

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Marina Moreira Silveira Andrade

**EQUIVALENTE DE REDES ELÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE
DE TENSÃO EM TEMPO REAL BASEADO EM MEDIÇÕES FASORIAIS
SINCRONIZADAS**

Belo Horizonte
2022

Marina Moreira Silveira Andrade

**EQUIVALENTE DE REDES ELÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE
DE TENSÃO EM TEMPO REAL BASEADO EM MEDIÇÕES FASORIAIS
SINCRONIZADAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Maria Helena Murta Vale

Belo Horizonte

2022

A553e

Andrade, Marina Moreira Silveira.

Equivalente de redes elétricas para avaliação da estabilidade de tensão em tempo real baseado em medições fasoriais sincronizadas [recurso eletrônico] / Marina Moreira Silveira Andrade.- 2022.

1 recurso online (149 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Maria Helena Murta Vale.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 140-149.

Bibliografia: f. 134-139.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Redes elétricas - Teses. 3. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade - Teses. 4. Controle em tempo real - Teses. 5. Medição - Teses. I. Vale, Maria Helena Murta. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"EQUIVALENTE DE REDES ELÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM TEMPO REAL BASEADO EM MEDIÇÕES FASORIAIS SINCRONIZADAS"

MARINA MOREIRA SILVEIRA ANDRADE

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 09 de dezembro de 2022. Por:

Profa. Dr^a. Maria Helena Murta Vale
DEE (UFMG) - Orientadora

Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)

Profa. Dr^a. Wadaed Uturbey da Costa
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Miguel de Brito Guimarães Neto
DEE (CEFET-MG)

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva
DSEE (UNICAMP)

Prof. Dr. Luís Guilherme Monteiro Oliveira
DEE (PUC Minas)



Documento assinado eletronicamente por **Maria Helena Murta Vale, Presidente de comissão**, em 09/12/2022, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Henrique Silveira, Professor do Magistério Superior**, em 09/12/2022, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wadaed Uturbey da Costa, Professora do Magistério Superior**, em 09/12/2022, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Pereira da Silva, Usuário Externo**, em 12/12/2022, às 08:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Miguel de Brito Guimarães Neto, Usuário Externo**, em 13/12/2022, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luís Guilherme Monteiro Oliveira, Usuário Externo**, em 13/12/2022, às 10:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1944792** e o código CRC **F9422ACD**.

AGRADECIMENTOS

Ao meu companheiro de vida, Alexandre, e a meu filho, Hurí, pelo amor, companheirismo, paciência e por dividir os dias comigo. Ao Hurí, agradeço cada sorriso e olhar, fontes de nutrição no meu dia a dia. Ao Alexandre, um agradecimento muito especial e profundo pelo amor, incentivo, sensibilidade, zelo e por não me deixar desistir nos momentos difíceis.

À minha professora orientadora, Maria Helena, pelos ensinamentos, dedicação e compreensão. Os aprendizados no desenvolvimento deste trabalho não se limitam à área técnica, são aprendizados de vida, que levarei comigo em minha caminhada. Expresso minha profunda admiração por sua sensibilidade e carinho.

Ao Fábio, parceiro de pesquisa, pelas trocas produtivas, apoio, partilha de conhecimento, conversas e momentos de descontração.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos, pelo amor, apoio e por estarem ao meu lado em todas as etapas e conquistas da minha vida.

Aos professores do LRC/UFMG pelas disciplinas ministradas e contribuições na minha formação.

RESUMO

Esta tese de doutorado propõe uma metodologia inovadora para a construção de equivalentes de redes elétricas baseados em dados de tempo real, por meio do uso de medições fasoriais locais de tensão e de corrente. Algumas características tornam essa proposta única, principalmente aquelas relacionadas a lidar com o comportamento do sistema elétrico em tempo real e com as propriedades particulares do sistema de medição, como alta taxa de amostragem e presença de ruído de medição. Técnicas de filtragem são usadas para obter consistência e exatidão dos parâmetros equivalentes. Para lidar com a dinâmica do sistema elétrico, procedimentos de amortecimento são implementados. A capacidade do equivalente em representar o sistema elétrico no ambiente de tempo real possibilita monitorar a condição de operação quanto à Estabilidade de Tensão do sistema. O monitoramento do comportamento dinâmico de sistemas elétricos em tempo real é fundamental, principalmente para evitar situações críticas, como as impostas por limites de segurança. Os estudos deste trabalho são realizados em redes elétricas padronizadas e em barramento de rede elétrica de alta tensão do sistema interligado brasileiro.

Palavras-Chave: Equivalente de redes; estabilidade de tensão; medição fasorial sincronizada; tempo real.

ABSTRACT

This dissertation proposes an innovative methodology for the construction of real-time measurement-based network equivalents, by the use of local bus voltage and current phasor measurements. Some features make this proposal unique, mainly those related to dealing both with Power System real-time behaviour and measurement system special properties, as high sampling rate and presence of measurement noise. Filtering techniques are used to obtain consistency and accuracy of the equivalent parameters. To cope with electrical system dynamic, damping procedures are implemented. The equivalent ability to represent power system in real-time environment allows to monitor system Voltage Stability operating condition. Monitoring system dynamic behaviour during real-time is vital, mainly to avoid critical situations, such as those imposed by security limits. The studies in this work are carried out in standardized networks and in high voltage busbar of the Brazilian Interconnected system.

Keywords: Network equivalent; voltage stability; synchronized phasor measurement; real-time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema elétrico de duas barras	21
Figura 2.2 – Curva PV, MET e MST	24
Figura 2.3 – Representação da rede elétrica vista de um barramento k : (a) rede completa e (b) circuito equivalente de duas barras.....	26
Figura 2.4 – Estrutura básica de um SMFS (ANDRADE, 2008).....	36
Figura 3.1 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes à barra 5 do sistema IEEE 14 Barras, obtidas da aplicação do método de (VU, 1999), considerando medições com desvios padrão de (a) 0%, (b) 0,1%, (c) 0,5% e (d) 1%	48
Figura 3.2 – Tensão e corrente características dos ambientes (a) de estudo e (b) de tempo real	53
Figura 3.3 – Magnitudes e ângulos (a) da tensão e (b) da corrente medidos no barramento de Taquaril e obtidos do GDF	59
Figura 3.4 – (a) Corrente de carga obtida do GDF e (b) impedância de Thévenin estimada pelo método de (VU, 1999).....	60
Figura 3.5 – Tensão obtida do GDF e impedância de Thévenin estimada pelo método de (VU, 1999), considerando: (a) e (b) maior, (c) e (d) menor taxa de amostragem	61
Figura 3.6 – (a) Potência aparente calculada a partir dos dados do GDF e (b) impedância de Thévenin estimada pelo método de (VU, 1999).....	62
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta.....	65
Figura 4.2 – Diagrama esquemático da obtenção dos parâmetros do Estimador dos Mínimos Quadrados.....	69
Figura 4.3 – Diagrama esquemático da solução (a) do Estimador dos Mínimos Quadrados e (b) do Equivalente Final.....	73
Figura 4.4 – Barramento de Taquaril, 345 kV.....	73
Figura 4.5 – Impedância de Thévenin, referente ao barramento de Taquaril, obtida pelo método de (VU, 1999) e pela média simples do conjunto de equivalentes.....	74
Figura 4.6 – Diagrama unifilar do Sistema de Teste RVS (CUTSEM, 2020)	80
Figura 4.7 – Parâmetros do equivalente de Thévenin, referentes às barras (a) 1103 e (b) 1104 do sistema RVS, obtidos da aplicação do método de (VU, 1999), considerando o aumento de potência na barra de carga em análise	81
Figura 4.8 – Parâmetros do equivalente de Thévenin, referentes às barras (a) 1103 e (b) 1104 do sistema RVS, obtidos da aplicação do método de (VU, 1999), considerando o aumento de potência em todas as barras de carga.....	82
Figura 4.9 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA1, considerando diferentes faixas de variação de f_1 : (a), (c) módulo da impedância e (b), (d) módulo da tensão	85

Figura 4.10 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA1, considerando a faixa de variação definida para f_1 : (a) módulo da impedância e (b) módulo da tensão	86
Figura 4.11 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA2, considerando diferentes faixas de variação de f_2 : (a), (c) módulo da impedância e (b), (d) módulo da tensão	87
Figura 4.12 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA2, considerando a faixa de variação definida para f_2 : (a) módulo da impedância e (b) módulo da tensão	87
Figura 4.13 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA3, considerando diferentes faixas de variação de f_3 : (a), (c) módulo da impedância e (b), (d) módulo da tensão	88
Figura 4.14 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA3, considerando a faixa de variação definida para f_3 : (a) módulo da impedância e (b) módulo da tensão	89
Figura 4.15 – (a) Circuito equivalente de Thévenin e (b) circuito equivalente de duas barras	93
Figura 4.16 – Impedância de Thévenin e potência máxima, referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, obtidas da aplicação do EARE e da metodologia desenvolvida, considerando o uso de: (a) TA1, (b) TA2 e (c) TA3	96
Figura 4.17 – Impedância de Thévenin e potência máxima (na região de instabilidade de tensão), referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, obtidas da aplicação do EARE e da metodologia desenvolvida, considerando o uso de: (a) TA1, (b) TA2 e (c) TA3	98
Figura 4.18 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, considerando o uso de: TA1, com desvios padrão de (a) 0,1% e (b) 0,5%; TA2, com desvios padrão de (c) 0,1% e (d) 0,5% e TA3, com desvios padrão de (e) 0,1% e (f) 0,5% .	101
Figura 4.19 – Potências máxima e da carga, referente ao barramento 1103 do sistema RVS, considerando o uso de: TA2, com desvios padrão de (a) 0,1% e (b) 0,5% e TA3, com desvios padrão de (c) 0,1% e (d) 0,5%	102
Figura 5.1 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes às barras (a) 1103, (b) 1104 e (c) 1110 do Sistema de Teste RVS, considerando desvios padrão de 0%, 0,5% e 1% nas medições	108
Figura 5.2 – Diagrama unifilar do Sistema de Teste IEEE 30 Barras (ROSAS, 2012)	109
Figura 5.3 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes às barras (a) 30, (b) 29 e (c) 26 do sistema IEEE 30 Barras, considerando desvios padrão de 0%, 0,5% e 1% nas medições	109
Figura 5.4 – (a) Corrente de carga obtida do GDF e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta	111
Figura 5.5 – (a) Potência aparente calculada a partir dos dados do GDF e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta	111
Figura 5.6 – Barramento de Tucuruí, 230 kV	112

Figura 5.7 – (a) Medições de tensão e de corrente coletadas no barramento de Taquaril e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta	113
Figura 5.8 – (a) Medições de tensão e de corrente coletadas no barramento de Tucuruí e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta	113
Figura 5.9 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, considerando medições com desvios padrão de (a) 0% e (b) 0,1%	115
Figura 5.10 – Impedâncias de Thévenin e da carga considerando medições fasoriais coletadas no barramento de Taquaril	118
Figura 6.1 – Parte do Sistema de Teste RVS onde estão inseridos os barramentos 113 e 123	122
Figura 6.2 – Fluxo de potência ativa dos ramos conectados à barra 113 do sistema RVS	123
Figura 6.3 – Impedâncias de Thévenin e da carga referentes (a) à barra 113, (b) ao ramo 1, (c) ao ramo 2 e (d) ao ramo 7	123
Figura 6.4 – Fluxo de potência ativa dos ramos conectados à barra 123 do sistema RVS	124
Figura 6.5 – Impedâncias de Thévenin e da carga referentes (a) à barra 123, (b) ao ramo 1, (c) ao ramo 2, (d) ao ramo 3 e (e) ao ramo 4	125
Figura 6.6 - Barramento de Taquaril, de 345 kV, com numeração dos ramos	127
Figura 6.7 – Fluxo de potência ativa dos ramos conectados ao barramento de Taquaril	127
Figura 6.8 – Impedâncias de Thévenin e da carga referentes (a) ao barramento de Taquaril, (b) ao ramo 3, (c) ao ramo 5, (d) ao ramo 6, (e) ao ramo 7 e (f) ao ramo 8	128
Figura A.1 – Diagrama unifilar do Sistema de Teste IEEE 14 Barras	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Técnicas de amortecimento investigadas.....	76
Tabela 4.2 – Faixas de valores dos fatores de ponderação das técnicas de amortecimento	89
Tabela 4.3 – Diferenças entre os ambientes de comparação	94
Tabela 4.4 – Erro relativo referente à identificação do ponto de instabilidade de tensão	99
Tabela A.1 – Dados das barras do Sistema de Teste IEEE 14 Barras.....	141
Tabela A.2 – Dados dos ramos do Sistema de Teste IEEE 14 Barras.....	141
Tabela A.3 – Dados das barras do Sistema de Teste RVS	142
Tabela A.4 – Dados dos ramos do Sistema de Teste RVS	144
Tabela A.5 – Dados das barras do Sistema de Teste IEEE 30 Barras.....	147
Tabela A.6 – Dados dos ramos do Sistema de Teste IEEE 30 Barras.....	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EARE	Equivalente Analítico de Redes Elétricas
EMQ	Estimador dos Mínimos Quadrados
GDF	Gerador de Dados Fasoriais
LRC	<i>Lightning Research Center</i>
MC1	Metodologia de Carga 1
MC2	Metodologia de Carga 2
MET	Margem de Estabilidade de Tensão
MST	Margem de Segurança de Tensão
PDC	Concentrador de Dados Fasoriais
PMU	Unidade de Medição Fasorial
SimC	Simulador de Cenários Operativos
SMFS	Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
TA1	Técnica de Amortecimento 1
TA2	Técnica de Amortecimento 2
TA3	Técnica de Amortecimento 3
TDF	Transformada Discreta de Fourier
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1 Considerações Iniciais	15
1.2 Objetivos da Pesquisa	17
1.3 Estrutura do Texto.....	18
CAPÍTULO 2 – CONCEITOS BÁSICOS E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2.1 Considerações Iniciais	20
2.2 Estabilidade de Tensão – Conceitos Básicos	20
2.3 Equivalente de Thévenin na Representação de Sistemas Elétricos de Potência.....	25
2.3.1 Considerações sobre o Equivalente Proposto em (VU, 1999)	27
2.3.2 Equivalentes de Tempo Real – Revisão Bibliográfica e Comentários sobre a Literatura	29
2.4 Medições Fasoriais Sincronizadas	34
2.5 Contextualização da Pesquisa	39
2.6 Considerações Finais	43
CAPÍTULO 3 – ESPECIFICIDADES DO AMBIENTE DE TEMPO REAL	45
3.1 Considerações Iniciais	45
3.2 Erros Inerentes ao Processo de Medição.....	46
3.3 Ambiente de Tempo Real Considerando o Comportamento Dinâmico dos Sistemas Elétricos	49
3.4 Gerador de Dados Fasoriais	54
3.4.1 Formulação Básica do Gerador de Dados Fasoriais.....	55
3.4.2 Aplicação do Gerador de Dados Fasoriais	58
3.5 Considerações Finais	62
CAPÍTULO 4 – PROPOSTA DE EQUIVALENTE DE REDES ELÉTRICAS BASEADO EM MEDIÇÕES FASORIAIS SINCRONIZADAS.....	64
4.1 Considerações Iniciais	64
4.2 Metodologia para Obtenção do Equivalente.....	64
4.2.1 Aquisição de Fasores.....	65
4.2.2 Determinação da Carga-equivalente	66
4.2.3 Cálculo do Equivalente de Thévenin	68
4.3 Tensão como Grandeza de Referência Angular.....	77
4.4 Faixas de Valores dos Fatores de Ponderação	83
4.5 Validação da Metodologia	90
4.5.1 Características do EARE.....	90
4.5.2 Diferenças Intrínsecas dos Ambientes de Comparação	91
4.5.3 Comparação do Equivalente Proposto com o EARE	94
4.6 Considerações Finais	103

CAPÍTULO – 5 APLICAÇÃO DO EQUIVALENTE DE REDES PROPOSTO	105
5.1	Considerações Iniciais 105
5.2	Aplicação da Metodologia Proposta Considerando Diferentes Ambientes para Geração dos Dados Fasoriais 106
5.2.1	Dados de Entrada Obtidos de Simulações de Fluxo de Potência..... 106
5.2.2	Dados de Entrada Obtidos do GDF 110
5.2.3	Dados de Entrada Obtidos de SMFS..... 112
5.3	Comparação com Outras Metodologias..... 114
5.3.1	Dados de Entrada Obtidos de Simulações de Fluxo de Potência..... 114
5.3.2	Dados de Entrada Obtidos de SMFS..... 117
5.4	Considerações Finais 119
CAPÍTULO 6 – EQUIVALENTES GLOBAL E INDIVIDUAIS EM BARRAMENTOS COM MÚLTIPLOS RAMOS: UMA PROPOSTA COMPLEMENTAR.....	120
6.1	Considerações Iniciais 120
6.2	Aplicação dos Equivalentes Global e Individuais 120
6.2.1	Dados de Entrada Obtidos de Simulações de Fluxo de Potência..... 121
6.2.2	Dados de Entrada Obtidos de SMFS..... 126
6.3	Considerações Finais 129
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
APÊNDICE A – SISTEMAS DE TESTE UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.....	140
A.1	Sistema IEEE 14 Barras 140
A.2	Sistema RVS 142
A.3	Sistema IEEE 30 Barras 147

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas elétricos de potência devem ser capazes de fornecer energia elétrica às cargas de maneira contínua, com confiabilidade e de forma econômica. A evolução da demanda do sistema brasileiro nem sempre tem sido acompanhada pela expansão necessária. Adicionalmente, as restrições impostas aos sistemas tornam-se cada vez mais rígidas, sejam estas ambientais, sociais ou econômicas. Nesse cenário, as condições de operação do sistema em tempo real podem resultar na proximidade aos limites toleráveis definidos pelo setor elétrico¹. Tal situação torna-se a cada dia mais frequente, impactando negativamente todo o sistema elétrico, seja do ponto de vista das empresas de energia elétrica, ou dos consumidores.

Um dos limites que tem merecido especial atenção é o de Estabilidade de Tensão, pois, quando atingido, resulta em um impacto extremamente negativo para o sistema elétrico de potência, incluindo a ocorrência de grandes desligamentos. Segundo a referência (IEEE, 1990), a instabilidade de tensão se caracteriza pelo estado de operação do sistema onde a tensão permanece decaindo de forma brusca ou lenta, e as ações automáticas de controle ou dos operadores não evitam tal decaimento.

Para se evitarem condições críticas, visando a melhorar o desempenho do sistema, a avaliação do risco de instabilidade torna-se fundamental em todas as atividades relacionadas aos sistemas elétricos, da expansão à operação.

A etapa de expansão tem como objeto de estudo providenciar a aquisição de novos recursos para ampliação e reforços do sistema, de forma a adequá-lo ao atendimento dos mercados atual e futuro, respeitando as restrições impostas. Nessa perspectiva, são avaliadas diferentes alternativas de expansão por meio de análises técnicas e econômicas. No que diz respeito à análise de estabilidade de tensão, tradicionalmente, são feitos cálculos utilizando resultados de simulação obtidos por meio de ferramentas computacionais de fluxo de potência.

Na atividade de operação, ocorre o gerenciamento dos recursos já disponíveis e a coordenação dos sistemas elétricos. Inclui a fase de estudos (planejamento), onde são geradas

¹ Ao nível da Rede Básica, esses limites são determinados pelo Operador Nacional do Sistema.

instruções operativas, e a fase de execução das diretrizes estabelecidas (tempo real). Na etapa de tempo real, é fundamental o monitoramento da condição operativa do sistema de forma contínua, visando a acompanhar o comportamento dinâmico do mesmo e sua proximidade aos limites operativos críticos, inclusive o de estabilidade de tensão.

Diferentemente das etapas de estudo, onde as análises fazem uso de *softwares* de fluxo de potência, em tempo real, a aplicação de Equivalentes de Redes, gerados a partir de medições coletadas nos barramentos, tem sido proposta para se avaliar a condição operativa dos sistemas elétricos. Tais equivalentes devem representar de forma consistente todo o sistema elétrico visto pelo barramento sob análise, mesmo sem o conhecimento da topologia e outras informações sobre a rede. Eles buscam reproduzir análises de estabilidade de tensão comumente realizadas através do cálculo do fluxo de potência, tais como a identificação do ponto de instabilidade de tensão por meio da aplicação do Teorema da Máxima Transferência de Potência. Desse modo, é vital que os equivalentes estejam em sintonia com as constantes mudanças do comportamento dinâmico do sistema, para que apresentem um bom desempenho no monitoramento da condição operativa do sistema em tempo real.

A construção de equivalentes de redes em tempo real não é uma tarefa trivial. Trata-se de um ambiente cercado de desafios, que exige atualização contínua de informações, feita de forma rápida, precisa e segura. A crescente utilização das Unidades de Medição Fasorial, como parte integrante do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, potencializa o desenvolvimento de estratégias de controle de sistemas elétricos, dada a capacidade de monitorar o desempenho dinâmico dos mesmos. Entretanto, o ambiente de medições suscita preocupações particulares, bem diferentes daquelas relacionadas a estudos *offline*. A complexidade desse ambiente decorre de diversos fatores, tais como a dinâmica própria do sistema elétrico, as particularidades da constituição das redes elétricas, as características do sistema de aquisição de dados e, em especial, a presença de incertezas inerentes ao processo de medição.

A equipe de pesquisadores do *Lightning Research Center*² da Universidade Federal de Minas Gerais (LRC/UFMG) tem atuado de forma intensa em pesquisas nessa área, sendo pioneira na construção de equivalentes de tempo real e de indicadores para avaliação do risco de instabilidade, inclusive com aplicação prática em barramento do Sistema Interligado Nacional (CEMIG, 2010). Este trabalho de pesquisa se insere nos desenvolvimentos que vêm

² LRC: *Lightning Research Center* – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas – Convênio UFMG-CEMIG.

sendo realizados por essa equipe, considerando toda a experiência teórica e prática na concepção de equivalentes.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

As metodologias propostas até o momento pela equipe do LRC/UFMG mostram-se consistentes para diversos cenários operativos no que diz respeito à construção de equivalentes para aplicação na análise de estabilidade de tensão em tempo real. Entretanto, à medida que o conhecimento avança nessa área, grandes e novos desafios se apresentam, justificando e incentivando a continuidade e o maior aprofundamento das pesquisas.

Nessa direção, importante investigação se apresenta no que diz respeito a uma das dificuldades enfrentadas na obtenção de equivalentes de tempo real: os parâmetros calculados são afetados significativamente por diferentes características das medições utilizadas, além dos ruídos sempre inerentes. Adicionalmente, a possibilidade de se conhecerem valores de referência, propostos em (SILVA, 2018) e (SILVA, 2022), traz nova perspectiva para as pesquisas, pois permite o aprimoramento dos equivalentes já propostos e a apresentação de abordagens inovadoras. Estudos podem ser ampliados, pois há uma meta que baliza os resultados, indicando a direção a ser seguida.

As investigações sobre equivalentes de redes baseados em medições fasoriais locais mostram que há trabalhos que, apesar de propostos para aplicações em ambiente de tempo real, são testados e validados em ambiente de estudo. A desconsideração ou falta de técnica para tratamento das incertezas nas medições pode inviabilizar a aplicação dos métodos em tempo real, visto que, nessas circunstâncias, os equivalentes apresentam respostas que não condizem com o comportamento esperado dos sistemas elétricos. Essa constatação foi um dos principais pontos motivadores para continuidade das investigações no tema e elaboração deste trabalho.

Tendo em vista as vertentes descritas anteriormente, o objetivo principal deste trabalho consiste na ***concepção de um equivalente de redes em tempo real que represente de maneira consistente o comportamento dinâmico de sistemas elétricos e que possibilite a avaliação da estabilidade de tensão***. Tal modelo deve ser capaz de incorporar as particularidades das medições fasoriais de tensão e de corrente do barramento de interesse. Considera-se que sua realização constitua importante contribuição científica.

A aferição do modelo se dá pela comparação de seus resultados com referências obtidas do equivalente calculado analiticamente apresentado em (SILVA, 2018) e (SILVA, 2022), e sua eficiência comprovada mediante a sua aplicação na avaliação da estabilidade de tensão em sistemas de teste, por meio de simulações de fluxo de potência, e em redes elétricas com medições reais, disponibilizadas pelos órgãos responsáveis.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O texto da tese está estruturado em sete capítulos e um apêndice, identificados conforme descrito a seguir.

Neste Capítulo 1, introdutório, a pesquisa desenvolvida é contextualizada, indicando suas motivações e relevância, e caracterizando seus objetivos.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos considerados relevantes para o desenvolvimento da pesquisa e, também, para facilitar sua descrição nos capítulos posteriores. Inclui conceitos básicos sobre a análise estática de estabilidade de tensão, introduz características dos equivalentes de redes desenvolvidos no ambiente de tempo real e aborda os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS). O capítulo descreve a contextualização do trabalho no âmbito das pesquisas que vêm sendo desenvolvidas pela equipe do LRC/UFMG e daquelas encontradas na literatura.

O objetivo do Capítulo 3 é identificar as especificidades do ambiente de tempo real e evidenciar os desafios relacionados à construção do equivalente proposto, enfatizando a relevância das pesquisas desenvolvidas neste trabalho. Dentre as questões tratadas, podem ser citadas: definição da carga-equivalente, influência da variação e da taxa de amostragem das medições, impacto da variação da potência da carga, relação entre as variações de tensão e de corrente. Especial atenção é dada à influência do erro do tipo ruído na composição do equivalente e às técnicas de estimação utilizadas para filtrá-lo. Além disso, esse capítulo apresenta uma ferramenta desenvolvida, denominada Gerador de Dados Fasoriais, que atua na geração de dados que simulam medições reais, cujo algoritmo considera diversas características do ambiente de tempo real que não são contempladas em simulações de fluxo de potência.

O Capítulo 4 apresenta a proposta principal deste trabalho, que consiste na metodologia para cálculo de equivalente de redes em tempo real. A proposta inicial engloba três técnicas de amortecimento para resposta do equivalente, visando a representar, da maneira mais fiel

possível, o comportamento dos sistemas elétricos. Alguns pontos críticos da metodologia são indicados e investigados. É realizada uma avaliação do impacto em se considerar a tensão medida na carga como grandeza de referência angular, nos dados de entrada da metodologia. Além disso, são propostas faixas para escolha dos fatores de ponderação das técnicas de amortecimento. A metodologia é, então, validada com base na referência adotada, o Equivalente Analítico de Redes Elétricas, proposto em (SILVA, 2018) e (SILVA, 2022), calculado com base em informações completas dos sistemas elétricos. Dessa maneira, são apresentadas as diferenças entre as filosofias de cálculo dos equivalentes de tempo real e analítico. A etapa de comparação e validação dos resultados viabiliza a identificação da técnica de amortecimento que apresenta melhor desempenho, dentre as três propostas.

No Capítulo 5, o equivalente desenvolvido é aplicado considerando dados de entrada obtidos da simulação de fluxo de potência em sistemas de teste, do Gerador de Dados Fasoriais e de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada. A ideia é verificar a aplicabilidade do equivalente sob a perspectiva de diferentes cenários operativos. Além disso, os parâmetros estimados do equivalente desenvolvido são comparados com aqueles obtidos por métodos selecionados da literatura, que se propõem para aplicação em tempo real.

O Capítulo 6 apresenta uma proposta complementar baseada no cálculo de equivalentes global e individuais em barramentos com múltiplos ramos incidentes. A obtenção desses equivalentes possibilita a disponibilidade de informações acerca da capacidade adicional do fluxo de potência em ramos específicos, destinados a alimentação de cargas. Desse modo, além da visão geral do barramento monitorado, fornecida por meio da obtenção do seu equivalente global, é possível identificar os ramos mais críticos, em termos da estabilidade de tensão.

O Capítulo 7 descreve as conclusões e as propostas de continuidade identificadas por esta pesquisa.

Finalizando o texto, são registrados as Referências Bibliográficas citadas e o Apêndice A, o qual inclui informações relativas aos sistemas elétricos de estudo adotados nas simulações.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo deste capítulo é apresentar conceitos e aspectos básicos de interesse relacionados à pesquisa deste trabalho, facilitando a compreensão dos desenvolvimentos apresentados nos capítulos posteriores.

Inicialmente, são abordadas as principais considerações a respeito da estabilidade de tensão, do ponto de vista da análise estática. Esse tipo de análise permite identificar conceitos importantes, como a definição do Ponto de Máxima Transferência de Potência e das Margens de Estabilidade de Tensão que caracterizam a proximidade do sistema ao ponto de instabilidade.

Em sequência, os fundamentos do uso dos equivalentes de redes são abordados, destacando o modelo que é a base do desenvolvimento da metodologia apresentada neste trabalho. Características do ambiente de tempo real são introduzidas, apontando para as suas diferenças com o ambiente de estudo. Diversos trabalhos da literatura que propõem equivalentes de redes são referidos, ressaltando as características dos ambientes em que os modelos estão inseridos.

As principais características dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada são apresentadas, tendo em vista que estes fornecem os dados de medição para a obtenção do equivalente de redes proposto.

Finalizando o capítulo, o trabalho desenvolvido no doutorado é contextualizado no âmbito das pesquisas encontradas na literatura e daquelas que vêm sendo desenvolvidas pela equipe do LRC/UFMG.

2.2 ESTABILIDADE DE TENSÃO – CONCEITOS BÁSICOS

Na literatura são utilizados vários termos e definições relacionados à estabilidade de tensão. Neste trabalho assume-se a definição proposta em (KUNDUR, 2004): “*estabilidade de tensão se refere à habilidade de um sistema de potência de manter as tensões estáveis em todos*

os seus barramentos após este sistema ser submetido a algum distúrbio a partir de uma condição operativa inicial”. Caso um distúrbio inicie o fenômeno da instabilidade de tensão, uma queda progressiva da tensão pode ocorrer em barramentos do sistema elétrico.

No contexto da análise estática, a condição de estabilidade de tensão está intimamente relacionada ao Ponto de Máxima Transferência de Potência ou Ponto de Máximo Carregamento de um sistema elétrico. Esse ponto corresponde à situação em que o sistema atinge seu limite de transferência de potência à carga, ou seja, indica o valor máximo de potência que pode ser transferida da fonte para a carga. Esse conceito pode ser entendido pela análise de um sistema simples de duas barras composto por uma fonte de tensão ideal, uma linha de transmissão e uma carga, conforme sugerido em (KUNDUR, 1994) e ilustrado na Figura 2.1.

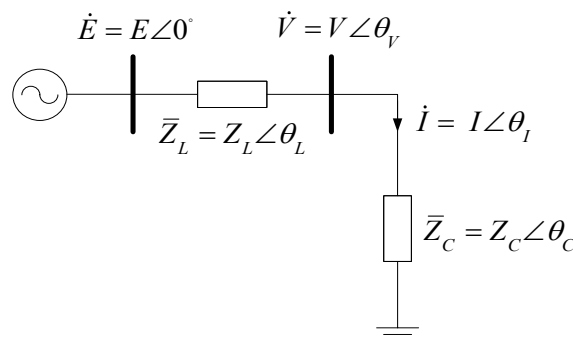


Figura 2.1 – Sistema elétrico de duas barras

Nesse sistema, a fonte de tensão \dot{E} é tomada como referência angular. A linha de transmissão e a carga são representadas pelas impedâncias \bar{Z}_L e \bar{Z}_C , respectivamente. Aplicando-se a lei de Ohm e considerando-se o módulo da soma de grandezas fasoriais, obtém-se o módulo da corrente desse circuito:

$$I = \frac{E}{\sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.1)$$

A corrente de curto-circuito desse sistema é dada por:

$$I_{CC} = \frac{E}{Z_L} \quad (2.2)$$

Assim, o módulo da corrente pode ser determinado em relação à corrente de curto-circuito de acordo com a seguinte expressão:

$$I = \frac{I_{CC}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.3)$$

O módulo da tensão na barra de carga é dado por:

$$V_C = Z_C I = \frac{Z_C I_{CC}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.4)$$

De posse da corrente e da tensão na barra de carga, a potência ativa na carga pode ser calculada pela equação:

$$P = V_C I \cos\theta_C = \frac{Z_C I_{CC}^2 \cos\theta_C}{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (2.5)$$

O valor da potência máxima transferida à carga é obtido igualando-se a zero a equação da derivada da potência em relação ao módulo da impedância da carga:

$$\frac{dP}{dZ_C} = 0 \Rightarrow Z_C = Z_L \quad (2.6)$$

Observa-se que a máxima transferência de potência ocorre para a condição em que o módulo da impedância da carga se iguala ao módulo da impedância da linha de transmissão³. Isso significa que o sistema atingiu seu limite, no que diz respeito à potência transferida, e qualquer tentativa de se aumentar a carga leva o sistema à instabilidade de tensão. Essa condição crítica de instabilidade é verificada considerando cargas modeladas como potência constante.

Uma manipulação matemática das equações (2.2) a (2.6) permite determinar a expressão da máxima potência ativa que pode ser transferida pelo sistema à carga (P_{max}) e sua tensão correspondente (V_{crit}).

³ Conforme detalhado no Capítulo 3, no caso de equivalentes de tempo real, que utilizam apenas duas medições consecutivas, na condição em que não há variação da potência da carga, a igualdade dos módulos das impedâncias pode ocorrer em situações diferentes do ponto de máximo carregamento, indicando uma falsa condição de instabilidade.

$$P_{max} = \frac{E^2 \cos \theta_C}{2Z_L [1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]} \quad (2.7)$$

$$V_{crit} = \frac{E}{\sqrt{2 + 2\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.8)$$

Analisando as equações (2.7) e (2.8), verifica-se que a potência e a tensão características do ponto de máxima transferência de potência podem ser obtidas conhecendo-se apenas os parâmetros da fonte, da linha e da carga no ponto atual de operação.

O ponto de máxima transferência de potência pode ser determinado por meio da chamada curva PV. A construção da curva PV se dá de forma relativamente simples, para o sistema de duas barras, ao se promover o aumento da carga conectada ao barramento de estudo e monitorando os valores de tensão e potência ativa.

Com esses valores, obtém-se a curva PV, conforme imagem ilustrativa da Figura 2.2. O ponto de máxima transferência de potência refere-se ao “nariz” da curva e caracteriza o limite entre as regiões estável e instável relativas ao sistema elétrico, para cargas modeladas como potência constante. Vale ressaltar que as grandezas que caracterizam o ponto de máximo carregamento desse sistema podem ser determinadas por meio das equações (2.7) e (2.8), não requerendo a construção da curva PV.

Em termos de aplicação prática, há dois conceitos importantes que caracterizam a proximidade do ponto de operação do sistema ao ponto de instabilidade, os quais estão ilustrados na curva PV. O primeiro refere-se à Margem de Segurança de Tensão (MST) que indica a distância mínima do ponto de operação do sistema para o ponto de máxima transferência de potência, definindo a região de operação insegura. No Brasil, tal margem é definida de acordo com as diretrizes do Operador Nacional do Sistema e, atualmente, é fixada em 4% para operação em tempo real (ONS, 2021). O segundo corresponde à Margem de Estabilidade de Tensão (MET) que é definida, no contexto deste trabalho, como a distância do ponto de operação ao ponto limite de segurança, ditado pela MST.

