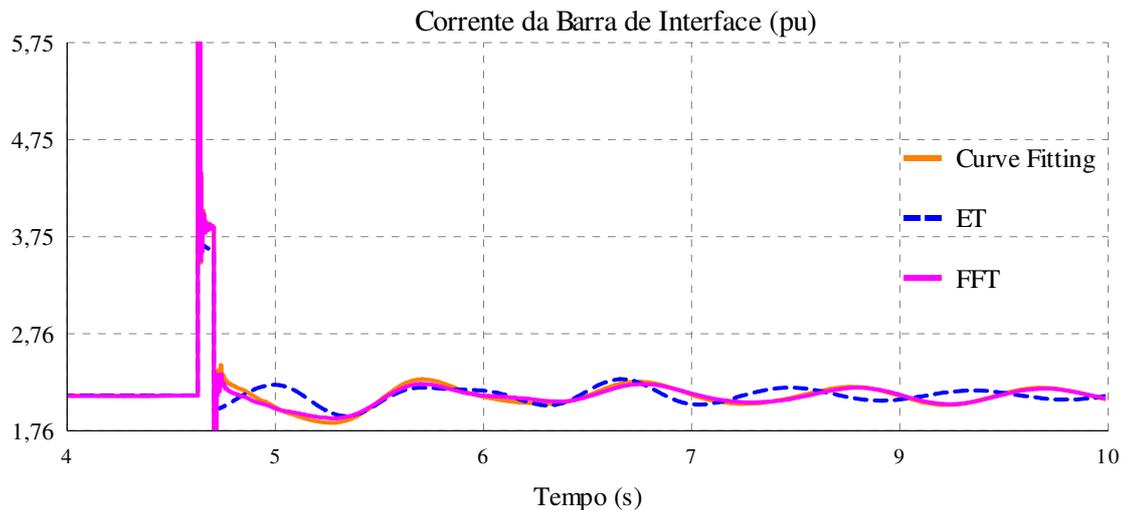


Figura IV.23 – Experimento #5 - Resultados com diferentes métodos de conversão

A partir da corrente da barra de interface, ilustrada na Figura IV.23 é possível concluir que respostas são muito próximas, não havendo ganho de desempenho em função do método de conversão utilizado. Esta resposta está de acordo com resultados apresentados em [46] que mostram a equivalência dos métodos de conversão citados.

Neste caso, será mantida a utilização do *Curve Fitting* por sua rotina de cálculo estar incorporada ao código da ferramenta de ET possibilitando assim a utilização com outras ferramentas de TEM que não possuam o cálculo da FFT.

IV.4.4 Experimento #6 – Intervalo de Tempo do Protocolo Serial

O protocolo paralelo é substituído pelo protocolo serial após ocorrer um distúrbio no sistema pelo instante de tempo de um ciclo da forma de onda senoidal na frequência fundamental para realizar o cálculo das grandezas fasoriais, ou seja, aproximadamente 16,7 ms. O Experimento #6 teve como objetivo avaliar a redução da duração do protocolo serial para tempos inferiores a um ciclo, visando reduzir ou eliminar o erro da corrente após as perturbações de forma mais rápida. O evento simulado corresponde a um curto-

circuito na Barra 13 com duração de 100ms utilizando os valores de meio ciclo da forma de onda para a realização do *Curve Fitting* e da FFT. Os resultados são apresentados na Figura IV.24.

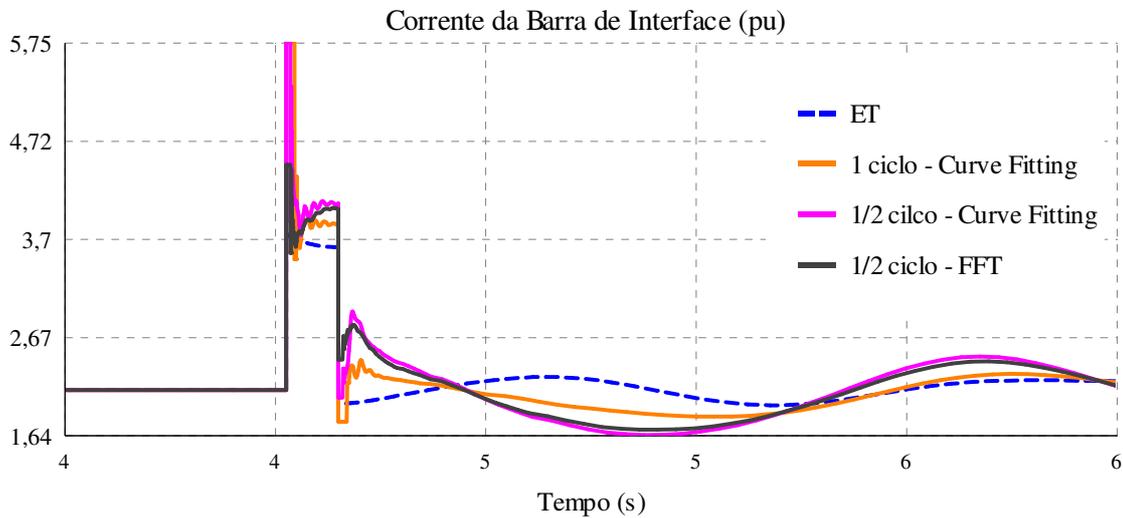


Figura IV.24 – Experimento #6 - Resultados com diferentes tempos de conversão

Conforme observado na Figura IV.24, a utilização de um tempo de espera com valor de um ciclo da forma de onda apresenta resultados melhores, uma vez que a diferença em relação a resposta de referência aumenta para intervalos de tempo menores. Isto ocorre devido ao cálculo dos fasores ser baseado na janela de um ciclo, sendo assim, quando o tempo de espera após a perturbação é inferior a um ciclo são considerados valores com sistema íntegro e valores com sistema em perturbação no cálculo dos fasores, o que não traduz de forma adequada o impacto das perturbações.

IV.4.5 Experimento #7 – Influência do Passo Integração

Os desenvolvimentos de simuladores híbridos apresentados na literatura utilizam ferramentas de ET com passo de integração fixo, tipicamente na faixa de 2 ms a 8 ms. O Experimento #7 tem como objetivo avaliar a influência do passo de integração variável da ferramenta de ET nos resultados da simulação híbrida.

Foram testados diferentes valores para o passo de integração na ferramenta de ET, passo variável limitado a um valor máximo de meio ciclo, passo fixo em meio ciclo e o passo fixo com 2 ms. O evento simulado corresponde a um curto-circuito na Barra 13 com duração de 100ms utilizando o *Curve Fitting* para o cálculo do equivalente do

sistema detalhado, conforme o item III.2.1 e a frequência barra de interface no cálculo do equivalente do sistema externo, conforme o item III.3.1. Os resultados são apresentados na Figura IV.25.

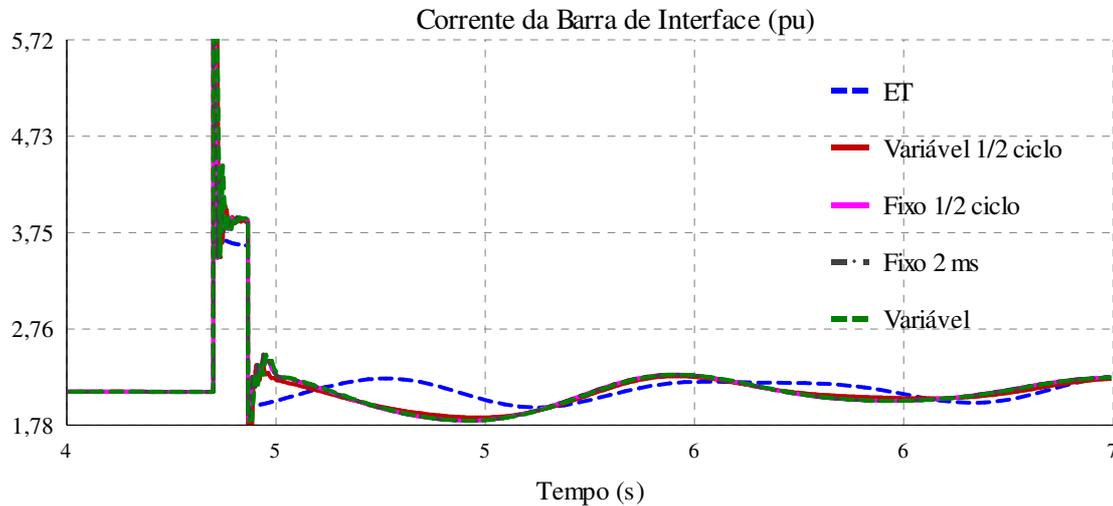


Figura IV.25 – Experimento #7 - Resultado com diferentes passos de integração

A Figura IV.25 mostra que o tipo de passo de integração não interfere de forma significativa nos valores obtidos. Esse resultado está coerente, uma vez que o passo de integração variável só aumenta à medida que o sistema se aproxima de uma condição de regime, onde as variações das grandezas são menores. Neste experimento os tempos computacionais para cada opção de passo de integração foram avaliados e encontram-se na Tabela IV.6.

Tabela IV.6 – Experimento #7 - Tempos de processamento

Passo de integração	Simulação (segundos)	Processamento (segundos)
Variável	15	67,516
Variável ½ ciclo		118,637
Fixo ½ ciclo		132,473
Fixo 2 ms		234,981

A Tabela IV.6 indica que dentre as opções consideradas, o passo de integração variável é a alternativa mais eficiente, retornando os mesmos resultados com aproximadamente metade do tempo de processamento.

VI.5 Sistema 39 Barras com HVDC

Os Experimentos 8 e 9 serão realizados utilizando um sistema de transmissão CCAT, objetivo principal de utilização da simulação híbrida. O sistema foi constituído a partir do Sistema 39 Barras com a substituição do Gerador 10 pelo sistema CCAT, adaptado a partir do sistema Benchmark do Cigre [47].

Para os experimentos a Barra 39 foi definida como a barra de interface. O sistema detalhado é composto pelo sistema CCAT, enquanto o sistema externo é composto por toda rede de transmissão CA, conforme a Figura IV.26.