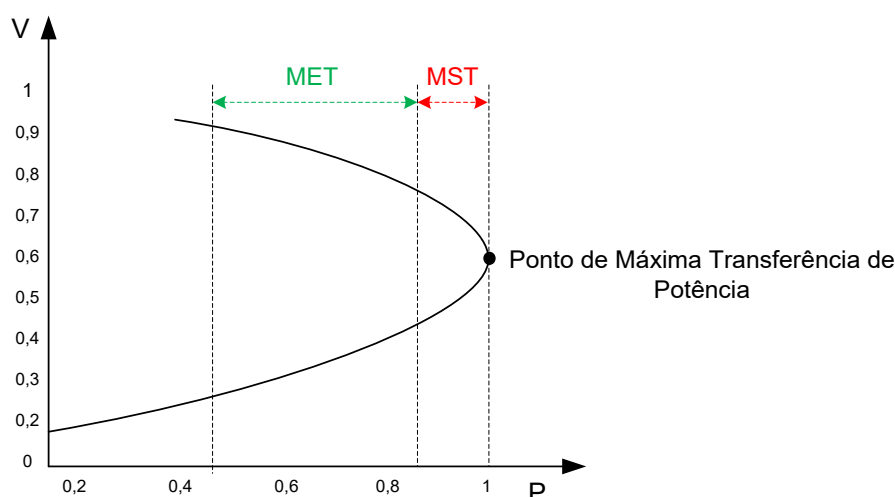


Figura 2.2 – Curva PV, MET e MST

O monitoramento da MET em tempo real é muito importante, pois permite que ações preventivas possam ser realizadas, quando da aproximação do ponto operativo à região de operação insegura, evitando situações críticas de instabilidade.

No contexto da análise estática, a curva PV tem sido amplamente utilizada nos estudos de estabilidade de tensão. Conforme visto, sua construção demanda a simulação de diversos cenários de aumento de carga. Para sistemas de grande porte, tais simulações são realizadas por meio de soluções sucessivas do fluxo de potência. Esse tipo de construção torna-se praticamente inviável na análise da estabilidade de tensão em tempo real, devido à dinâmica característica desse ambiente.

A construção da curva PV, para sistemas elétricos reais, envolveria um grande número de cenários a serem considerados e um elevado esforço computacional, condição esta incompatível com a operação em tempo real, onde são exigidas rapidez e agilidade na obtenção das informações do estado do sistema.

As formulações desenvolvidas e apresentadas anteriormente para o sistema de duas barras podem ser aplicadas no monitoramento em tempo real, pois envolvem cálculos diretos e instantâneos, dependendo apenas dos seus parâmetros. Para viabilizar a aplicação dessas formulações, o uso de Equivalentes de Redes, os quais permitem que sistemas de grande porte sejam representados por um sistema simples de duas barras, torna-se fundamental.

No contexto desta pesquisa, conforme já salientado, o enfoque é dado aos equivalentes gerados a partir de medições fasoriais de tensão e de corrente em barramentos da rede, visando à sua aplicação no monitoramento em tempo real do risco de perda de estabilidade de tensão do

sistema. A construção desse tipo de equivalente constitui grande desafio, diante das especificidades inerentes ao ambiente de tempo real, sendo este um dos pontos motivadores para a elaboração desta pesquisa. Nos próximos itens, esse tema começa a ser introduzido, formando uma base para as discussões mais detalhadas apresentadas em capítulos posteriores.

2.3 EQUIVALENTE DE THÉVENIN NA REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O uso de equivalentes de redes nas análises de sistemas elétricos não é uma técnica recente, sendo amplamente difundida. Essa técnica visa a representar redes elétricas complexas por meio de circuitos compactos, viabilizando e simplificando análises, sendo sua aplicação estendida a diversos estudos.

A literatura apresenta vários tipos de equivalentes de redes que se diferem basicamente pela maneira como são constituídos e pelos dados utilizados na sua concepção. Várias são as modelagens adotadas, de acordo com sua aplicação.

Em geral, para aplicação na operação em tempo real, os equivalentes de redes são obtidos por meio de dados de medições fasoriais de tensão e de corrente coletadas nos barramentos do sistema. Nesse cenário, existem desafios a serem vencidos, relacionados à sua construção e contínua atualização, para que se tornem capazes de acompanhar o comportamento dinâmico do sistema.

É importante observar que, na literatura, encontram-se metodologias para obtenção de equivalentes de redes que se propõem à aplicação em tempo real, mas que utilizam formulações típicas de ambiente de estudo, tais como o cálculo de fluxo de potência. Isso torna-se uma limitação à aplicação dessas metodologias, que desconsideram a presença de erros inerentes aos processos de medição e outras características do ambiente de tempo real. As especificidades do ambiente de tempo real são tratadas em detalhes no Capítulo 3, onde as diferenças deste com o ambiente de estudo ficam explicitadas.

O equivalente de redes desenvolvido neste trabalho visa à redução do sistema elétrico complexo em um sistema simples de duas barras, denominado Equivalente de Thévenin, conforme ilustra a Figura 2.3. Esse equivalente é obtido a partir de dados de medições fasoriais de tensão e de corrente.

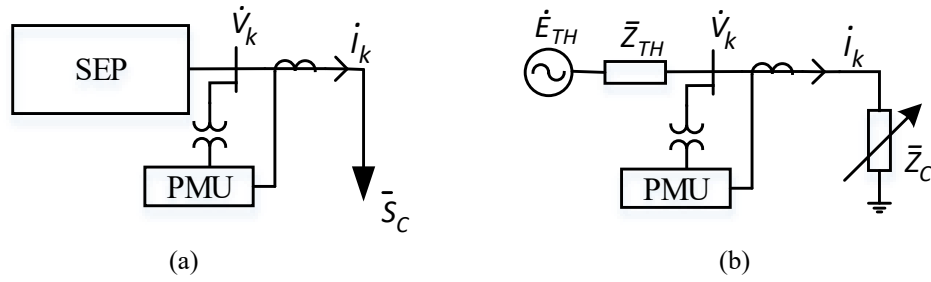


Figura 2.3 – Representação da rede elétrica vista de um barramento k : (a) rede completa e (b) circuito equivalente de duas barras

Na Figura 2.3, uma Unidade de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit* – PMU)⁴ é conectada à barra k . \dot{V}_k e \dot{I}_k representam os fasores de tensão e de corrente, \bar{S}_C a potência aparente da carga e \dot{E}_{TH} e \bar{Z}_{TH} a tensão e a impedância equivalentes de Thévenin. \bar{Z}_C representa a impedância da carga.

No sistema elétrico mostrado na Figura 2.3, consideram-se conhecidas as medições fasoriais de tensão e de corrente na barra de carga k . A impedância da carga é determinada por:

$$\bar{Z}_C = \frac{\dot{V}_k}{\dot{I}_k} \quad (2.9)$$

Para obtenção do equivalente é necessário estimar seus parâmetros: tensão (\dot{E}_{TH}) e impedância (\bar{Z}_{TH}).

A tensão de Thévenin é dada por:

$$\dot{E}_{TH} = \dot{V}_k + \bar{Z}_{TH}\dot{I}_k \quad (2.10)$$

Substituindo os fasores da equação (2.10) pela sua forma retangular e separando as partes real (subíndices r) e imaginária (subíndices m) obtém-se um sistema linear do tipo $Ax = b$:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{kr} & I_{km} \\ 0 & 1 & I_{km} & -I_{kr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{THr} \\ E_{THi} \\ R_{TH} \\ X_{TH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{kr} \\ V_{km} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

⁴ O tema Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, no qual se insere a PMU, é tratado posteriormente neste capítulo.

Em (2.11), I_{kr} , I_{km} , V_{kr} e V_{km} representam as partes real e imaginária das medições fasoriais de corrente e de tensão coletadas no barramento de carga. Os parâmetros do equivalente de Thévenin (E_{THr} , E_{THm} , R_{TH} e X_{TH}) são as incógnitas a serem calculadas.

O sistema linear (2.11) é classificado como possível e indeterminado, pois apresenta quatro incógnitas e apenas duas equações. Assim, é necessário outro conjunto de equações semelhantes para a determinação dos parâmetros. Essa é a proposta apresentada em (VU, 1999) que, por constituir a base inicial do equivalente desenvolvido neste trabalho, recebe atenção e é descrita a seguir.

2.3.1 Considerações sobre o Equivalente Proposto em (VU, 1999)

Segundo a proposta de (VU, 1999), o novo conjunto de equações necessário pode ser obtido considerando-se medições fasoriais de tensão e de corrente em um instante de operação diferente. Se duas medições consecutivas forem usadas, as dimensões de A e b são aumentadas e o sistema pode ser resolvido. Nesse caso, assume-se que o vetor de incógnitas permanece constante no intervalo em que as duas medições são registradas. Portanto, a equação (2.11) pode ser reescrita na forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{kr1} & I_{km1} \\ 0 & 1 & -I_{km1} & -I_{kr1} \\ 1 & 0 & -I_{kr2} & I_{km2} \\ 0 & 1 & -I_{km2} & -I_{kr2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{THr} \\ E_{THm} \\ R_{TH} \\ X_{TH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{kr1} \\ V_{km1} \\ V_{kr2} \\ V_{km2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Nessa expressão, os subíndices 1 e 2 referem-se às duas medições consecutivas consideradas. A solução do sistema do tipo $Ax = b$ descrito em (2.12) corresponde aos parâmetros do equivalente de Thévenin.

Conforme tratado no Capítulo 3, os dados obtidos de medição podem estar contaminados pela presença de diferentes tipos de erros, como grosseiros, na configuração e ruído. O erro do tipo ruído é inerente a qualquer valor medido, pois está relacionado à incerteza dos dispositivos usados no processo de medição e, portanto, sua presença deve ser considerada na solução de (2.12).

Uma técnica muito empregada no tratamento do ruído é o Estimador dos Mínimos Quadrados (EMQ) que, basicamente, considera a presença de um erro associado à solução de um sistema do tipo $Ax = b$ e minimiza tal erro (AGUIRRE, 2015). Para isso, as matrizes A e b são sobredimensionadas.

No contexto da análise dos sistemas elétricos, considerando o sistema linear (2.12), esse sobredimensionamento é feito utilizando-se várias medições consecutivas no preenchimento da matriz A e do vetor b , os quais contêm os valores de corrente e de tensão medidos, respectivamente. A solução do sistema sobredimensionado é obtida por meio da matriz pseudo-inversa, conforme equação (2.13).

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2.13)$$

Sendo uma referência básica, o método proposto por (VU, 1999) merece ser observado com atenção. Considerando a formulação (2.12), questões podem ser levantadas, quanto à sua aplicação na construção de equivalentes que utilizam valores reais de medições de tensão e de corrente. Dentre elas, destacam-se a capacidade de filtragem do erro do tipo ruído e a taxa de amostragem das medições.

A consideração de um número maior de medições consecutivas, na composição do sistema de equações, vem no sentido de aumentar a capacidade de filtragem do estimador. Uma análise inicial poderia sugerir o uso de um grande número de medições para que, matematicamente, a solução pudesse ficar mais exata. Contudo, é importante lembrar que as grandezas do equivalente são consideradas constantes para as diversas medições consecutivas. Sendo assim, deve haver um compromisso entre a dimensão do conjunto de medições que compõem o sistema de equações do estimador e a premissa da condição estática das grandezas do equivalente.

A decisão sobre o conjunto de medições a considerar está, também, intimamente relacionada à taxa de amostragem dos dados de medição. Maiores intervalos de tempo entre as amostragens dos fasores de tensão e de corrente tornam-se menos consistentes com a premissa da condição inalterada da rede, ou seja, das grandezas do equivalente, durante as medições consecutivas. Nas discussões apresentadas neste trabalho, é considerada a relação entre a taxa de amostragem das medições e o passo de variação da carga do sistema, utilizado nas simulações de fluxo de potência.

Percebe-se que a resposta do equivalente é fortemente influenciada pela presença do erro do tipo ruído nas medições, bem como das diferentes taxas de amostragem das coletas dos fasores. É necessário considerar a correlação entre a solução matemática do problema e sua consistência com o comportamento do sistema elétrico. Tratar dessas questões constitui grande desafio para o cálculo de equivalentes de redes aplicados na operação em tempo real, conforme discutido neste trabalho.

2.3.2 Equivalentes de Tempo Real – Revisão Bibliográfica e Comentários sobre a Literatura

Com o advento da medição fasorial sincronizada, novas possibilidades têm sido estudadas para determinação de um circuito equivalente na representação de sistemas elétricos complexos. Nesta seção, é feita uma revisão bibliográfica de estudos que propõem metodologias dedicadas à construção de equivalentes de redes elétricas baseados em medições locais no barramento.

O trabalho (HAJI, 2018) propõe um método para determinação do circuito equivalente de Thévenin multi-portas na representação de um sistema elétrico complexo. O equivalente multi-portas corresponde a n circuitos de porta simples calculados a partir do monitoramento do sistema. A obtenção desse equivalente se dá por meio do uso de medições fasoriais de tensão e de corrente que devem ser coletadas nas fronteiras entre as áreas do sistema elétrico. No processo de estimação dos parâmetros do equivalente, a filtragem dos erros de medição é feita por meio da aplicação do Estimador dos Mínimos Quadrados, ao se considerar o sobredimensionamento das matrizes que compõem o sistema a ser solucionado. No trabalho é proposto um método para detectar e avaliar mudanças no sistema, a partir das medições coletadas, para garantir que o sistema externo tenha permanecido constante durante o intervalo de tempo considerado no cálculo do equivalente. Apesar da abordagem desse trabalho mostrar-se interessante, há dois aspectos que merecem atenção no âmbito de sua aplicação em tempo real: (i) a necessidade de que medições fasoriais sejam coletadas em todos os barramentos da fronteira com a área externa que se deseja representar, por se tratar de um equivalente de multi-portas; (ii) o fato do equivalente proposto ser testado e validado no ambiente de simulações de fluxo de potência, considerando o Sistema de Teste IEEE 18 Barras. Conforme detalhado no Capítulo 3, há diferenças importantes entre este e o ambiente de tempo real, que podem impactar significativamente a estimação dos parâmetros do equivalente.

A metodologia proposta em (SU, 2018) apresenta uma abordagem de cálculo do equivalente de Thévenin para avaliação da estabilidade de tensão em tempo real, a partir de medições fasoriais. A estimativa dos parâmetros se dá pela solução do Estimador dos Mínimos Quadrados, considerando apenas duas medições consecutivas de tensão e de corrente. Como forma de tratamento aos ruídos de medição, uma técnica cônica de programação de segunda ordem é incluída. Trata-se de um problema de otimização, em que uma função objetivo linear é minimizada sobre restrições lineares e restrições de cone quadrático. O método é testado utilizando dados obtidos da solução do fluxo de potência de sistemas de teste e dados reais de medição de um sistema elétrico de Taiwan. Os resultados apresentados se limitam à análise da capacidade do equivalente em indicar a condição de máxima transferência de potência, sem entrar no mérito da avaliação do comportamento dos parâmetros e da precisão na detecção do ponto de instabilidade. Entretanto, a consideração desses aspectos é fundamental no monitoramento da operação de sistemas elétricos em tempo real.

O trabalho (LEE, 2019) apresenta um método para estimativa do equivalente de Thévenin para avaliação da margem de estabilidade de tensão. No processo da obtenção desse equivalente, uma rede complexa é representada por um sistema de múltiplos barramentos, em que são coletadas medições fasoriais de tensão e de corrente. A partir dessas medições, efetuadas em cada barramento de carga, pode-se obter um circuito equivalente simples composto por um barramento, denominado barramento virtual. A corrente desse barramento corresponde à soma da corrente de cada um dos múltiplos barramentos de carga, enquanto a tensão fasorial é calculada a partir da potência aparente. A definição dos fasores de tensão e de corrente do barramento virtual permite a construção de um circuito equivalente que engloba os parâmetros de geração, transmissão e carga do sistema complexo. A partir desse circuito, um método de estimação de parâmetros é indicado, para separar a tensão e impedância de Thévenin da parte de geração desse circuito, possibilitando o cálculo da margem de estabilidade de tensão do sistema. Apesar do equivalente se propor para aplicação em tempo real, há alguns aspectos no seu desenvolvimento que merecem atenção. A abordagem utilizada não considera o tratamento dos erros de medição na estimação dos parâmetros de Thévenin. Tais erros são filtrados apenas na modelagem da carga-equivalente. Além disso, o equivalente é testado considerando dados obtidos da simulação de cenários operativos de uma rede elétrica coreana, por meio do cálculo do fluxo de potência, com ênfase na análise de contingências.

O método proposto em (WANG, 2019) para determinação do equivalente de redes tem como objetivo avaliar e tratar o impacto das variações que ocorrem no sistema a montante da

barra a partir da qual o equivalente de Thévenin é calculado. Essas variações são decorrentes das flutuações das diversas cargas que compõem o sistema elétrico, além da barra em análise. Como proposta de solução para essa questão, a estimativa do equivalente é feita considerando duas medições consecutivas de tensão e de corrente, incluindo a variação dos parâmetros \bar{Z}_{TH} e \bar{E}_{TH} na equação que rege o sistema de duas barras. Um limiar adaptativo é proposto como valor máximo aceitável para a variação dos parâmetros do sistema. O método é aplicado considerando simulações de fluxo de potência para o Sistema de Teste IEEE 33 Barras. A proposta de avaliação das variações do sistema mostra-se interessante, visto que muitos trabalhos consideram que o sistema permanece inalterado no intervalo definido pelas medições consecutivas no cálculo dos parâmetros do equivalente. Entretanto, na abordagem desse trabalho, o tratamento de erros de medição não é considerado na estimação do equivalente, o que inviabiliza sua aplicação no ambiente de tempo real. Nesse tipo de aplicação, a filtragem de erros de medição é uma característica básica para garantir o bom desempenho dos equivalentes. Os resultados apresentados no trabalho referem-se a simulações de fluxo de potência para o Sistema de Teste IEEE 33 Barras.

Na metodologia de estimação do equivalente de Thévenin proposta em (ZHANG, 2020), os parâmetros são obtidos a partir de um algoritmo adaptativo que propõe uma equação recursiva para o cálculo. Os erros associados ao processo de medição são tratados por meio da introdução da função *Huber* e de estatísticas de projeção, que propõem eliminar os efeitos de valores atípicos e variações bruscas das medições, respectivamente. Uma variável “fator de esquecimento” é introduzida na metodologia e pode ser ajustada, de acordo com as mudanças no sistema elétrico, para eliminar rapidamente os dados históricos com desvios de medição elevados. Os resultados apresentados nesse trabalho referem-se a simulações de cenários operativos dos Sistemas de Teste IEEE 118 Barras e IEEE 30 Barras. A proposta do equivalente mostra-se relevante, principalmente no que diz respeito à eliminação rápida dos efeitos adversos de medições suspeitas. Entretanto, no âmbito da operação em tempo real, não se pode comprovar a eficácia e a aplicabilidade do equivalente no monitoramento de sistemas, visto que é testado por meio de simulações de fluxo de potência, em um ambiente controlado, que não incorpora as especificidades do ambiente de medições.

No trabalho (SOBHY, 2022), o método apresentado para obtenção do equivalente de redes é baseado no uso da Transformada Discreta de Fourier (TDF), que é aplicada a n pares de medições fasoriais de tensão e de corrente. A determinação dos coeficientes da TDF permite desenvolver um método simples para o cálculo do equivalente, que considera a presença de

erros de medição na estimação dos parâmetros. O tratamento desses erros se deve à característica própria da TDF que garante que seus efeitos em uma amostra de medição não refletem da mesma maneira nos diversos coeficientes calculados, devido aos diferentes deslocamentos de fase aplicados. Assim, é proposto um método para testar os coeficientes da TDF, sendo dois de cada vez, em que um indicador de erro definido permite determinar qual coeficiente resulta na melhor estimativa para a impedância de Thévenin. O método proposto no trabalho é aplicado para um circuito simples, através de um exemplo ilustrativo, e para o Sistema de Teste IEEE 30 Barras. Embora os resultados referentes ao equivalente mostrem-se coerentes, são restritos a ambiente de estudo, por meio de simulações de fluxo de potência, e não se pode atestar sua aplicabilidade no monitoramento de sistemas em tempo real.

Os trabalhos descritos anteriormente propõem metodologias para cálculo de equivalente de redes baseados em medições e se dizem aplicáveis para monitoração em tempo real. Entretanto, a maioria das metodologias são aplicadas e testadas utilizando dados provenientes de simulações de cenários operativos de sistemas de estudo. Dessa forma, não consideram a diferença entre o ambiente de estudo, baseado em simulações de fluxo de potência, e o ambiente de tempo real, baseado em medições de grandezas da rede elétrica, inviabilizando a aplicação em tempo real.

Essas questões são avaliadas detalhadamente no trabalho (SILVA, 2020), que apresenta uma análise de alguns dos equivalentes de redes elétricas de tempo real citados em (YUAN, 2014) e a comparação dos parâmetros estimados com uma referência analítica, proposta pelo autor. Tal referência analítica engloba nas análises, além dos parâmetros do equivalente, valores para a potência máxima, tensão crítica, módulo da impedância de Thévenin e módulo da impedância de carga para o ponto de máxima transferência de potência. As simulações são realizadas considerando o Sistema de Teste IEEE 14 Barras. As análises de sensibilidade são elaboradas com base em dois aspectos importantes: impacto da dinâmica da carga, por meio do tamanho do passo de aumento de carga, e da presença de incertezas nas medições no comportamento dos equivalentes. As conclusões dessa análise minuciosa são descritas resumidamente a seguir.

No trabalho (SILVA, 2020) é apresentada uma discussão acerca da habilidade das técnicas em modelar e filtrar os ruídos presentes nas medições. As análises das metodologias selecionadas são realizadas a fim de demonstrar a importância desse aspecto na exatidão dos resultados obtidos pelos equivalentes.

O método baseado no Teorema de Tellegen (ŠMON, 2006) não possui capacidade de filtragem do erro do tipo ruído nas medições dos fasores de tensão e de corrente, o que ocasiona a estimação de parâmetros inconsistentes e de difícil aplicação prática. Em relação ao tamanho do passo de aumento de carga, os parâmetros estimados para o equivalente apresentam-se distantes dos valores de referência e de difícil interpretação elétrica, a menos do módulo da impedância de Thévenin. Além disso, a identificação do ponto de máxima transferência de potência não se mostra consistente com os valores de referência para potência máxima, tensão crítica e módulo das impedâncias de Thévenin e da carga de referência nesse ponto. O tamanho do passo de aumento de carga não mostra impacto significativo nas grandezas estimadas pelo método.

Baseado no Método Adaptativo, a metodologia proposta em (CORSI, 2008) não apresenta uma técnica direta de filtragem para erros do tipo ruído, mas um controle obtido por um parâmetro denominado erro de identificação (ε_E) que limita as variações entre parâmetros estimados em instantes consecutivos. Com isso, as grandezas estimadas para os parâmetros do equivalente considerando medições com ruído não convergem para os mesmos valores de um cenário onde não há presença desse erro. Verifica-se também que, quanto maior o desvio padrão considerado, ou seja, maior ruído presente, a identificação do ponto de máxima transferência de potência torna-se mais conservadora. Em relação ao tamanho do passo de aumento de carga, observa-se uma forte influência, com estimativas diferentes para os parâmetros do equivalente considerando os mesmos dados de entrada. Os resultados obtidos apresentam-se distantes dos valores de referência. Entretanto, a identificação do ponto de máxima transferência de potência mostra-se consistente em relação aos valores de referências das grandezas características desse ponto.

Seguindo a mesma filosofia do trabalho anterior, a metodologia (DUONG, 2016) apresenta técnica para filtragem do ruído, por meio de um Filtro de Médias Móveis. Os resultados obtidos mostram que as grandezas estimadas para o equivalente não convergem para os mesmos valores em que não se considera a presença do erro do tipo ruído, apesar de haver uma indicação de como filtrar esse erro. Nessa metodologia, os módulos da impedância e da corrente de carga não são grandezas filtradas, o que dificulta a aplicação prática em ambiente de tempo real. Também em função disso, verifica-se a identificação de diversos pontos de máxima transferência de potência. Ao se avaliar a sensibilidade em relação ao tamanho do passo de aumento de carga, constata-se que não há aproximação dos parâmetros estimados do equivalente para os valores de referência. A identificação do ponto de máxima transferência de

potência não apresenta consistência. Vale frisar que o Filtro de Médias Móveis introduz no método a sensibilidade com relação ao passo de carga.

A metodologia proposta em (VU, 1999), já tratada anteriormente, utiliza o Estimador dos Mínimos Quadrados como técnica de filtragem e tratamento do erro do tipo ruído. As análises realizadas em (SILVA, 2020) permitem observar que as grandezas estimadas para o equivalente de redes não possuem aplicação prática direta, se for considerada uma janela de dados com apenas duas amostras como indicado pelos autores, mesmo em ambientes com medições com baixo desvio padrão. Caso a janela seja ampliada, o método tem aumentada a sua capacidade de filtragem do erro do tipo ruído. Porém, a escolha dessa dimensão deve ser feita de maneira cuidadosa, conforme discutido no Capítulo 4.

As características dos métodos propostos em (HAQUE, 2003) e (TOBÓN, 2015), com relação à filtragem do erro do tipo ruído, são semelhantes às adotadas em (VU, 1999). Dessa maneira, o desempenho desses métodos acerca da filtragem do ruído é semelhante ao observado em (VU, 1999). Tal semelhança também é observada nos resultados provenientes da análise de sensibilidade em relação ao tamanho do passo de aumento de carga.

De acordo com as análises efetuadas em (SILVA, 2020), verifica-se que mesmo os métodos que incluem filtragem do erro do tipo ruído presente nas medições mostram resultados para o equivalente de redes que não apresentam comportamento condizente com o esperado. Isso inviabiliza a aplicação das metodologias em tempo real. Esse fato incentiva fortemente a continuidade das investigações no tema, sendo uma das principais motivações para a elaboração deste trabalho.

2.4 MEDIÇÕES FASORIAIS SINCRONIZADAS

Os sistemas elétricos de potência, em sua grande maioria, tornaram-se gradativamente interligados, resultando em controle e coordenação mais complexos. Assim, surgem demandas por melhorias constantes de métodos e instrumentos dedicados ao monitoramento e ao controle da operação em tempo real.

Dentre as tecnologias propostas para esse fim, destaca-se o Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, que utiliza avanços em comunicação e a tecnologia *Global Positioning System* (GPS) para estimar grandezas fasoriais associadas a barramentos dos sistemas elétricos. A tecnologia GPS permite que as medições sejam realizadas em um mesmo instante de tempo, por meio da fonte de sincronização, o que possibilita o conhecimento da magnitude e do ângulo das grandezas elétricas e a representação do estado do sistema de forma bastante exata. As medições podem ser feitas em instalações geograficamente distantes sob uma mesma referência de tempo e com precisão angular. Nesta seção, são abordados de forma sucinta os aspectos relacionados a tal sistema, visando a dar uma visão geral sobre o mesmo, no contexto da pesquisa. Características específicas do SMFS, bem como os requisitos mínimos para sua implantação no Brasil, podem ser encontrados na norma técnica (ONS, 2020).

O SMFS é composto basicamente por quatro equipamentos principais: unidade de medição fasorial (*Phasor Measurement Unit* – PMU), concentrador de dados fasoriais (*Phasor Data Concentrator* – PDC), *Global Positioning System* e canais de comunicação.

A Figura 2.4 ilustra a estrutura básica do SMFS. Os dados do sistema elétrico são coletados pelas PMU de acordo com o sinal de pulso por segundo emitido pelo sistema GPS. Esse sinal permite que o processo de aquisição de dados seja executado de modo sincronizado em diferentes locais de medição. A partir dos dados amostrados, as tensões e as correntes complexas de sequência positiva são calculadas com base no mesmo instante de tempo, utilizando-se a Transformada Discreta de Fourier (PHADKE, 1993). Os dados fasoriais são enviados aos PDC por meio de canais de comunicação. Esse concentrador, por sua vez, disponibiliza as medidas de magnitude e ângulo das grandezas coletadas nas barras, relativas a um instante de tempo bastante próximo do estado real, aos diversos aplicativos conectados a ele.

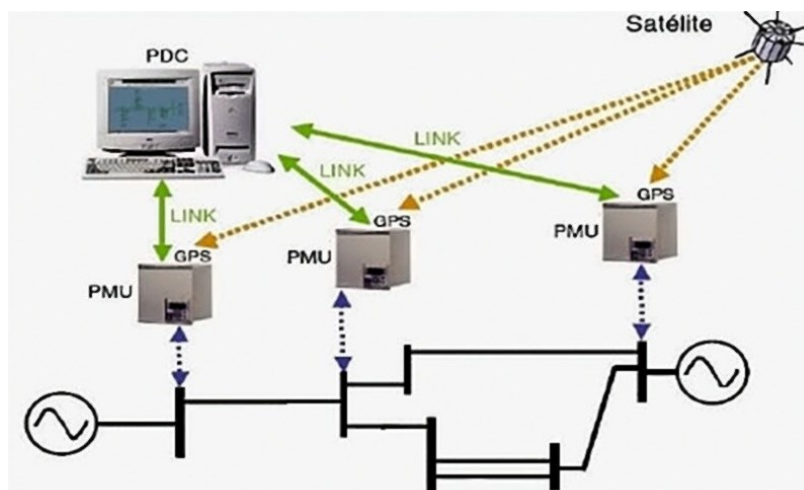


Figura 2.4 – Estrutura básica de um SMFS (ANDRADE, 2008)

Para uma melhor compreensão do processo de medição do SMFS, a seguir é realizada uma breve descrição dos principais equipamentos que o compõem:

A. Unidade de medição fasorial

O elemento mais importante do SMFS é a unidade de medição fasorial, responsável por obter as medições das grandezas do sistema elétrico, além de processá-las e enviá-las ao concentrador de dados. A PMU se caracteriza por fornecer medidas de alta confiabilidade e precisão sobre o estado do sistema, permitindo uma visualização dinâmica do mesmo e ampla gama de aplicações em proteção e controle (PHADKE, 2018), (APPASANI, 2018).

O sistema de aquisição de sinais da PMU recebe os sinais analógicos de tensão e de corrente, por meio de transformadores de potencial e de corrente, que passam por um filtro *anti-aliasing*, destinado a minimizar os ruídos provenientes desse tipo de medição. Em seguida, os dados passam pelo circuito oscilador com bloqueio de fase, responsável pela conversão do sinal proveniente do GPS de um pulso por segundo em vários pulsos sequenciais com uma taxa de velocidade alta utilizados na amostragem da forma de onda e pelo conversor analógico/digital, que realiza a discretização dos sinais analógicos. Os sinais digitais são, então, enviados ao microprocessador que realiza os cálculos matemáticos para obtenção dos fasores.

B. *Global Positioning System*

No SMFS, a fonte de sincronização é necessária para que o processo de aquisição de dados seja executado de modo sincronizado nas diferentes estações remotas. O GPS é o sistema utilizado para esse fim.

O sistema GPS envia para as estações receptoras um sinal de pulso por segundo, que é a base de tempo para sincronização das medidas obtidas. O sinal enviado é recebido pelas subestações com grande precisão, resultando em um erro bastante reduzido.

C. Concentrador de dados fasoriais

O concentrador de dados é o elemento do SMFS cujas funções principais são receber, organizar, armazenar e disponibilizar as medidas fasoriais. Os dados coletados pelas PMU são enviados ao PDC, onde são formatados utilizando-se etiquetas de tempo a fim de organizá-los em conjuntos de medições fasoriais referentes ao mesmo instante de tempo. Esses dados são, então, armazenados e disponibilizados de acordo com as aplicações solicitadas.

O PDC deve possuir um alto desempenho computacional, devido a seu papel fundamental no SMFS. Esse dispositivo deve apresentar continuidade de operação em tempo real, eficiência para o armazenamento de dados, confiabilidade e disponibilidade, capacidade de comunicação eficiente, atendimento aos diversos tipos de aplicação e fácil integração.

D. Canais de comunicação

Os canais de comunicação têm a função básica de interligar as PMU aos PDC e os PDC entre si, de diferentes áreas de controle. Atualmente, os meios de comunicação mais utilizados são a tecnologia sem fio, rede *wireless*, e redes privadas das empresas, que atuam com velocidade superior à dinâmica do sistema, não comprometendo a avaliação em tempo real.

A tecnologia de medição fasorial sincronizada tem avançado rapidamente nos últimos anos e muitas concessionárias de energia elétrica vêm instalando centenas de PMU em suas redes. Com isso, o monitoramento de redes elétricas utilizando essa tecnologia tem se tornado cada vez mais usual. Na literatura recente são encontrados diversos algoritmos de processamento de dados fasoriais sincronizados para diferentes aplicações, como monitoramento de oscilações, detecção de rede fora de operação, entre outros. No monitoramento da estabilidade de tensão, o uso de medições fasoriais, com o acesso a dados de medição de alta amostragem em tempo real, pode possibilitar uma identificação rápida e eficiente da margem de estabilidade de tensão (ELECTRA, 2017).

Publicações podem ser encontradas na literatura sobre o monitoramento da estabilidade de tensão em tempo real, a partir do uso de SMFS. Dentre elas, há aquelas baseadas no equivalente de Thévenin e aquelas que se utilizam de modelagens de redes neurais artificiais.

No âmbito do equivalente de Thévenin, podem ser citados os trabalhos (GONG, 2006), (CORSI, 2008), (MOU, 2012), (SU, 2016) e (POLSTER, 2017). Com relação a esses trabalhos, cabem duas observações que motivam a continuidade das pesquisas nesse assunto. A primeira é destacar que, além de medições obtidas das PMU, diversas metodologias necessitam do conhecimento de mais informações do sistema elétrico, como a topologia da rede, os parâmetros dos elementos e o vetor de estado. A necessidade desses dados pode ser entendida como um limitador, em virtude de a formulação matricial possuir um custo elevado para acompanhar a dinâmica do sistema elétrico. A segunda observação refere-se aos métodos que utilizam diretamente os dados das PMU, sem considerar as especificidades que caracterizam as medições, haja vista os resultados da pesquisa apresentada em (SILVA, 2020). Conforme já citado anteriormente, tal referência mostra, de forma detalhada, que há propostas de formulações que podem introduzir comportamentos que degradam a qualidade ou impossibilitam o monitoramento da estabilidade de tensão.