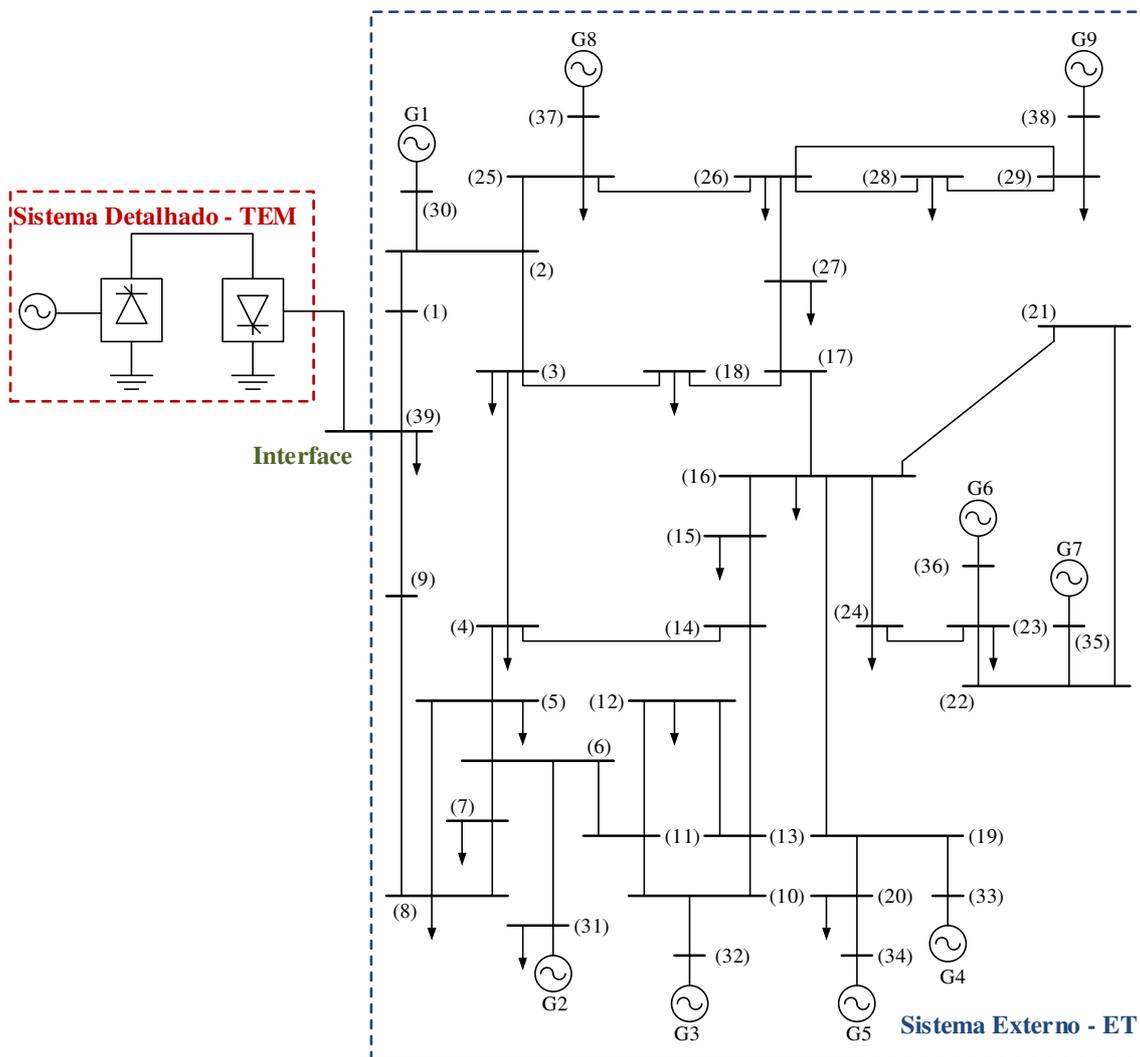


Figura IV.26 - Sistema 39 Barras com CCAT

Esse sistema foi representado integralmente apenas na ferramenta de TEM para a validação dos resultados. Nos experimentos anteriores os sistemas eram representados integralmente em ambas ferramentas e as condições de regime permanente foram obtidas

através do fluxo de potência na ferramenta de ET e os valores utilizados na inicialização dos componentes na ferramenta de TEM.

Em casos onde não há representação do sistema detalhado na ferramenta de ET para obtenção das condições de regime permanente e conseqüentemente das condições iniciais dos componentes do sistema detalhado, devem ser utilizados componentes que levam às mesmas condições de tensão e ângulo na barra de interface, viabilizando a sincronização da simulação híbrida. Foram utilizadas fontes ideais e cargas com potência constante para reproduzir a contribuição dos subsistemas na interface.

IV.5.1 Experimento #8 – Perturbações no Sistema Externo

O Experimento #8 teve como objetivo avaliar o comportamento dinâmico do sistema com HVDC para uma perturbação no sistema externo. O evento simulado corresponde a um curto-circuito trifásico na Barra 13 com duração de 100 ms considerando o *Curve Fitting* para o cálculo do equivalente do sistema detalhado, conforme o item III.2.1 e a frequência barra de interface no cálculo do equivalente do sistema externo, conforme o item III.3.1.

Os resultados são apresentados da Figura IV.27 à Figura IV.32. As curvas em vermelho representam as grandezas do sistema completo na ferramenta de TEM e as curvas verdes as grandezas resultantes da simulação híbrida.

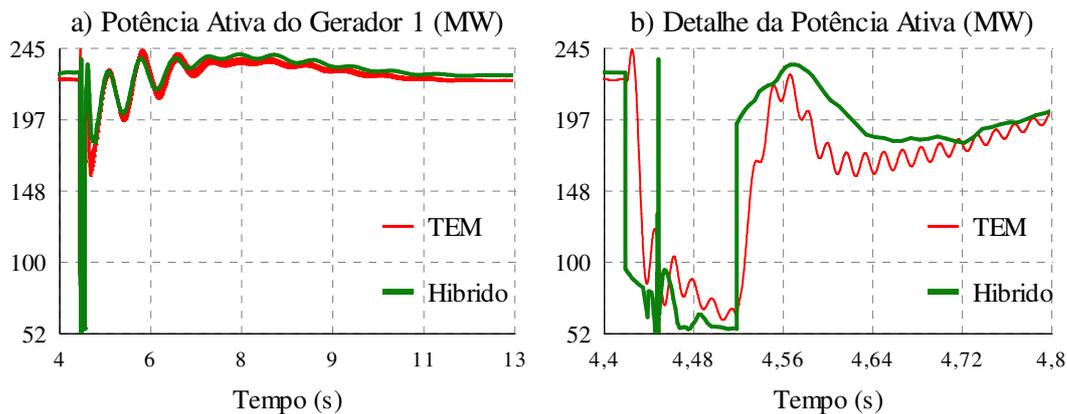


Figura IV.27 – Experimento #8 - Potência ativa do Gerador 1

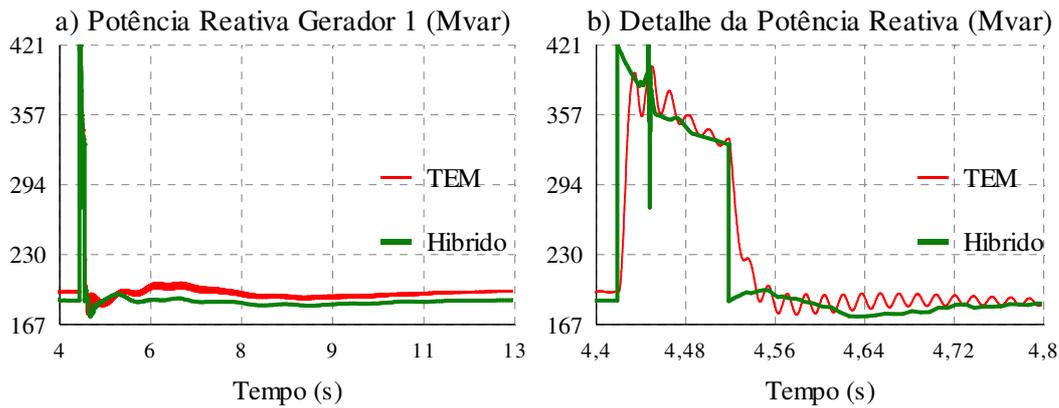


Figura IV.28 – Experimento #8 - Potência reativa do Gerador 1

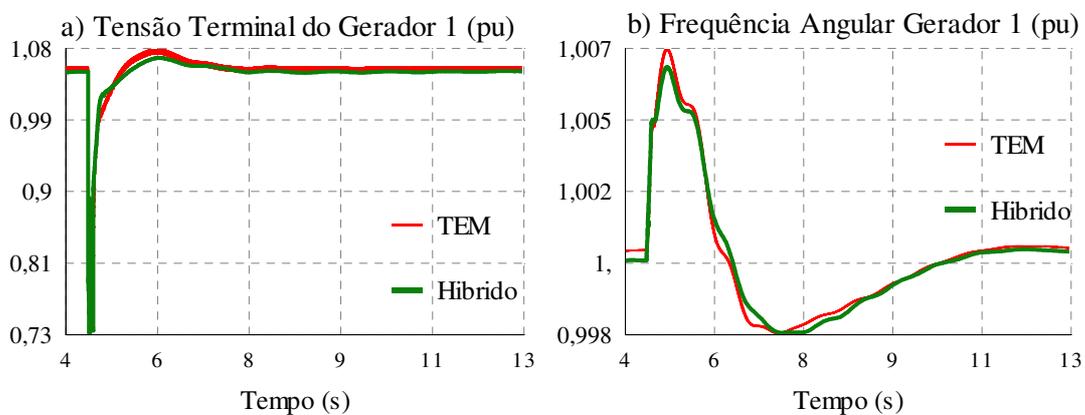


Figura IV.29 – Experimento #8 - Tensão terminal e frequência do Gerador 1

A análise dos itens (a) e (b) da Figura IV.27 à Figura IV.29 indica que o comportamento dinâmico do gerador, pertencente ao sistema externo, durante a simulação híbrida mostrou-se aderente aos resultados da simulação completa na ferramenta de TEM