No campo das redes neurais, encontram-se as referências (INNAH, 2011), (MOHAMMADI, 2015), (NANDANWAR, 2016) e (SHAH, 2016). O trabalho apresentado em (INNAH, 2011) propõe o uso de redes neurais treinadas com dados obtidos por simulações de fluxo de potência. Adicionalmente, o índice utilizado na avaliação da estabilidade de tensão requer conhecimento detalhado da rede, por meio de matrizes que a representam, não apenas dos dados de medição fasorial. A metodologia sugerida em (MOHAMMADI, 2015) utiliza técnica baseada em árvore de decisões com o principal objetivo de reduzir a dimensão do problema de avaliação da estabilidade, por meio da seleção dos dados mais relevantes, tendo em vista o grande número de informações relacionadas aos sistemas elétricos. A proposta apresentada em (NANDANWAR, 2016) visa a identificar a melhor localização das PMU, com base nos barramentos críticos do sistema em termos de estabilidade de tensão, por meio da técnica de árvore de decisão alimentada por diferentes cenários simulados por programas de fluxo de potência. A abordagem adotada em (SHAH, 2016) utiliza redes neurais também para propor a localização ótima de PMU e calcular índices tradicionais de estabilidade já apresentados na literatura. Dois aspectos merecem atenção, com relação a esse trabalho: as redes neurais são treinadas com base em simulações prévias; os índices utilizados, conforme pode ser visto na pesquisa realizada em (SOUSA, 2018), são definidos com base em equações de fluxo de potência, não se mostrando aplicáveis em tempo real. Eles dependem, justamente,

da qualidade dos equivalentes que os alimentam. Nenhuma dessas referências considera, em seu equacionamento, as especificidades do ambiente de tempo real e só apresentam resultados obtidos em redes de estudo. Sendo assim, apesar dessas abordagens se mostrarem interessantes, não se enquadram na mesma linha da pesquisa desenvolvida neste trabalho de doutorado.

Pode-se concluir que o monitoramento da estabilidade de tensão de sistemas elétricos em tempo real tem sido reconhecido como uma atividade relevante, e que o uso de dados provenientes dos SMFS constitui avanço nessa direção. Contudo, vale ressaltar que, mesmo diante de toda essa promissora evolução, grandes desafios ainda precisam ser enfrentados, para que as aplicações possam, de fato, ser adotadas nos centros de supervisão e controle, na operação em tempo real.

2.5 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Conforme já introduzido, o presente trabalho integra uma série de pesquisas que vêm sendo desenvolvidas no LRC/UFMG relacionadas à avaliação da estabilidade de tensão dos sistemas elétricos. Os estudos se iniciaram, em 1996, com uma dissertação de mestrado (LOBATO, 1998), na qual é feita uma ampla discussão sobre a avaliação da estabilidade de tensão sob o ponto de vista da análise estática. Esse marco inicial não contempla o ambiente de tempo real, porém forneceu uma base teórica bem consolidada para as pesquisas posteriores. Da mesma forma, os desenvolvimentos voltados para as etapas de planejamento, (CORTEZ, 2001), (MARIANO, 2008), (CONDEGA, 2013) e (VILELA, 2014), mesmo não sendo descritos aqui, compõem as investigações de forma coesa e consistente.

A motivação principal para as pesquisas voltadas para a avaliação da estabilidade de tensão em tempo real, utilizando dados de medição fasorial, foi a dissertação de mestrado (ANDRADE, 2008). O trabalho aborda o grande potencial das aplicações dos SMFS na operação dos sistemas elétricos, sendo o tema estabilidade de tensão apontado como uma das funcionalidades mais relevantes.

Em 2010, foi elaborada a dissertação de mestrado (SILVA, 2010) que aborda o uso de equivalentes de redes na análise de estabilidade de tensão em tempo real, utilizando medições fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente. O equivalente utilizado nesse trabalho é obtido por meio do método apresentado na publicação (VU, 1999). De posse desse equivalente e dos conceitos relacionados à estabilidade de tensão, propôs-se um Índice Previsor de Instabilidade,

denominado PIT. Embora a metodologia tenha sido desenvolvida visando à aplicação de medições fasoriais sincronizadas, a mesma foi aplicada considerando dados obtidos de programas de fluxo de potência, tendo em vista a indisponibilidade de dados de tempo real, naquele momento.

Com a continuidade das pesquisas, verificou-se a necessidade da ampliação do conceito de carga para o equivalente de Thévenin. Nas simulações de fluxo de potência, a carga do sistema é conhecida, e, conseqüentemente, a corrente de carga é bem definida. Em contrapartida, no ambiente de medições fasoriais de tensão e de correntes em um barramento do sistema elétrico, a corrente vista pela barra possui uma característica dinâmica e nem sempre é bem definida, em especial nas barras de passagem. Diante dessa questão, a dissertação de mestrado (RIBEIRO, 2011) propõe duas metodologias para definição da corrente equivalente vista pela barra de carga do equivalente, dependendo do sentido do fluxo das potências ativa e reativa nos ramos diretamente conectados ao barramento analisado. Nesse trabalho, as análises e resultados obtidos também consideram dados obtidos de programas de fluxo de potência. Tais metodologias são de especial interesse para o desenvolvimento do equivalente proposto neste trabalho, conforme tratado nos capítulos que se seguem.

Em 2012, surgiu o primeiro trabalho que efetivamente utilizou dados provenientes de medição para determinação do Equivalente de Thévenin, representando a transição do ambiente de simulação para o ambiente de medição. Trata-se do trabalho de conclusão de curso (MARTINS, 2012), em que se propõe o uso de Estimadores de Estado para tratamento do erro do tipo ruído presente nas medições. Após a avaliação de três métodos, concluiu-se que o Estimador dos Mínimos Quadrados seria o mais adequado, devido a seu baixo custo computacional e por gerar resultados satisfatórios na determinação dos parâmetros do equivalente. As amostras de dados de medição utilizadas possuíam uma taxa de amostragem de 1 medição a cada 15 minutos, aproximadamente. Apesar de caracterizar um avanço nas pesquisas por se tratar de dados de medição reais, verificou-se a necessidade de continuidade das investigações, visando ao monitoramento em tempo real e considerando que dados de medição fasorial possuem uma taxa de amostragem bem maior.

Paralelamente aos últimos trabalhos citados, em 2010, iniciou-se um projeto de pesquisa de parceria entre LRC/UFMG, Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a empresa Concert Technologies (CEMIG, 2010). O projeto teve como objetivo o desenvolvimento do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada próprio da CEMIG, denominado SISMEF. A equipe do LRC/UFMG foi responsável pela elaboração de uma metodologia capaz de avaliar a

proximidade do ponto de operação atual do sistema elétrico ao ponto de risco de instabilidade de tensão com base na aplicação do SMFS da empresa. O desenvolvimento desse projeto permitiu um significativo avanço nas pesquisas e na aplicação prática das mesmas devido à disponibilidade de medições fasoriais.

Dentro do contexto desse projeto de pesquisa, originou-se a dissertação de mestrado (LEAL, 2013), como continuidade e aprimoramento dos trabalhos anteriores. O objetivo principal desse trabalho foi aferir o cálculo do equivalente para gerar resultados que representassem da melhor maneira possível o comportamento do sistema elétrico. Foram consideradas medições de tensão e de corrente com taxa de amostragem de 1 medição por minuto. Verificou-se que as variações de tensão e de corrente entre duas medidas consecutivas, diretamente relacionadas à taxa de amostragem dos dados, provocaram impacto significativo na determinação do equivalente. Diante dessa característica observada, foi proposto um método inovador para a obtenção do equivalente, o Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados, que objetiva o tratamento do erro tipo ruído e do efeito das alterações sistêmicas no equivalente.

No decorrer do projeto de pesquisa, foram disponibilizados pela CEMIG dados de medição fasorial com taxa de amostragem de 10 medições por segundo, bem superior às utilizadas até aquele momento. Tendo em vista que a taxa de amostragem dos dados produz impacto significativo nos resultados do equivalente, mostrou-se necessária a revisão da metodologia.

A dissertação de mestrado (ANDRADE, 2014), a partir de uma revisão detalhada da metodologia proposta em (LEAL, 2013), propôs quatro novas metodologias para determinação de equivalentes de redes em tempo real, já no contexto das medições fasoriais. A proposta baseia-se em atribuir diferentes ponderações na obtenção da impedância de Thévenin calculada pelo Estimador dos Mínimos Quadrados. Tais ponderações visam a dar maior ênfase às medições mais recentes da janela de dados considerada no cálculo. Outra contribuição importante do trabalho foi a criação de uma janela de aceleração no início do processamento do cálculo do equivalente, que permite uma rápida convergência dos parâmetros estimados.

No intuito de aprofundar as investigações acerca do efeito do erro do tipo ruído na determinação do equivalente proposto em (VU, 1999), originou-se a dissertação de mestrado (SILVA, 2015). Nesse trabalho é proposta uma ferramenta computacional facilitadora para o avanço das pesquisas, denominada Simulador de Cenários Operativos (SimC), implementada no MATLAB®. Os cenários avaliados nos trabalhos anteriores, com medições fasoriais reais, correspondiam a situações de operação normal, não apresentando risco de perda de estabilidade.

O SimC permite gerar conjuntos de medições fasoriais de tensão e de corrente, com erro do tipo ruído presente, possibilitando a análise de diferentes cenários de operação, incluindo situações de risco iminente de instabilidade de tensão.

As metodologias propostas no trabalho (ANDRADE, 2014) foram implementadas através do aplicativo denominado Monitor, proposto e desenvolvido em (VALE VISACRO, 2014). Tal aplicativo permite que análises das grandezas elétricas relacionadas ao equivalente se tornem mais fáceis e diretas. Os dados de entrada do Monitor podem corresponder a medições fasoriais ou valores simulados e gerados pelo SimC.

A integração dos aplicativos SimC e Monitor permitiu uma avaliação mais aprofundada das metodologias implementadas, cujos resultados são apresentados na dissertação (ANDRADE, 2018). Dois aspectos muito importantes foram considerados nas análises: exatidão e capacidade de filtragem dos estimadores. Os resultados apresentados demonstram que todas as metodologias são consistentes, mostrando-se capazes de representar a rede para o monitoramento da condição de segurança dos sistemas elétricos. Entretanto, pesquisas adicionais se mostraram necessárias, para se decidir qual seria inequivocamente a melhor metodologia de equivalente.

Ainda no sentido de se aprimorarem as metodologias desenvolvidas em (ANDRADE, 2014), partindo das equações que definem cada uma, a análise de sensibilidade apresentada na dissertação (BARBOSA, 2018) registra o comportamento das mesmas frente à variação de seus parâmetros. A partir dessas análises, foi sugerida uma Proposta de Ajuste de Parâmetros, visando à escolha mais adequada dos valores que favoreçam a convergência das impedâncias do equivalente.

Em (SOUSA, 2018) é apresentada uma análise comparativa entre diversos índices de estabilidade de tensão a serem aplicados na operação em tempo real. Além de identificar formulações que se mostraram inconsistentes, o trabalho enfatiza a importância da construção de equivalentes de forma confiável. Isso porque os índices não consideram as especificidades do tempo real, ficando tal responsabilidade para o equivalente.

A dissertação (SILVA, 2018) propõe uma metodologia para cálculo analítico dos equivalentes das redes elétricas vistos dos barramentos dos sistemas de potência, por meio da matriz de impedâncias de barras da rede. A metodologia, denominada Equivalente Analítico de Redes Elétricas, tornou-se uma primeira referência para validar as metodologias para cálculo de equivalentes de tempo real. A criação de um parâmetro de referência constitui um importante

marco para as pesquisas do LRC/UFGM, pois permite a aferição das metodologias desenvolvidas até o momento.

Dando continuidade à dissertação (SILVA, 2018), a tese de doutorado (SILVA, 2022) apresenta uma metodologia para cálculo de equivalentes de redes elétricas apropriados para avaliação do risco de instabilidade de tensão, em tempo real, por meio da análise das curvas PV e VQ. Nesse trabalho, duas linhas de pesquisa são identificadas: determinação de equivalente de redes visto de um barramento e análise de margens de estabilidade de tensão em tempo real a partir da aplicação dos equivalentes calculados. Na primeira linha, o principal avanço consiste em mostrar que a modelagem dos geradores no cálculo dos equivalentes impacta a avaliação do risco de instabilidade de tensão, deixando este de ser atribuído somente ao aumento do carregamento do sistema. Com relação à segunda linha de pesquisa, apresentam-se as margens de tensão e de potência reativa nas curvas PV e VQ, considerando uma distância predeterminada do ponto crítico para estabilidade de tensão.

É importante notar como tem se dado a evolução das pesquisas no LRC/UFGM, envolvendo os diversos aspectos relacionados ao tema Estabilidade de Tensão, no âmbito das atividades de expansão e de operação, em especial à concepção de Equivalentes de Redes de tempo real. A inserção do presente trabalho nesse contexto possibilita o desenvolvimento de uma pesquisa de alto nível técnico. O aprofundamento dos conhecimentos e o amadurecimento no tema permitem enxergar novos desafios, bem como propostas para as suas soluções.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A instabilidade de tensão é um fenômeno que pode ocasionar danos consideráveis aos sistemas elétricos. Em alguns casos, pode ocorrer uma série de eventos em cascata que se propaga pela rede, causando desligamentos em partes da rede de transmissão ou até mesmo um blecaute total. Portanto, é de fundamental importância o monitoramento da margem de estabilidade de tensão em tempo real, para garantir a segurança e confiabilidade da rede elétrica.

Na operação em tempo real, é necessário ter agilidade e rapidez na obtenção de parâmetros que qualificam a condição de estabilidade do sistema, devido ao dinamismo característico desse cenário. Nessas circunstâncias, os equivalentes de redes construídos em tempo real têm ganhado importância, e o uso de SMFS tem tido cada vez mais espaço no monitoramento do comportamento de sistemas elétricos.

Os conceitos básicos abordados neste capítulo introduzem as características dos equivalentes de redes desenvolvidos no ambiente de tempo real, e identificam o modelo empregado nesta pesquisa correspondente ao equivalente de Thévenin, que pode ser determinado a partir de medições fasoriais de tensão e de corrente.

Considerando a evolução e o contínuo avanço das pesquisas realizadas no LRC/UFGM, principalmente no que concerne aos desafios que se impõem à construção, validação e aplicação dos equivalentes de tempo real, verificou-se a importância de se identificarem com clareza as especificidades de tal ambiente. A revisão da literatura técnica apresentada neste capítulo reforça a necessidade dessa identificação, tendo em vista o fato de grande parte das abordagens apresentadas desconsiderar características intrínsecas à operação em tempo real, tais como a presença do erro do tipo ruído nas medições, a taxa de amostragem dos dados e a dinâmica própria dos sistemas elétricos de potência.

Visando a apresentar de forma organizada uma síntese dos desafios inerentes ao tempo real, o próximo capítulo apresenta de forma organizada as questões a serem observadas nesse ambiente, em contraposição ao ambiente de estudo. As especificidades levantadas serviram de base para o desenvolvimento do equivalente proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 3

ESPECIFICIDADES DO AMBIENTE DE TEMPO REAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Considerando a contextualização deste trabalho e a definição das suas frentes de pesquisa, diante do exposto nos capítulos anteriores, torna-se importante apresentar as principais características e desafios existentes no cenário de operação de sistemas elétricos em tempo real.

Conforme comentado, na literatura há trabalhos que, apesar de propostos para aplicações em ambiente de tempo real, são testados e validados em ambiente de estudo. De certa maneira, esses trabalhos ignoram a diferença entre o ambiente de estudo, baseado normalmente em simulações de fluxo de potência, e o ambiente de tempo real, baseado em medições de grandezas da rede elétrica.

Este capítulo apresenta o conjunto de características do ambiente de medição que devem ser consideradas e, devidamente tratadas para uma aplicação consistente e exata dos equivalentes em tempo real. Tais características são avaliadas em um contexto técnico aprofundado, abordando aspectos que são observados quando se atua no ambiente de medições reais. A experiência da equipe do LRC no desenvolvimento de aplicações em centros de supervisão e controle do setor elétrico nacional embasam os pontos aqui levantados (CEMIG, 2010).

Dentre as questões tratadas, atenção especial é dada ao erro do tipo ruído, relacionado às incertezas inerentes aos dados provenientes de medição, e às técnicas de estimação adotadas para tratá-lo. Diversas outras relevantes questões são discutidas, tais como: a definição da carga vista pelo barramento, a influência da variação e da taxa de amostragem das medições fasoriais consecutivas, o impacto da condição de não variação da potência da carga, e a relação entre as variações das medições sincronizadas de tensão e de corrente.

Neste capítulo também é apresentado o algoritmo desenvolvido para geração de dados de tensão e de corrente que emulam medições fasoriais sincronizadas. Apesar da pesquisa contar com conjuntos de dados fasoriais provenientes de medição, considerou-se importante a criação de cenários que representassem as diferentes condições operativas possíveis de ocorrer

na operação em tempo real de um sistema, conforme as questões levantadas para tal ambiente. Assim, as análises não ficam limitadas apenas a dados obtidos de redes específicas. O cenário de desenvolvimento do gerador de dados fasoriais inclui diversas características do ambiente de tempo real, onde estão inseridas as medições reais de grandezas elétricas.

Diante do exposto, tem-se que o objetivo do capítulo é evidenciar os desafios relacionados às aplicações de tempo real, enfatizando a relevância das pesquisas desenvolvidas neste trabalho.

3.2 ERROS INERENTES AO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Conforme detalhado em (VALE, 1986), nas discussões relativas à funcionalidade Estimador de Estado, os dados provenientes de medição estão sujeitos à presença de três tipos de erros: erro do tipo grosseiro, erro na configuração e erro do tipo ruído. O estimador considera a possível presença de tais erros e, a partir de formulação específica, os trata de forma diferenciada, formando uma base de dados estimados, considerados mais confiáveis em relação às medições propriamente ditas. De forma sucinta, tais erros podem ser assim caracterizados:

- Erro do tipo grosseiro: Pode decorrer, principalmente, de leitura errônea, de operação indevida ou de falha no sistema de medição. Trata-se de um erro que apresenta grande diferença do valor medido em relação ao valor verdadeiro da grandeza elétrica. Devido a suas características, é um erro de difícil previsibilidade, tanto em termos de magnitude, quanto em termos de localização. Dessa forma, modelagem específica para esse erro não é implementada no Estimador. O seu aparecimento pode ser minimizado ao se realizarem, periodicamente, aferições e calibrações dos instrumentos envolvidos no processo de medição. Outra maneira de se minimizarem os impactos desse tipo de erro nas aplicações práticas é empregar técnicas para sua detecção e identificação, a fim de eliminar seus efeitos, tais como aquelas implementadas no Estimador de Estados.
- Erro na configuração: Erro proveniente de informações incorretas sobre *status* atuais de chaves e disjuntores ou da falha do programa Configurador da Rede. Em geral, trata-se de um erro de menor ocorrência, visto que, durante a operação normal de sistemas elétricos, a configuração da rede e, conseqüentemente, as informações sobre o *status* da rede são menos sujeitas a alterações de valores quando comparadas àquelas de dados relativos a grandezas

do tipo analógico. O tratamento desse tipo de erro pode ser feito de maneira semelhante ao erro do tipo grosseiro pelo Estimador de Estados.

- Erro do tipo ruído: Erro inerente a qualquer tipo de medição está sempre presente nos dados coletados no sistema elétrico. Trata-se de um erro de natureza aleatória, associado à incerteza característica dos equipamentos de medição e à imperfeição na transmissão das informações. Devido a essa característica, pode-se afirmar que não existem medições perfeitas ou puras, livres de ruído. Diferentemente dos erros do tipo grosseiro e na configuração, é possível determinar uma modelagem específica para o ruído. Dessa forma, o Estimador de Estados modela e trata esse erro, de maneira a calcular um estado confiável e consistente para a rede elétrica. O erro ruído é modelado como sendo uma variável aleatória, normalmente distribuída, com valor esperado nulo e desvio padrão conhecido, relacionado à qualidade de medição⁵.

O comportamento dos equivalentes de redes mostra-se muito sensível em relação à qualidade do sistema de medição. Sistemas de medição de baixa qualidade podem levar a variações muito elevadas dos parâmetros do equivalente, o que não condiz com o estado normal de operação dos sistemas elétricos. Pequenas amplitudes de desvio padrão associadas a medições de tensão e de corrente já causam impacto na resposta do equivalente.

Para exemplificar essa questão, a Figura 3.1 mostra o comportamento dos módulos das impedâncias de Thévenin e da carga, obtidos da aplicação do método proposto por (VU, 1999), considerando um conjunto de 20 medições consecutivas na solução do sistema. O cenário de simulação considerou um aumento nas potências ativa e reativa de todas as barras de carga do Sistema de Teste IEEE 14 Barras⁶, mantendo os fatores de potência constantes. A barra 5 foi escolhida para demonstração dos resultados por ser avaliada como a mais sensível em relação às variações de tensão.

Com o uso da ferramenta computacional SimC, para cada incremento de carga de 0,1%, por meio do cálculo do fluxo de potência, tem-se uma “medição” fasorial de tensão e de corrente associada. Em um primeiro momento, tais medições foram consideradas puras, sem a presença de erro do tipo ruído (resultado direto da solução do fluxo de potência) e, posteriormente, tal presença foi incluída.

⁵ No contexto deste trabalho, o termo baixa qualidade de medição é utilizado para caracterizar medições com desvio padrão elevado.

⁶ O Sistema de Teste IEEE 14 Barras encontra-se descrito no Apêndice A.

A inexatidão dos sinais provenientes de sistemas de medição fasorial sincronizado é qualificada com base no Erro Vetorial Total, estabelecido pela Norma para Sincrofasores dos Sistemas de Potência (IEEE, 2011), que estabelece os padrões de mensagens para transmissão dos dados. Essa inexatidão deve ser inferior a 1% para os equipamentos de medição. Por isso, foram escolhidos desvios de 0,1%, 0,5% e 1% para as simulações.

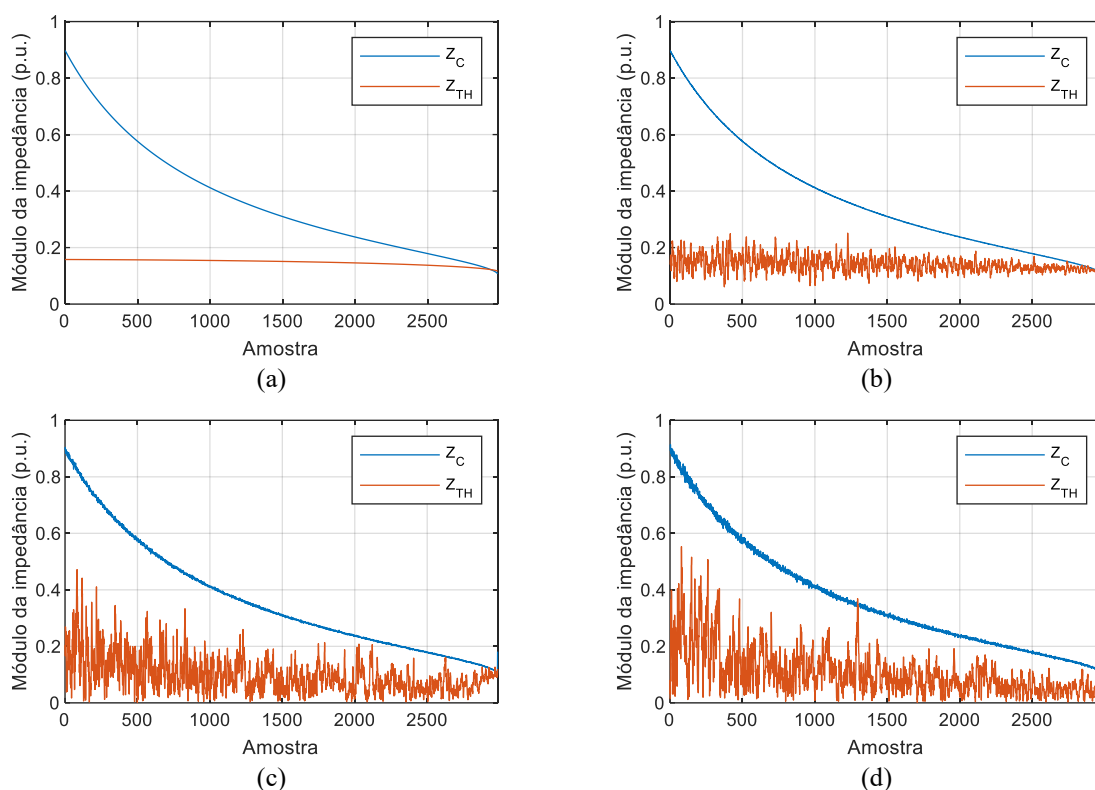


Figura 3.1 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes à barra 5 do sistema IEEE 14 Barras, obtidas da aplicação do método de (VU, 1999), considerando medições com desvios padrão de (a) 0%, (b) 0,1%, (c) 0,5% e (d) 1%

O impacto da presença do erro do tipo ruído pode ser visto com clareza na Figura 3.1, onde estão registrados os módulos das impedâncias de Thévenin e da carga para a barra 5 do Sistema de Teste IEEE 14 Barras. No cenário em que se consideram medições puras, as impedâncias de Thévenin e da carga se igualam, próximo ao ponto de máxima transferência de potência. Na condição em que se insere o erro do tipo ruído nas medições, observa-se que a tendência de comportamento dos parâmetros está em sintonia com os resultados anteriores. Entretanto, apresentam comportamento com variações bruscas entre os valores consecutivos, o que não se mostra condizente com o comportamento esperado para sistemas elétricos. As variações tornam-se mais acentuadas com o aumento do desvio padrão associado ao erro do tipo ruído nas medições.

É importante ressaltar que o método proposto por (VU, 1999) emprega a técnica de estimação de estado para filtragem do erro do tipo ruído. Entretanto, mesmo com a filtragem, os resultados obtidos para os parâmetros de Thévenin não apresentam comportamento condizente com o esperado, tornando necessária uma investigação mais profunda acerca do tratamento desse tipo de erro, na construção dos equivalentes.

O uso de técnicas de estimação de estado permite a obtenção de um modelo mais exato e com maior confiabilidade para a análise de sistemas de energia elétrica. Em (MARTINS, 2012), foram estudados três métodos com relação ao tratamento de dados: Estimador dos Mínimos Quadrados, Estimador Estendido dos Mínimos Quadrados e Estimador dos Mínimos Quadrados Totais. Os resultados obtidos foram muito próximos, para os três estimadores, apresentando diferença praticamente desprezível entre eles. Esse comportamento mostrou-se presente em diversos casos estudados. Diante dessa característica e pelo fato de ser o algoritmo de menor esforço computacional, optou-se pelo uso do Estimador dos Mínimos Quadrados neste trabalho para tratamento do erro do tipo ruído nas medições.

3.3 AMBIENTE DE TEMPO REAL CONSIDERANDO O COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

Conforme já introduzido, as análises do comportamento de sistemas elétricos no ambiente de tempo real se diferem significativamente daquelas no ambiente de estudo. Em termos das análises de estabilidade de tensão no ambiente de estudo, tradicionalmente, utilizam-se programas de fluxo de potência, em especial para a obtenção da curva PV, em que a topologia e os parâmetros da rede elétrica são conhecidos. Nesses estudos, normalmente, as cargas do sistema elétrico, modeladas como potência constante, são incrementadas gradativamente, mantendo-se os fatores de potência constantes. O tamanho do passo do aumento de carga é um parâmetro que se pode controlar. No ambiente de tempo real, as grandezas ficam disponíveis por meio de medições e, no caso deste trabalho, são de especial interesse as medições fasoriais de tensão e de corrente. Os dados fasoriais são a fonte para a obtenção dos equivalentes de tempo real, os quais devem representar de maneira consistente toda a dinâmica do sistema elétrico.

As particularidades do ambiente de tempo real muitas vezes não são consideradas no ambiente de estudo. A identificação de tais particularidades decorre de pesquisas de natureza

acadêmica e prática em aplicações desenvolvidas para o ambiente dos centros de operação. Os itens descritos a seguir registram alguns aspectos que merecem atenção no contexto da concepção de equivalentes de tempo real.

A. Definição da carga vista pelo barramento

Na formulação de equivalentes baseados no equivalente de Thévenin, utilizam-se fasores de tensão e de corrente referentes à carga do sistema, sendo essa carga bem definida. Entretanto, no ambiente de tempo real, há barras que possuem vários ramos nelas incidentes, tornando não direta a identificação da carga vista pela mesma. Frequentemente, tem-se apenas uma medição de tensão do barramento em análise e várias medições de corrente, relacionadas a cada ramo conectado a esse barramento. As medições de corrente não identificam de forma direta a carga do barramento, ou seja, em tempo real a carga não é diretamente definida, precisando ser calculada.

Essa dificuldade na definição da carga constitui mais um desafio, que se destaca no ambiente de tempo real, muitas vezes ignorado pelas metodologias propostas.

No presente trabalho, conforme detalhado posteriormente, é adotada a abordagem proposta em (RIBEIRO, 2011), onde são geradas alternativas para a determinação da corrente equivalente, a qual é utilizada para se calcular a carga-equivalente do barramento.

B. Variação dos valores das medições fasoriais consecutivas de tensão e de corrente

Uma questão importante levantada por (RIBEIRO, 2011) diz respeito às variações muito pequenas entre medições consecutivas de corrente. Nesse caso, observou-se que o módulo da impedância de Thévenin tende a valores elevados. Esse comportamento pode ser verificado matematicamente através de manipulação matemática simples da equação que rege o sistema de duas barras da Figura 2.1, considerando dois instantes de medição consecutivos:

$$\dot{E}_{TH} = \dot{V}_{k1} + \bar{Z}_{TH}\dot{I}_{k1} \quad (3.1)$$

$$\dot{E}_{TH} = \dot{V}_{k2} + \bar{Z}_{TH}\dot{I}_{k2} \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.2) em (3.1) e rearranjando os termos, obtém-se:

$$\bar{Z}_{TH} = - \left(\frac{\dot{V}_{k2} - \dot{V}_{k1}}{\dot{I}_{k2} - \dot{I}_{k1}} \right) = \left(\frac{\Delta \dot{V}}{\Delta \dot{I}} \right) \quad (3.3)$$

A equação (3.3) mostra que variações muito pequenas para a corrente de carga podem resultar em valor elevado para \bar{Z}_{TH} . Nessa condição, os valores obtidos para $|\bar{Z}_{TH}|$ podem alcançar o valor do módulo da impedância da carga, indicando uma condição de instabilidade de maneira equivocada. Em caso de variação de corrente próxima a zero, indeterminação matemática poderá prejudicar a obtenção do equivalente.

C. Taxa de amostragem das medições fasoriais consecutivas de tensão e de corrente

O ambiente de tempo real deste trabalho considera o uso de SMFS para fornecer dados de ângulo e magnitude de tensão e de corrente referentes ao barramento de interesse. A taxa de amostragem desse tipo de medição é, em geral, bem elevada. No SISMEF, sistema implantado na CEMIG (CEMIG, 2010), por exemplo, a taxa de amostragem é de 10 medições por segundo.

Essa característica possibilita um melhor rastreamento do comportamento dinâmico dos sistemas elétricos, sendo uma das principais vantagens da tecnologia de medições fasoriais. Por outro lado, medições consecutivas muito próximas umas das outras, pode se tornar um fator complicador para a obtenção de equivalentes de redes. Conforme tratado no item anterior, em abordagens que se baseiam em diferenças entre medições consecutivas, caso tais diferenças sejam muito pequenas, podem ocorrer inconsistências nos equacionamentos. Adicionalmente, em abordagens que utilizam medições consecutivas na composição de matrizes de um sistema linear, estas podem se tornar mal condicionadas e dificultar a etapa de sua inversão, um dos passos importantes na solução do sistema.

A taxa de amostragem de dados de medição está relacionada com o tamanho do passo de carga, fazendo uma analogia com o ambiente de estudo. Pesquisas realizadas em (SILVA, 2015) mostram que, quanto menor o passo de aumento de carga, ou quanto maior a taxa de amostragem de dados, maior é a variação da resposta do equivalente de Thévenin. Esses estudos foram realizados utilizando a plataforma SimC, onde é possível selecionar a dimensão do passo de carga. O equivalente avaliado em (SILVA, 2015) é aquele proposto por (VU, 1999), apresentado no Capítulo 2, que considera duas medições consecutivas de tensão e de corrente, na solução do sistema linear.

D. Variação da potência da carga em medições consecutivas

Ainda no contexto da taxa de amostragem de dados e considerando o equivalente proposto por (VU, 1999), outra característica importante foi verificada no trabalho (RIBEIRO, 2011). Refere-se à condição em que há variações em medições consecutivas de tensão e de corrente da barra em análise, contudo a potência da carga-equivalente se mantém inalterada.

Nesse caso, os cálculos do circuito equivalente de Thévenin resultam em módulos iguais para as impedâncias de Thévenin e da carga, indicando que o sistema estaria no ponto de máxima transferência de potência, em situação de instabilidade. Esse comportamento pode ser comprovado, através de equacionamento matemático envolvendo a expressão de potência da carga do sistema de duas barras ilustrado na Figura 2.3 (b):

$$P_{eq} = |\dot{V}_k| |\dot{I}_k| \cos(\theta_{\dot{V}_k} - \theta_{\dot{I}_k}) \quad (3.4)$$

Isolando-se a tensão $|\dot{V}_k|$ na equação (3.4) e derivando-se a expressão resultante em relação à corrente $|\dot{I}_k|$, após algumas manipulações, obtém-se:

$$\left| \frac{d\dot{V}_k}{d\dot{I}_k} \right| = |\bar{Z}_{TH}| = |\bar{Z}_C| \quad (3.5)$$

Essa expressão confirma a igualdade observada entre as impedâncias de Thévenin e da carga nos estudos realizados em (RIBEIRO, 2011). Portanto, na condição em que não há variação da potência, o equivalente que utiliza apenas duas medições consecutivas apresenta resultados matemáticos não condizentes com o comportamento do sistema elétrico, indicando que este se encontra no ponto crítico de estabilidade de tensão, mesmo operando em um ponto distante do mesmo.

E. Relação entre as variações das medições consecutivas de tensão e de corrente

A grande maioria das cargas presentes nos sistemas elétricos de potência tem característica indutiva, sendo assim usualmente utilizada nos estudos elétricos. Considerando,

então, uma carga indutiva submetida ao cálculo de circuitos elétricos, o aumento da potência da carga resultaria em um aumento da corrente e uma redução da tensão.

No cenário envolvendo medições, esse comportamento nem sempre é observado, devido às características desse ambiente, incluindo a presença do erro do tipo ruído e a atuação dos diversos equipamentos de controle de tensão localizados na rede elétrica. Nos sistemas elétricos de potência, a tensão é uma grandeza controlada, que deve ser mantida dentro de limites (faixa operativa) definidos pelos órgãos responsáveis. Essa questão está exemplificada na Figura 3.2.

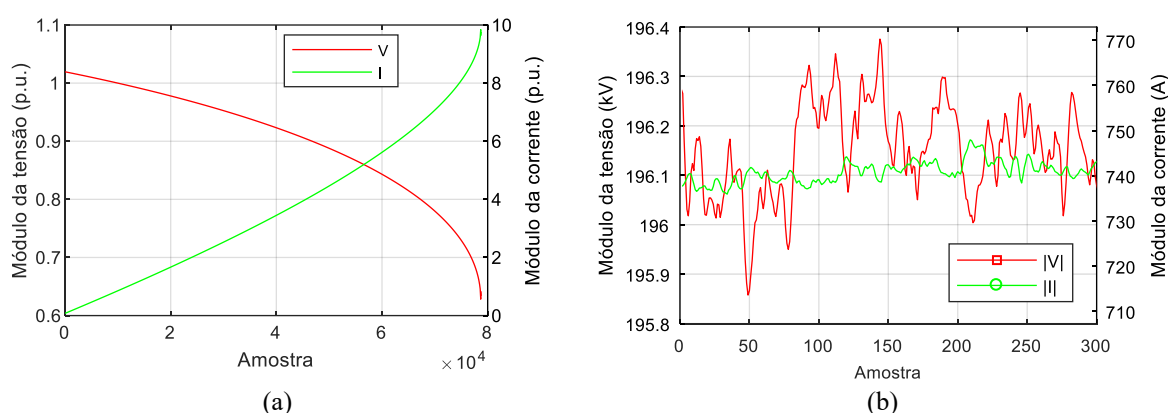


Figura 3.2 – Tensão e corrente características dos ambientes (a) de estudo e (b) de tempo real

Na Figura 3.2 (a) são apresentados dados de tensão e de corrente obtidos por meio de programas de fluxo de potência, onde se promove o aumento da carga indutiva da barra 5 do Sistema de Teste IEEE 14 Barras. Observa-se o aumento da corrente de carga e a redução da tensão, conforme esperado. Na Figura 3.2 (b) são ilustrados dados de medições fasoriais referentes ao barramento de Taquaril⁷, de 345 kV, sob responsabilidade da CEMIG. As medições apresentam muitas variações e não se verifica um padrão de comportamento que caracterize aumento ou redução de carga indutiva. Em um curto intervalo de tempo são observadas todas as situações possíveis entre medições consecutivas: corrente e tensão aumentando, corrente e tensão diminuindo, corrente aumentando e tensão diminuindo e, corrente diminuindo e tensão aumentando.

F. Considerações sobre as especificidades do ambiente de tempo real

⁷ O diagrama esquemático desse barramento está ilustrado no Capítulo 4.

Tendo em vista os aspectos apresentados anteriormente, o impacto da taxa de amostragem dos dados, considerando sua influência nos valores e nas variações das grandezas medidas, se mostra como uma questão que merece investigação em estudos de tempo real. O fato de a tensão ser uma grandeza controlada, refletindo o resultado de todo o controle de tensão do sistema, faz com que sua relação com a variação da corrente equivalente da barra também mereça atenção, pois o que se mostra incoerente nas equações de circuitos ocorre frequentemente quando se analisam as medições.

Uma maneira de se evitar que as condições apresentadas anteriormente ocorram é aumentar o número de medições consecutivas na composição das matrizes A e b , para solução do sistema linear do equivalente proposto em (VU, 1999). Entretanto, conforme já introduzido no Capítulo 2, deve haver um compromisso entre o conjunto de medições a serem consideradas no sistema linear e a premissa de que as grandezas do equivalente permanecem constantes para todo esse conjunto.

A proposta apresentada neste trabalho trata todas as questões levantadas, conforme registrado de forma detalhada no capítulo que se segue.

3.4 GERADOR DE DADOS FASORIAIS

Conforme enfatizado ao longo deste capítulo, as diferenças existentes entre os ambientes de tempo real e de simulação impactam diretamente na resposta do equivalente. Dessa maneira, verifica-se a importância de se avaliarem métodos propostos na literatura para aplicação em tempo real a partir do uso de dados reais de medição, visto que grande parte deles é testada e validada apenas com dados provenientes de simulações.

A criação de cenários operativos que representem condições possíveis de ocorrer na operação em tempo real de sistemas elétricos permite que as análises envolvendo equivalentes de redes não fiquem restritas a dados de medição de redes específicas e a dados de simulações de fluxo de potência. Nesse sentido, foi desenvolvido neste trabalho um algoritmo para geração de dados fasoriais, denominado Gerador de Dados Fasoriais (GDF). Os dados de saída dessa ferramenta correspondem a magnitude e ângulo de tensão e de corrente elétricas. O algoritmo desenvolvido foi implementado na ferramenta computacional MATLAB®.

É importante destacar que a ideia básica do GDF não é a reprodução fiel de medições fasoriais reais, mas a geração de dados que possuam aspectos característicos desse tipo de

medição. Dessa forma, as diversas especificidades do ambiente de medição, descritas na seção anterior, são consideradas na elaboração do algoritmo, cuja formulação é apresentada a seguir.

3.4.1 Formulação Básica do Gerador de Dados Fasoriais

O desenvolvimento do algoritmo do GDF foi dividido, basicamente, em três etapas: estudo do comportamento de dados reais de medição fasorial sincronizada, modelagem para geração dos dados fasoriais de tensão e de corrente, e inclusão das especificidades do ambiente de tempo real. Cada uma dessas etapas é aqui descrita.

A. Estudo do comportamento de dados reais de medição fasorial sincronizada

Os dados de saída do GDF devem representar, de maneira consistente, valores semelhantes às medições fasoriais reais de tensão e de corrente. Portanto, o passo inicial do desenvolvimento do algoritmo foi a análise criteriosa e cuidadosa do comportamento de dados de medição, em termos de magnitude e ângulo, que são as bases para a modelagem do gerador.

Nessa etapa, diversos conjuntos de dados reais de medição fasorial foram avaliados sob diversos aspectos. Em termos de magnitude, as grandezas de interesse são o valor médio e a variação entre duas medições consecutivas. A taxa de dispersão da magnitude dos dados em relação a tais grandezas é analisada através do desvio padrão. Em termos de ângulo, os aspectos avaliados são o valor referente à primeira medição do conjunto, a taxa de crescimento, assumindo um aumento linear do ângulo, e a diferença máxima entre o ângulo real e o ângulo estimado através de uma reta de aproximação.

Todos os conjuntos de medições fasoriais de tensão e de corrente disponíveis ao longo do desenvolvimento das pesquisas da equipe do LRC/UFMG foram estudados a fim de se obter um volume maior de informações sobre o comportamento de dados reais. São vários conjuntos de medições, efetuadas em dias e horários distintos nos barramentos de Tucuruí e Altamira, sob responsabilidade da Eletrobras Eletronorte, e no barramento de Taquaril, sob responsabilidade da CEMIG. A taxa de amostragem dos dados analisados é de 10 medições por segundo.

B. Modelagem para geração dos dados fasoriais de tensão e de corrente

A partir das informações levantadas na etapa anterior, foram desenvolvidas modelagens para representar de maneira consistente o comportamento das medições fasoriais estudadas. Seis modelos de algoritmo foram criados, ao longo do processo de evolução, até se chegar ao modelo final aqui descrito.

Os dados necessários para determinação da magnitude dos fasores de tensão e de corrente, representados por $M_{V,I}$, são: valor inicial ou médio para a primeira amostra ($M_{I(V,I)}$), variação média entre amostras consecutivas ($\Delta M_{V,I}$), desvio padrão em relação a essa variação média ($d_{\Delta M_{V,I}}$), número de amostras do conjunto de dados gerado (n) e fator que impacta diretamente na variação entre amostras consecutivas (f).

A magnitude de cada amostra (k) dos fasores de tensão e de corrente é calculada, inicialmente, da seguinte forma:

$$M_{V,I}(k) = M_{V,I}(k - 1) + \text{normrnd}(\Delta M_{V,I}, d_{\Delta M_{V,I}}, [n/f, 1]) \quad (3.6)$$

Em (3.6), a função *normrnd* do MATLAB® gera números aleatórios normalmente distribuídos, com média $\Delta M_{V,I}$ e desvio padrão $d_{\Delta M_{V,I}}$. A amostra inicial é calculada com base no dado de entrada $M_{I(V,I)}$, já que nesse instante não há informação de $M_{V,I}(k - 1)$.

Observa-se, na equação (3.6), que o desvio padrão é aplicado à variação média entre amostras consecutivas de tensão e de corrente, resultando em um comportamento mais suave dos dados fasoriais. Caso o desvio padrão fosse aplicado considerando o próprio valor de tensão e de corrente, os dados gerados apresentariam variações muito bruscas, não condizentes com as características das medições de SMFS.

Ainda assim, as variações entre amostras consecutivas do conjunto de dados obtido em (3.6) mostram-se bastante significativas, superando as variações típicas de medições reais. Para amenizar esse efeito, esse conjunto de dados passa por uma interpolação cúbica, como forma de estimar valores de uma função desconhecida entre aqueles fornecidos inicialmente em (3.6). Ao se realizar a interpolação, $f - 1$ novos valores são gerados entre dois dados consecutivos do conjunto inicial. A escolha da interpolação cúbica se deve ao fato de que um polinômio de terceira ordem é usado para modelar cada segmento entre dados consecutivos. Dessa forma, uma curva suave se ajusta entre os pontos, provocando a suavização do comportamento dos dados do GDF.

O estudo do comportamento do ângulo das medições reais de tensão e de corrente mostra uma característica que tende a ser cíclica, salvo pelas interferências decorrentes do ambiente de tempo real. Portanto, a modelagem do ângulo dos dados gerados pelo GDF difere-se bastante da modelagem da magnitude. Uma representação plausível para o ângulo das amostras de tensão e de corrente seria uma curva suave em torno de uma reta, que indica o aspecto crescente ou decrescente, quando se assume que, a cada ciclo completo, o ângulo é incrementado de 2π rad.

Os dados necessários para determinação do ângulo dos fasores de tensão e de corrente, representados por $\theta_{V,I}$, são: valor inicial para a primeira amostra ($\theta_{I(V,I)}$), inclinação da reta que caracteriza o comportamento do ângulo ($m_{\theta(V,I)}$), desvio em torno da reta para geração do aspecto de curva ($d_{\theta(r)}$), número de amostras do conjunto de dados gerado (n) e fator que impacta na suavidade da curva do ângulo (g).

A primeira etapa do cálculo do ângulo de cada amostra (k) dos fasores de tensão e de corrente consiste na determinação dos pontos da reta que caracteriza seu comportamento:

$$r_{\theta}(k) = (\theta_{I(V,I)}) + m_{\theta(V,I)}(k - 1) \quad (3.7)$$

Com a definição da reta, é possível traçar uma curva em seu entorno, com base em pontos de inflexão específicos, determinados pelo fator g e desvio $d_{\theta(r)}$. A cada intervalo n/g das amostras geradas em (3.7) é definido um ponto de desvio, cujo valor é indicado a partir de um grupo de variáveis aleatórias, delimitadas por $[-d_{\theta(r)}, d_{\theta(r)}]$. A partir desses pontos, é feita uma interpolação cúbica para determinação de todos os ângulos ($\theta_{I(V,I)}$) das amostras de tensão e de corrente do conjunto de dados gerado.

C. Inclusão das especificidades do ambiente de tempo real

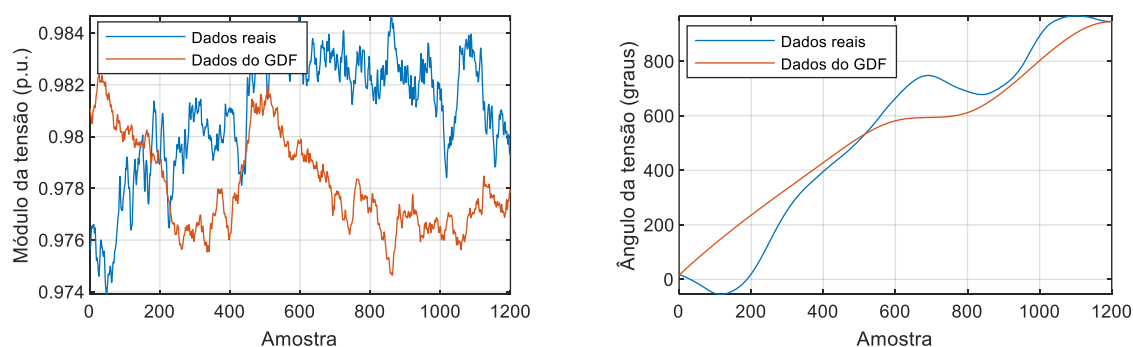
A última etapa do desenvolvimento do GDF foi a inclusão de situações possíveis de ocorrer no ambiente de medições e que não podem ser reproduzidas no ambiente de simulação. Os erros de medição apresentados na Seção 3.2 e as especificidades descritas na Seção 3.3 são abrangidos no GDF. Alguns deles estão embutidos no processo de modelagem dos dados, como os erros inerentes ao processo de medição e a relação entre as variações consecutivas de tensão e de corrente. Os demais podem ser inseridos separadamente ou em conjunto após a geração de dados definida no item anterior.

3.4.2 Aplicação do Gerador de Dados Fasoriais

Como forma de validação do algoritmo do GDF e, para comprovar sua eficiência, os dados originados por ele são comparados com dados reais de medição, coletados no barramento de Taquaril, de 345 kV. Os parâmetros de entrada do algoritmo do GDF são determinados com base nas informações levantadas a partir das medições reais.

A Figura 3.3 mostra os dados provenientes do GDF juntamente com os dados reais de medição. Conforme pode ser observado, o comportamento dos dados do GDF é condizente com o comportamento dos dados reais. Tanto as variações das magnitudes quanto o aspecto crescente do ângulo são bem representados. Visto que o objetivo do desenvolvimento do GDF é fornecer dados que apresentem características semelhantes às de dados reais de medição fasorial, pode-se afirmar que o algoritmo apresenta consistência e bom desempenho.

Vale ressaltar que os parâmetros f e g são muito importantes na determinação das variações da magnitude e da suavidade da curva representativa do ângulo, respectivamente. Nos resultados apresentados na Figura 3.3, os valores assumidos foram $f = 2$ e $g = 6$. Quanto menor o valor de f , mais bruscas são as variações da magnitude entre duas amostras consecutivas. Em relação ao parâmetro g , quanto maior seu valor, menor a suavidade da curva representativa do ângulo dos fasores. A escolha dos valores de f e g está condicionada às características dos dados que se deseja gerar.



(a)

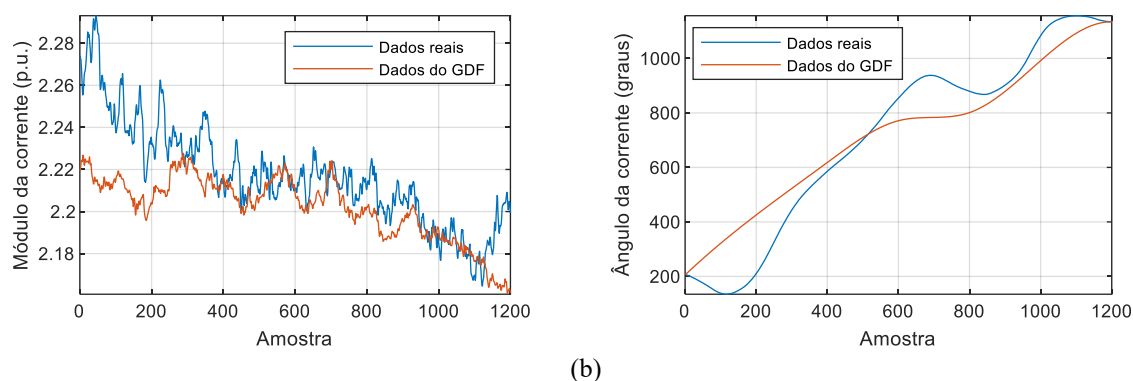


Figura 3.3 – Magnitudes e ângulos (a) da tensão e (b) da corrente medidos no barramento de Taquaril e obtidos do GDF

Comprovado o bom desempenho do GDF, ele é, então, aplicado na geração de dados fasoriais, incluindo situações específicas, sujeitas a ocorrer no ambiente de tempo real. Com o intuito de se avaliar o impacto dessas ocorrências na resposta de equivalentes de rede, propostos para aplicação em tempo real, foi escolhido o método proposto em (VU, 1999) para análises e considerações. Tal escolha se justifica pelo fato desse método constituir a base inicial do equivalente desenvolvido neste trabalho. Nas simulações foi considerada uma janela de dados com 50 amostras, com o intuito de aumentar a capacidade de filtragem do erro do tipo ruído.

A primeira ocorrência simulada consiste em provocar variações muito pequenas para a corrente de carga. A cada intervalo de 800 amostras do conjunto de dados de corrente gerado, 50 delas tiveram suas magnitudes modificadas, considerando variações dez vezes menores do restante das amostras. No ambiente de simulação de fluxo de potência, não é possível gerar esse cenário, tendo em vista que se trata de um ambiente controlado, em que o passo de aumento de carga possui um valor fixo.

A Figura 3.4 mostra a magnitude da corrente dos dados obtidos do GDF e a resposta da impedância de Thévenin $|\bar{Z}_{TH}|$ calculada pelo método de (VU, 1999). É possível verificar, na Figura 3.4 (a), a redução das variações da magnitude da corrente nos intervalos em que as amostras foram modificadas. O impacto dessa redução no comportamento de $|\bar{Z}_{TH}|$ pode ser visto na Figura 3.4 (b), em que $|\bar{Z}_{TH}|$ apresenta valores muito elevados nos intervalos correspondentes, se igualando ou superando o valor da impedância da carga, $|\bar{Z}_C|$. Dessa maneira, haveria indicações da condição de instabilidade de tensão, de maneira equivocada.

O aumento expressivo de $|\bar{Z}_{TH}|$ era esperado, conforme visto na análise da equação (3.3). Apesar de se adotar uma janela de dados de tamanho maior, o efeito obtido é o mesmo

caso fossem consideradas apenas duas amostras. Isso ocorre porque a redução da variação de corrente foi aplicada a um intervalo de amostras que corresponde à dimensão da janela de dados.

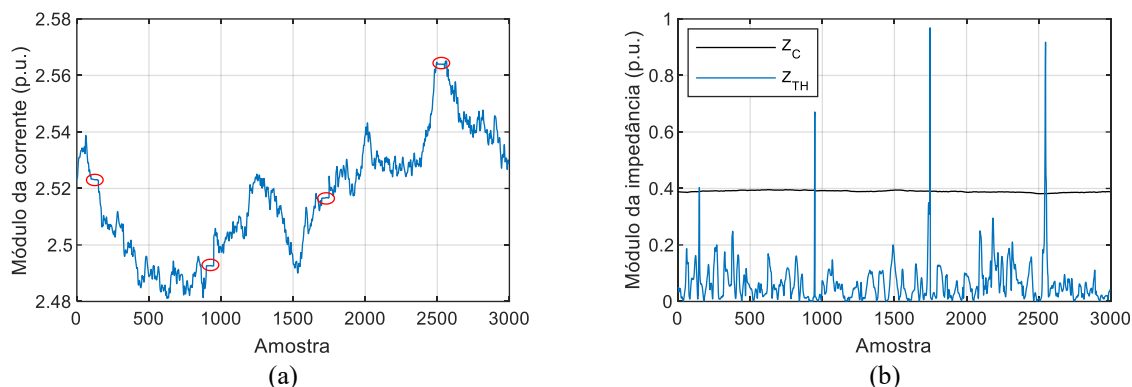
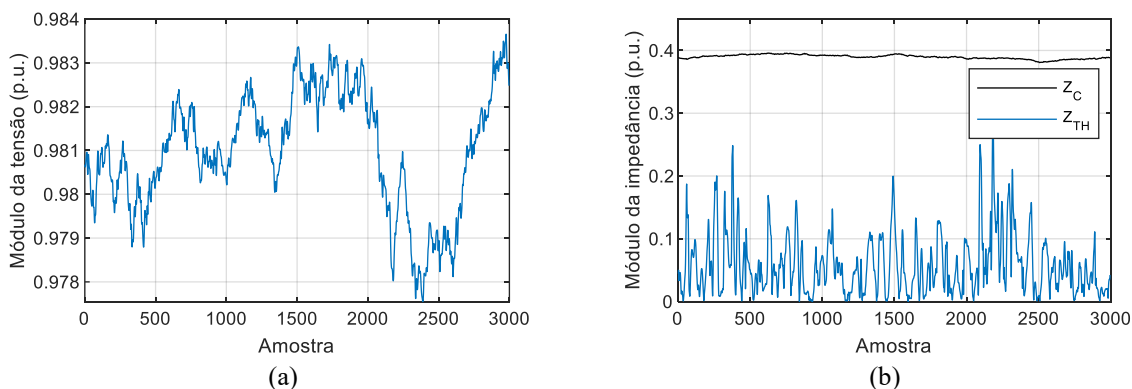


Figura 3.4 – (a) Corrente de carga obtida do GDF e (b) impedância de Thévenin estimada pelo método de (VU, 1999)

Outra especificidade avaliada refere-se à taxa de amostragem dos dados fasoriais, que impacta de maneira significativa a resposta do equivalente de Thévenin. Para verificar essa questão, o equivalente de (VU, 1999) foi calculado considerando-se dois conjuntos de dados fasoriais obtidos do GDF, sendo que em um deles, a taxa de amostragem é reduzida pela metade. Para provocar essa redução, foram selecionadas amostras alternadas, duas a duas, do conjunto com maior taxa de amostragem.

As Figura 3.5 (a) e (c) ilustram a magnitude da tensão para os dois conjuntos de dados analisados. É possível visualizar a redução da taxa de amostragem, visto que no segundo conjunto de dados, mostrado na Figura 3.5 (c), o número de amostras é reduzido de 3000 para 1500. O impacto dessa alteração na resposta do equivalente é mostrado, nas Figura 3.5 (b) e (d), através de $|\bar{Z}_{TH}|$. Pode-se observar que o conjunto de dados com maior taxa de amostragem provoca uma maior variação da resposta do equivalente de Thévenin.



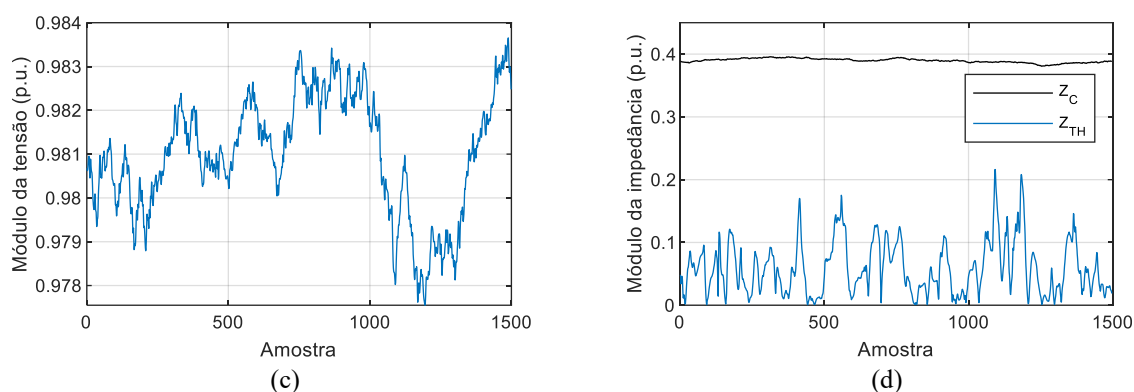
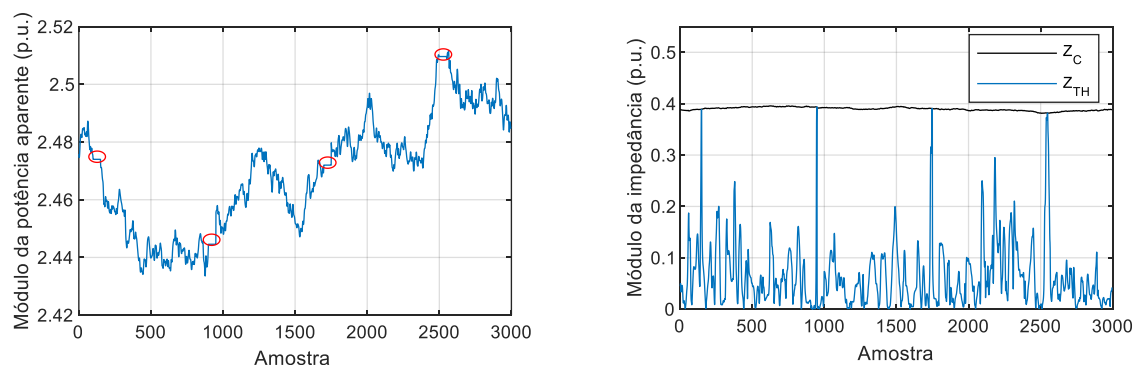


Figura 3.5 – Tensão obtida do GDF e impedância de Thévenin estimada pelo método de (VU, 1999), considerando: (a) e (b) maior, (c) e (d) menor taxa de amostragem

A última ocorrência avaliada refere-se à circunstância em que a potência da carga permanece constante, apesar de haver variações em medições consecutivas de tensão e de corrente. Para caracterizar essa situação, a cada intervalo de 800 amostras do conjunto de dados de corrente gerado, 50 delas tiveram suas magnitudes modificadas, de forma que resultasse em uma potência aparente calculada constante.

A Figura 3.6 mostra o módulo da potência aparente calculada a partir dos dados obtidos do GDF e a resposta de $|\bar{Z}_{TH}|$ calculada pelo método de (VU, 1999). A análise do comportamento do módulo da potência aparente, na Figura 3.6 (a), permite identificar os intervalos em que a potência se mantém inalterada. O reflexo do desempenho de $|\bar{Z}_{TH}|$ em função dessa ocorrência corresponde ao seu encontro com a impedância da carga $|\bar{Z}_C|$, indicando uma condição equivocada de instabilidade de tensão, como mostrado na Figura 3.6 (a). Essa constatação é esperada, conforme comprovado na equação (3.5). Entretanto, nem sempre é notada por abordagens apresentadas na literatura, nas quais a igualdade de impedâncias ocorrida na condição de igualdade de potências é utilizada para identificar o ponto de máximo carregamento, resultando falsa indicação de instabilidade.



(a)

(b)

Figura 3.6 – (a) Potência aparente calculada a partir dos dados do GDF e (b) impedância de Thévenin estimada pelo método de (VU, 1999)

Os resultados apresentados anteriormente reforçam a importância do desenvolvimento do GDF. Diversas características do ambiente de medições, que não são reproduzidas no ambiente de simulação de fluxo de potência, foram inseridas na elaboração do algoritmo. A disponibilidade dos dados fasoriais gerados permite que equivalentes de redes sejam avaliados, considerando dados de simulação que representam de forma consistente as características de medições fasoriais reais.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto neste capítulo, verifica-se que a avaliação do comportamento de sistemas elétricos em tempo real não é uma tarefa trivial. Percebe-se a complexidade desse ambiente, devido ao comportamento dinâmico das grandezas elétricas e à presença de erros provenientes do processo de medição.

Os diversos desafios levantados na contextualização dos ambientes de estudo e de tempo real são os principais elementos que dificultam a aplicação direta dos equivalentes de redes na monitoração da estabilidade de tensão.

Apesar das plataformas computacionais do ambiente de estudo, dito controlável (via fluxo de potência), buscarem cada vez mais incorporar aspectos do ambiente de tempo real (simulação de erros ruído, por exemplo), os impactos da dinâmica própria do sistema elétrico nos resultados dos equacionamentos propostos não podem ser ignorados.

Diante dessa constatação e da dificuldade de acesso a dados reais de medição, foi desenvolvido o Gerador de Dados Fasoriais, que consiste em uma ferramenta para geração de fasores de tensão e de corrente que incorpore, em sua modelagem, os aspectos dinâmicos do ambiente de tempo real.

Conforme já enfatizado neste trabalho, metodologias desenvolvidas para aplicação na operação em tempo real frequentemente são testadas em ambiente de estudo. Diante das especificidades discutidas neste capítulo, percebe-se que, apesar dos equivalentes obterem solução matemática para os parâmetros da rede, nem sempre essa solução mostra-se consistente com o comportamento do sistema elétrico. Isto reforça a importância do conhecimento das

diferenças entre as ferramentas de análise, tanto na construção das propostas, quanto na sua validação. A disponibilidade de dados fasoriais obtidos do GDF possibilita que equivalentes de redes sejam avaliados, considerando dados simulados que emulam medições reais, na ausência destas.

No capítulo seguinte, é apresentada a metodologia proposta neste trabalho para obtenção do equivalente de redes, visando à sua aplicação em tempo real. As especificidades do ambiente de tempo real foram observadas, de maneira técnica e criteriosa, ao longo do desenvolvimento da metodologia.

CAPÍTULO 4

PROPOSTA DE EQUIVALENTE DE REDES ELÉTRICAS BASEADO EM MEDIÇÕES FASORIAIS SINCRONIZADAS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo detalha o desenvolvimento do equivalente de redes elétricas proposto neste trabalho para aplicação em tempo real. A forma final da metodologia de cálculo é fruto de um processo de evolução, relacionado ao atendimento às diversas características relacionadas ao ambiente de tempo real, que emergiram ao longo da pesquisa. Em um primeiro momento, a consistência da metodologia inicial foi avaliada considerando conjuntos de dados reais de medição fasorial, apresentando bom desempenho. Com a evolução da pesquisa, novos estudos mostraram a necessidade de se reavaliar tal metodologia, diante das especificidades do ambiente de tempo real que se evidenciaram posteriormente ao seu equacionamento original, além de sua aplicação e aferição considerando outros sistemas e novos dados de medição.

Após o detalhamento da metodologia, este capítulo registra a etapa de validação da proposta. A validação é feita a partir da comparação de seus resultados com aqueles obtidos pelo Equivalente Analítico de Redes Elétricas, denominado EARE, proposto em (SILVA, 2018) e (SILVA, 2022). O EARE trouxe nova perspectiva para as pesquisas relacionadas à construção de equivalentes de redes elétricas em tempo real, fato que motivou a sua escolha para a etapa de validação. Esse equivalente é obtido a partir da interpretação do Teorema de Thévenin aplicado ao diagrama de admitâncias equivalente do fluxo de potência. Da forma como foi desenvolvido, o EARE permite fazer o elo entre o equivalente de Thévenin, construído a partir do sistema elétrico de potência completo, e os equivalentes baseados em medições, constituindo-se, assim, em uma referência analítica para a avaliação dos equivalentes de tempo real. A possibilidade de se conhecerem valores de referência permite, inclusive, o aprimoramento dos equivalentes.

4.2 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DO EQUIVALENTE

O fluxograma ilustrado na Figura 4.1 indica os passos da metodologia proposta para obtenção do equivalente de Thévenin em tempo real. Cada uma das etapas é descrita de forma detalhada a seguir.

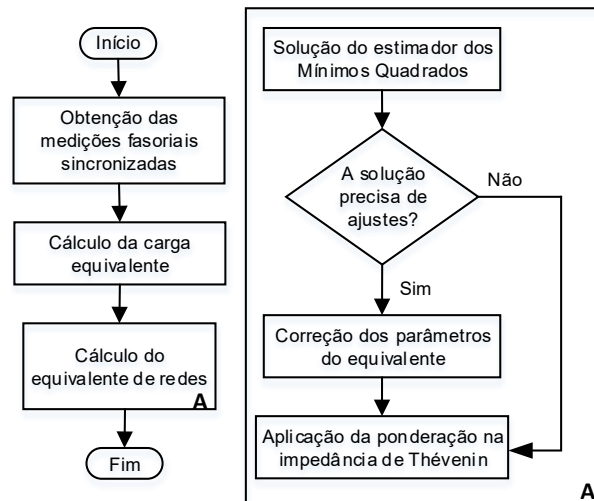


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta

4.2.1 Aquisição de Fasores

A primeira etapa da metodologia corresponde à obtenção de fasores sincronizados de tensão e de corrente, para uma barra de interesse do sistema elétrico. Para cada instante de tempo, têm-se amostragens que correspondem ao fasor de tensão do barramento e aos fasores de corrente referentes a cada ramo nele incidentes. Esses dados passam por uma verificação inicial de consistência em relação às medições de corrente, proposta em (CEMIG, 2010). O método para identificar as medições suspeitas utiliza a Lei de Kirchhoff das Correntes.

As correntes que entram e saem do barramento são aquelas que circulam por linhas de transmissão, transformadores, elementos de derivação e cargas diretamente conectadas. Inicialmente, calcula-se o somatório das partes positiva e negativa das componentes real e imaginária dos fasores de corrente, de um mesmo instante de tempo como em (4.1).

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{PR} = \sum_{n \in PR} \text{Re}\{I_{kn}\} \\ I_{NR} = \sum_{n \in NR} \text{Re}\{I_{kn}\} \\ I_{PI} = \sum_{n \in PI} \text{Im}\{I_{kn}\} \\ I_{NI} = \sum_{n \in NI} \text{Im}\{I_{kn}\} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Em (4.1), PR é o conjunto da parte real positiva, NR é o conjunto da parte real negativa, PI é o conjunto da parte imaginária positiva e NI é o conjunto da parte imaginária negativa, sendo todos referentes às correntes do barramento.

As relações entre as correntes real e imaginária totais expressas em (4.2) definem os componentes de erro mostrados em (4.3).

$$\left\{ \begin{array}{l} R_R = \frac{I_{PR}}{I_{NR}} \\ R_I = \frac{I_{PI}}{I_{NI}} \end{array} \right. \quad (4.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_R = \frac{1}{R_R} \text{ se } R_R > 1, \text{ ou } E_R = R_R \text{ se } R_R < 1 \\ E_I = \frac{1}{R_I} \text{ se } R_I > 1, \text{ ou } E_I = R_I \text{ se } R_I < 1 \end{array} \right. \quad (4.3)$$

Definindo o limiar pré-especificado σ_{lim} , tem-se uma base de comparação com o coeficiente de medida suspeita (σ), apresentado em (4.4). Se $\sigma > \sigma_{lim}$, uma mensagem de aviso informa que as amostras de corrente não são confiáveis naquele momento. Após várias simulações com medições obtidas de sistemas reais de potência, observou-se que σ_{lim} encontra-se dentro do intervalo de 10 a 20%.

$$\sigma = 100[2 - (E_R + E_I)] \quad (4.4)$$

4.2.2 Determinação da Carga-equivalente

Após a aquisição e verificação inicial dos fasores, os dados são utilizados para definir uma carga-equivalente. Embora esta seja uma etapa de suma importância para a obtenção de equivalentes de redes em tempo real, muitos trabalhos da literatura não apresentam uma técnica para determinação da carga. A carga-equivalente considerada neste trabalho, proposta em (RIBEIRO, 2011), apresenta duas metodologias de carga, denominadas Metodologias de Carga 1 e 2, baseadas no sentido dos fluxos de potência dos ramos incidentes na barra.

A Metodologia de Carga 1 (MC1) assume a carga como sendo consumidora de potência ativa. Considerando que a potência ativa flui dos geradores em direção à carga, essa metodologia caracteriza a carga com base nas potências ativas positivas que saem do barramento. Portanto, a carga corresponde ao somatório das potências aparentes nas quais a parte real deixa a barra, independente da parte imaginária possuir característica indutiva ou capacitiva. A Metodologia de Carga 2 (MC2) é proposta com base no fato de que a grande maioria das cargas existentes no sistema elétrico brasileiro tem característica indutiva, ou seja, consomem uma potência elétrica com parcelas ativa e reativa positivas. Dessa forma, a carga-equivalente é representada como o somatório de potências ativa ou reativa que saem da barra, que assumem sinal positivo.