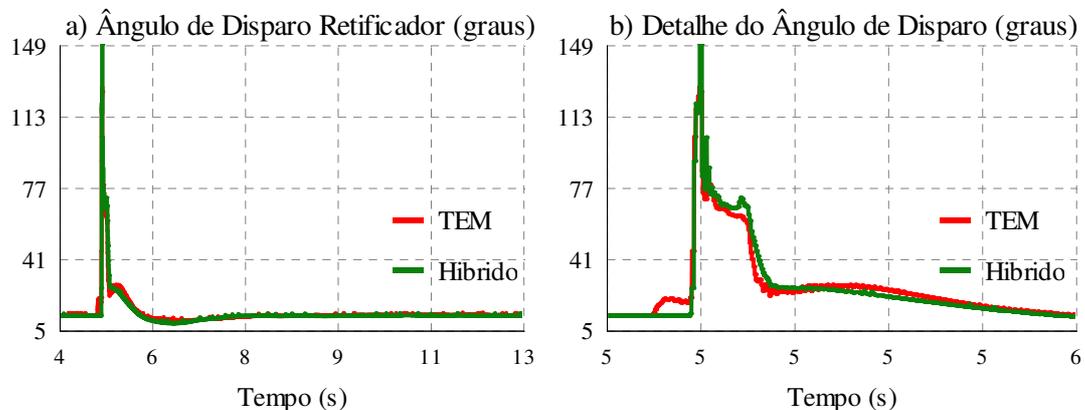


Figura IV.30 – Experimento #8 - Ângulo de disparo do retificador

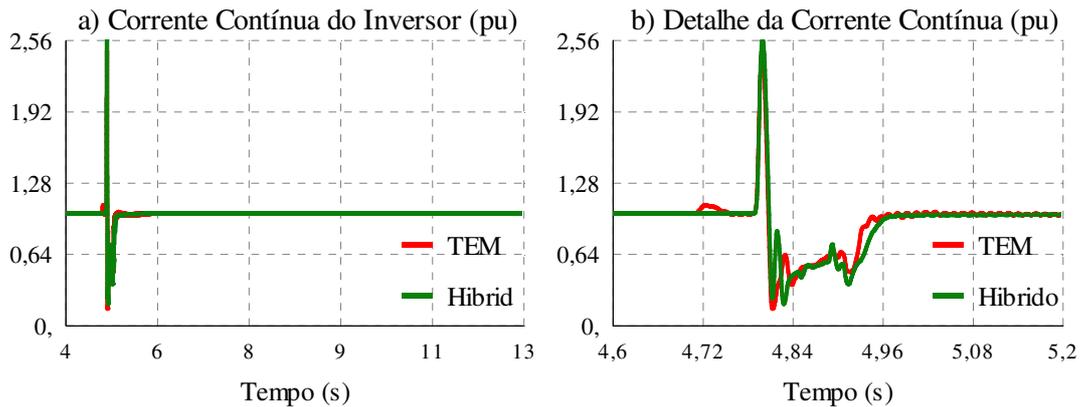


Figura IV.31 – Experimento #8 - Corrente contínua do inversor

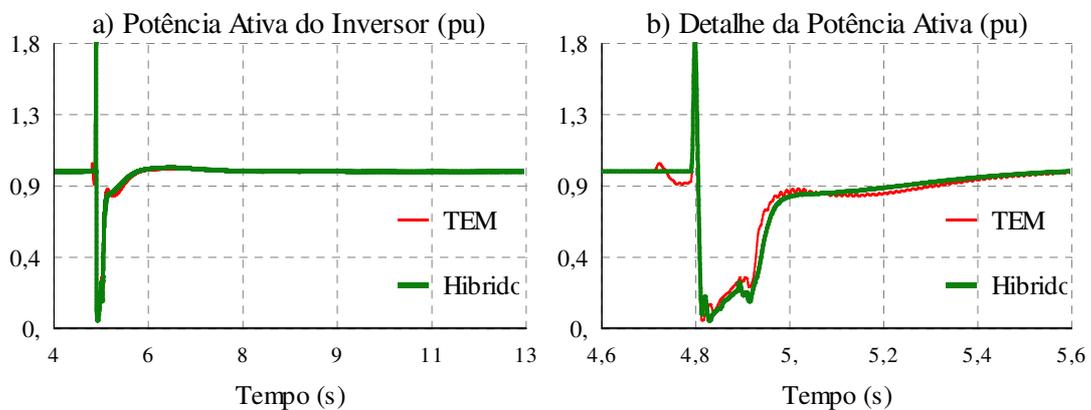


Figura IV.32 – Experimento #8 - Potência ativa do inversor

As curvas apresentadas nos itens (a) e (b) da Figura IV.30 à Figura IV.32 mostram que os resultados do sistema CCAT, representado no sistema detalhado, são muito próximos dos resultados da simulação individualizada na ferramenta de TEM. As diferenças decorrentes do protocolo de comunicação provocam pequenas diferenças após as descontinuidades da perturbação, mas não prejudicam o desempenho dinâmico das características do elo CC.

A Figura IV.33 apresenta o detalha da corrente injetada na barra de interface durante a simulação híbrida. Observa-se que o erro da corrente neste experimento foi proporcionalmente menor em comparação aos experimentos anteriores, isto ocorre porque o sistema HVDC não contribui para a corrente de curto-circuito tendo um comportamento dinâmico mais próximo ao de uma carga com potência constante, o que gera um erro menor durante o cálculo do equivalente do sistema externo com o sistema em perturbação.

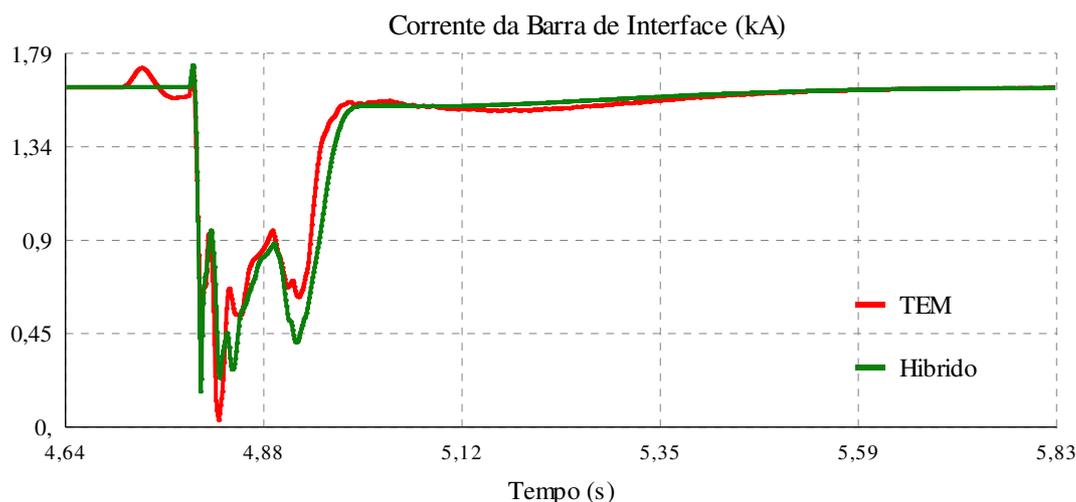


Figura IV.33 – Experimento #8 - Corrente da barra de interface

Os tempos de processamento das simulações foram contabilizados e encontram-se na Tabela IV.

Tabela IV.7 – Experimento #8 - Tempos de processamento

Perturbação	Ferramenta	Processamento (segundos)	Simulação (segundos)
Curto Circuito	TEM	138,297	15
	Híbrido	38,973	

Neste este experimento, a simulação híbrida proporcionou uma redução no tempo de processamento de 72 %. A medida que se transferem componentes do sistema detalhado para o sistema externo a tendência é que os tempos de simulação sejam ainda menores.

IV.5.2 Experimento #9 – Perturbações no Sistema Detalhado

O objetivo do Experimento #9 foi avaliar o comportamento dinâmico para uma perturbação na rede do sistema detalhado. O evento simulado corresponde a um curto-circuito trifásico na barra terminal do inversor com duração de 80 ms. A Figura IV.34 apresenta a corrente da barra de interface, que nesse experimento apresentou um erro significativamente maior que no experimento anterior.

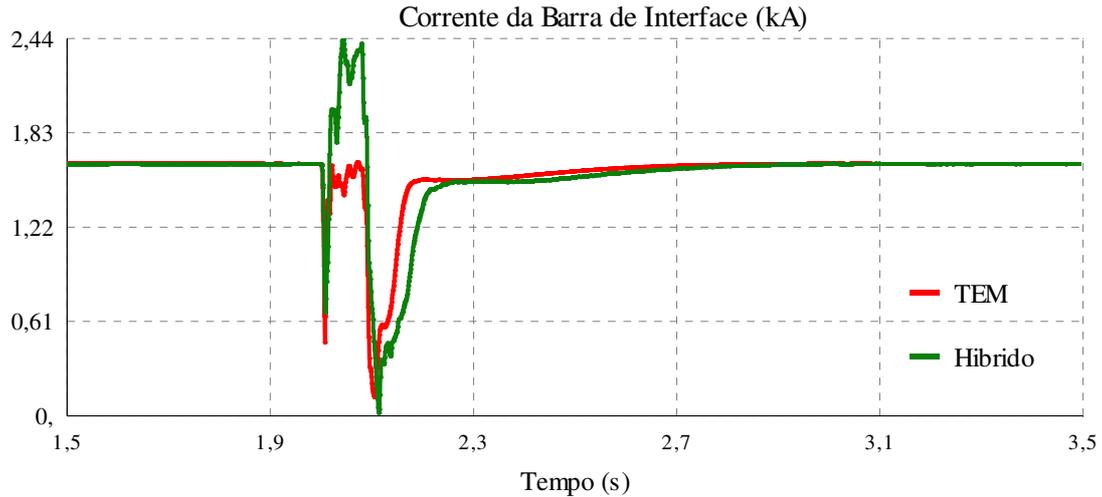


Figura IV.34 – Experimento #9 - Corrente da barra de interface

Neste caso foi identificado que as trocas de informação durante a aplicação da perturbação no sistema detalhado não estão ocorrendo conforme mencionado no item III.4. As informações estão sendo transmitidas segundo o protocolo apresentado na Figura IV.35 e explicado em seguida.

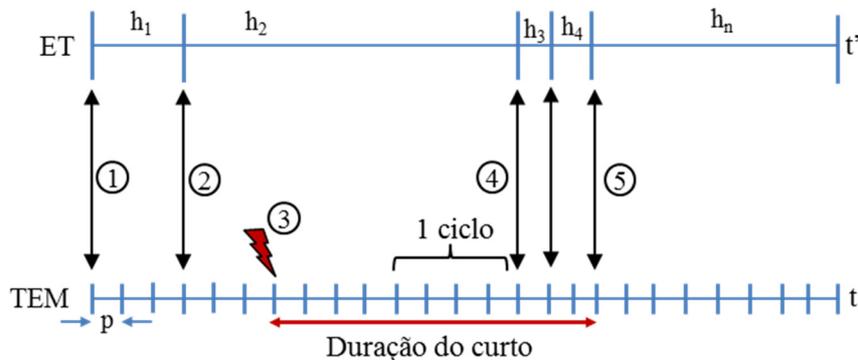


Figura IV.35 – Protocolo de comunicação para perturbação no sistema detalhado

- Em (1) as ferramentas estão sincronizadas e trocam equivalentes a cada passo da ET. Como o sistema está em uma condição de regime o passo de integração da ET aumenta.
- Em (2) após atualizar os equivalentes, se estabelece o novo instante de comunicação após h_2 segundos. Nesta situação a ferramenta de ET não possui a informação de que existe uma perturbação programada para ocorrer no instante (3). Caso a perturbação fosse no sistema externo, o passo h_2 seria ajustado para

que o equivalente do sistema em perturbação fosse calculado e enviado para o sistema detalhado neste momento.

- Em (3) é aplicado o curto-circuito no sistema detalhado. A ferramenta de TEM seguirá sendo processada com o equivalente recebido em (2) e a ET só irá receber o equivalente do sistema detalhado no instante (4). A forma adequada seria a ferramenta de ET entrar em modo de espera no instante (3), e aguardar a ferramenta de TEM ser executada por um ciclo para só então receber o equivalente do sistema detalhado.
- No instante (4) a ferramenta de ET recebe o equivalente do sistema detalhado com o efeito da perturbação. Com a variação no valor da corrente do equivalente o passo de integração será reduzido e os novos equivalentes serão trocados em intervalos de tempo mais curtos, conforme os passos h3 e h4. No instante do defeito o passo de integração era de 90 ms, após receber o equivalente do sistema detalhado em (4) o passo é reduzido para 1ms e no instante de extinção do curto o passo é de 9ms. Dessa forma, não há tempo hábil para que seja feita uma conversão adequada das grandezas instantâneas após a eliminação da perturbação.

A variação do passo de integração está ilustrada na Figura IV.36.

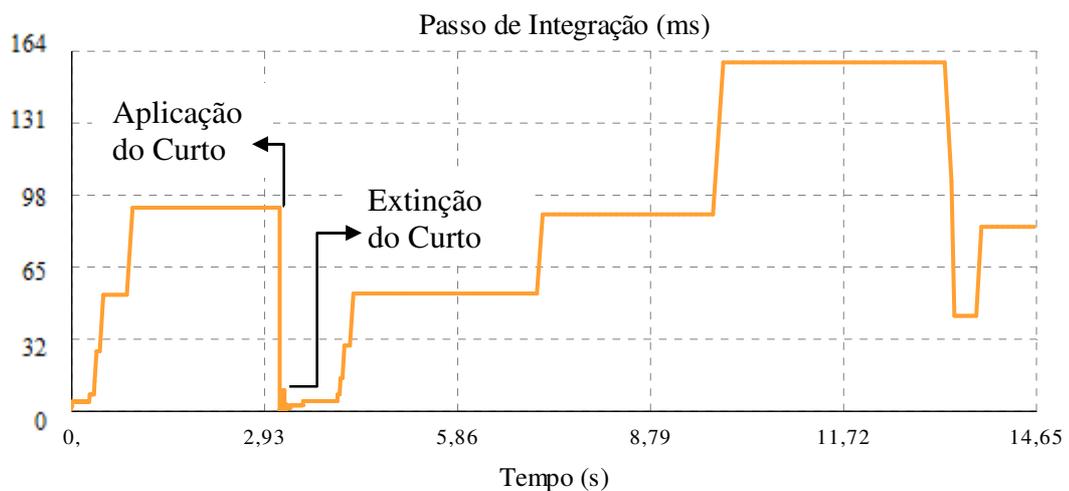


Figura IV.36 – Passo de integração na simulação híbrida

Sendo assim, é necessário que o protocolo de comunicação seja adequado de forma a ser capaz de identificar a perturbação no sistema detalhado, recalculando o seu passo e aguardar a ferramenta de TEM ser processada por um ciclo para que seja possível efetuar o *Curve Fitting*, tal qual ocorre para perturbações na rede do sistema externo.

CAPÍTULO V

Conclusões e Trabalhos Futuros

V.1 Conclusões

Diante da crescente complexidade de operação dos sistemas potência e dos equipamentos que o compõem, o interesse em ferramentas que ampliem a capacidade de representação e aumentem a fidelidade da reprodução dos fenômenos transitórios torna-se cada vez maior. Estas condições motivaram o desenvolvimento da plataforma de simulação híbrida que incorpora as características das ferramentas de TEM e ET em uma única simulação, permitindo explorar a capacidade de representação detalhada de componentes e a eficiência computacional de análise de redes de grande porte.

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a metodologia desenvolvida, através da análise do protocolo de comunicação que coordena a integração entre as ferramentas e a validação das formas de cálculo dos equivalentes do sistema externo e detalhado. Foram avaliados os métodos de conversão de valores instantâneos para fasores, as grandezas utilizadas no cálculo dos equivalentes e a influência do passo variável da ferramenta de ET na simulação.

Os resultados obtidos com a simulação híbrida para perturbações aplicadas na rede do sistema externo são encorajadores e mostraram-se aderentes às respostas provenientes das simulações individualizadas em cada uma das ferramentas. O equivalente do sistema externo mostrou-se capaz de transferir adequadamente as oscilações eletromecânicas para o sistema detalhado. Esta metodologia proporcionou uma redução nos tempos de simulação sem prejuízo da dinâmica do sistema. Conclui-se que a metodologia no seu estado atual de desenvolvimento pode beneficiar as simulações eletromecânicas com modelos detalhados de HVDC, parques eólicos e dispositivos *FACTS*. Ela também é capaz de complementar a simulação eletromagnética com a dinâmica de baixa frequência de redes de grande porte.

A partir deste trabalho, foram identificadas diferenças nas grandezas da barra de interface que são inerentes do protocolo de comunicação implementado e ocorrem devido à falta de informação do impacto da perturbação no outro subsistema durante o cálculo do equivalente. Esta diferença permanece por um instante de tempo pouco superior a um

ciclo após descontinuidades na rede e é atenuada conforme os equivalentes são atualizados ao longo da simulação. O erro das grandezas é proporcional a variação da corrente do outro subsistema. O subsistema com elementos ativos, que contribuem para correntes de curto-circuito, apresentou diferenças maiores em relação a sistemas somente com o elo CCAT, pois estes não contribuem para a corrente de curto-circuito, tendo seu comportamento mais semelhante ao de uma carga com potência constante.

A avaliação dos métodos de conversão das formas de onda para fasores mostrou que o *Curve Fitting* e o FFT são equivalentes e apresentam os melhores resultados utilizando um intervalo de espera de um ciclo da forma de onda após perturbações. Os dois métodos não apresentaram bons resultados para intervalos de tempo menores que um ciclo. O *Curve Fitting* foi mantido como opção padrão por ter suas rotinas de cálculo inseridas no código da ferramenta de ET, possibilitando a integração com outras ferramentas de TEM, que eventualmente não possuam recursos como o cálculo do FFT.

O passo de integração variável da ferramenta de ET mostrou-se vantajoso quando comparado com as opções com passo fixo, retornando os mesmos resultados com tempos de processamento significativamente menores.

Essa dissertação contribuiu para a evolução do desenvolvimento da simulação híbrida, indicando pontos de adequação da metodologia implementada inicialmente. Destaca-se a proposta de utilização da frequência da barra de interface no cálculo do equivalente do sistema externo e a identificação da necessidade de ajustes do protocolo de comunicação para distúrbios no sistema detalhado. Também foram indicadas recomendações de caráter prático como a forma de se obter as condições necessárias para inicialização da simulação híbrida e a confirmação da necessidade de se afastar a perturbação do local da barra de interface para que o erro do protocolo de comunicação não prejudique os resultados gerados.

V.2 Proposições para Trabalhos Futuros

Com base no trabalho apresentado, são sugeridos em seguida alguns pontos importantes para pesquisas e desenvolvimento futuros:

1. Estabelecer um critério para definir a proximidade da perturbação do local da barra de interface de forma que o erro das grandezas provenientes do protocolo de comunicação não interfira nos resultados. Uma proposta inicial seria validar o conceito

de distância elétrica baseado na sensibilidade da variação de tensão em uma barra do sistema em função da alteração da tensão em outra barra.

2. Investigar métodos que sejam capazes de converter as formas de onda instantâneas em grandezas fasoriais utilizando um intervalo de valores menor que um ciclo da forma de onda ou que não precisem utilizar métodos de conversão e realizem a conversão a partir da conservação de potência na barra de interface.

3. Avaliar a utilização de um Equivalente Norton simples e multiporta do sistema externo. Verificar se esta implementação traz melhorias em relação aos resultados apresentados com o Equivalente Thévenin. A opção multiporta é necessária para análise de sistemas maiores e com mais de um sistema HVDC, onde existe a necessidade de se estabelecer mais de uma barra de interface.

4. Implementar um equivalente do sistema externo dependente da frequência. Este desenvolvimento traz benefícios para simulação de TEM possibilitando a avaliação das dinâmicas de alta frequência de redes de grande porte.

5. Representação no lado ET de equivalentes de sequência negativa e zero para possibilitar a representação adequada de faltas assimétricas em ambos os sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ELGERD, O. I., *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. McGraw Hill: São Paulo, Brasil, 1977.
- [2] EREMIA, M., SHAHIDEHPOUR, M., *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*. CRC Press, Third Edition, April 2013.
- [3] WATSON, N., ARRILLAGA, J., *Power System Electromagnetic Transients Simulation*. Institute of Electric Engineering: London, United Kingdom, 2003.
- [4] ELECTRANIX – *Translator for Power System Simulation*. Disponível em: <www.electranix.com/E-TRAN/index.htm>
- [5] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, *Mapas do Sistema Interligado Nacional*. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: Junho de 2014.
- [6] EPE – Empresa de Pesquisa Energética, *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: Junho de 2014.
- [7] LOUIE, K. W., WANG, A. WILSON, P., BUCHANAN, P. “A Newly Built Power Flow Program in PSCAD/EMTDC for Electric Power System Studies” IEEE International Conference on Power System Technology, v. 2, pp. 1502-1507, November 2004.
- [8] NETO, C. A. S., PASSARO, M. C., SANTOS, M. G., et al. “Utilização do Programa Organon no ONS: Testes de Validação e Comparação de Resultados” XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Março de 2009.
- [9] HEFFERNAN, M. D., TURNER, K. S., ARRILLAGA, J., ARNOLD, C. P., *Computation of AC-DC System Disturbances, Parts I, II and III*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-100, pp. 4341-4348, November 1981.
- [10] REEVE, J.; ADAPA, R. “A New Approach to Dynamic Analysis of AC Networks Incorporating Detailed Modeling of DC Systems. Part I: Principles and