As expressões (4.5) e (4.6) mostram a carga-equivalente calculada por MC1 e MC2, respectivamente:

$$\bar{S}_{eq}^{MC1} = \sum_{n \in \Omega_1} (P_{kn} + jQ_{kn}) \quad (4.5)$$

$$\bar{S}_{eq}^{MC2} = \sum_{n \in \Omega_2} P_{kn} + j \sum_{n \in \Omega_{k2}} Q_{kn} \quad (4.6)$$

Em (4.5), Ω_1 corresponde ao conjunto de ramos em que a potência ativa flui do barramento e a potência reativa depende da direção da potência ativa. Em (4.6), Ω_2 corresponde ao conjunto de ramos em que a potência ativa ou reativa flui do barramento, independentemente da direção de potência ativa.

A partir das potências calculadas em (4.5) e (4.6), as correntes de carga-equivalente podem ser calculadas.

Neste trabalho optou-se por apresentar os resultados do equivalente considerando a carga-equivalente definida pela MC1, visto que, para os casos estudados, a aplicação de MC2 apresenta resultados semelhantes. Nas simulações de fluxo de potência, as respostas dos equivalentes calculados por meio de MC1 e MC2 mostram-se iguais para a maioria das barras de carga dos sistemas de teste. Quando são observadas diferenças, estas são da ordem de grandeza de 10^{-4} e 10^{-2} para os módulos e ângulos dos parâmetros do equivalente, respectivamente. Nas avaliações considerando dados reais de medição, são da ordem de 10^{-3} e 10^{-2} . O impacto dessas diferenças na avaliação da estabilidade de tensão de sistemas elétricos é bem reduzido.

Conforme já citado, essa etapa de cálculo de carga-equivalente da metodologia é de suma importância, tendo em vista sua aplicação em tempo real. Geralmente, em redes elétricas, grande parte das PMU está instalada em barras com vários ramos incidentes. No Capítulo 6, essa questão é novamente abordada, em detalhes, na proposição de equivalentes individuais para cada um dos ramos que compõem a barra avaliada, em complemento ao equivalente global dessa barra.

4.2.3 Cálculo do Equivalente de Thévenin

A etapa de determinação dos parâmetros do equivalente de Thévenin é de suma importância na metodologia apresentada na Figura 4.1. Nessa etapa são executados os procedimentos para cálculo dos parâmetros, de modo que estes representem de forma consistente o comportamento do sistema elétrico.

A filosofia básica da metodologia do equivalente é implementada por meio de três passos bem definidos.

O primeiro corresponde à determinação dos parâmetros do equivalente, \dot{E}_{TH} e \bar{Z}_{TH} , a partir de um conjunto de medições fasoriais, conjunto este denominado Janela de Medições ou Janela de Dados. A escolha da dimensão dessa janela é de suma importância para a resposta do equivalente, por impactar na capacidade de filtragem do erro do tipo ruído e pelo fato dos parâmetros serem considerados inalterados nesse período. A determinação dessa dimensão depende, basicamente, da taxa de amostragem dos dados de medição fasorial, visto que tal taxa estabelece o intervalo de tempo definido pela janela de dados.

Uma vez calculadas as grandezas do equivalente, caso seja necessária, é realizada uma correção de valores, definindo o segundo passo.

Ajustado o equivalente, é executado o terceiro passo, aquele que mais diferencia a metodologia tratada nesta pesquisa das demais abordagens. Com base em um número determinado de equivalentes calculados consecutivamente, considerando para isso uma janela móvel de dados, são propostas diferentes técnicas de amortecimento. Tais técnicas vêm no sentido de vencer os desafios de tempo real, principalmente o tratamento eficaz dos erros associados às medições, para que o equivalente resultante represente, da maneira mais fiel possível, o comportamento do sistema elétrico. Esse passo se baseia em aplicações de ponderações nas impedâncias de Thévenin.

Cada um desses passos possui objetivo e formulação bem definidos, conforme detalhamento a seguir apresentado.

A. Passo 1 - Solução do equivalente dos Mínimos Quadrados

A solução do equivalente nesse passo corresponde à solução de um sistema linear, como uma extensão do equivalente proposto em (VU, 1999), e à aplicação do Estimador dos Mínimos Quadrados.

Um fator muito importante na aplicação da técnica de estimação é o número de medições a serem consideradas para a solução do equivalente, as quais compõem a janela de dados. Cada conjunto de medições que formam a janela de dados gera um equivalente. A Figura 4.2 ilustra a obtenção dos parâmetros, denominados \hat{E}_{THEM} e \bar{Z}_{THEM} , utilizando uma janela de dados de dimensão igual a j .

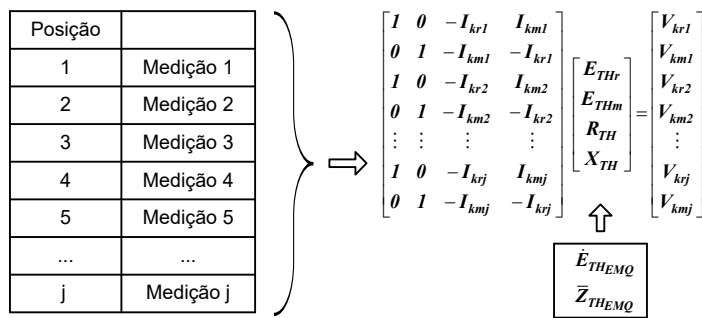


Figura 4.2 – Diagrama esquemático da obtenção dos parâmetros do Estimador dos Mínimos Quadrados

À medida que as mais recentes medições fasoriais vão sendo adicionadas aos dados, novos EMQ vão sendo calculados dinamicamente, a partir da atualização da janela, que passa a ser considerada como uma Janela Móvel de Dados.

A dimensão dessa janela influencia diretamente o tempo de convergência e a variação da resposta do equivalente, além de atuar na filtragem do erro do tipo ruído nas medições.

Ao se considerar uma dimensão menor para a janela de medições, a resposta do equivalente tende a convergir mais rapidamente para um valor menos variável. Entretanto, a resposta apresenta variações muito acentuadas, pouco amortecidas, até convergir para esse valor, não se mostrando eficaz no tratamento do ruído. À medida que se aumenta a dimensão da janela de dados, percebe-se um maior amortecimento nos valores das grandezas calculadas. A importância do amortecimento da resposta dos equivalentes visa a garantir um acompanhamento mais fiel à dinâmica lenta do sistema elétrico em operação normal, no que se refere às variações dos parâmetros que o representam, absorvendo impactos das particularidades do ambiente de tempo real, detalhadas no capítulo anterior. A observação da correlação entre a dimensão da janela de dados, o processo de convergência e o amortecimento das grandezas calculadas pelo equivalente trouxe vários avanços para o desenvolvimento da pesquisa.

Diante desse comportamento, a metodologia inclui uma importante etapa denominada Processo de Aceleração. Tal processo consiste em considerar, na fase inicial do procedimento de cálculo do equivalente, uma janela de dados de dimensão menor e posterior aumento do seu tamanho. Dessa maneira, a resposta do equivalente converge rapidamente para um valor menos variável e, a partir daí, sofre amortecimento e potencializa o tratamento do ruído, devido ao aumento do conjunto de dados utilizados na determinação do equivalente.

Portanto, atentando sempre que as grandezas do estimador ficam constantes a cada cálculo do EMQ, a decisão sobre o número de medições que compõem a janela de dados deve ser feita de forma criteriosa, considerando a taxa de amostragem do sistema de medição e os tempos viáveis para a convergência da resposta do mesmo, principalmente quando se exigem rapidez e agilidade na operação em tempo real do sistema elétrico de potência.

B. Passo 2 - Correção dos parâmetros do equivalente

Conforme já citado neste trabalho, nos sistemas elétricos de potência a tensão é uma grandeza controlada que deve permanecer dentro de uma faixa de valores definida pelos órgãos

responsáveis. Os parâmetros calculados pelo EMQ podem apresentar características que não condizem com as condições do sistema elétrico, em termos dos limites mínimo e máximo de operação do perfil de tensão. Diante disso, é feita uma correção dos parâmetros quando estes apresentarem valores incoerentes.

Em condições normais de operação, a magnitude de tensão deve estar entre os limites mínimo e máximo. Neste trabalho, tais valores são considerados 0,9 e 1,1 p.u. para qualquer nível de tensão. Assim é verificado se o módulo da tensão de Thévenin calculada encontra-se dentro dessa faixa operativa. Caso tal condição não seja satisfeita, esse parâmetro é sujeito a uma correção, dependendo da característica da carga.

Na situação em que o sistema e a carga são predominantemente indutivos, não é esperado que a tensão de geração seja menor que a tensão na barra de carga, \dot{V}_C . Assim, o módulo da tensão de Thévenin deve obedecer à seguinte inequação:

$$|\dot{V}_C| < |\dot{E}_{TH}| < 1,1|\dot{V}_{nom}| \quad (4.7)$$

Para situações de carga e/ou sistema capacitivo, a tensão na carga pode apresentar valor superior à tensão de geração. Nessa situação, a inequação que define os limites da tensão de Thévenin torna-se:

$$0,90|\dot{V}_{nom}| < |\dot{E}_{TH}| < 1,1|\dot{V}_{nom}| \quad (4.8)$$

Essa correção define que, nos instantes de operação, onde as condições definidas nas inequações (4.7) ou (4.8) forem violadas, considera-se o valor calculado de \dot{E}_{TH} na iteração anterior como sendo o atual.

C. Passo 3 – Determinação do equivalente final

O comportamento dos sistemas elétricos, quando em operação normal, não apresenta grandes variações em um curto intervalo de tempo. Os parâmetros obtidos da solução direta do EMQ não representam de forma consistente essa dinâmica lenta, já que são caracterizados por apresentarem um comportamento com grandes variações entre os valores consecutivos de $\bar{Z}_{TH_{EMQ}}$ calculados.

Para vencer esse desafio, as investigações realizadas na pesquisa levaram a uma nova perspectiva de aplicação do método proposto por (VU, 1999). Visando a representar a operação real de sistemas de potência, são introduzidas técnicas de ponderação aplicadas à impedância de Thévenin obtida do EMQ.

Para amortecer a resposta do equivalente, introduziram-se duas estratégias que, em termos gerais, consistem em uma ampliação do método proposto por (VU, 1999).

A primeira, já tratada em itens anteriores, diz respeito ao sobredimensionamento da matriz A do sistema da equação (2.12), considerando mais de duas medições consecutivas em sua composição, formando a janela de dados.

A segunda consiste em se calcular um Equivalente Final a partir de um conjunto de resultados dos EMQ.

A ideia inicialmente implementada foi determinar uma média para o parâmetro $\bar{Z}_{TH_{EMQ}}$ a cada nova medição incluída na janela de dados, ou seja, a cada nova solução do equivalente dos mínimos quadrados. Nesse caso, o resultado final não corresponde à solução direta do EMQ, mas a uma média simples de um conjunto de parâmetros obtido no instante atual e em instantes de tempo anteriores. O número de parâmetros considerados na média coincide com o número de medições utilizadas na solução do EMQ, ou seja, refere-se ao tamanho da janela de dados, j .

A equação para determinação da impedância de Thévenin, \bar{Z}_{TH} , considerando essa ideia inicial, é dada por:

$$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{\sum_{n=0}^{j-1} \bar{Z}_{TH_{EMQ}}(t-n)}{j} \quad (4.9)$$

Em (4.9), t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela e $\bar{Z}_{TH_{EMQ}}$ à impedância calculada pelo EMQ.

Apenas para ilustrar essa ideia de composição do equivalente final, na Figura 4.3 (a) é indicada a criação de um EMQ, para cada conjunto de medições da janela de dados, e na Figura 4.3 (b), a determinação do Equivalente Final, a partir de um conjunto de EMQ.

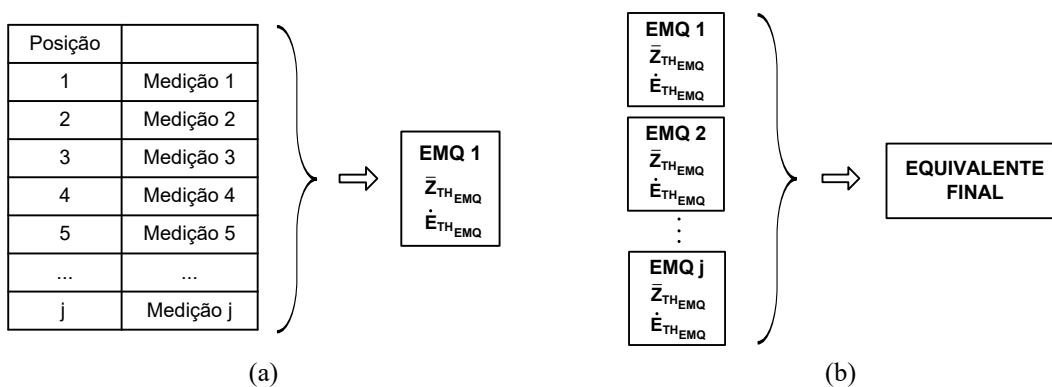


Figura 4.3 – Diagrama esquemático da solução (a) do Estimador dos Mínimos Quadrados e (b) do Equivalente Final

Os resultados da aplicação dessa técnica simples mostram a impedância de Thévenin ainda com uma variação muito acentuada. Para exemplificar, considere o cenário real de aplicação, onde foram utilizadas medições fasoriais coletadas no barramento de Taquaril, de 345 kV, sob responsabilidade da CEMIG. Um diagrama esquemático desse barramento é ilustrado na Figura 4.4. Observa-se que há nove ramos que incidem no barramento, sendo quatro referentes a linhas de transmissão e cinco correspondentes a transformadores de potência.

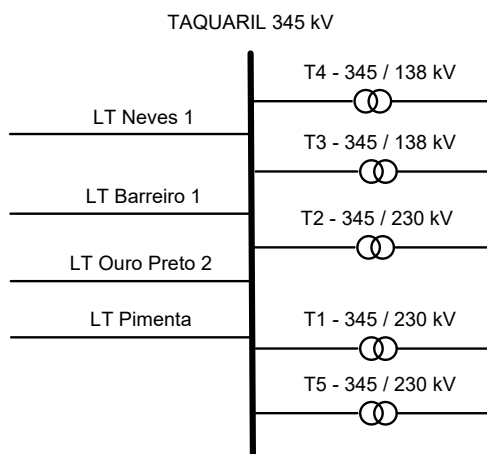


Figura 4.4 – Barramento de Taquaril, 345 kV

Os dados de medição fasorial sincronizada do barramento de interesse foram fornecidos pela concessionária responsável pela rede e possuem uma taxa de amostragem de 10 medições por segundo. O período de medições analisado foi de 10 minutos, totalizando 6000 amostras. A janela de dados utilizada foi de 120 medições, que corresponde a 12 segundos, tendo em vista a taxa de amostragem dos dados. Dessa forma, é plausível considerar que nesse período os parâmetros de Thévenin permanecem constantes.

Para fins de comparação, a Figura 4.5 mostra o resultado da aplicação da média simples juntamente com a solução obtida dos resultados consecutivos dos EMQ individuais, que correspondem ao método de (VU, 1999). Em ambos os casos, já foi considerado o sobredimensionamento da matriz A , ou seja, um número maior de medições consecutivas para obtenção do equivalente.

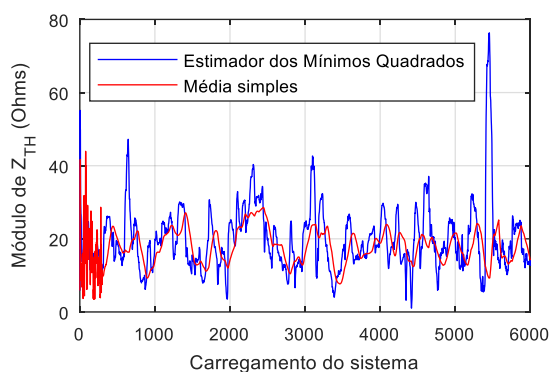


Figura 4.5 – Impedância de Thévenin, referente ao barramento de Taquaril, obtida pelo método de (VU, 1999) e pela média simples do conjunto de equivalentes

Pela análise da Figura 4.5, observa-se o efeito da janela de aceleração, com 300 amostras, nos instantes iniciais. Verifica-se também uma melhora em relação ao método de (VU, 1999), em termos de amortecimento, mas ainda insuficiente para representar o comportamento de um sistema elétrico real.

Esses resultados motivaram a investigação de novas abordagens baseadas em diferentes fatores de ponderação, cuja ideia é privilegiar as impedâncias de Thévenin calculadas nos instantes mais recentes. Nesse sentido, este trabalho apresenta a evolução de três propostas de técnicas de amortecimento, em que as medições fasoriais referentes aos estados mais atuais apresentam maior importância no cálculo dos parâmetros de Thévenin.

A. Equacionamento da técnica de amortecimento TA1

Na primeira técnica de amortecimento, denominada TA1, a ponderação é feita de modo que os parâmetros correspondentes aos instantes mais recentes tenham maior peso em relação aos passados, seguindo uma direção linear. Nesse caso, a impedância de Thévenin é calculada da seguinte maneira:

$$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{p(t)\bar{Z}_{TH_{EMQ}}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} p(t-n)\bar{Z}_{TH}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)} \quad (4.10)$$

Em (4.10), t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela, $\bar{Z}_{TH_{EMQ}}$ à impedância calculada pelo EMQ no instante de tempo atual e p ao fator de ponderação.

A ponderação utilizada é do tipo linear, conforme equação (4.11). Considera-se um fator de ponderação (f_1) que determina a inclinação da reta de ponderação.

$$p_{lin}(t-n) = 1 - \frac{1}{f_1 \cdot j} n \quad (4.11)$$

Note que o maior peso de p_{lin} é atribuído à janela atual, quando $n = 0$. É importante que o valor de f_1 seja sempre maior ou igual a 1 para garantir que a ponderação dos valores calculados para \bar{Z}_{TH} nos instantes passados seja sempre positiva.

B. Equacionamento da técnica de amortecimento TA2

Na ponderação linear da TA1, a taxa de crescimento do fator de ponderação é constante. Com o intuito de valorizar ainda mais as medições recentes, pode-se utilizar uma ponderação exponencial, em que as impedâncias são ponderadas por um fator com uma taxa de crescimento mais significativa em relação às medições referentes a instantes passados. Dessa ideia, surge a técnica de amortecimento TA2, cuja base de cálculo é a mesma apresentada na equação (4.10). Porém, agora, a ponderação possui característica exponencial, conforme indicado em (4.12). Nesse caso, tem-se um fator de ponderação (f_2) que caracteriza o parâmetro referente ao instante de tempo atual.

$$p_{exp}(t-n) = e^{(f_2 - n \frac{f_2}{j})} - 1 \quad (4.12)$$

C. Equacionamento da técnica de amortecimento TA3

A técnica de amortecimento TA3 tem como objetivo reforçar a contribuição das últimas medições, que correspondem às medições que compõem a janela de dados que gera o valor de $\bar{Z}_{TH_{EMQ}}$ do instante de tempo atual. Assim, um fator de ponderação é aplicado ao parâmetro

referente a essa impedância, que determina o quão mais importantes são as últimas medições em relação às demais.

Basicamente, a TA3 consiste em se calcular a média dos parâmetros obtidos nos instantes de tempo anteriores e adicionar a esse valor a parcela referente à solução do EMQ para a iteração atual. Tal parcela é calculada pela diferença entre a solução do estimador e a média de parâmetros já calculados, dividida por um fator de ponderação. Quanto menor esse fator, maior a influência das medições referentes ao instante de tempo atual.

A equação para determinação da impedância de Thévenin é dada por:

$$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{TH}(t-n)}{j-1} + \frac{\bar{Z}_{THEM}(t) - \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{TH}(t-n)}{j-1}}{f_3} \quad (4.13)$$

Em (4.13), t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela, \bar{Z}_{THEM} à impedância calculada pelo EMQ e f_3 ao fator de ponderação.

A Tabela 4.1 sintetiza as formulações detalhadas anteriormente.

Tabela 4.1 – Técnicas de amortecimento investigadas

Técnicas de Amortecimento Investigadas	Equacionamento	Ponderações
Média simples	$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{\sum_{n=0}^{j-1} \bar{Z}_{THEM}(t-n)}{j}$	Sem ponderação
TA1	$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{p(t)\bar{Z}_{THEM}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} p(t-n)\bar{Z}_{TH}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)}$	$p_{lin}(t-n) = 1 - \frac{1}{f_1 \cdot j} n$
TA2		$p_{exp}(t-n) = e^{(f_2 - n \frac{f_2}{j})} - 1$
TA3	$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{TH}(t-n)}{j-1} + \frac{\bar{Z}_{THEM}(t) - \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{TH}(t-n)}{j-1}}{f_3}$	Ponderação via f_3

Ao longo do processo de evolução do desenvolvimento do equivalente de redes, foram detectados dois pontos importantes que podem impactar diretamente no cálculo dos parâmetros

do equivalente de Thévenin. O primeiro refere-se ao ângulo das medições fasoriais de tensão e de corrente, dados de entrada do algoritmo da metodologia. O segundo refere-se aos fatores de ponderação de TA1, TA2 e TA3, que, inicialmente, são livres para escolha de seus valores. Os estudos e as conclusões sobre essas questões são apresentados a seguir.

4.3 TENSÃO COMO GRANDEZA DE REFERÊNCIA ANGULAR

Os primeiros dados reais de medição fasorial obtidos para aplicação da metodologia deste trabalho foram coletados no barramento de Taquaril, já apresentado na seção anterior. No SMFS, cada amostra de uma medição fasorial é caracterizada por apresentar magnitude e ângulo em relação a uma referência angular. Entretanto, as medições fasoriais de tensão, disponibilizadas pela concessionária, não continham informação de ângulo, somente de magnitude. Diante desse impasse, optou-se, naquele momento, por tomar a tensão como a grandeza de referência angular, assumindo seu ângulo como nulo, para todos os instantes de tempo.

É importante avaliar o impacto dessa ação na resposta do equivalente de Thévenin. Essa avaliação é feita por meio da análise matemática da solução do sistema que caracteriza o Estimador dos Mínimos Quadrados e de aplicações práticas considerando cenários de simulação. A utilização da ferramenta SimC, que simula cenários operativos de sistemas elétricos, gerando conjuntos de medições fasoriais de tensão e de corrente com a presença de erro do tipo ruído, viabilizou essa investigação.

O sistema linear a ser resolvido para obtenção do equivalente de Thévenin, proposto por (VU, 1999), é reescrito aqui para facilitar o entendimento da análise matemática.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{kr1} & I_{km1} \\ 0 & 1 & -I_{km1} & -I_{kr1} \\ 1 & 0 & -I_{kr2} & I_{km2} \\ 0 & 1 & -I_{km2} & -I_{kr2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{THr} \\ E_{THm} \\ R_{TH} \\ X_{TH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{kr1} \\ V_{km1} \\ V_{kr2} \\ V_{km2} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Dois cenários diferentes são considerados: o primeiro em que magnitude e ângulo das medições fasoriais são conhecidos e o segundo em que não se conhece o ângulo da tensão e, por isso, o assume como referência angular. As grandezas fasoriais características desses ambientes de simulação são:

$$\text{Cenário 1} \begin{cases} |\dot{V}_{k1}| \angle \theta_{V_{k1}} \\ |\dot{V}_{k2}| \angle \theta_{V_{k2}} \\ |\dot{I}_{k1}| \angle \theta_{I_{k1}} \\ |\dot{I}_{k2}| \angle \theta_{I_{k2}} \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\text{Cenário 2} \begin{cases} |\dot{V}_{k1}| \angle 0^\circ \\ |\dot{V}_{k2}| \angle 0^\circ \\ |\dot{I}_{k1}| \angle (\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k1}}) \\ |\dot{I}_{k2}| \angle (\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k2}}) \end{cases} \quad (4.16)$$

Para garantir as mesmas condições de carga para os dois cenários avaliados, o ângulo da corrente também deve ser deslocado de θ_{V_k} , mantendo a mesma potência para a carga. As grandezas fasoriais foram escritas na forma polar para facilitar a visualização dos resultados.

O sistema linear (4.14) foi solucionado analiticamente, considerando os dois cenários de simulação. Os resultados obtidos para as partes real e imaginária da impedância de Thévenin são mostrados nas equações (4.17) a (4.20). O subíndice D caracteriza o deslocamento assumido no Cenário 2.

$$R_{TH} = \frac{-[|\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k1}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k1}}) - |\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k2}}) - |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k1}|\cos(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k1}}) + |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k2}})]}{|\dot{I}_{k1}|^2 - 2|\dot{I}_{k1}||\dot{I}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{I_{k2}}) + |\dot{I}_{k2}|^2} \quad (4.17)$$

$$R_{TH-D} = \frac{-[|\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k1}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k1}}) - |\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k1}}) - |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k1}|\cos(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k2}}) + |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k2}})]}{|\dot{I}_{k1}|^2 - 2|\dot{I}_{k1}||\dot{I}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k1}} + \theta_{V_{k2}}) + |\dot{I}_{k2}|^2} \quad (4.18)$$

$$X_{TH} = \frac{|\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k1}|\sin(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k1}}) - |\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k2}|\sin(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k2}}) - |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k1}|\sin(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k1}}) + |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k2}|\sin(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k2}})}{|\dot{I}_{k1}|^2 - 2|\dot{I}_{k1}||\dot{I}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{I_{k2}}) + |\dot{I}_{k2}|^2} \quad (4.19)$$

$$X_{TH-D} = \frac{|\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k1}|\sin(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k1}}) - |\dot{I}_{k1}||\dot{V}_{k2}|\sin(\theta_{I_{k1}} - \theta_{V_{k1}}) - |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k1}|\sin(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k2}}) + |\dot{I}_{k2}||\dot{V}_{k2}|\sin(\theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k2}})}{|\dot{I}_{k1}|^2 - 2|\dot{I}_{k1}||\dot{I}_{k2}|\cos(\theta_{I_{k1}} - \theta_{I_{k2}} - \theta_{V_{k1}} + \theta_{V_{k2}}) + |\dot{I}_{k2}|^2} \quad (4.20)$$

Avaliando as equações anteriores, verifica-se que há alguns termos diferentes nas equações dos parâmetros e, portanto, o deslocamento produzido no ângulo de \dot{V}_k provoca uma diferença na solução do sistema proposto por (VU, 1999). Embora a solução da tensão de

Thévenin não esteja aqui apresentada, também foram verificados termos diferentes nas soluções correspondentes aos dois cenários.

Vale ressaltar que a análise matemática foi feita considerando apenas duas medições fasoriais consecutivas na composição da matriz A , que corresponde ao sistema de equações de menor dimensão. Essa escolha foi feita para facilitar a visualização das expressões matemáticas. Entretanto, o comportamento observado nessa condição também é verificado quando se considera um número maior de medições para compor a janela de dados. Além disso, como a metodologia desenvolvida neste trabalho, envolvendo as técnicas de amortecimento, tem como base o método proposto por (VU, 1999), os parâmetros do equivalente final também se mostram diferentes para os dois cenários avaliados. Dessa forma, pode-se afirmar que há impacto na resposta do equivalente ao se assumir a tensão como uma grandeza referência angular em TA1, TA2 e TA3.

Esse impacto também pode ser verificado por meio da simulação de cenários operativos. Para isso, foram utilizados dados gerados pelo SimC. A técnica do fluxo de potência continuado é componente do SimC por meio de sua integração com o *software open-source* MATPOWER (ZIMMERMAN, 2011). Os dados gerados pelo SimC são completos, possuindo magnitude e ângulo conhecidos, que correspondem ao Cenário 1, citado anteriormente. O Cenário 2 foi obtido deslocando todas as grandezas fasoriais de θ_{vk} , para cada amostra obtida.

A *Task Force on Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment* recomenda a utilização do Sistema de Teste RVS nos estudos, por este ser considerado representativo para avaliação da estabilidade de tensão (CUTSEM, 2020). Atendendo a essa recomendação, esse foi o sistema escolhido para a realização das simulações e análises. O diagrama unifilar do sistema está mostrado na Figura 4.6. Os dados das linhas de transmissão, transformadores, compensações *shunt*, geradores e compensador síncrono encontram-se no Apêndice A. Os barramentos 1103 e 1104 foram escolhidos para demonstração dos resultados gráficos por serem considerados como os mais críticos para instabilidade de tensão pela análise do vetor tangente.

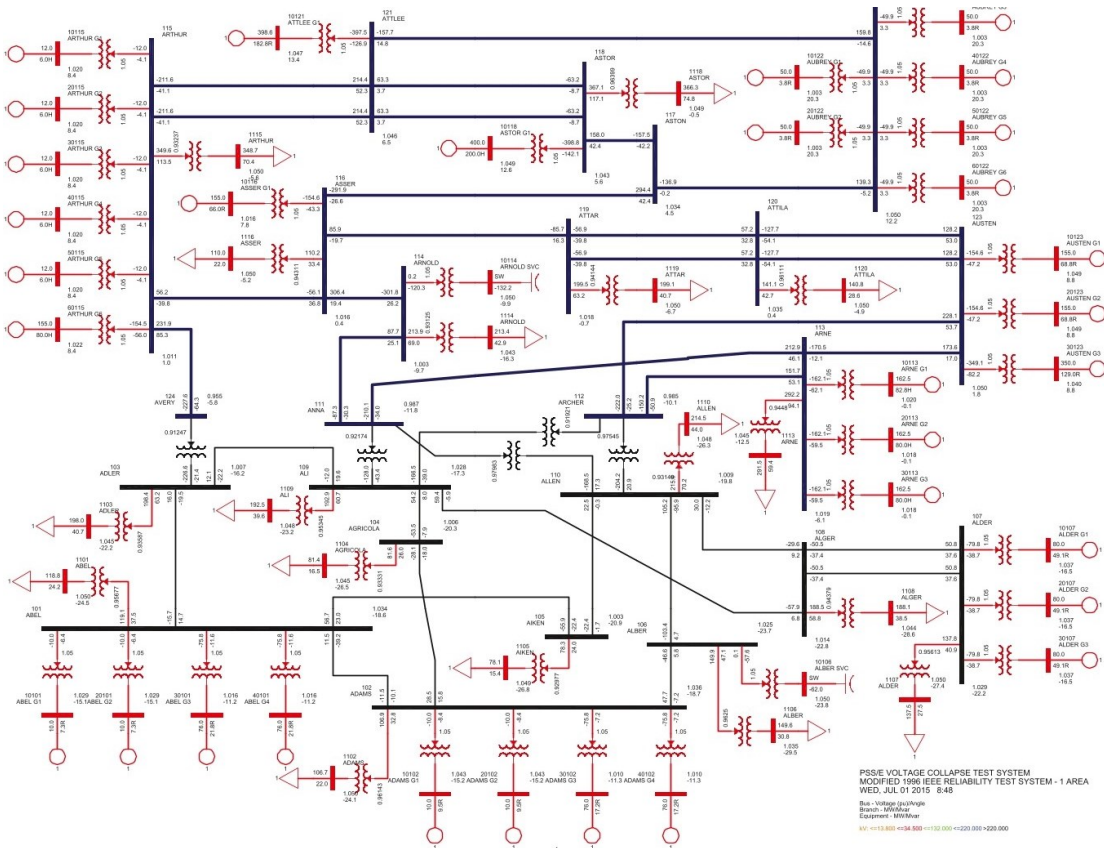


Figura 4.6 – Diagrama unifilar do Sistema de Teste RVS (CUTSEM, 2020)

O cenário de instabilidade de tensão foi obtido ao se incrementarem as cargas do sistema elétrico, mantendo-se o fator de potência constante. Os pontos operativos até a máxima transferência de potência do sistema para a carga foram identificados pelas sucessivas soluções do fluxo de potência.

Na primeira etapa de simulação, considerou-se aumento nas potências ativa e reativa apenas na barra de carga em análise, com passo de carga de 0,1% a cada iteração. Esse valor mostra-se consistente com variações típicas apresentadas por barramentos avaliados do sistema elétrico brasileiro. Não foi considerada a presença de erro do tipo ruído, já que não é o foco dessa etapa de avaliação.

A Figura 4.7 ilustra os resultados obtidos para os módulos dos parâmetros de Thévenin com a aplicação da metodologia proposta por (VU, 1999) para os dois cenários considerados. A impedância de Thévenin é representada juntamente com a impedância da carga, para facilitar as análises. Os subíndices C1 e C2 caracterizam os Cenários 1 e 2, descritos anteriormente.

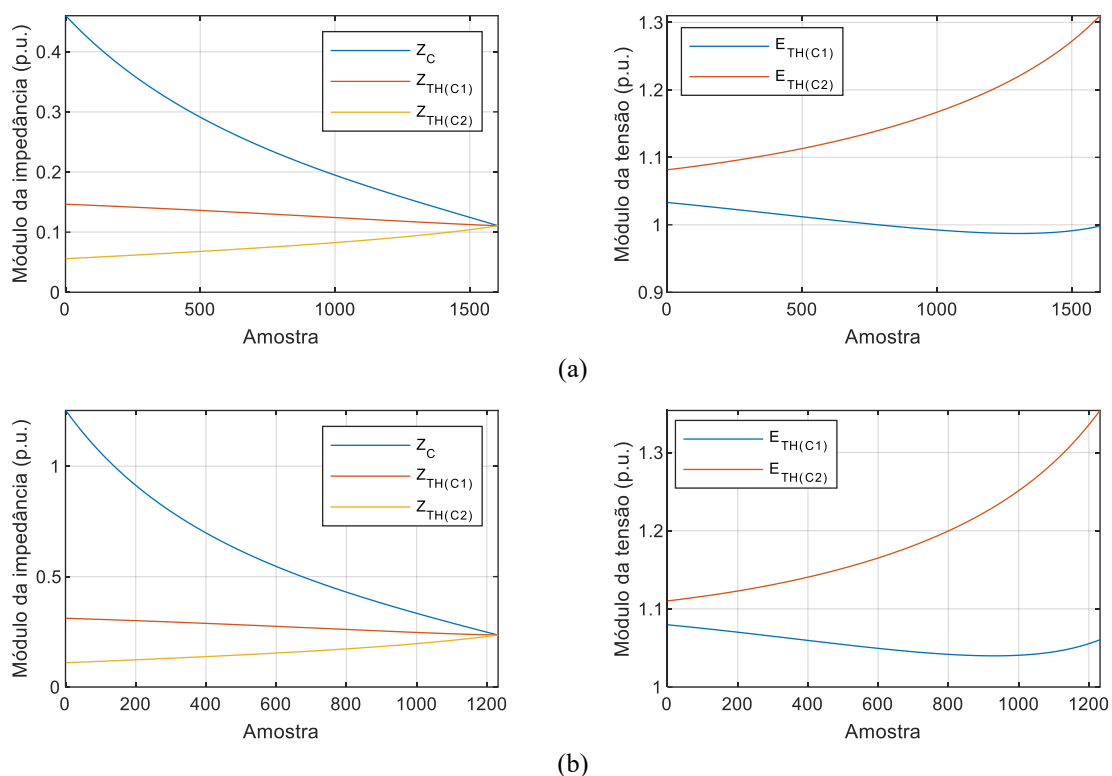


Figura 4.7 – Parâmetros do equivalente de Thévenin, referentes às barras (a) 1103 e (b) 1104 do sistema RVS, obtidos da aplicação do método de (VU, 1999), considerando o aumento de potência na barra de carga em análise

Algumas observações importantes podem ser feitas sobre as curvas mostradas na Figura 4.7. Conforme esperado, tendo em vista os resultados matemáticos apresentados anteriormente, os parâmetros do equivalente de Thévenin apresentam valores e comportamentos diferentes para os dois cenários simulados.

Os módulos de \bar{Z}_{TH} tendem a se igualar nos dois casos, ao final do carregamento do sistema, próximo ao ponto de instabilidade de tensão, embora apresentem comportamentos antagônicos. Em equivalentes de rede, a impedância de Thévenin representa todo o sistema visto a partir do barramento de interesse, onde são efetuadas as medições. Portanto, à medida que cargas do sistema são aumentadas, a impedância de Thévenin deve refletir que a condição de operação do sistema elétrico caminha para situações mais próximas aos limites. Esse comportamento é observado apenas para o Cenário 2, onde $|\bar{Z}_{TH}|$ tem característica crescente, caminhando ao encontro de $|\bar{Z}_C|$.

As magnitudes de \bar{E}_{TH} também apresentam comportamentos contrários para os Cenários 1 e 2, ao longo de praticamente todo o carregamento do sistema, sendo que em um dos casos, verifica-se o aumento e no outro a redução, conforme mostrado na Figura 4.7. Isso era esperado,

visto que o cálculo de \dot{E}_{TH} é feito a partir da solução do circuito de duas barras, ilustrado na Figura 2.1.

Na segunda etapa de simulação, o equivalente foi calculado considerando o aumento de potência em todas as barras de carga do sistema, para os Cenários 1 e 2. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.8.

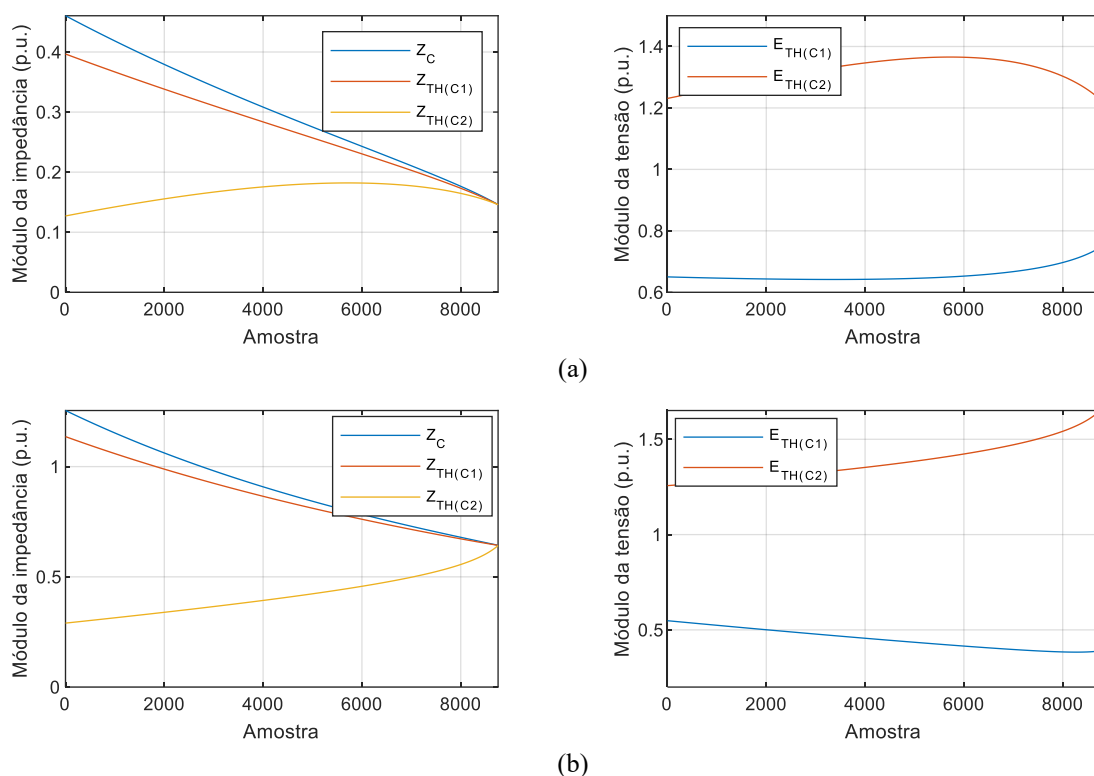


Figura 4.8 – Parâmetros do equivalente de Thévenin, referentes às barras (a) 1103 e (b) 1104 do sistema RVS, obtidos da aplicação do método de (VU, 1999), considerando o aumento de potência em todas as barras de carga

Novamente, verifica-se que o equivalente mostra-se mais consistente para o Cenário 2, em que a tensão é assumida como a referência angular. No Cenário 1, a grandeza $|\bar{Z}_{TH}|$ apresenta valores elevados e caminha muito próximo a $|\bar{Z}_C|$, o que indicaria uma baixa margem de estabilidade de tensão, mesmo em condições de operação em que o sistema encontra-se longe do ponto de máxima transferência de potência.

A metodologia proposta neste trabalho utiliza como base o método proposto por (VU, 1999). Portanto, é esperado que os resultados obtidos para o equivalente de Thévenin com TA1, TA2 e TA3 tenham um comportamento semelhante aos ilustrados anteriormente.

O impacto da escolha da tensão como uma grandeza de referência foi avaliado para outros sistemas elétricos, além do Sistema de Teste RVS. Foram também estudados os sistemas

IEEE 14 Barras, IEEE 30 Barras, WSCC 9 Barras e Nordic32. O comportamento dos parâmetros do equivalente é semelhante em todos os casos.

Tendo em vista os resultados aqui apresentados, a metodologia proposta neste trabalho assumirá a tensão no barramento de carga como grandeza de referência angular. É importante ressaltar que há trabalhos na literatura destinados à obtenção de equivalentes de redes em tempo real que assumem uma das grandezas de entrada, ou seja, uma das medições fasoriais, como referência angular. Como exemplo, podem ser citados os trabalhos de (HAQUE, 2003), que considera a tensão na barra de carga como referência angular e, (CORSI, 2008), que assume a corrente de carga na referência angular do circuito equivalente de duas barras.

4.4 FAIXAS DE VALORES DOS FATORES DE PONDERAÇÃO

Na metodologia proposta neste trabalho, as técnicas de amortecimento da resposta do equivalente (TA1, TA2 e TA3) envolvem fatores de ponderação, cuja função é enfatizar a influência das medições mais recentes no cálculo dos parâmetros. A princípio, o valor desses fatores é de livre escolha, o que determina uma ampla gama de possibilidades. Torna-se importante, assim, indicar valores ou faixas de valores de referência. As investigações mostram que há dificuldade na definição de valores *default* para esses fatores de ajuste, tendo em vista que o cálculo do equivalente em tempo real envolve diversos aspectos a considerar. Para vencer esse desafio, mostra-se de suma importância estabelecer a correlação entre esses fatores e as impedâncias do equivalente.

Os valores dos fatores de ponderação afetam significativamente o amortecimento da resposta do equivalente. Dessa forma, a escolha adequada desses fatores garante o bom desempenho e a exatidão da metodologia para obtenção do equivalente de redes.

A determinação das faixas de valores para escolha dos fatores de ponderação é feita por meio de análises de sensibilidade, envolvendo as três técnicas de amortecimento.

As simulações foram feitas com o uso da plataforma SimC, em conjunto com o MATPOWER. O Sistema de Teste RVS foi escolhido para demonstração dos resultados. Foi considerado o aumento das potências ativa e reativa em todas as barras de carga. O passo de carga utilizado foi de 0,1% a cada iteração da solução do fluxo de potência. Em todos os casos, considerou-se a janela de aceleração com 5 amostras, durante as 10 primeiras medições e, posteriormente, aumentou-se o tamanho da janela para 10. Para a variação de potência

assumida, esse valor caracteriza um período considerado consistente em termos de constância dos parâmetros do equivalente de Thévenin. Nessa etapa de simulações, não foi considerada a presença de erro do tipo ruído, visto que o tratamento de incertezas de medição não é o foco da presente análise.

É importante citar que, apesar das análises de sensibilidade terem sido feitas para todas as barras de carga do Sistema de Teste RVS, neste texto são apresentados os resultados referentes à barra crítica 1103, que corresponde àquela que sofre quedas de tensão mais pronunciadas próximo do ponto de máxima transferência de potência. Os resultados obtidos para todos os outros casos simulados apresentam comportamentos semelhantes aos que são aqui apresentados.

As análises de sensibilidade realizadas avaliaram todos os parâmetros do equivalente, ou seja, módulo e ângulo da impedância e da tensão de Thévenin. Entretanto, para facilitar a análise do grande volume de resultados gerados, optou-se por apresentar os módulos das grandezas, sem perda de generalidade.

A. Técnica de amortecimento TA1

A primeira consideração a ser feita em relação ao fator de ponderação de TA1 é baseada na equação (4.11) que determina a inclinação da reta de ponderação. Para garantir que a ponderação dos valores calculados para \bar{Z}_{TH} nos instantes passados seja sempre positiva, f_1 deve ser maior que 1. Esse é o ponto de partida para as análises de sensibilidade em relação a f_1 .

Inicialmente, para abranger maior gama de possibilidades, tais análises foram feitas considerando uma ampla faixa de valores para f_1 . A partir do comportamento observado, essa faixa foi sendo reduzida, de modo a se obter o menor intervalo plausível para escolha de f_1 . Os resultados obtidos ao longo dessa trajetória para os parâmetros de Thévenin, vistos a partir da barra de carga 1103, são ilustrados na Figura 4.9.

Em um primeiro momento, foi avaliado o intervalo $1 \leq f_1 \leq 80$. Os resultados mostram que as diferenças obtidas para os parâmetros do equivalente são muito pequenas quando $10 \leq f_1 \leq 80$, gerando curvas que praticamente se sobrepõem, conforme mostrado nas Figura 4.9 (a) e (b). As variações significativas ocorrem para a faixa de valores $1 \leq f_1 \leq 10$, motivando uma nova faixa de avaliação, $1 \leq f_1 \leq 15$. Nessa segunda fase, observam-se diferenças ainda muito

discretas na resposta do equivalente no intervalo $2 \leq f_1 \leq 15$, comparado ao intervalo $1 \leq f_1 \leq 2$, conforme indicado nas Figura 4.9 (c) e (d). Dessa maneira, define-se uma faixa de escolha para o fator de ponderação: $1 \leq f_1 \leq 2$.

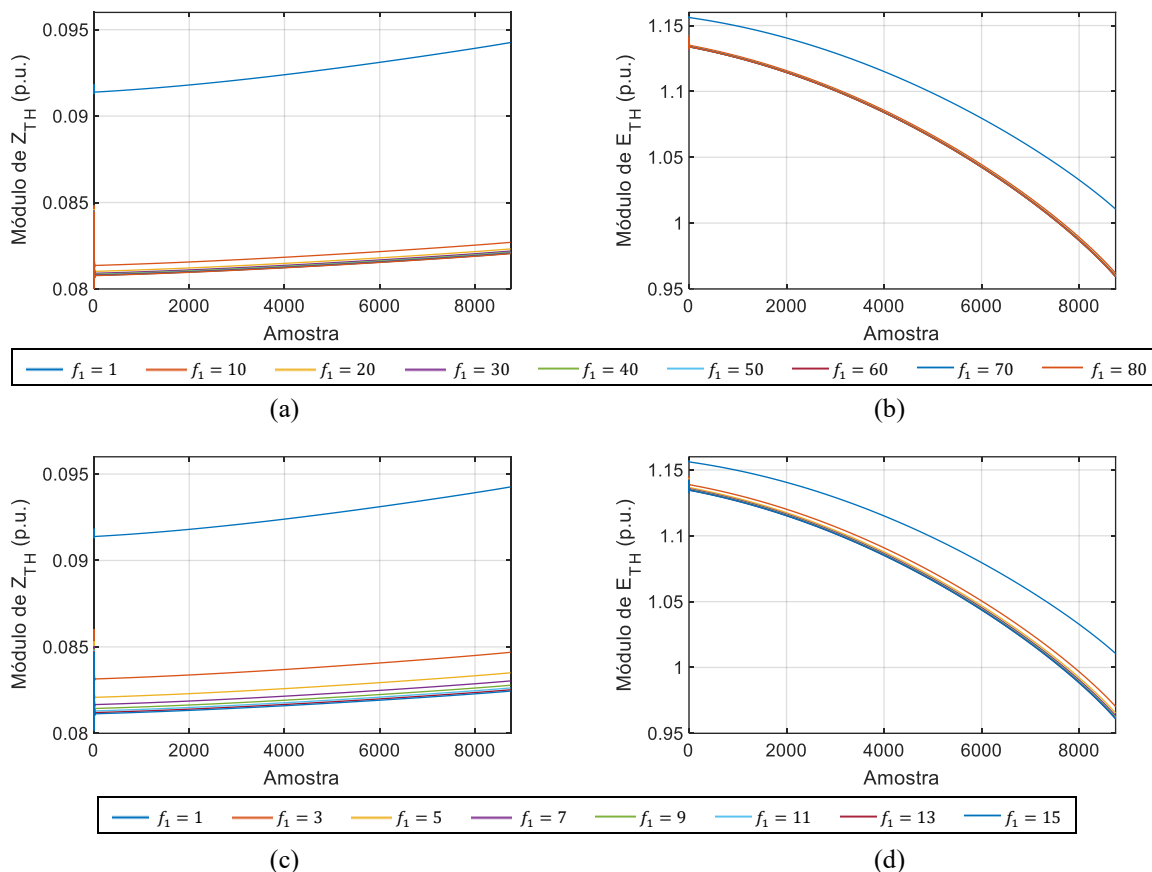


Figura 4.9 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA1, considerando diferentes faixas de variação de f_1 : (a), (c) módulo da impedância e (b), (d) módulo da tensão

As respostas do equivalente para valores definidos dentro dessa faixa estão mostradas na Figura 4.10.

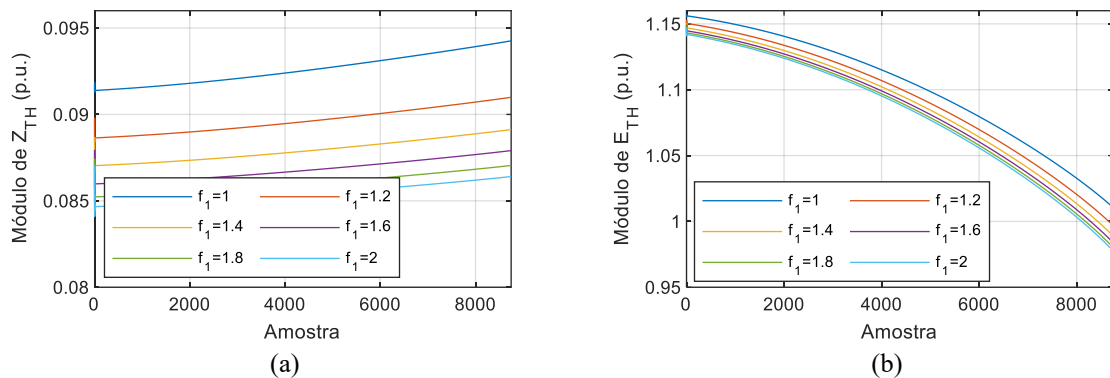


Figura 4.10 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA1, considerando a faixa de variação definida para f_1 : (a) módulo da impedância e (b) módulo da tensão

B. Técnica de amortecimento TA2

As análises de sensibilidade em relação a f_2 foram feitas seguindo a mesma direção de f_1 , ou seja, partindo de uma faixa ampla de valores até reduzi-la a um intervalo mais restrito. Os resultados obtidos com a aplicação de TA2 estão ilustrados na Figura 4.11. O primeiro intervalo avaliado foi $1 \leq f_2 \leq 80$, onde se percebem curvas que representam os parâmetros muito próximos para $f_2 \geq 20$, conforme ilustrado nas Figura 4.11 (a) e (b). Portanto, pode-se afirmar que, para essa condição, a resposta do equivalente apresenta uma variação muito discreta com o aumento de f_2 . Esse comportamento definiu a nova faixa de avaliação, $1 \leq f_2 \leq 15$, mostrada nas Figura 4.11 (c) e (d). Nessa etapa fica claro que as variações mais acentuadas dos parâmetros ocorrem no intervalo $1 \leq f_2 \leq 10$. Fora dessa faixa, as curvas ainda se apresentam muito próximas umas das outras, indicando diferenças pouco significativas, em termos de precisão dos resultados. Com isso, fica estabelecida a faixa de escolha do parâmetro f_2 : $1 \leq f_2 \leq 10$.

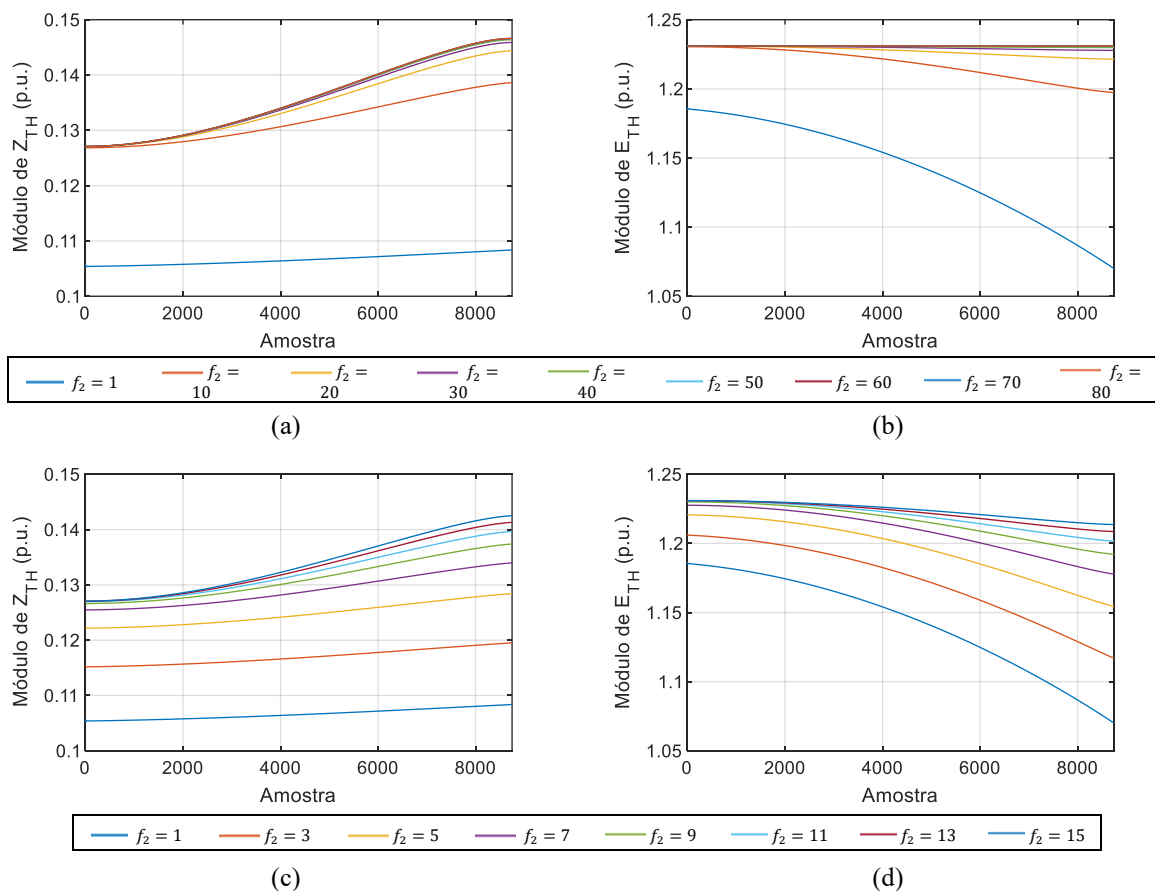


Figura 4.11 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA2, considerando diferentes faixas de variação de f_2 : (a), (c) módulo da impedância e (b), (d) módulo da tensão

As respostas do equivalente para valores definidos dentro da faixa estabelecida estão mostradas na Figura 4.12.

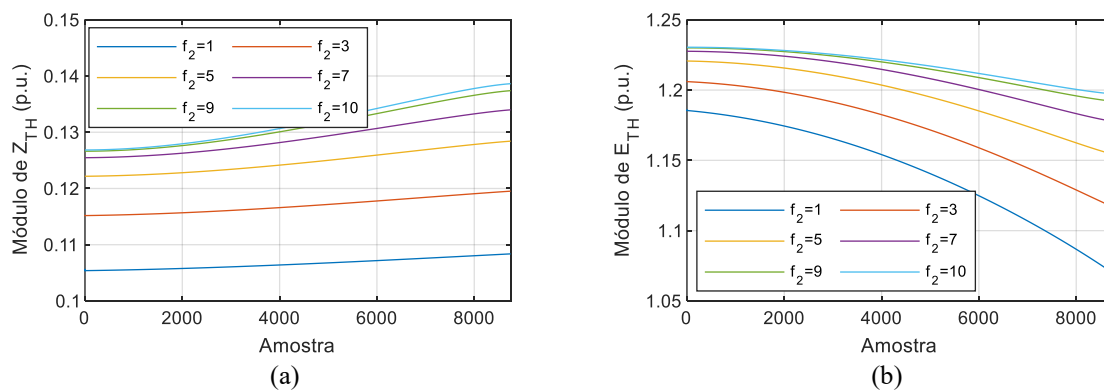


Figura 4.12 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA2, considerando a faixa de variação definida para f_2 : (a) módulo da impedância e (b) módulo da tensão

C. Técnica de amortecimento TA3

O equacionamento característico da técnica de amortecimento TA3 apresentado em (4.13) mostra que, quanto menor o valor de f_3 , maior o peso da impedância correspondente ao instante atual no cálculo da média ponderada, que determina os parâmetros finais do equivalente. Como a ideia da ponderação consiste em atribuir mais importância às medições mais recentes no cálculo do equivalente, f_3 não deve assumir valores muito elevados. Por essa razão, o intervalo inicial considerado das análises foi $2 \leq f_3 \leq 20$, bem mais restrito que aquele utilizado em TA1 e TA2. É importante destacar que, para $f_3 = 1$, a resposta do equivalente corresponde à saída do Estimador dos Mínimos Quadrados, conforme indica a equação (4.13). Nesse caso, a resposta apresenta variações muito bruscas, como já visto neste trabalho. Por essa razão $f_3 = 1$ não entra no intervalo de avaliação. Os resultados das análises de sensibilidade estão ilustrados na Figura 4.13.

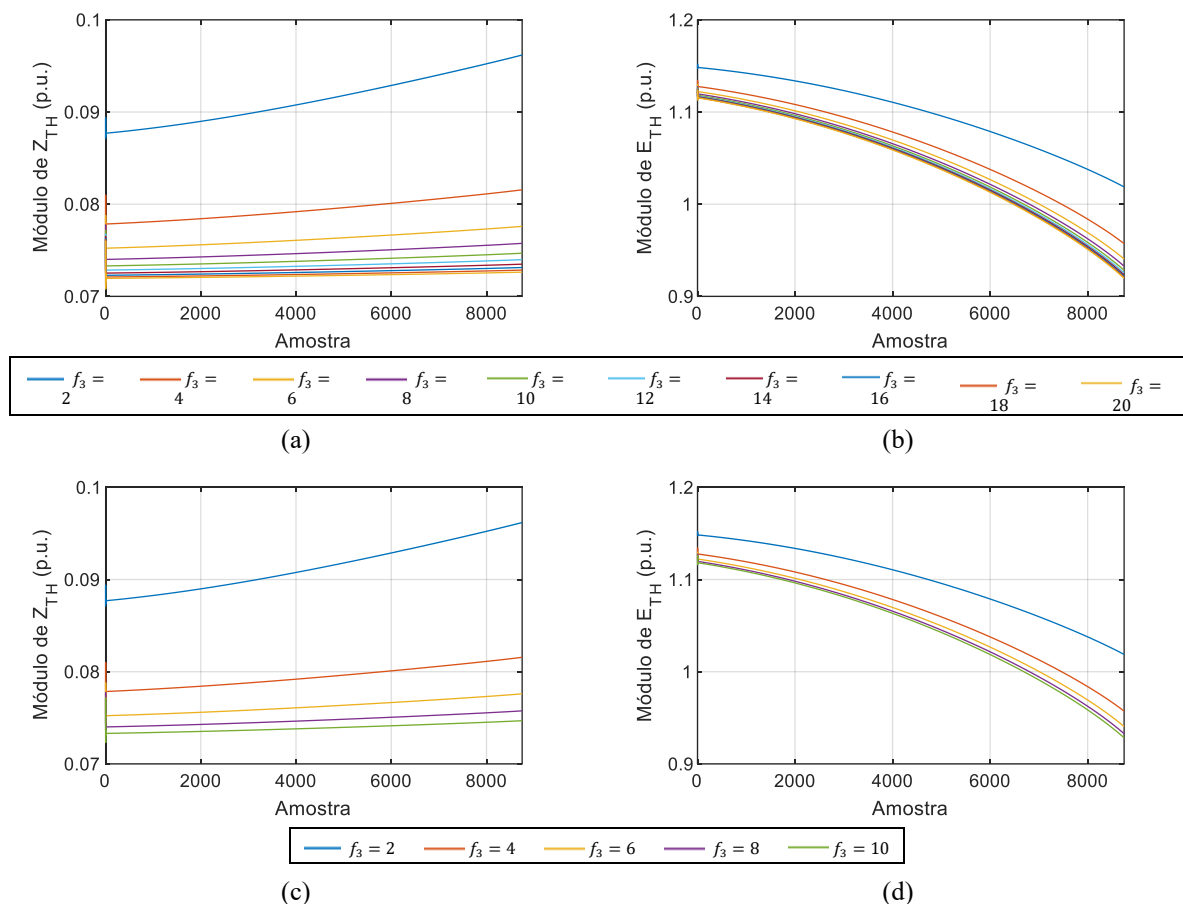


Figura 4.13 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA3, considerando diferentes faixas de variação de f_3 : (a), (c) módulo da impedância e (b), (d) módulo da tensão

As diferenças mais significativas para os parâmetros de Thévenin ocorrem para valores f_3 limitados a 10, conforme mostram as Figura 4.13 (a) e (b). Com isso, a nova faixa $2 \leq f_3 \leq$

10 foi avaliada, o que permitiu identificar que as variações mais significativas ocorrem dentro de um intervalo ainda mais estreito, $2 \leq f_3 \leq 6$, como ilustram as Figura 4.13 (c) e (d). Assim, determina-se a faixa de escolha do parâmetro f_3 : $2 \leq f_3 \leq 6$.

A Figura 4.14 mostra as respostas do equivalente para valores de f_3 situados dentro da faixa definida.

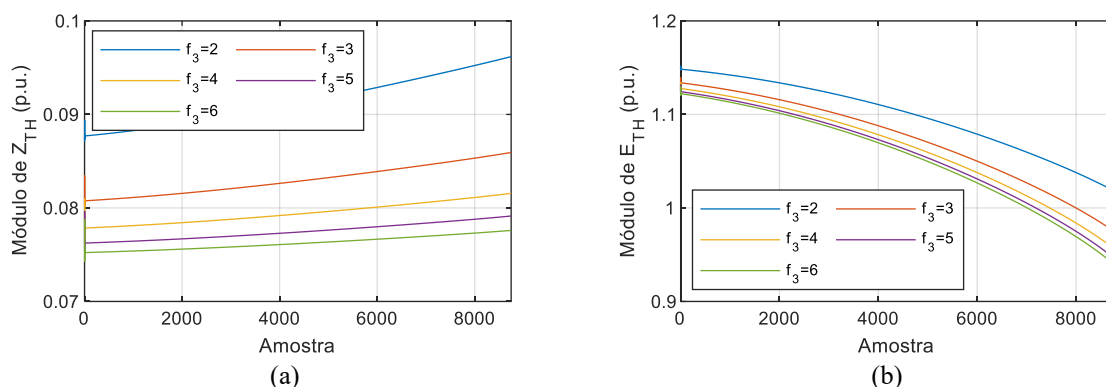


Figura 4.14 – Parâmetros do equivalente de Thévenin obtidos da aplicação de TA3, considerando a faixa de variação definida para f_3 : (a) módulo da impedância e (b) módulo da tensão

A limitação de possibilidades de escolha dos fatores de ponderação é fundamental para obtenção de respostas mais exatas. A Tabela 4.2 sintetiza os resultados da análise detalhada anteriormente.

Tabela 4.2 – Faixas de valores dos fatores de ponderação das técnicas de amortecimento

Técnicas de Amortecimento	Faixa de Valores dos Fatores de Ponderação	Observações
TA1	$1 \leq f_1 \leq 2$	No caso de medições fasoriais de baixa qualidade, adotar valores de f_1 mais próximo ao limite superior da faixa.
TA2	$1 \leq f_2 \leq 10$	No caso de medições fasoriais de baixa qualidade, adotar valores de f_2 mais próximo ao limite inferior da faixa.
TA3	$2 \leq f_3 \leq 6$	No caso de medições fasoriais de baixa qualidade, adotar valores de f_3 mais próximo ao limite superior da faixa.

A análise global dos resultados apresentados anteriormente já mostra o bom desempenho da aplicação das três técnicas de amortecimento no cálculo do equivalente de redes. Uma análise complementar, sob a ótica de equacionamento de circuitos elétricos, já

considerando a faixa de limites aqui estabelecida, é feita na seção seguinte, considerando a comparação com valores calculados pelo EARE.

4.5 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho mostra-se consistente com base em sua formulação. No sentido de validá-la e comprovar sua eficácia, desenvolveu-se uma análise comparativa entre o equivalente obtido pela metodologia proposta, utilizando medições, e o equivalente calculado a partir de informações completas do sistema elétrico, tomado como referência.

Conforme já citado, a referência adotada neste trabalho, para fins de comparação, é o EARE, proposto em (SILVA, 2018) e (SILVA, 2022), que define uma direção a ser seguida.

4.5.1 Características do EARE

A estimação dos parâmetros do EARE utiliza como dados de entrada o vetor de estados, a topologia fixa e os parâmetros dos componentes da rede elétrica. A formulação nodal dessa metodologia é baseada na determinação de matriz de admitâncias modificada, permitindo o cálculo dos equivalentes de redes vistos de todos os barramentos do sistema. A matriz modificada é composta pela representação dos componentes da rede elétrica (transformadores, linhas de transmissão, bancos de indutores e de capacitores, etc.) e os efeitos das cargas e dos geradores. Essas representações dão origem a três submatrizes: uma contendo os componentes do sistema a serem considerados pelos respectivos modelos de regime permanente, uma para as cargas especificadas como potência aparente serem convertidas em impedâncias e uma para os geradores serem modelados como fontes de tensão ideal. A matriz de admitâncias modificada dá origem à matriz de impedâncias modificada, que é o elo entre a impedância e a fonte de tensão do equivalente de redes e o sistema elétrico completo visto por cada barramento.

Os dados de entrada, a modelagem dos componentes, o equacionamento e a técnica de solução são muito diferentes entre as abordagens do EARE e da metodologia proposta. Sendo assim, para que sejam realizadas comparações consistentes entre os resultados dos equivalentes propostos nesta pesquisa e aqueles fornecidos pelo EARE, as diferenças entre as abordagens precisam ficar bem claras, para que os casos estudados e comparados possuam correspondência.

4.5.2 Diferenças Intrínsecas dos Ambientes de Comparação

Um ponto importante, para que as comparações sejam pertinentes, é que os dados de entrada fornecidos às duas abordagens sejam os mesmos. Sendo assim, a montagem dos casos de teste do EARE deve corresponder às medições fasoriais que servem de alimentação para o equivalente gerado pela metodologia utilizada neste trabalho.

Como o equivalente calculado pelo EARE considera informações completas sobre o sistema (topologia fixa, parâmetros dos componentes e vetor de estado), atenção deve ser dada à modelagem dos componentes utilizada em sua formulação.

Os dois ambientes de construção do equivalente foram comparados a fim de identificar os pontos considerados como fontes de diferenças na resposta do equivalente. Vale comentar que, devido às características distintas, as respostas dos equivalentes podem apresentar uma pequena discrepância, quando comparadas. Apesar disso, espera-se que a tendência do comportamento seja a mesma nos dois casos. As principais análises e observações em relação a esses pontos são apresentadas a seguir.

A. Modelagem dos componentes do sistema elétrico

O EARE adota em seu cálculo uma modelagem para cada componente da rede. As linhas de transmissão, transformadores e banco de capacitores e reatores são modelados por meio de circuitos π -nominal, característicos de regime permanente. Quando essa modelagem estática é utilizada na avaliação do comportamento do sistema elétrico, assume-se que as variações das grandezas elétricas com o tempo são suficientemente lentas para que os efeitos transitórios possam ser desprezados.

A modelagem dos geradores no cálculo do EARE consiste em uma fonte de tensão em série com uma reatância, que caracteriza a impedância interna do gerador. Essa reatância é obtida por meio da solução de um problema de otimização.

No cálculo do EARE, a potência aparente especificada e a tensão do barramento de carga dão origem à impedância incluída no diagrama de impedâncias usado na metodologia. Como a potência da carga é uma grandeza conhecida, pode-se afirmar que, no ambiente do EARE, a carga é bem definida. Nesse caso, há distinção clara entre geração e carga. Conforme

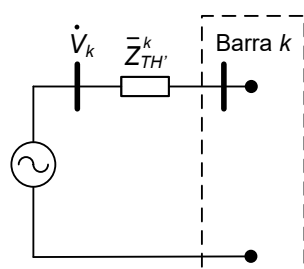
já comentado, no cálculo do equivalente em tempo real, a carga nem sempre é definida e sua potência é estimada por meio de dois modelos de carga, MC1 e MC2.

Diferentemente do EARE, o equivalente de Thévenin calculado em tempo real não necessita de informações do sistema completo, o que por si só caracteriza uma diferença notável. As únicas informações necessárias para o cálculo desse equivalente são as medições fasoriais sincronizadas de tensão e de corrente efetuadas no barramento de interesse do sistema elétrico. Tais medições apresentam altas taxas de amostragem (10 medições por segundo, por exemplo) e características dinâmicas. Por outro lado, as medições são contaminadas pelo erro do tipo ruído.

Diante do exposto, percebe-se outra diferença entre os cenários onde são calculados os equivalentes: de um lado, o cálculo do equivalente envolve ambiente com modelagens estáticas e, de outro, ambiente de medições, com características dinâmicas.

B. Cálculo dos parâmetros do equivalente

Na formulação do EARE, uma vez que a topologia fixa da rede é conhecida, pode-se determinar o diagrama de impedâncias/admitâncias, empregando as modelagens dos componentes elétricos que a compõem, considerando os resultados da solução do fluxo de potência. Esse diagrama é a base para obtenção do equivalente de Thévenin visto de cada barramento, pois possibilita a construção da matriz de admitâncias, elemento importante no modelo matricial proposto na metodologia. A partir da inversão da matriz de admitâncias de barras modificada, que abrange as matrizes de admitâncias de barras da rede elétrica e dos geradores e cargas, obtém-se a matriz de impedâncias de barras modificada. A diagonal principal dessa matriz contém as impedâncias de Thévenin (\bar{Z}_{TH}^k), vistas de cada barramento do sistema, definindo um dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin original de uma barra k , ilustrado na Figura 4.15 (a). A tensão (\dot{V}_k) desse circuito é obtida da solução do fluxo de potência e corresponde à tensão de circuito aberto de cada barramento.