- Implementation.*” IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, pp 2005-2011, October 1988.
- [11] ANDERSON, G. W. J.; WATSON, N. R.; ARNOLD, C. P.; ARRILLAGA, J. “*A New Hybrid Algorithm for Analysis of HVDC and FACTS Systems*” IEEE Energy Management and Power Delivery, v. 2, pp. 462-467, November 1995.
- [12] SULTAN, M.; REEVE, J.; ADAPA, R. “*Combined Transient and Dynamic Analysis of HVDC and FACTS Systems*” IEEE Transactions on Power Delivery, v.13, pp. 1271-1277, October 1998.
- [13] WANG, X.; WILSON, P.; WOODFORD, D. “*Interfacing Transient Stability Program to EMTDC Program*” IEEE International Conference on Power System Technology, v. 2, pp. 1264-1269, October 2002.
- [14] WONG, S. M.; SZE, K. M.; SNIDER, L. A.; CHAN, K. W. “*Overcoming the Difficulties Associated With Interfacing Different Simulation Programs*” IEEE Advances in Power System Control, Operation and Management, v. 1, pp. 403-408, November 2003.
- [15] DO, V., MCCALLUM, D., GIROUX, P., KELPER, B., “*A Backward-Forward Interpolation Technique for a Precise Modelling of Power Electronics in HYPERSIM*” International Conference on Power Systems Transients, pp. 337-342, June 2001.
- [16] SU, H. T.; CHAN, K. W.; SNIDER, L. A. “*Parallel Interaction Protocol for Electromagnetic and Electromechanical Hybrid Simulation*” IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, v.152, pp. 406-414, May 2005.
- [17] SU, H. T.; CHAN, K. W.; SNIDER, L. A.; CHUNG, T. S. “*A Parallel Implementation of Electromagnetic Electromechanical Hybrid Simulation Protocol*” IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, v. 1, pp. 151-155, April 2004.
- [18] SU, H. “*Real-Time Electromagnetic Electromechanical Hybrid Transient Simulation for Large Power Systems*” Ph.D. Thesis at Hong Kong Polytechnic University, September 2004.

- [19] SU, H. T.; CHAN, K. W.; SNIDER, L. A.; CHUNG, T. S; FANG, D.Z. “*Recent Advancements in Electromagnetic and Electromechanical Hybrid Simulation*” International Conference on Power System Technology, v.2, pp. 1479-1484, November 2004.
- [20] SU, H. T.; CHAN, K. W.; SNIDER, L. A., SOUMANGE, J. C. “*Advancements on the Integration of Electromagnetic Transients Simulator and Transient Stability Simulator*” International Conference on Power Systems Transients, pp. 19-23, June 2005.
- [21] LIN, X.; GOLE, A. M.; YU, M. “*A Wide-Band Multi-Port System Equivalent for Real-Time Digital Power System Simulators*” IEEE Transactions on Power Systems, v. 24, pp. 237-249, February 2009.
- [22] LIN, X. “*System Equivalent for Real Time Digital Simulator*” Ph.D. Thesis at Department of Electrical and Computer Engineering. University of Manitoba, 2010.
- [23] LIANG, Y.; LIN, X.; GOLE, A. M.; YU, M. “*Improved Coherency-Based Wide-Band Equivalents for Real-Time Digital Simulators*” IEEE Transactions on Power Systems, v. 26, pp 1410-1417, August 2011.
- [24] LIANG, Y. “*An Improved Wide-Band System Equivalent Technique for Real Time Digital Simulator*” Ph.D. Thesis at Department of Electrical and Computer Engineering. University of Manitoba, 2011.
- [25] ZHANG, Y.; WU, W.; ZHANG, B.; GOLE, A. M. “*A Decoupled Interface Method for Electromagnetic and Electromechanical Simulation*” IEEE Electrical Power and Energy Conference, v.1, pp. 187-191, October 2011.
- [26] ABHYANKAR, S.; FLUECK, A. J. “*An Implicitly-Coupled Solution Approach for Combined Electromechanical and Electromagnetic Transients Simulation*” IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-8, July 2012.
- [27] ZHANG, Y.; GOLE A. M.; WU, W.; ZHANG, B.; SUN, H. “*Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements*” IEEE Transactions on Power Systems, v. 28, pp. 357-366, February 2013.

- [28] PLUMIER, F.; GEUZAIN, C.; VAN CUSTEN, T. “*A Multirate Approach to Combine Electromagnetic Transients and Fundamental-Frequency Simulations*” International Conference on Power Systems Transients, July 2013.
- [29] STOTT, B. “*Power System Dynamic Response Calculation*” Proceedings of the IEEE, v. 67, pp. 219-241, February 1979.
- [30] ABHYANKAR, S. “*Development of an Implicitly Coupled Electromechanical and Electromagnetic Transients Simulator for Power Systems*” Ph.D. Thesis at Graduate College of Illinois Institute of Technology, December 2011.
- [31] Manitoba HVDC Research Center, *PSCAD/EMTDC Version 4.4 – User Manual*. Manitoba, Canada, 2014.
- [32] CIGRÉ – International Council on Large Electric Systems, *Guidelines for Representation of Networks Elements When Calculating Transients*, Working Group 33.02 Brochure no. 39, 1990.
- [33] MARTINEZ, J. A. V. “*Power System Transients: Parameter Determination*” CRC Press, 1th Edition, 2009
- [34] ZHANG, L., DOFNAS, L., “*A Novel Method to Mitigate Commutation Failures in HVDC Systems*” IEEE International Conference in Power System Technology, v. 1, pp. 51-56, October 2002.
- [35] CARVALHO, A. R., ALMEIDA, L. P., DANIEL, L. O., BARROS, J. G. C., “*Princípios dos Controlos Aplicados a Elos de Transmissão em CCAT*” XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Março 2009.
- [36] PADYAR, K. R., “*HVDC Power Transmission System: Technology and System Interactions*” New Age International (P) Ltd, First Edition, 1990.
- [37] ALSTOM Group, *HVDC for Beginners and Beyond*, Disponível em: <www.alstom.com>. Acesso em: Junho de 2014.
- [38] DOMMEL, H.W. “*Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multi-phase networks*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 88, pp. 734-741, April 1969.

- [39] ARAUJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A., *Cálculos de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005.
- [40] MARTINEZ, J. A. V. “*Digital Computation of Electromagnetic Transients in Power Systems: Current Status*” IEEE Working Group of Modeling and Analysis of Switching Transients Using Digital Programs, 2009.
- [41] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*”, IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1387-1401, August 2004.
- [42] P. KUNDUR, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill: New York, USA, 1994.
- [43] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, *Procedimentos de Rede - Submódulo 23.3 - Diretrizes e Critérios para Estudos de Estabilidade Eletromecânica*, Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: Junho 2014.
- [44] GRIGSBY, L. L., *The Electric Power Engineering Handbook*. CRC Press, Second Edition, Alabama, USA 2001.
- [45] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, *Manual of ORGANON – Introduction Methodology –Volume III, Version 1.1*, April 2005.
- [46] ELKALASHY, N. I., KAWADY, T. A., MANSOUR, N. M., “*Aspects of Phasor Angle Measurement for Wind Farm Protection Applications*” International Conference on Power Systems Transients, Delft, Holland, June 2011.
- [47] SZECHTMAN, M., WESS, T., THIO, C. V., “*First Benchmark Model for HVDC Control Studies*” CIGRE – Working Group 14.02, ELECTRA, No. 135, pp. 54-73, April 1991.
- [48] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, *Manual of ORGANON – Dynamic Models Reference, Vol. II, Version 1.2*, April 2006.

APÊNDICE A – Métodos de Conversão de Forma de Onda para Fasor

Nesta seção será apresentado com mais detalhes as características e o equacionamento dos métodos de conversão das formas de onda instantâneas em grandezas fasoriais.

A.1 *Curve Fitting* com Mínimos Quadrados

O Método do *Curve Fitting* determina, a partir da técnica dos mínimos quadrados, os valores de amplitude e defasagem angular de um sinal senoidal na frequência fundamental que melhor se ajusta a um conjunto de dados adquirido. O método dos mínimos quadrados define como o melhor sinal, aquele retorna a menor soma do erro quadrático resultante da diferença entre o sinal ajustado e o sinal adquirido.

O equacionamento incorporado às rotinas de cálculo da ferramenta de ET foi realizado baseado na proposição descrita em [3]. O sinal a ser determinado encontra-se na equação (A.1) e pode ser reescrito de acordo com as equações (A.2) e (A.3).

$$y(t) = A \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (\text{A.1})$$

$$\delta = \omega t_0 \quad (\text{A.2})$$

$$y(t) = A \text{sen}(\omega t) \cos(\omega t_0) - A \cos(\omega t) \text{sen}(\omega t_0) \quad (\text{A.3})$$

Onde,

- A : amplitude do sinal senoidal;
- δ : defasagem angular do sinal senoidal;
- ω : frequência do sinal senoidal;
- t_0 : instante de tempo arbitrário;
- t : tempo.

A partir das relações descritas nas equações (A.4) à (A.7), a equação (A.3) pode ser reescrita na forma (A.8), conforme indicado a seguir.

$$C_1 = A \cos(\omega t_0) \quad (\text{A.4})$$

$$C_2 = A \text{sen}(\omega t_0) \quad (\text{A.5})$$

$$F_1(t) = \text{sen}(\omega t) \quad (\text{A.6})$$

$$F_2(t) = \text{cos}(\omega t) \quad (\text{A.7})$$

$$y(t) = C_1 F_1(t) + C_2 F_2(t) \quad (\text{A.8})$$

Como a frequência da forma de onda senoidal a ser estipulada é conhecida, os termos $F_1(t)$ e $F_2(t)$ podem ser determinados para qualquer instante de tempo. A obtenção dos termos C_1 e C_2 e conseqüentemente da amplitude e defasagem angular é realizada a partir da comparação da equação (A.8) com um sinal adquirido, conforme a equação (A.9).

$$E = x(t) - y(t) \quad (\text{A.9})$$

Onde,

- E : erro entre o sinal adquirido e o sinal ajustado;
- $x(t)$: sinal adquirido;
- $y(t)$: sinal ajustado.

O erro para cada valor discreto das curvas pode ser representado na forma matricial, conforme as equações (A.10) e (A.11).

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_1(t_1) & F_2(t_1) \\ F_1(t_2) & F_2(t_2) \\ \vdots & \vdots \\ F_1(t_n) & F_2(t_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$[e] = [X] - [F][C] \quad (\text{A.11})$$

O erro quadrático é calculado a partir da matriz apresentada em (A.11), conforme indicado nas equações (A.12).

$$E = [e]^T [e] = e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2 \quad (\text{A.12})$$

A minimização do erro é obtida através das equações (A.13) e (A.14).

$$\frac{\partial E}{\partial C} = -2[F]^T[X] + 2[F]^T[F][C] = 0 \quad (\text{A.13})$$

Os termos C_1 e C_2 são determinados a partir da equação (A.13) conforme exposto na equação (A.14) e (A.15).

$$[C] = [[F]^T[F]]^{-1}[F]^T[X] \quad (\text{A.14})$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1F_1(t_i) & F_1F_2(t_i) \\ F_2F_1(t_i) & F_2F_2(t_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(t_i)x(t_i) \\ F_2(t_i)x(t_i) \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

Com os valores de C_1 e C_2 calculados os valores da amplitude e da defasagem angular da forma de onda na frequência fundamental são determinados a partir da substituição nas equações (A.4) e (A.5). Os valores são calculados recursivamente a partir de dados sequencias adquiridos nas simulações na ferramenta de TEM.

A.2 Transformada Rápida de Fourier – FFT

A definição de séries de Fourier estipula que qualquer sinal ou forma de onda pode ser decomposto em um somatório de formas de onda senoidais múltiplas da frequência fundamental com amplitude e fase apropriadas.

A Transformada Rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* – FFT é uma técnica de processamento de sinais que permite calcular de forma eficiente a Transformada de Fourier de Tempo Discreto – DTFT e a sua inversa. A DTFT é a técnica utilizada para transformar um sinal discreto no domínio do tempo para o domínio da frequência, através da equação (A.16).

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (\text{A.16})$$

O cálculo da FFT é realizado em tempo de execução nas simulações no domínio do tempo e utiliza sempre um intervalo de tempo no valor de um ciclo da forma de onda na frequência fundamental. A amostragem dos sinais é realizada de acordo com o Critério de Nyquist, que estipula que a taxa de aquisição do sinal a ser transformado deve ser maior que o dobro do valor da maior frequência harmônica de interesse. A amostragem

em frequências menores pode resultar no fenômeno conhecido como aliasing, gerando erro no sinal a ser estimado, conforme a Figura A.1.

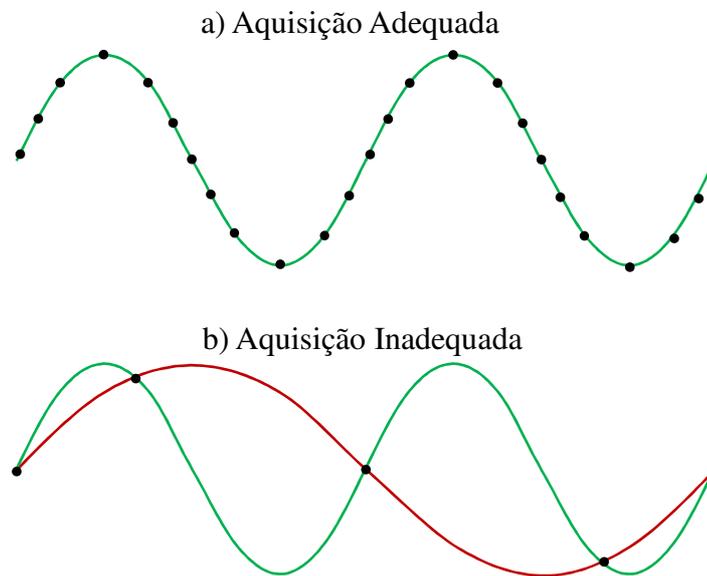


Figura A.1 – Aquisição adequada e inadequada com efeito de *aliasing*

Para evitar a ocorrência deste fenômeno o sinal adquirido é filtrado para eliminar componentes harmônicas de ordem muito elevada. O modelo utilizado já possui um filtro passa-baixa incorporado na sua rotina de cálculo.

APÊNDICE B – Dados dos Sistemas Teste Utilizados

O Apêndice B apresenta os dados dos sistemas teste utilizados nas simulações do presente trabalho. São fornecidos os parâmetros da rede elétrica e dos modelos de componentes dinâmicos. A ferramenta de ET possui uma biblioteca de modelos dinâmicos que seguem o padrão IEEE [48]. A representação na ferramenta de TEM foi realizada utilizando modelos da biblioteca E-TRAN [4] que são compatíveis com os utilizados na simulação de ET.

B.1. Sistema #1 – Sistema Radial com Um Gerador

Este sistema teste é composto por um gerador alimentando uma carga através de um sistema de transmissão radial, contendo um transformador e duas linhas de transmissão em série, conforme apresentado na Figura IV.1.

B.1.1. Parâmetros da Rede Elétrica

Os dados de geração, como sua respectiva capacidade de geração de potência ativa e reativa, estão descritos na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Dados de geração do Sistema #1

Barra	Nome	Pmax (MW)	Qmax (Mvar)	Qmin (Mvar)
100	Gerador	1151	-9999	9999

Os parâmetros do transformador e das linhas de transmissão estão apresentados na Tabela B.2 e na Tabela B.3, respectivamente.

Tabela B.2 – Parâmetros do transformador do Sistema #1

De – Para	R (%)	X (%)	Tap (pu)
100 – 101	0.0	2.0	1.0

Tabela B.3 – Parâmetros das linhas de transmissão do Sistema #1

De – Para	R (%)	X (%)	B (Mvar)
101 – 102	0.0	1.0	0.0
102 – 103	0.0	1.0	0.0

A carga ativa e reativa é representada por um modelo de impedância constante, os seus valores encontram-se na Tabela B.4.

Tabela B.4 – Dados da carga do Sistema #1

Barra	Nome	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)
103	Carga	830	20

B.1.2. Modelos de Componentes Dinâmicos

Nesta seção serão apresentados os modelos dinâmicos do gerador e seus controladores como regulador de tensão e regulador de velocidade. O gerador foi representado por um modelo de polos salientes com dois enrolamentos de eixo direto e dois enrolamentos no eixo em quadratura, conforme a Figura B.1. Os parâmetros encontram-se na Tabela B.5.

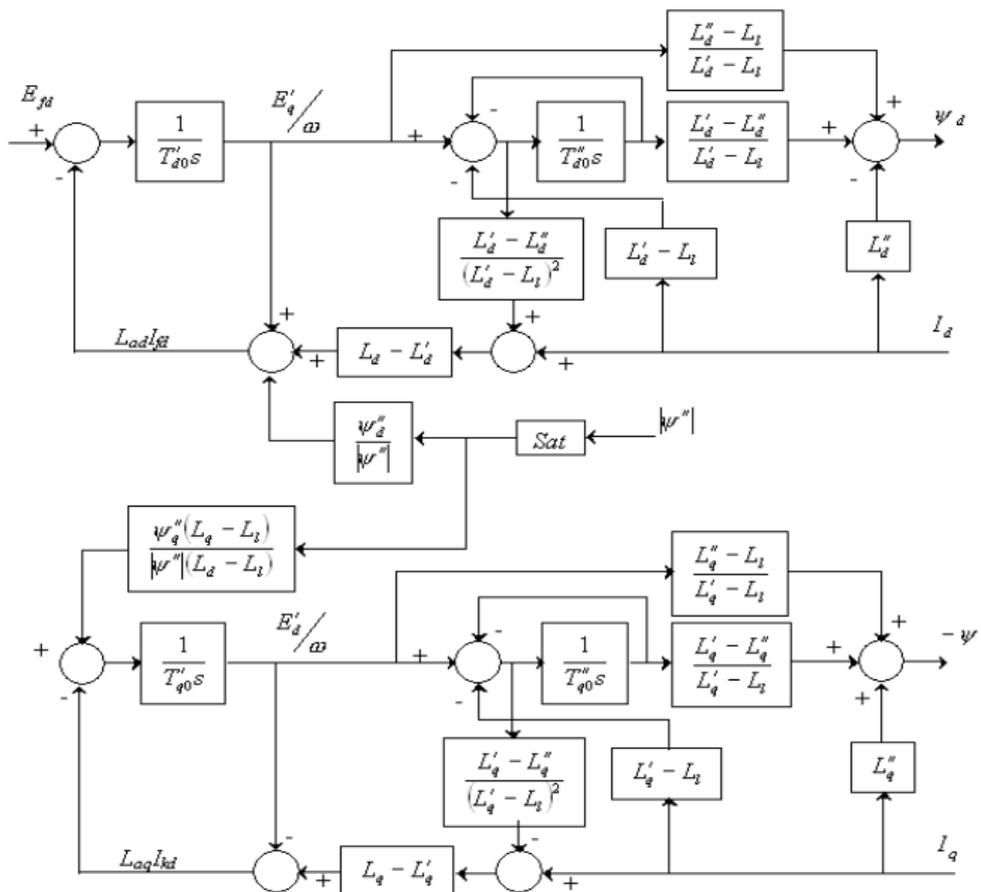


Figura B.1 – Modelo de gerador de polos lisos

Tabela B.5 – Parâmetros do gerador do Sistema #1

Parâmetros		Parâmetros	
X_d (pu)	1,643	X_t (pu)	0,0
X'_d (pu)	0,3169	T'_d (s)	7,61
X''_d (pu)	0,246	T''_d (s)	0,043
X_q (pu)	1,573	T'_q (s)	0,84
X'_q (pu)	0,4793	H (MW/MVA.s)	5,32
X''_q (pu)	0,246	D (pu/pu)	0,0
R_a (pu)	0,0	T''_q (s)	0,065
Base (MVA)	1151	A_g	0,0
X_l (pu)	0,1992	B_g	0,0

O diagrama de blocos do Regulador Automático de Tensão – RAT e da excitatriz com os seus respectivos parâmetros encontram-se na Figura B.2 e na Tabela B.6.