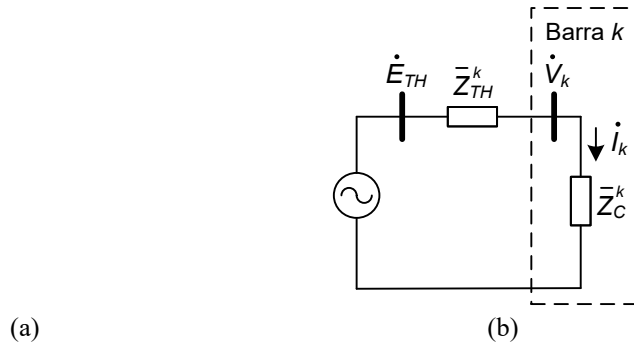


Figura 4.15 – (a) Circuito equivalente de Thévenin e (b) circuito equivalente de duas barras

Nos estudos de estabilidade de tensão, conhecer as impedâncias de Thévenin e da carga é essencial, visto que a relação entre elas determina a proximidade do ponto de operação do sistema elétrico ao ponto de instabilidade. Portanto, o circuito mostrado na Figura 4.15 (a) não se mostra adequado para esse tipo de análise, já que não apresenta a impedância da carga. Na formulação do EARE, a solução para esse impasse consiste em determinar um equivalente de duas barras, a partir do equivalente de Thévenin original, em que o efeito da impedância da carga da barra k (\bar{Z}_C^k) é extraído de \bar{Z}_{TH}^k . Esse equivalente de duas barras está mostrado na Figura 4.15 (b).

A impedância de Thévenin (\bar{Z}_{TH}^k) do circuito de duas barras, vista da barra de carga k , é obtida isolando-se essa variável em $\bar{Z}_{TH}^k = \bar{Z}_{TH}^k // \bar{Z}_C^k$, enquanto a fonte de tensão de Thévenin (\dot{E}_{TH}^k) é calculada utilizando o conceito de divisor de tensão no circuito da Figura 4.15 (b), conforme indicam as equações (4.21) e (4.22), respectivamente:

$$\bar{Z}_{TH}^k = \left(\frac{1}{\bar{Z}_{TH}^k} - \frac{1}{\bar{Z}_C^k} \right)^{-1} \quad (4.21)$$

$$\dot{E}_{TH}^k = \left(1 + \frac{\bar{Z}_{TH}^k}{\bar{Z}_C^k} \right) \dot{V}_k \quad (4.22)$$

A análise da equação (4.21) mostra que, na formulação do EARE, o cálculo da impedância de Thévenin depende de \bar{Z}_C^k que, por sua vez, depende apenas do módulo da tensão e da potência conhecida da barra k . Essa informação indica outro ponto de diferença em relação ao cálculo do equivalente de tempo real, visto que, nesse ambiente, o cálculo da impedância de Thévenin envolve módulo e ângulo da tensão e da corrente na barra de carga k . Além disso, o valor dessa corrente é estimado com base em dois modelos de carga, MC1 e MC2, já que esta

não é uma grandeza bem definida, o que caracteriza outra fonte de diferença dos ambientes de comparação.

A Tabela 4.3 sintetiza as discussões apresentadas anteriormente, apenas para dar uma visão geral da complexidade de validação das aplicações de tempo real.

Tabela 4.3 – Diferenças entre os ambientes de comparação

Equivalentes	Dados de entrada	Formulação	Modelagem dos dados de entrada			Observações
			Geração	Ramos	Carga	
EARE	Topologia fixa, parâmetros dos componentes e vetor de estado do sistema elétrico	Matricial Matriz de impedâncias modificada	Montagem do diagrama de impedâncias			Ambiente de estudo Modelagem estática
			Fonte de tensão em série com uma reatância	π -nominal	Definida Impedância calculada a partir da potência consumida	
Tempo Real	Medições fasoriais de tensão e de corrente	Cálculo de \bar{Z}_{TH} Utilizando técnicas TA1, TA2 e TA3			Calculada Uso das Metodologias MC1 e MC2	Ambiente dinâmico Presença de Erros nas Medições

4.5.3 Comparação do Equivalente Proposto com o EARE

Tendo em vista que as características básicas do EARE e as diferenças inerentes aos ambientes de comparação foram apresentadas, podem ser realizadas simulações de cenários operativos a fim de se comprovar a consistência do equivalente proposto neste trabalho. Alguns pontos importantes devem ser considerados nessa etapa de validação, para garantir ambientes de comparação mais próximos entre si.

Nas análises, o incremento de carga deve ser feito apenas na barra de carga em análise, para garantir que a premissa de que o sistema permanece inalterado no intervalo de tempo definido pela janela de dados seja respeitada. Nesse caso, o efeito da variação das tensões e impedâncias vistas do barramento monitorado é menos significativo e os parâmetros do equivalente obtido tornam-se mais exatos. No ambiente de fluxo de potência, esse cuidado é

importante, tendo em vista que se trata de um cenário de simulação em que há um aumento compulsório de carga, cujo objetivo é atingir o ponto de máxima transferência de potência.

Outra questão importante é não considerar a correção proposta na metodologia desenvolvida para os parâmetros do equivalente, quando os valores da tensão de Thévenin excederem os limites da faixa de operação da tensão. Trata-se de uma correção importante no ambiente de tempo real. Entretanto, nos cenários de cálculo do fluxo de potência, essa faixa definida de tensão não se justifica.

Feitas essas considerações, nas simulações realizadas para validação, o cenário de instabilidade de tensão foi obtido ao se incrementarem as potências ativa e reativa da barra de carga em análise, mantendo-se o fator de potência constante. O passo de carga utilizado foi de 0,1% a cada iteração da solução do fluxo de potência. Os pontos operativos até a máxima transferência de potência do sistema para a carga foram identificados pelas sucessivas soluções do fluxo de potência continuado, por meio do uso das plataformas SimC e MATPOWER. O sistema escolhido para cálculo do equivalente foi o Sistema de Teste RVS.

Em todas as simulações que envolveram medições fasoriais puras, sem inserção do erro do tipo ruído, considerou-se a janela de aceleração com 5 amostras, durante as 10 primeiras medições e, posteriormente, aumentou-se o tamanho da janela para 10. Nas simulações em que se considerou a presença de ruídos de medição, manteve-se o tamanho da janela de aceleração, durante as 80 primeiras medições, mas posteriormente, aumentou-se a janela para 80 medições. Nesse cenário, a adoção de uma janela de dados de dimensão maior é necessária para garantir o amortecimento da resposta do equivalente e a filtragem dos erros do tipo ruído.

Todos os parâmetros do equivalente de Thévenin foram avaliados, em módulo e ângulo. Entretanto, para demonstração dos resultados optou-se por apresentar somente $|\bar{Z}_{TH}|$, sem perda de generalidade. Em termos da avaliação da estabilidade de tensão, o parâmetro $|\bar{Z}_{TH}|$ por si só já traz uma informação importante sobre o risco de instabilidade de tensão, quando analisado em conjunto com $|\bar{Z}_C|$. Outra grandeza importante de se avaliar é P_{max} , que traz a informação da máxima potência ativa que pode ser transferida pelo sistema à carga, possibilitando o cálculo da margem de estabilidade de tensão.

Nas análises a seguir, além da sigla EARE já definida, é adotada a sigla MD para caracterizar os parâmetros obtidos pela metodologia desenvolvida neste trabalho.

Na primeira etapa de validação, os dados de entrada para aplicação da metodologia proposta foram obtidos das soluções do fluxo de potência continuado, com desvio padrão nulo,

ou seja, sem contaminação com erro do tipo ruído. As três técnicas de amortecimento, TA1, TA2 e TA3, foram avaliadas, sob a perspectiva da adoção de fatores de amortecimento determinados pelos limites inferior e superior de cada uma das faixas definidas na Seção 4.4.

A Figura 4.16 mostra os comportamentos da impedância de Thévenin e da potência máxima obtidos das aplicações da metodologia proposta neste trabalho e do EARE. Essas grandezas são apresentadas juntamente com a impedância e potência da carga, para melhor interpretação dos resultados.

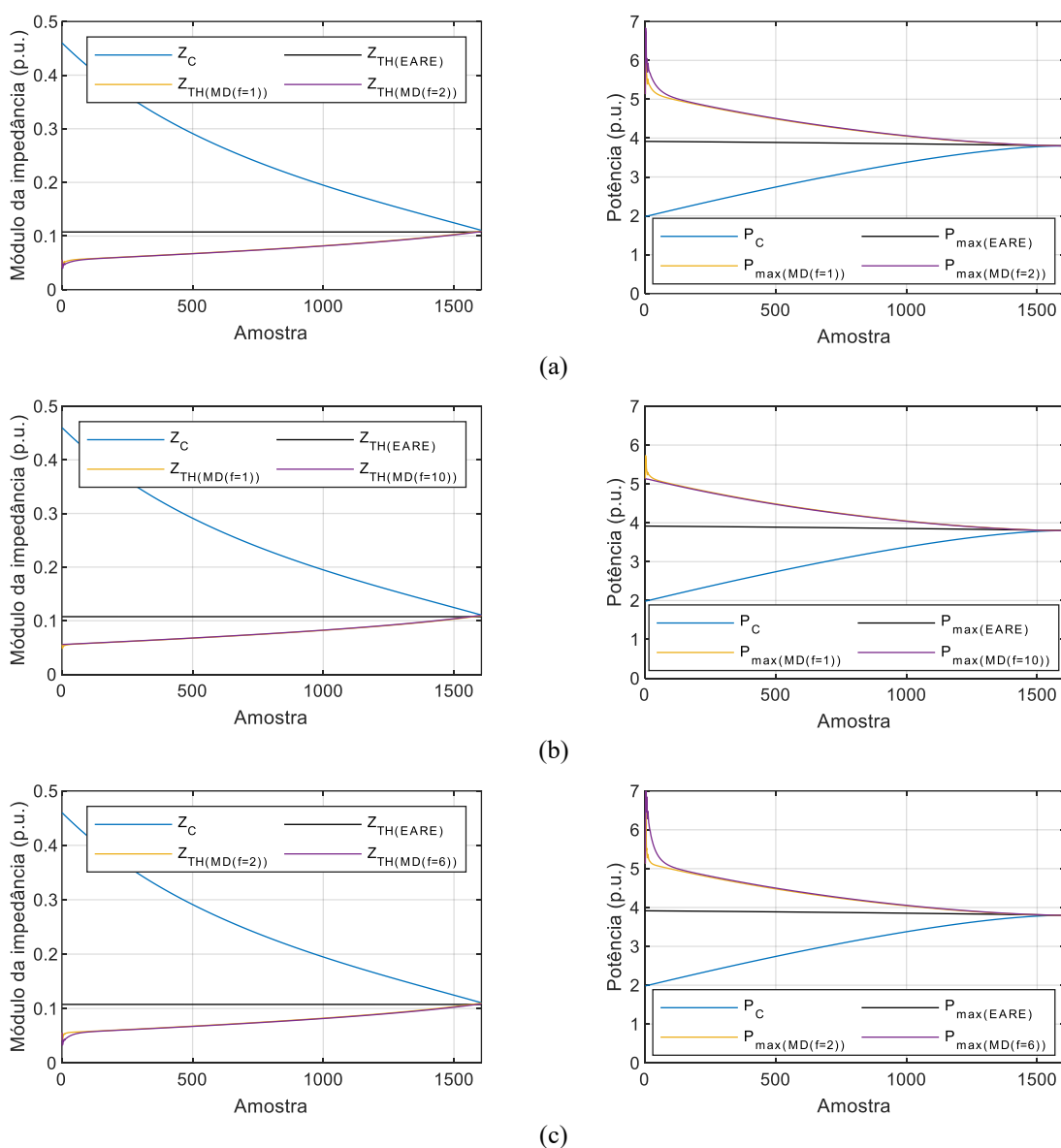


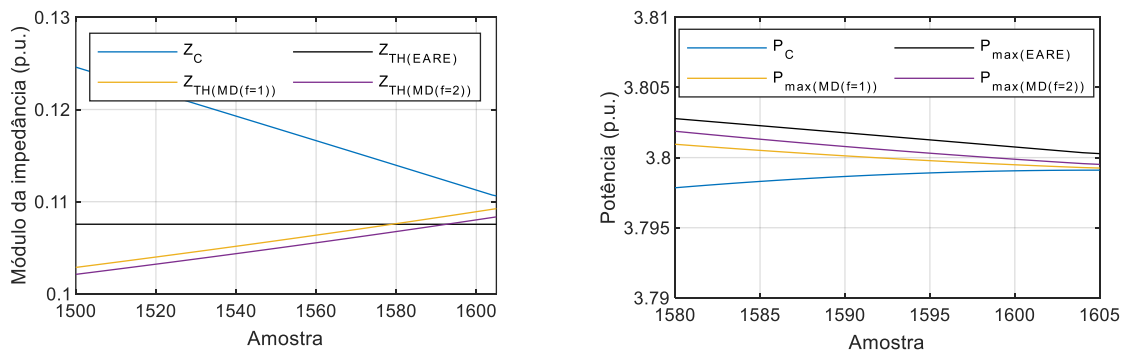
Figura 4.16 – Impedância de Thévenin e potência máxima, referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, obtidas da aplicação do EARE e da metodologia desenvolvida, considerando o uso de: (a) TA1, (b) TA2 e (c) TA3

Pela análise da Figura 4.16, observa-se que no início do carregamento, os valores obtidos para $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ não se encontram muito próximos do valor de referência, definido pelo EARE. À medida que a potência da barra de carga é incrementada, a distância entre essas impedâncias é reduzida, de modo que elas se igualam próximo ao ponto de máxima transferência de potência. Dessa forma, pode-se afirmar que a identificação do ponto de instabilidade, mostra-se consistente. Esse comportamento é observado para todas as técnicas de amortecimento.

Apesar da diferença detectada nos instantes iniciais do cálculo do fluxo de potência, em uma visão macro, incluindo a impedância da carga, verifica-se que o comportamento de $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ está condizente com a condição de operação do sistema. No início do carregamento, a impedância $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ apresenta uma distância significativa de $|\bar{Z}_C|$, indicando uma margem segura em relação ao ponto de instabilidade de tensão. Além disso, à medida que se aumenta a potência da barra de carga em análise, verifica-se o aspecto crescente de $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$, que reflete a piora da condição de operação do sistema elétrico.

Avaliando o comportamento das potências, verifica-se que, analogamente à impedância de Thévenin, no início do carregamento, $P_{\max(MD)}$ encontra-se a uma certa distância de $P_{\max(EARE)}$. Entretanto, à medida que se aproxima do ponto de instabilidade, a diferença entre eles diminui. Na visão macro, incluindo P_C , observa-se que $P_{\max(MD)}$ apresenta um comportamento consistente com o esperado para o sistema elétrico.

As simulações também permitem avaliar a eficiência das técnicas de amortecimento, em função dos valores adotados para os fatores de ponderação. Na Figura 4.16, as curvas que representam $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ estão praticamente sobrepostas para os diferentes fatores considerados. Para melhor visualização e interpretação dos resultados, a Figura 4.17 mostra o comportamento da impedância e da potência na região em torno do ponto de instabilidade de tensão.



(a)

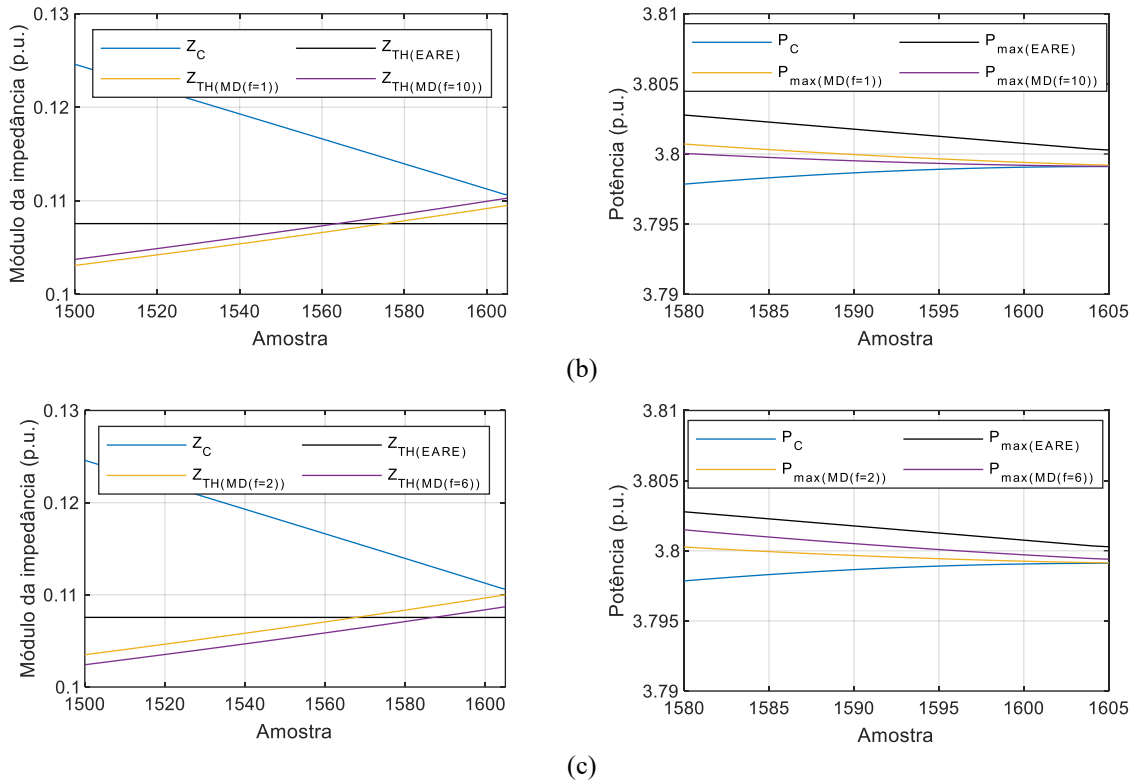


Figura 4.17 – Impedância de Thévenin e potência máxima (na região de instabilidade de tensão), referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, obtidas da aplicação do EARE e da metodologia desenvolvida, considerando o uso de: (a) TA1, (b) TA2 e (c) TA3

Conforme pode ser observado, em nenhum dos casos $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ se igualam efetivamente, no ponto de máxima transferência de potência. O equivalente desenvolvido neste trabalho apresenta um comportamento mais conservador, em termos da avaliação da estabilidade de tensão, quando comparado com o EARE, visto que indicaria primeiro o encontro das impedâncias $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$.

Além disso, para cada uma das técnicas de amortecimento, a adoção de fatores de ponderação específicos leva a respostas do equivalente em que a razão $|\bar{Z}_C|/|\bar{Z}_{TH}|$ mostra-se mais próxima do valor unitário. Esse comportamento é observado para os fatores $f_1 = 1$, $f_2 = 10$ e $f_3 = 2$ das técnicas TA1, TA2 e TA3, respectivamente. Dessa forma, pode-se dizer que a escolha desses valores, em um ambiente de medições puras, resulta em um equivalente com desempenho mais conservador quando comparado com o uso de outros fatores de ponderação dentro da faixa definida.

A avaliação do comportamento das potências reforça todas as considerações feitas anteriormente.

Para uma avaliação quantitativa dos resultados obtidos nas simulações, foram calculados os erros percentuais (ε) referentes a $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ e a $P_{\max(MD)}$ em relação aos

parâmetros do EARE, no ponto de máxima transferência de potência, para todas as barras de carga do Sistema de Teste RVS. A Tabela 4.4 mostra os valores obtidos.

Tabela 4.4 – Erro relativo referente à identificação do ponto de instabilidade de tensão

Barra	$\varepsilon_{ Z_{TH} }(\%)$						$\varepsilon_{P_{max}}(\%)$					
	TA1		TA2		TA3		TA1		TA2		TA3	
	f = 1	f = 2	f = 1	f = 10	f = 2	f = 6	f = 1	f = 2	f = 1	f = 10	f = 2	f = 6
1101	0,235	0,758	0,524	1,430	1,106	0,365	0,007	0,003	0,009	0,013	0,012	0,001
1102	0,349	0,650	0,640	1,548	1,222	0,256	0,009	0,002	0,011	0,015	0,014	0,003
1103	1,576	0,745	1,813	2,534	2,278	1,076	0,027	0,020	0,028	0,031	0,030	0,023
1104	0,403	1,561	0,072	0,939	0,580	1,100	0,001	0,014	0,002	0,007	0,006	0,008
1105	0,031	1,153	0,290	1,272	0,923	0,707	0,004	0,009	0,006	0,011	0,010	0,003
1106	2,462	1,725	2,674	3,327	3,095	2,018	0,046	0,041	0,047	0,049	0,049	0,043
1107	5,776	5,147	5,956	6,509	6,312	5,397	0,168	0,164	0,169	0,170	0,170	0,166
1108	6,419	5,866	6,575	7,050	6,882	6,087	0,189	0,186	0,189	0,190	0,190	0,187
1109	3,773	3,000	3,996	4,683	4,438	3,307	0,091	0,086	0,093	0,095	0,094	0,088
1110	5,866	5,235	6,046	6,598	6,401	5,486	0,171	0,168	0,172	0,173	0,173	0,169
1113	2,041	1,478	2,205	2,720	2,535	1,701	0,032	0,029	0,033	0,034	0,034	0,031
1114	2,455	1,736	2,661	3,295	3,069	2,022	0,047	0,042	0,048	0,050	0,049	0,044
1115	5,030	4,488	5,182	5,645	5,482	4,705	0,129	0,126	0,129	0,130	0,130	0,127
1116	0,280	0,830	0,600	1,582	1,232	0,389	0,009	0,004	0,012	0,016	0,015	0,002
1118	1,858	1,210	2,043	2,606	2,406	1,469	0,030	0,026	0,031	0,032	0,032	0,028
1119	1,174	0,328	1,418	2,167	1,900	0,664	0,020	0,013	0,021	0,024	0,023	0,016
1120	0,124	1,146	0,173	1,101	0,769	0,742	0,003	0,009	0,005	0,009	0,008	0,003

A análise dos erros percentuais em relação ao EARE permite verificar que as três técnicas de amortecimento apresentam bons resultados para o equivalente. Os maiores erros foram observados com o uso da TA2 e $f_2 = 10$ para a barra de carga 1108, atingindo o valor 7,050% para a impedância de Thévenin. Entretanto, percebe-se que o erro é reduzido para 0,190% em termos de potência máxima, nas mesmas condições. Observa-se que, em todos os casos, o erro referente à P_{max} é menor comparado ao erro de $|\bar{Z}_{TH}|$. Esse é um ponto positivo, já que, em termos da avaliação da estabilidade de tensão, P_{max} é a grandeza de interesse para cálculo da margem de estabilidade de tensão.

Outra questão importante na avaliação dos erros percentuais é que, para as três técnicas de amortecimento, a adoção de um dos fatores limites dentro da faixa definida produz resultados mais exatos. Esse padrão de comportamento é observado para a maioria das barras de carga do sistema RVS, salvo poucas exceções. Entretanto, essa informação, analisada isoladamente, não permite definir que esses sejam os valores ótimos para cada um dos fatores de ponderação, visto

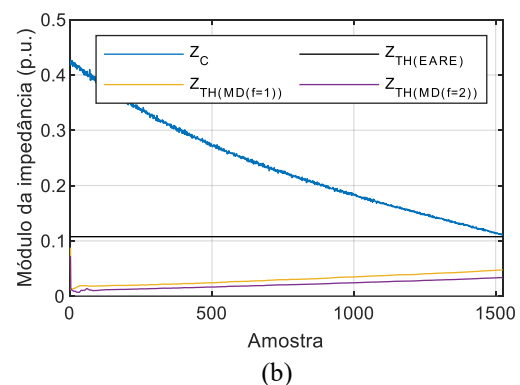
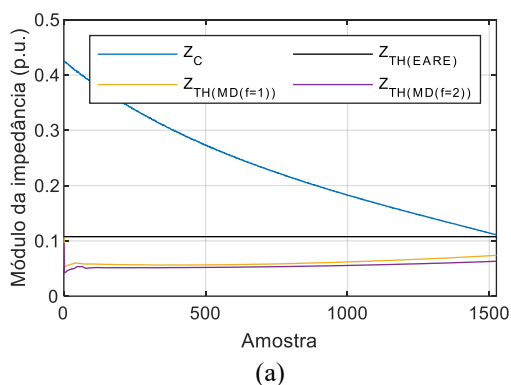
que essa definição depende de outro aspecto fundamental: o desempenho frente à presença de erro do tipo ruído nas medições.

Os resultados mostrados até aqui não permitem identificar qual das técnicas de amortecimento apresenta melhor desempenho, já que todas mostram-se eficientes e com comportamentos muito semelhantes. Isso era esperado já que essa primeira análise não inclui a presença de ruído nos dados de entrada da metodologia proposta neste trabalho.

Portanto, nessa segunda etapa de avaliação, as soluções do fluxo de potência continuado foram contaminadas com o erro do tipo ruído. Para isso, foram adotados desvios padrão de 0,1% e 0,5% nos fasores de tensão e de corrente, após o cálculo do fluxo de potência. Esses conjuntos de dados foram usados para gerar medições que seriam obtidas pelas PMU, representando o ambiente de tempo real simulado.

Os resultados obtidos para $|\bar{Z}_{TH}|$ estão mostrados na Figura 4.18. Em todos os casos, observa-se $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ mais distante de $|\bar{Z}_{TH(EARE)}|$, em comparação ao cenário em que as medições de tensão e de corrente são puras, sem a presença do erro do tipo ruído. Obviamente, é esperado que o cenário ideal de medições, sem erros associados, apresente uma maior exatidão no cálculo do equivalente.

No primeiro cenário de simulação, considerando medições puras, o desempenho do equivalente desenvolvido mostrava-se mais conservador comparado à referência EARE. Entretanto, com a contaminação das medições com erro do tipo ruído, verifica-se que o aspecto crescente da impedância de Thévenin ao longo do carregamento torna-se menos acentuado e, conseqüentemente, $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ mostra-se mais distante de $|\bar{Z}_C|$ no ponto de instabilidade de tensão. Essa distância torna-se mais significativa com o aumento do desvio padrão associado às medições.



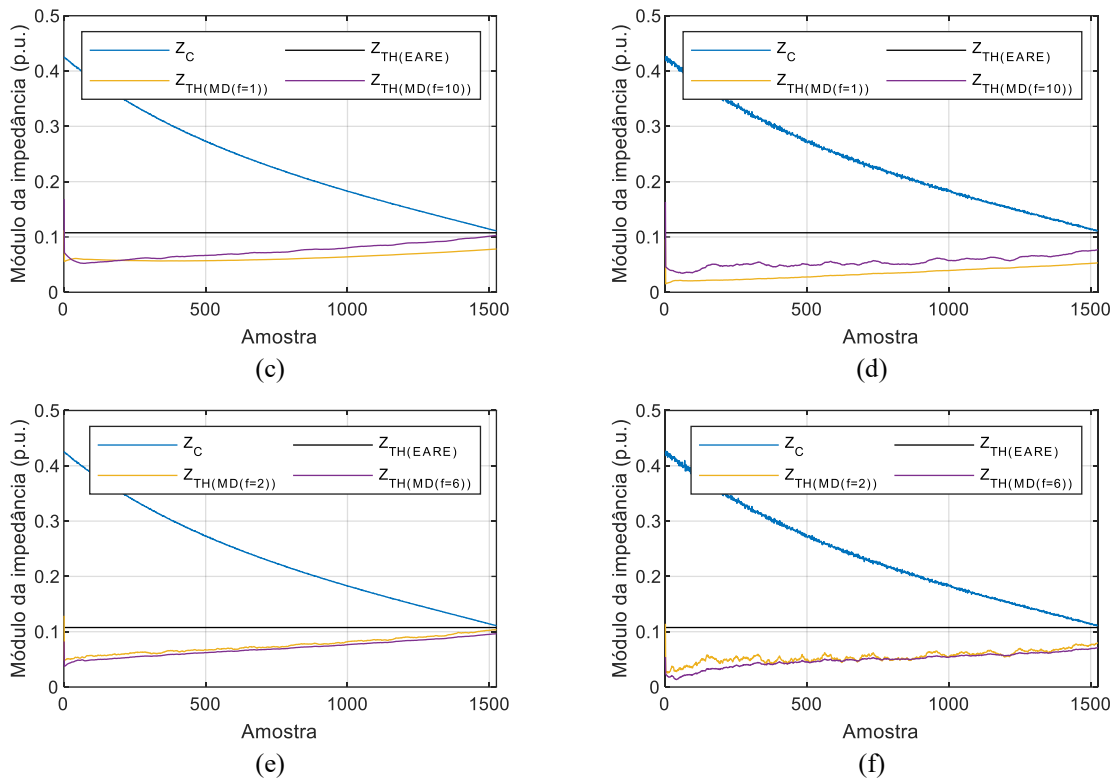


Figura 4.18 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, considerando o uso de: TA1, com desvios padrão de (a) 0,1% e (b) 0,5%; TA2, com desvios padrão de (c) 0,1% e (d) 0,5% e TA3, com desvios padrão de (e) 0,1% e (f) 0,5%

Em termos do desempenho das técnicas de amortecimento, verifica-se que TA3 apresenta melhores resultados, visto que $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ mostra-se mais próximo do valor de referência $|\bar{Z}_{TH(EARE)}|$. A técnica de amortecimento TA1 não se mostra tão eficiente, com a introdução do erro do tipo ruído. Percebe-se que, ao longo do carregamento do sistema, $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ apresenta característica mais estacionária e se mantém distante de $|\bar{Z}_{TH(EARE)}|$, mesmo na região da máxima transferência de potência. Dessa forma, não indicaria que o sistema atingiu o ponto de instabilidade de tensão com a devida exatidão. O desempenho da técnica de amortecimento TA2 é similar ao da TA3, apesar desta se mostrar um pouco mais exata.

Outro ponto favorável em relação à TA3 é o fato de que a adoção dos limites inferior e superior para o fator de ponderação resulta em respostas muito próximas para o $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$, diferenciando-se, basicamente, pelo amortecimento e não pelas magnitudes em si. No caso de TA2, essa característica não é observada, já que a adoção do fator de ponderação no seu limite superior gera uma resposta mais exata e relativamente distante, em termos de magnitude, do cenário em que se considera o limite inferior da faixa definida para o fator de ponderação.

A Figura 4.19 mostra o comportamento da grandeza P_{max} com a inserção de erro do tipo ruído nas medições fasoriais de tensão e de corrente, considerando o uso das técnicas de

amortecimento TA2 e TA3, que apresentaram melhores desempenhos em termos da impedância de Thévenin.

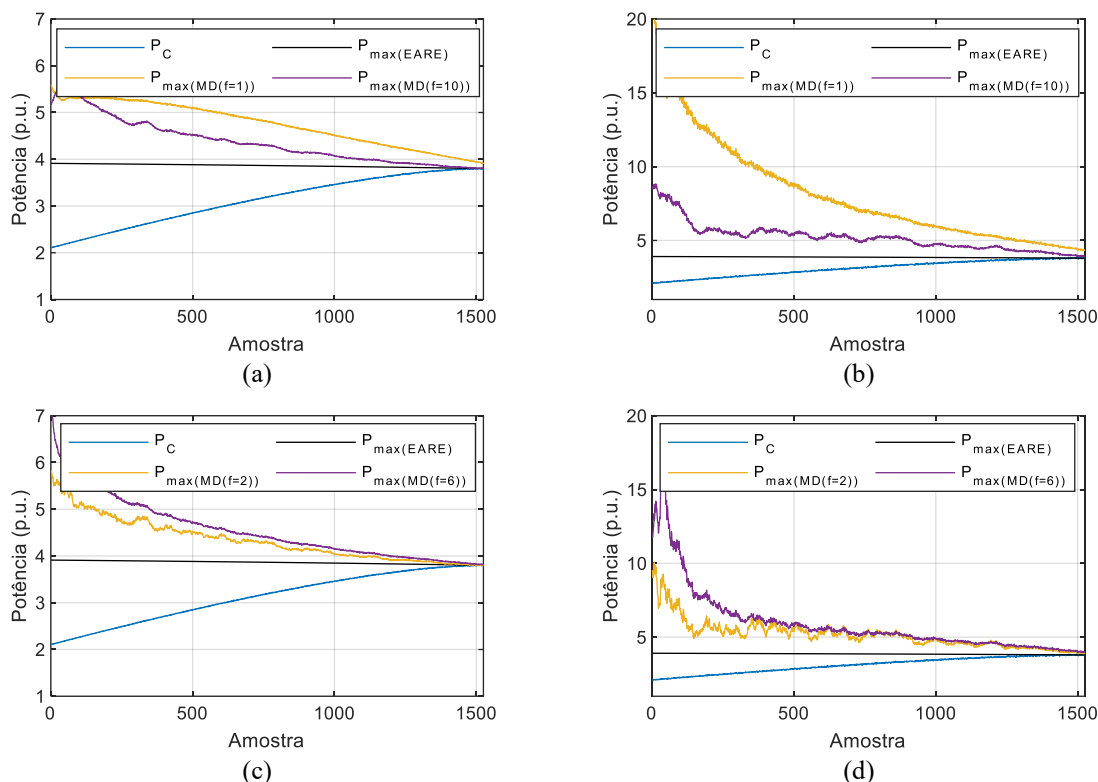


Figura 4.19 – Potências máxima e da carga, referente ao barramento 1103 do sistema RVS, considerando o uso de: TA2, com desvios padrão de (a) 0,1% e (b) 0,5% e TA3, com desvios padrão de (c) 0,1% e (d) 0,5%

Em relação ao comportamento das grandezas $|\bar{Z}_{TH}|$ e P_{max} , a aplicação de TA2 e TA3 levam a resultados muito próximos se forem adotados $f_2 = 10$ e $f_3 = 2$, respectivamente. Entretanto, a análise dos resultados referentes a P_{max} permite confirmar que, de forma geral, TA3 apresenta um melhor desempenho. Os resultados são consistentes e, novamente, verifica-se que tal técnica não é tão sensível à variação dos fatores de ponderação. Independentemente do valor adotado, o valor de P_{max} permanece dentro de uma faixa estreita, que se reduz à medida que se aproxima do ponto de instabilidade de tensão.

Vale ressaltar que, apesar dos resultados aqui descritos se limitarem ao Sistema de Teste RVS, as redes elétricas IEEE 14 Barras, IEEE 30 Barras, Nordic e WSCC 9 Barras também foram avaliadas e mostraram resultados semelhantes.

Diante dos resultados apresentados nesta seção de validação, verifica-se a consistência da metodologia desenvolvida para cálculo do equivalente de redes, dentro de sua proposta. A

técnica de amortecimento TA3 mostra-se mais eficiente e exata, comparada às demais, o que justifica sua escolha a partir deste momento.