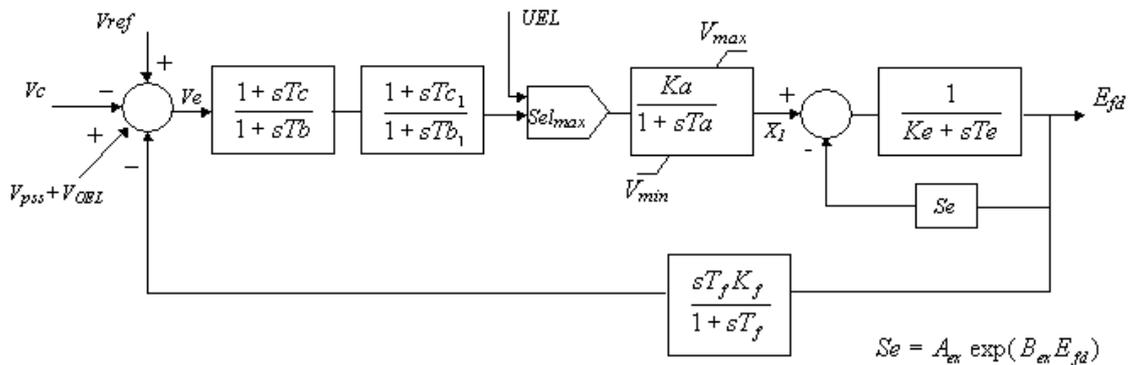


Figura B.2 – Diagrama de blocos do regulador automático de tensão e excitatriz

Tabela B.6 – Parâmetros do regulador de tensão e excitatriz do Sistema #1

Parâmetros		Parâmetros	
K_a	40,0	V_{min}	-4,16
T_a	0,02	V_{max}	5,2
K_e	1,0	E_1	2,8
T_e	0,83	$S(E_1)$	0,041
T_c	1,0	E_2	3,8
T_b	1,0	$S(E_2)$	0,368
K_f	0,03	T_{c1}	1,0
T_f	1,0	T_{b1}	1,0

O diagrama de blocos do Regulador de Velocidade – RV e da turbina com os seus respectivos parâmetros encontram-se na Figura B.3 e na Tabela B.7

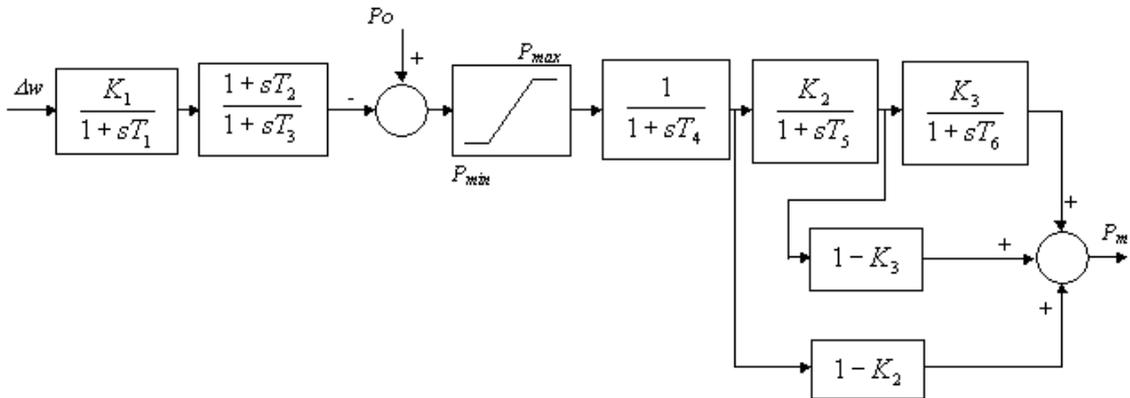


Figura B.3 – Diagrama de blocos da turbina e regulador de velocidade

Tabela B.7 – Parâmetros do regulador de velocidade do Sistema #1

Parâmetros	
T_1	0,0
T_2	0,0
T_3	0,02
T_4	0,673
T_5	3,0
T_6	0,45

Parâmetros	
K_1	14,3
K_2	0,7
K_3	1,0
P_{max}	10,0
P_{min}	0,5

B.2. Sistema #2 – Sistema Radial com Dois Geradores

Este sistema teste é composto por dois geradores conectados radialmente a uma carga através de transformadores e linhas de transmissão em série. O diagrama unifilar do sistema encontra-se na Figura IV.9.

B.2.1 Parâmetros da Rede Elétrica

Os dados de geração, como suas respectivas capacidades de geração de potência ativa e reativa, estão descritos na Tabela B.8.

Tabela B.8 – Dados de geração do Sistema #2

Barra	Nome	Pmax (MW)	Qmax (Mvar)	Qmin (Mvar)
100	Gerador1	1151	9999	-9999
200	Gerador2	1151	9999	-9999

Os parâmetros do transformador e das linhas de transmissão apresentados na Tabela B.9 e na Tabela B.10, respectivamente.

Tabela B.9 – Parâmetros dos transformadores do Sistema #2

De – Para	R (%)	X (%)	Tap (pu)
100 – 101	0.0	1.0	1.0
200 – 104	0.0	1.0	1.0

Tabela B.10 – Parâmetros das linhas de transmissão do Sistema #2

De – Para	Nº	R (%)	X (%)	B (Mvar)
101 – 102	1	0.1	1.0	0.0
102 – 103	1	0.1	1.0	0.0
103 – 104	1	0.1	1.0	0.0

As cargas ativa e reativa são representadas por um modelo de impedância constante, os dados da carga do sistema encontram-se na Tabela B.11.

Tabela B.11 – Dados da carga do Sistema #2

Barra	Nome	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)
103	Carga	1660	100

B.2.2 Modelos de Componentes Dinâmicos

O Gerador1 e o Gerador2 utilizam o mesmo modelo dinâmico de gerador e reguladores de tensão e velocidade. Os diagramas de blocos dos reguladores e os parâmetros são os mesmos para os dois geradores e encontram-se apresentados no item B.1.2.

B.3. Sistema #3 – Sistema IEEE 39

Este sistema é composto por uma rede contendo 10 geradores e 19 cargas conectados através de 34 linhas de transmissão e 12 transformadores de tap fixo.

B.3.1 Parâmetros da Rede Elétrica

Os dados de geração, como suas respectivas capacidades de geração de potência ativa e reativa, estão descritos na Tabela B.12.

Tabela B.12 – Dados de geração do Sistema #3

Barra	Nome	Pmax (MW)	Qmax (Mvar)	Qmin (Mvar)
30	Gerador1	300	9999	-9999
31	Gerador2	612	9999	-9999
32	Gerador3	765	9999	-9999
33	Gerador4	700	9999	-9999
34	Gerador5	613	9999	-9999
36	Gerador6	660	9999	-9999
35	Gerador7	798	9999	-9999
37	Gerador8	660	9999	-9999
38	Gerador9	1151	9999	-9999
39	Gerador10	1151	9999	-9999

Os parâmetros dos transformadores e das linhas de transmissão estão apresentados na Tabela B.13 e na Tabela B.14, respectivamente.

Tabela B.13 – Parâmetros dos transformadores do Sistema #3

De	Para	R (%)	X (%)	Tap (pu)
2	30	0.0000	1.810	1.0
6	31	0.0000	2.500	1.0
10	32	0.0000	2.000	1.0
12	11	0.1600	4.350	1.0
12	13	0.1600	4.350	1.0
19	33	0.0700	1.420	1.0
19	20	0.0700	1.380	1.0

De	Para	R (%)	X (%)	Tap (pu)
20	34	0.0900	1.800	1.0
22	35	0.0000	1.430	1.0
25	37	0.0600	2.320	1.0
29	38	0.0800	1.560	1.0

Tabela B.14 – Parâmetros das linhas de transmissão do Sistema #3

De	Para	R (%)	X (%)	B (Mvar)
1	2	0.3500	4.110	69.87
1	39	0.1000	2.500	75.00
2	3	0.1300	1.510	25.72
2	25	0.7000	0.860	14.60
3	4	0.1300	2.130	22.14
3	18	0.1100	1.330	21.38
4	5	0.0800	1.280	13.42
4	14	0.0800	1.290	13.82
5	6	0.0200	0.260	4.340
5	8	0.0800	1.120	14.76
6	7	0.0600	0.920	11.30
6	11	0.0700	0.820	13.89
6	31	0.0000	2.500	0.0001.0
7	8	0.0400	0.460	7.800
8	9	0.2300	3.630	38.04
9	39	0.1000	2.500	120.0
10	11	0.0400	0.430	7.290
10	13	0.0400	0.430	7.290
13	14	0.0900	1.010	17.23
14	15	0.1800	2.170	36.60
15	16	0.0900	0.940	17.10
16	17	0.0700	0.890	13.42
16	19	0.1600	1.950	30.40
16	21	0.0800	1.350	25.48
16	24	0.0300	0.590	6.800
17	18	0.0700	0.820	13.19
17	27	0.1300	1.730	32.16
21	22	0.0800	1.400	25.65
22	23	0.0600	0.960	18.46

De	Para	R (%)	X (%)	B (Mvar)
23	24	0.2200	3.500	36.10
23	36	0.0500	2.720	0.000
25	26	0.3200	3.230	51.30
26	27	0.1400	1.470	23.96
26	28	0.4300	4.740	78.02
26	29	0.5700	6.250	102.9
28	29	0.1400	1.510	24.90

As cargas ativa e reativa são representadas por um modelo de impedância constante, os seus valores encontram-se na Tabela B.15.

Tabela B.15 – Dados das cargas do Sistema #3

Barra	Ativa (MW)	Reativa (Mvar)
3	322.0	2.4
4	500.0	184.0
7	233.8	84.0
8	522.0	176.0
12	7.5	88.0
15	320.0	153.0
16	329.4	32.3
18	158.0	30.0
20	628.0	103.0
21	274.0	115.0
23	247.5	84.6
24	308.6	-92.2
25	224.0	47.2
27	281.0	75.5
28	206.0	27.6
29	283.5	26.9
39	1104.0	250.0

B.3.2 Modelos de Componentes Dinâmicos

Nesta seção serão apresentados os modelos dinâmicos do gerador e seus controladores como regulador de tensão e regulador de velocidade. O gerador foi representado por um modelo de polos lisos com dois enrolamentos de eixo direto e dois enrolamentos no eixo em quadratura, conforme a Figura B.1. Os parâmetros encontram-se na Tabela B.16.

Tabela B.16 – Parâmetros dos geradores do Sistema #3

Parâmetro	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
X_d (pu)	2,134	1,724	1,870	1,860	1,724	1,840	1,834	1,840	1,643	1,643
X'_d (pu)	0,319	0,259	0,370	0,282	0,259	0,280	0,419	0,280	0,317	0,317
X''_d (pu)	0,224	0,203	0,281	0,233	0,203	0,215	0,314	0,215	0,246	0,246
X_q (pu)	2,049	1,659	1,740	1,810	1,659	1,770	1,798	1,770	1,573	1,573
X'_q (pu)	0,478	0,452	0,467	0,466	0,452	0,478	0,830	0,478	0,479	0,479
X''_q (pu)	0,224	0,203	0,281	0,233	0,203	0,215	0,314	0,215	0,246	0,246
R_a (pu)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Base(MVA)	300	612	765	700	613	660	798	660	1151	1151
X_l (pu)	0,185	0,145	0,230	0,164	0,145	0,155	0,260	0,155	0,192	0,192
X_t (pu)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T'_d (s)	3,797	3,826	6,700	5,800	3,826	3,800	5,318	3,800	7,610	7,610
T''_d (s)	0,033	0,023	0,035	0,035	0,032	0,034	0,053	0,034	0,043	0,043
T'_q (s)	0,438	0,508	0,410	1,200	0,508	0,520	0,970	0,520	0,840	0,840
H	5,800	3,410	6,050	3,600	3,410	3,141	5,016	3,141	5,320	5,320
D (pu/pu)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
T''_q (s)	0,070	0,023	0,070	0,054	0,059	0,058	0,039	0,058	0,065	0,065
A_g	0,094	0,140	0,138	0,128	0,120	0,123	0,083	0,123	0,107	0,107
B_g	0,488	0,480	0,407	0,458	0,450	0,474	0,362	0,474	0,524	0,524

Os geradores possuem o mesmo modelo de regulador de tensão e excitatriz. O diagrama de blocos deste regulador está apresentado na Figura B.2. Os parâmetros dos reguladores estão apresentados na Tabela B.17.

Tabela B.17 – Parâmetros do regulador de tensão do Sistema #3

Parâmetros	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10
K_a	5.0	6.2	5	5	40	40	5	5	40	40
T_a	0.06	0.05	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
K_e	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T_e	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
T_c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T_b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K_f	0.040	0.114	0.080	0.080	0.030	0.030	0.0605	0.046	0.030	0.030
T_f	1	0.5	1	1	1	1	1.246	1.26	1	1
V_{min}	-4.16	-4.16	-4.16	-4.16	-4.16	-4.16	-4.16	-4.16	-4.16	-4.16
V_{max}	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
E_1	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
$S(E_1)$	0.0410	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041	0.041
E_2	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
$S(E_2)$	0.368	0.368	0.368	0.368	0.368	0.368	0.368	0.368	0.368	0.368
T_{c1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T_{b1}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Os geradores utilizam modelos de reguladores de velocidades distintos. Os diagramas de blocos dos reguladores estão apresentados nas Figura B.4 à Figura B.7. Os seus respectivos parâmetros estão apresentados na Tabela B.18 à Tabela B.21.

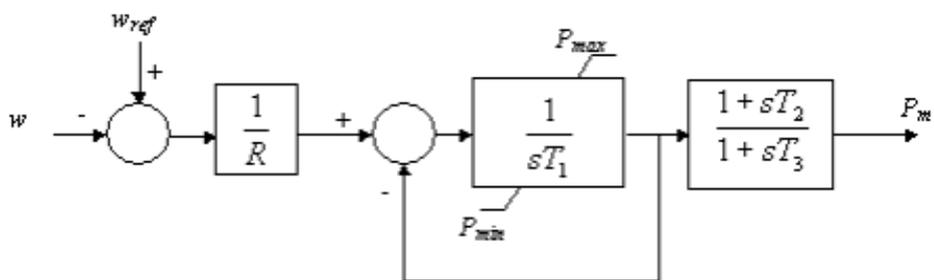


Figura B.4 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade

Tabela B.18 – Parâmetros do regulador de velocidade do Sistema #3

Parâmetros	G2	G5	G7
R	0.05	0.05	0.05
T_1	0.49	0.49	0.49
P_{max}	15.0	27.0	33.0
P_{min}	0.0	0.4	0.4
T_2	2.1	2.1	2.1
T_3	7.0	7.0	7.0

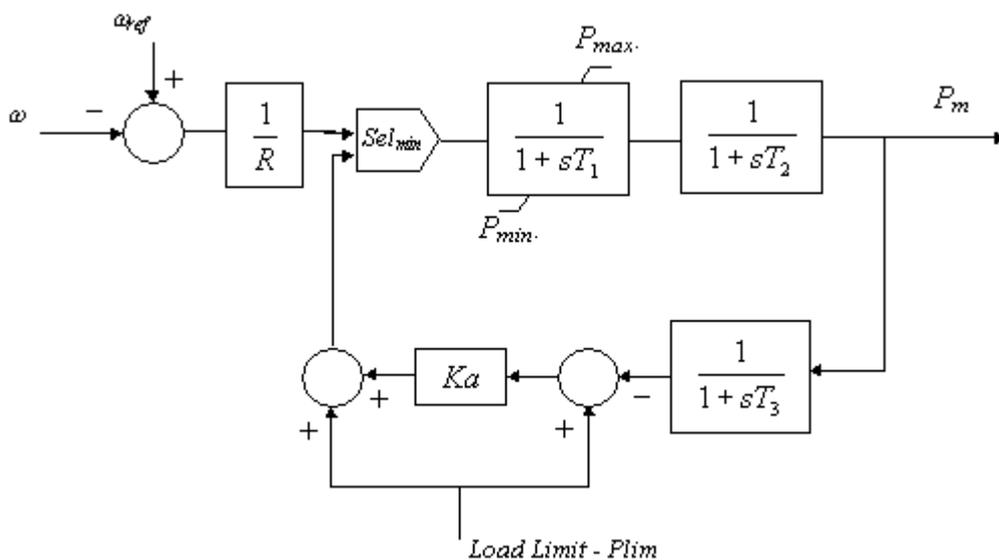


Figura B.5 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade

Tabela B.19 – Parâmetros do regulador de velocidade e turbina

Parâmetros	G1
R	0.05
T_1	0.40
T_2	0.10
T_3	3.00
P_{lim}	0.90
K_a	2.00
P_{max}	0.90
P_{min}	0.31

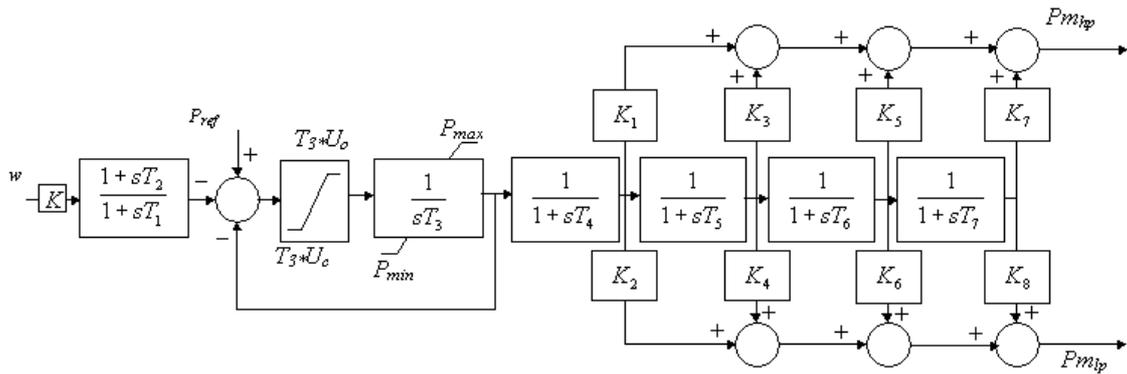


Figura B.6 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade

Tabela B.20 – Parâmetros do regulador de velocidade e turbina

Parâmetros	G4	G6	G8
K	20.0	20.0	20.0
T_1	0.0	0.0	0.0
T_2	0.0	0.0	0.0
T_3	0.1	0.1	0.1
U_o	0.1	0.1	0.1
U_c	-0.5	-0.5	-0.5
P_{max}	10.0	10.0	10.0
P_{min}	0.40	0.42	0.42
T_4	0.320	0.347	0.347
K_1	0.27	0.30	0.30
K_2	0.0	0.0	0.0
T_5	10.0	7.0	7.0
K_3	0.0	0.2	0.2
K_4	0.0	0.0	0.0
T_6	0.13	0.60	0.60
K_5	0.25	0.50	0.50
K_6	0.0	0.0	0.0
T_7	0.12	0.00	0.00
K_7	0.48	0.00	0.00
K_8	0.0	0.0	0.0

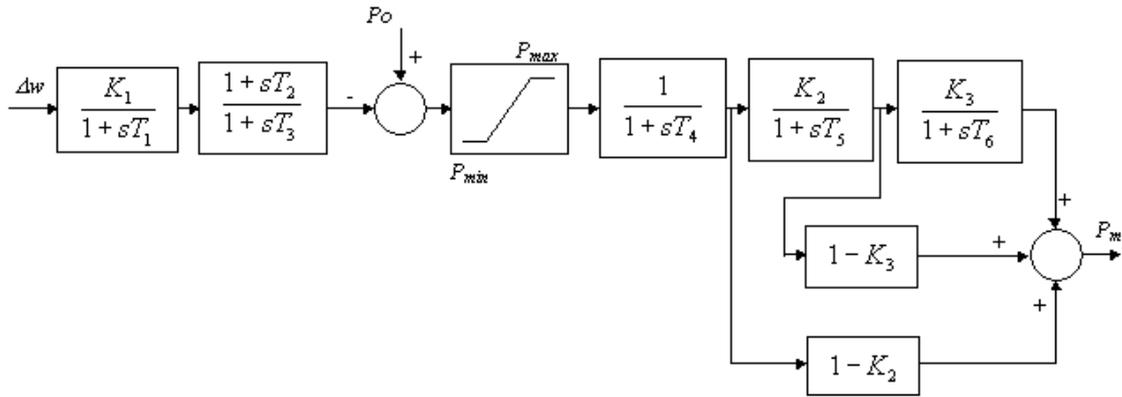


Figura B.7 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade

Tabela B.21 – Parâmetros do regulador de velocidade e turbina

Parâmetros	G3	G9	G10
T_1	0.0	0.0	0.0
T_2	0.0	0.0	0.0
T_3	0.02	0.02	0.02
T_4	0.673	0.673	0.673
T_5	3.0	3.0	3.0
T_6	0.45	0.45	0.45
K_1	14.3	14.3	14.3
K_2	0.7	0.7	0.7
K_3	1.0	1.0	1.0
P_{max}	10	10	10
P_{min}	0.5	0.5	0.5

B.4. Sistema #4 – Sistema IEEE 39 com HVDC

Este sistema foi concebido a partir do sistema IEEE 39 substituindo o gerador 39 por um sistema de transmissão em corrente contínua. O sistema CCAT utilizado foi o Benchmark do Cigre [47]. Os parâmetros da rede CA e dos geradores são os mesmos apresentados no item B.3.