É importante mencionar que os resultados obtidos apresentam diferenças em relação à referência adotada neste trabalho, o EARE. As causas dessas diferenças já foram expostas e, apesar delas, a resposta do equivalente tende a um comportamento seguindo a mesma direção definida pelo EARE.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do equivalente de redes proposto neste trabalho, cuja finalidade é a aplicação na avaliação da estabilidade de tensão em tempo real. Devido às especificidades e dinâmica do ambiente de tempo real, verificou-se a necessidade de se avaliar cuidadosamente alguns pontos da metodologia, a fim de se obterem resultados mais exatos para os parâmetros do equivalente.

Este trabalho apresenta um importante passo na concepção de equivalentes de tempo real: a etapa de validação dos seus resultados. Para tal, considera um equivalente de referência nas análises, o EARE, que fornece o embasamento analítico com respeito à consistência dos parâmetros estimados. As filosofias básicas da construção dos equivalentes de tempo real e analítico são bem distintas, tendo em vista as características próprias de cada proposta. Sendo assim, o estudo das diferenças entre os ambientes de comparação foi requerido, inclusive para identificar a razão da resposta obtida para o equivalente de tempo real não corresponder exatamente àquela característica do EARE. Apesar das diferenças, o EARE define uma direção a ser seguida, direção esta muito importante para nortear o ajuste das propostas.

A etapa de validação permitiu verificar a consistência do equivalente desenvolvido, na determinação do ponto de instabilidade de tensão. Além disso, foi possível determinar a técnica de amortecimento, dentre as três inicialmente propostas, que leva a respostas mais exatas do equivalente.

O crescente conhecimento aprofundado das questões de tempo real, incluindo a percepção da carência de uma visão desse ambiente por parte da maioria das abordagens propostas na literatura, impulsiona para o avanço das pesquisas nessa área, acreditando poder contribuir de forma significativa para a mesma.

No próximo capítulo, o equivalente desenvolvido é aplicado considerando diversos cenários de operação: cenários operativos criados através de plataforma SimC, dados reais de medição fasorial e dados produzidos pelo gerador de medições fasoriais.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DO EQUIVALENTE DE REDES PROPOSTO

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo principal deste capítulo é apresentar os resultados da aplicação da metodologia proposta na obtenção do equivalente de redes para avaliação da estabilidade de tensão de sistemas elétricos em tempo real. Visando a uma avaliação ampla e criteriosa do desempenho do equivalente, são considerados três cenários distintos para geração dos dados de entrada. O primeiro corresponde ao ambiente de simulação de cálculo do fluxo de potência, desenvolvido na plataforma SimC, em conjunto com o MATPOWER. Trata-se de um ambiente controlado, onde é possível incluir o efeito do erro do tipo ruído nas medições. A vantagem desse tipo de simulação é a possibilidade de se avaliar o desempenho do equivalente na identificação do ponto de instabilidade de tensão. O segundo cenário considerado assume como dados de entrada aqueles obtidos do Gerador de Dados Fasoriais, proposto neste trabalho, que caracteriza um ambiente que simula medições fasoriais à semelhança de medições reais. No último cenário avaliado, o equivalente é calculado a partir de dados reais de medição obtidos de SMFS.

Após essa etapa de aplicação e avaliação da metodologia desenvolvida, é feita uma comparação com outros métodos propostos na literatura, em conjunto com a referência adotada neste trabalho, o EARE. O objetivo principal da comparação é avaliar a capacidade de filtragem de erros de medição dos métodos. Dentre todas as especificidades do ambiente de medições abordadas no Capítulo 3, o tratamento eficaz dos erros de medição é a característica básica para a aplicabilidade dos equivalentes no monitoramento de sistemas elétricos em tempo real.

Nas simulações de cálculo do fluxo de potência, foram escolhidos os Sistemas de Teste RVS e IEEE 30 Barras para demonstração dos resultados, visto que são redes elétricas usuais em estudos de avaliação da estabilidade de tensão. Já os dados reais de medição de tensão e de corrente utilizados referem-se a dois barramentos de subestações que integram a rede básica do Sistema Interligado Nacional: Taquaril e Tucuruí.

A dimensão da janela de dados foi definida com base na premissa de que os parâmetros do equivalente são considerados inalterados no período definido por essa janela. Desse modo,

a escolha dessa dimensão foi feita com base no passo de aumento de carga e na taxa de amostragem dos dados, nas simulações de fluxo de potência e nas simulações com dados reais de medição, respectivamente. Já o fator de ponderação foi escolhido dentro da faixa definida no Capítulo 4.

É importante ressaltar que os resultados apresentados neste capítulo referem-se à aplicação da técnica de amortecimento TA3, visto que esta se mostrou a mais exata na estimação dos parâmetros do equivalente de redes.

5.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA CONSIDERANDO DIFERENTES AMBIENTES PARA GERAÇÃO DOS DADOS FASORIAIS

Considerando os cenários identificados anteriormente, o desempenho da metodologia proposta é analisado com base em três conjuntos de dados de entrada, obtidos de fontes de naturezas diferentes, para que sua aplicabilidade seja avaliada diante dos aspectos e particularidades envolvidos em cada caso. As análises são feitas a partir do comportamento dos módulos das impedâncias de Thévenin e da carga, que trazem informações importantes e exatas em termos da avaliação da estabilidade de tensão.

5.2.1 Dados de Entrada Obtidos de Simulações de Fluxo de Potência

Para avaliar o comportamento do equivalente desenvolvido, foram realizadas simulações utilizando a plataforma SimC, em conjunto com o MATPOWER. Tal plataforma permite gerar o cenário em que o ponto de máxima transferência de potência é atingido, além de inserir erro do tipo ruído nos dados de tensão e de corrente obtidos do fluxo de potência, incorporando essa característica do ambiente de tempo real.

O cenário de instabilidade de tensão foi obtido por meio do incremento gradual das potências aparentes de todas as barras de carga em um passo de 0,1%, mantendo o fator de potência constante. Os limites de carregamento do sistema foram determinados na curva PV por meio do fluxo de potência continuado, cujas soluções foram contaminadas com o erro do tipo ruído. Para isso, foram adotados desvios padrão de 0%, 0,5% e 1% nos fasores de tensão e de corrente.

Nas simulações considerou-se a janela de aceleração com 5 amostras, durante as 60 primeiras medições e, posteriormente, aumentou-se o tamanho da janela para 60. O uso de uma janela maior é importante para a minimização do erro do tipo ruído nas medições. Como o desvio padrão adotado nos fasores de tensão e de corrente chega ao valor de 1%, considerado relativamente alto, o fator de ponderação foi assumido como $f_3 = 6$, que corresponde ao valor recomendado em casos de medições de baixa qualidade.

Inicialmente, o equivalente desenvolvido foi aplicado considerando o Sistema de Teste RVS, mostrado na Figura 4.6. As barras 1103, 1104 e 1110 foram escolhidas para demonstração dos resultados, por serem consideradas como as mais críticas para instabilidade de tensão, de acordo com a análise do vetor tangente.

A Figura 5.1 ilustra os módulos das impedâncias do equivalente de redes e da carga obtidos da aplicação da metodologia proposta, considerando desvios padrão de 0%, 0,5% e 1% nos fasores de tensão e de corrente. Essa etapa de análises é importante para verificar o desempenho do equivalente em relação ao tratamento do erro do tipo ruído nas medições. Comparando a resposta do equivalente, baseada no parâmetro $|\bar{Z}_{TH}|$, nos cenários com e sem a presença de ruído nas medições, pode-se avaliar dois aspectos interessantes.

O primeiro diz respeito ao comportamento de $|\bar{Z}_{TH}|$ ao longo do carregamento do sistema, que apresenta a mesma tendência nos cenários de medições puras e com desvios padrão, indicando a habilidade de filtragem de erros do tipo ruído da metodologia desenvolvida. Para todas as barras avaliadas, $|\bar{Z}_{TH}|$ apresenta uma característica predominante crescente, caminhando ao encontro de $|\bar{Z}_C|$ à medida que as cargas são incrementadas. No caso do barramento 1103, as impedâncias se igualam nas iterações finais do cálculo do fluxo de potência, indicando a condição de instabilidade de tensão, visto que se trata da barra mais crítica do sistema. Os demais barramentos não chegam a atingir o ponto de máxima transferência de potência, já que o cálculo do fluxo de potência é interrompido quando uma das barras do sistema atinge esse ponto. É importante destacar que a capacidade de filtragem do método desenvolvido apresenta uma pequena redução à medida que se aumenta o desvio padrão nas medições, resultando em uma detecção mais tardia do ponto de instabilidade de tensão.

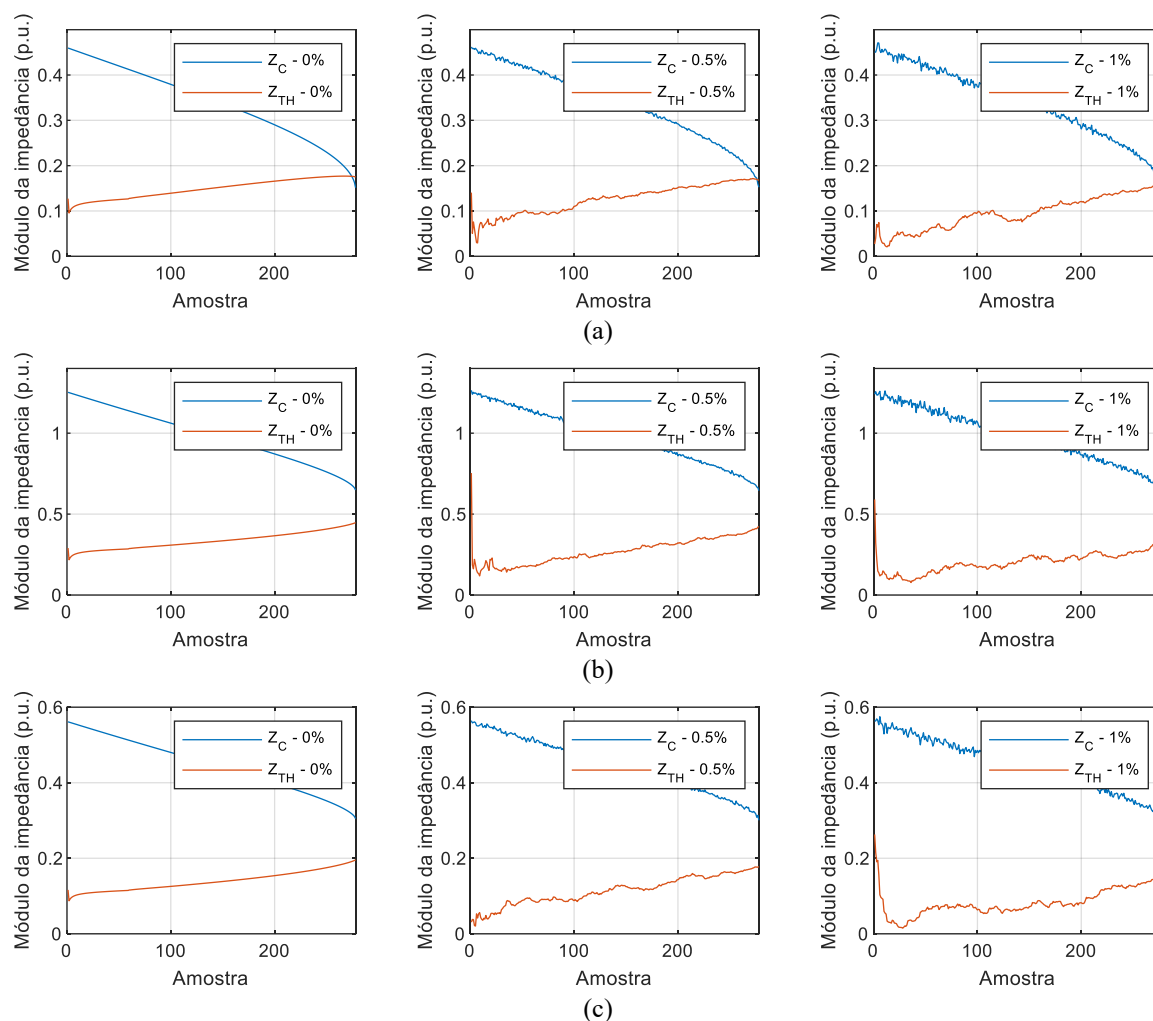


Figura 5.1 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes às barras (a) 1103, (b) 1104 e (c) 1110 do Sistema de Teste RVS, considerando desvios padrão de 0%, 0,5% e 1% nas medições

O segundo aspecto positivo observado na resposta do equivalente está relacionado à sua característica amortecida, resultante da aplicação da ponderação definida pela TA3. Essa técnica cumpre seu objetivo de maneira eficiente, mesmo na presença de erros de medição de valores consideráveis, definidos pelo desvio padrão de 1%. O amortecimento da resposta, aliado à minimização do erro do tipo ruído (resultante do sobredimensionamento da janela de dados), garante ao equivalente características que o tornam uma boa representação para o comportamento real de sistemas elétricos, visto que suas grandezas não apresentam grandes variações em um curto intervalo de tempo.

O Sistema de Teste IEEE 30 Barras também foi usado na avaliação do equivalente deste trabalho. Esse sistema representa uma parte da rede elétrica norte-americana no estado da Virgínia e é composto por 30 barras e 6 geradores, como mostra a Figura 5.2. Os dados do circuito estão disponíveis no Apêndice A. As barras 30, 29 e 26 foram escolhidas para demonstração dos resultados, por serem consideradas como as mais críticas para instabilidade.

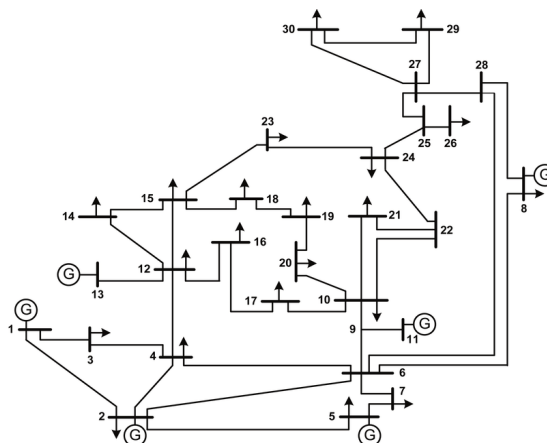


Figura 5.2 – Diagrama unifilar do Sistema de Teste IEEE 30 Barras (ROSAS, 2012)

A Figura 5.3 ilustra os módulos das impedâncias do equivalente de redes e da carga obtidos da aplicação da metodologia proposta, considerando desvios padrão de 0%, 0,5% e 1% nos fasores de tensão e de corrente.

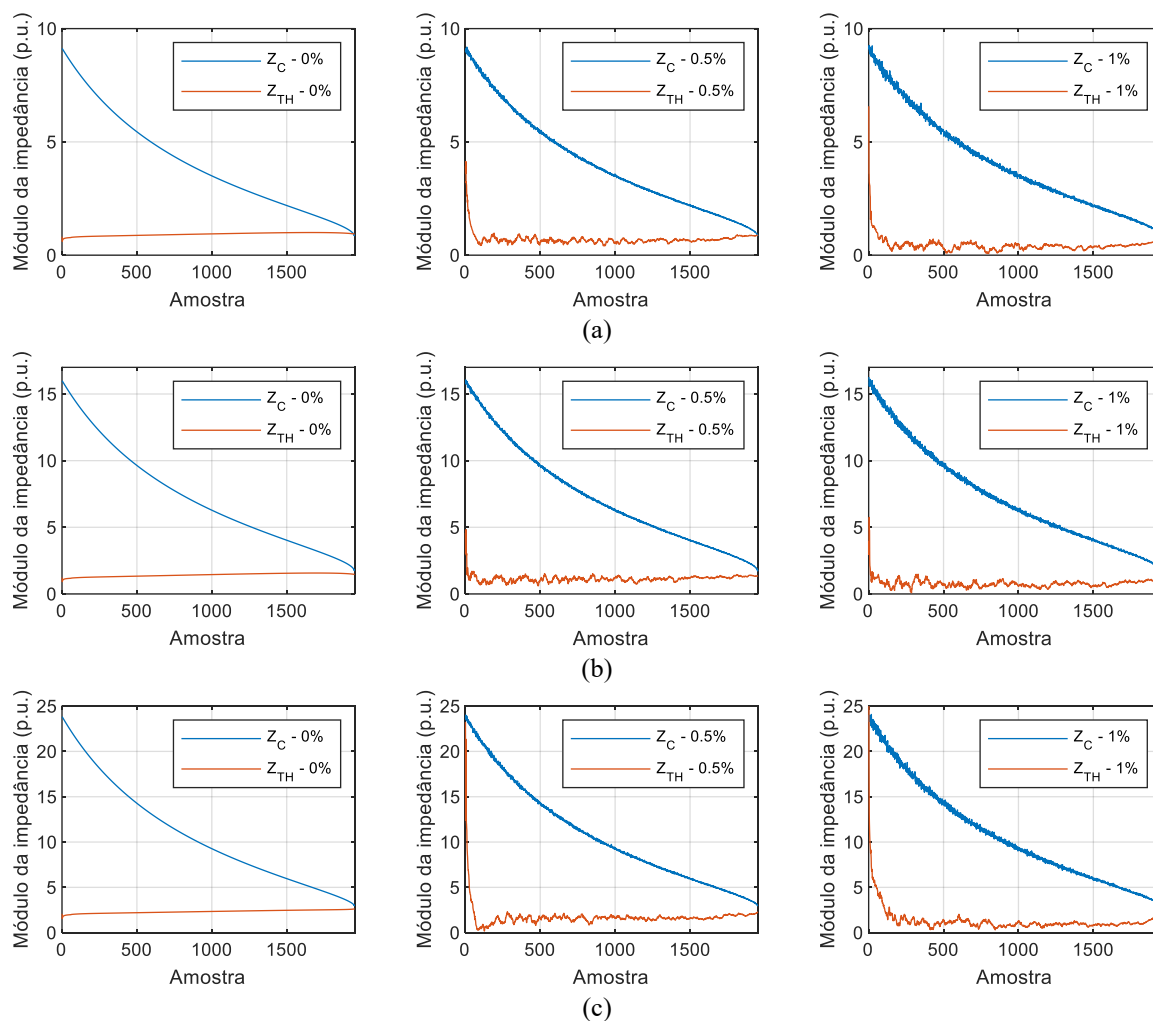


Figura 5.3 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes às barras (a) 30, (b) 29 e (c) 26 do sistema IEEE 30 Barras, considerando desvios padrão de 0%, 0,5% e 1% nas medições

As curvas apresentadas na Figura 5.3 indicam comportamentos de $|\bar{Z}_{TH}|$ semelhantes aos obtidos da aplicação no Sistema de Teste RVS, reforçando as constatações feitas naquela ocasião em relação ao desempenho da metodologia desenvolvida. Portanto, pode-se reafirmar que o equivalente de redes calculado apresenta comportamento condizente com a condição de operação do sistema elétrico, mesmo na presença de erros do tipo ruído nas medições.

5.2.2 Dados de Entrada Obtidos do GDF

A metodologia proposta é, agora, aplicada considerando como dados de entrada aqueles obtidos do GDF. Nessa etapa, dois tipos de situações possíveis de ocorrer no ambiente de tempo real foram simuladas, a fim de verificar os impactos na resposta do equivalente. Tais ocorrências correspondem àquelas apresentadas no Capítulo 3 (variações muito pequenas para a corrente e invariância da potência), em que o equivalente proposto em (VU, 1999) foi avaliado, demonstrando sua fragilidade diante das características do ambiente de medições.

Nas simulações, considerou-se a janela de aceleração com 5 amostras, durante as 50 primeiras medições e, posteriormente, aumentou-se o tamanho da janela para 50. O fator de ponderação assumido foi $f_3 = 6$.

A primeira ocorrência avaliada consiste em provocar variações muito pequenas para a corrente de carga, em intervalos específicos, como mostra a Figura 5.4 (a). Tais alterações não impactam de maneira significativa a resposta do equivalente de redes deste trabalho, conforme indica o comportamento de $|\bar{Z}_{TH}|$, ilustrado na Figura 5.4 (b). Nos intervalos em que a corrente de carga é alterada, $|\bar{Z}_{TH}|$ atinge valores mais elevados, mas rapidamente retorna ao seu valor médio. Apesar dos aumentos detectados, os valores alcançados por $|\bar{Z}_{TH}|$ ainda se encontram distantes dos valores de $|\bar{Z}_C|$, sem risco de uma indicação falsa da condição de instabilidade de tensão. Dessa forma, verifica-se o bom desempenho do equivalente diante dessa condição adversa, diferentemente do observado na avaliação do equivalente de (VU, 1999).

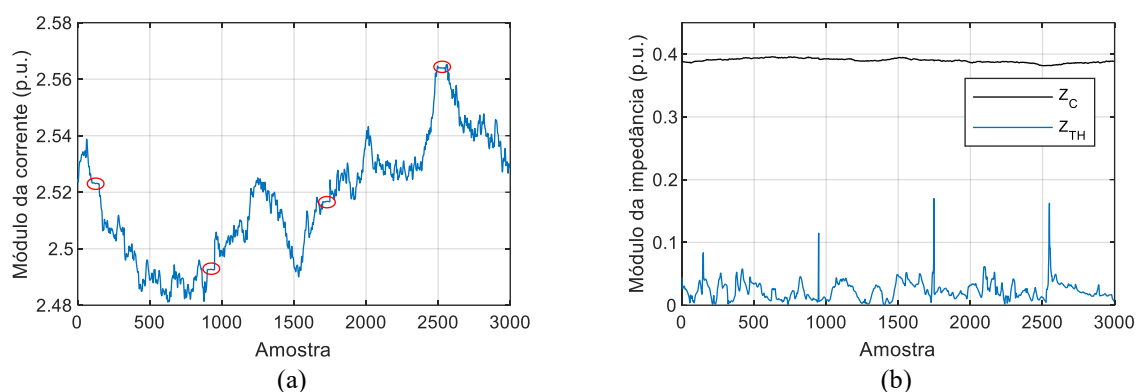


Figura 5.4 – (a) Corrente de carga obtida do GDF e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta

Outra especificidade do ambiente de tempo real avaliada refere-se à circunstância em que a potência da carga permanece constante, apesar de haver variações em medições consecutivas de tensão e de corrente, conforme ilustrado na Figura 5.5 (a). Novamente aqui, verifica-se que a resposta do equivalente não é muito afetada diante dessa ocorrência, apresentando um comportamento condizente com o esperado, em termos da condição de operação do sistema elétrico. Conforme pode ser visto na Figura 5.5 (b), mesmo nos intervalos de amostras em que a potência permanece inalterada, $|Z_{TH}|$ não apresenta uma variação expressiva, mantendo-se em torno do seu valor médio e com as mesmas variações típicas.

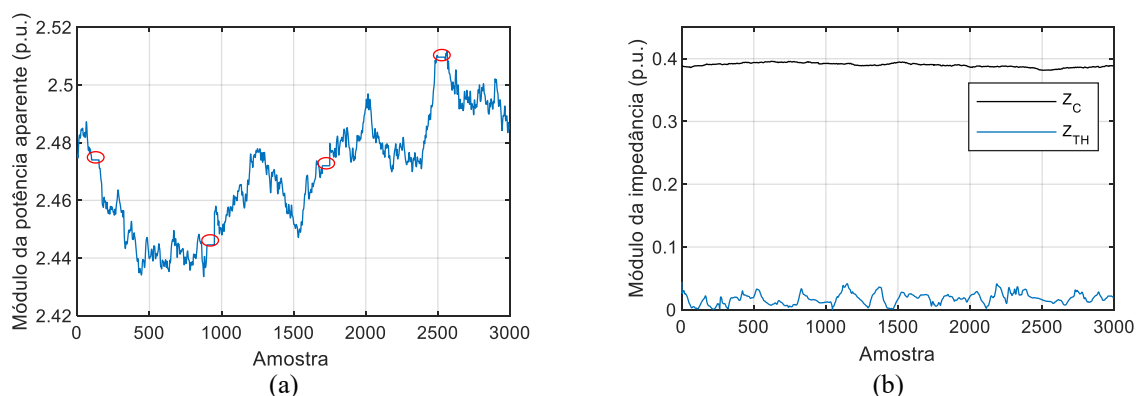


Figura 5.5 – (a) Potência aparente calculada a partir dos dados do GDF e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta

É importante ressaltar que o bom desempenho do equivalente de redes deste trabalho, diante das condições apresentadas anteriormente, se deve ao cuidado depositado no seu desenvolvimento, no que diz respeito à consideração das características do ambiente de tempo real. Em termos práticos, o uso de uma janela de dados de tamanho maior e, principalmente, o emprego da técnica de amortecimento contribuem para a consistência dos resultados obtidos.

5.2.3 Dados de Entrada Obtidos de SMFS

Nas análises apresentadas nesta seção, o equivalente desenvolvido é calculado considerando dados reais de medição obtidos de SMFS. Os dados utilizados foram coletados em duas subestações diferentes, sendo uma sob responsabilidade da CEMIG e outra da Eletrobras Eletronorte. O primeiro conjunto de medições utilizado refere-se ao barramento de Taquaril, de 345 kV, já descrito neste trabalho e ilustrado na Figura 4.4. O segundo, refere-se ao barramento Tucuruí, de 230 kV, cujo diagrama esquemático está ilustrado na Figura 5.6.

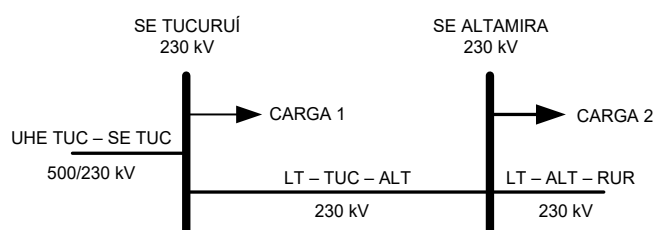


Figura 5.6 – Barramento de Tucuruí, 230 kV

Nas simulações, considerou-se a janela de aceleração com 5 amostras, durante as 150 primeiras medições e, posteriormente, aumentou-se o tamanho da janela para 120. Esse valor foi adotado com base em uma análise de sensibilidade, considerando a taxa de amostragem dos dados de medição. O fator de ponderação assumido foi $f_3 = 6$.

A Figura 5.7 mostra as magnitudes dos fasores de tensão e de corrente coletados no barramento de Taquaril bem como o módulo da impedância de Thévenin obtida da aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho. Os dados de medição utilizados possuem uma taxa de amostragem de 10 medições por segundo e correspondem ao período de, aproximadamente, 10 minutos.

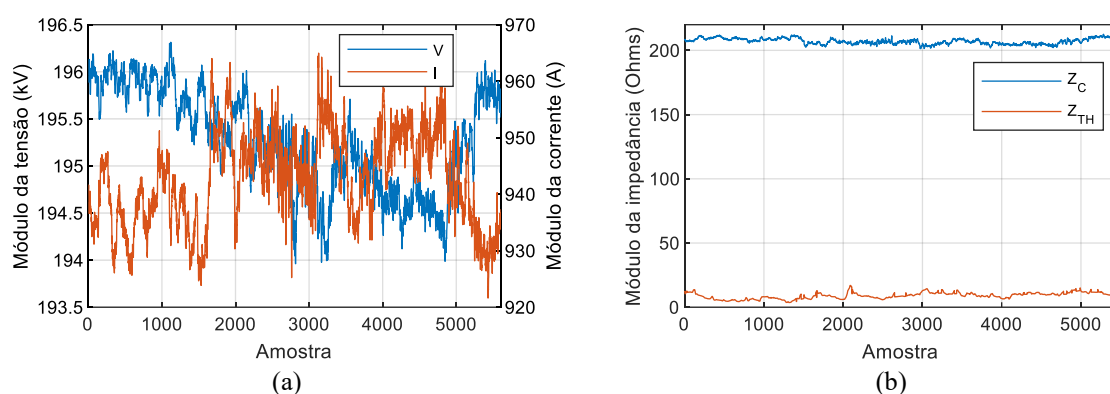


Figura 5.7 – (a) Medições de tensão e de corrente coletadas no barramento de Taquaril e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta

Na Figura 5.7 (b), as amostras relacionadas à janela de aceleração foram removidas para facilitar a visualização do monitoramento na fase amortecida. As análises mostram que a impedância da carga, $|\bar{Z}_C|$, varia dentro de uma estreita faixa de valores, indicando uma condição de operação normal do sistema. A impedância de Thévenin calculada, $|\bar{Z}_{TH}|$, reflete esse comportamento, conforme esperado. Durante o período monitorado, $|\bar{Z}_C|$ varia em torno de 207Ω enquanto $|\bar{Z}_{TH}|$ não excede 17Ω , demonstrando uma distância significativa e quase constante entre as impedâncias. Essa característica indica a segurança do sistema, sem evidência de risco de instabilidade de tensão.

A Figura 5.8 mostra as magnitudes dos fasores de tensão e de corrente coletados no barramento de Tucuruí bem como o módulo da impedância de Thévenin obtida da aplicação da metodologia proposta. Os dados de medição utilizados possuem uma taxa de amostragem de 10 medições por segundo e correspondem ao período de, aproximadamente, 30 minutos.

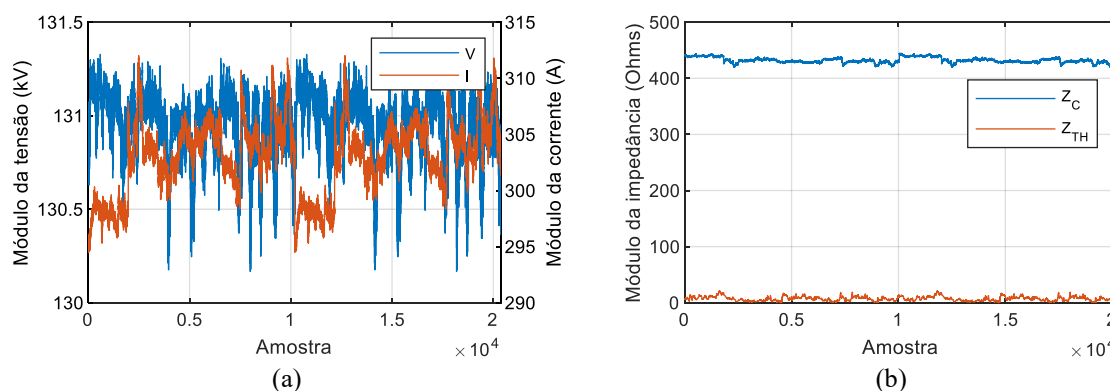


Figura 5.8 – (a) Medições de tensão e de corrente coletadas no barramento de Tucuruí e (b) impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação da metodologia proposta

Os resultados ilustrados na Figura 5.8 (b) indicam comportamentos das impedâncias de Thévenin e da carga semelhantes aos observados na aplicação da metodologia considerando os dados de Taquaril. Novamente, verifica-se o comportamento consistente de $|\bar{Z}_{TH}|$ e a segurança do sistema em termos da estabilidade de tensão, dadas as condições de operação em que o sistema se encontra.

Os dois conjuntos de medição utilizados referem-se a sistemas elétricos reais cujos comportamentos apresentam dinâmica lenta pouco variável durante o dia, não tendo apresentado risco de instabilidade de tensão durante todo o tempo de monitoramento.

5.3 COMPARAÇÃO COM OUTRAS METODOLOGIAS

Finalizada a etapa de aplicação da metodologia, nesta seção, é feita uma comparação dos parâmetros estimados do equivalente deste trabalho com outros obtidos por métodos propostos na literatura. O intuito principal dessa comparação é verificar a habilidade de filtragem dos métodos, considerando dois conjuntos de dados de entrada: fasores de tensão e de corrente obtidos de simulações de fluxo de potência e medições reais provenientes de SMFS. No primeiro caso, é possível incluir a referência adotada neste trabalho, o EARE, nas comparações.

Os métodos escolhidos, para fins de comparação, são os propostos em (VU, 1999), (HAQUE, 2003), (CORSI, 2008) e (DUONG, 2016), cujas ideias básicas estão descritas no Capítulo 2. Todos eles possuem técnicas para tratamento de incerteza das medições e se propõem para aplicação em tempo real. As siglas utilizadas para identificação dos métodos são V, H, C e D, respectivamente, adicionalmente às siglas já definidas, EARE e MD. Os parâmetros de entrada dos métodos foram definidos com base nas sugestões propostas pelos autores.

5.3.1 Dados de Entrada Obtidos de Simulações de Fluxo de Potência

Nessa etapa de simulações, os parâmetros estimados para os equivalentes de rede, com base em medições fasoriais de tensão e de corrente, são comparados com a referência EARE. É fundamental que a preparação dos casos a serem testados vise à redução do impacto das diferenças dos ambientes de comparação, detalhadas no Capítulo 3. Dessa forma, o cenário de

instabilidade de tensão foi obtido por meio do incremento gradual constante da potência da barra em análise, em passos de 0,1%. O sistema elétrico escolhido para simulações foi o Sistema de Teste RVS, cuja barra mais crítica, em termos de estabilidade de tensão, é a 1103. O aumento de carga somente nessa barra é importante para garantir que a premissa de que o sistema permanece inalterado no intervalo de tempo definido pela janela de dados seja respeitada. As soluções do fluxo de potência continuado foram contaminadas com o erro do tipo ruído. Para isso, foram adotados os desvios padrão de 0% e 0,1% nos fasores de tensão e de corrente.

A Figura 5.9 mostra o comportamento dos módulos das impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação dos métodos escolhidos, considerando fasores de tensão e de corrente com desvios padrão de 0% e 0,1%.

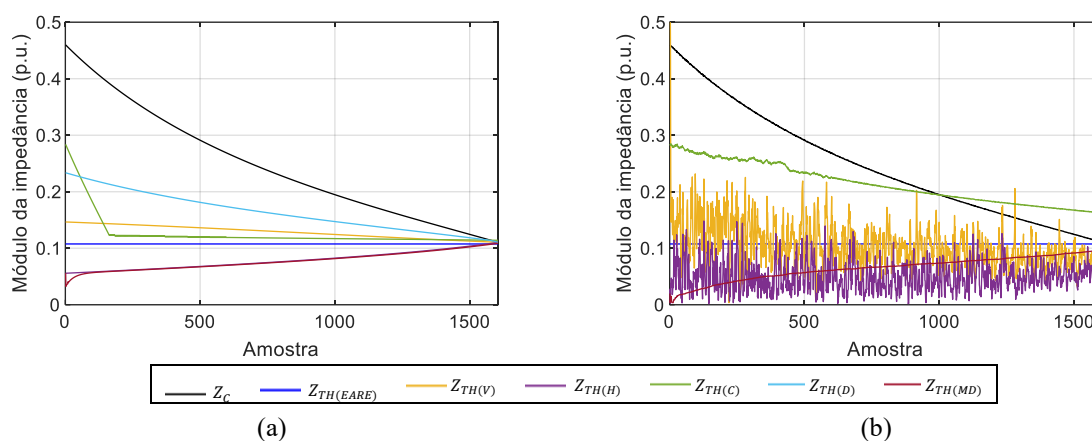


Figura 5.9 – Impedâncias de Thévenin e da carga, referentes ao barramento 1103 do sistema RVS, considerando medições com desvios padrão de (a) 0% e (b) 0,1%

A análise das curvas apresentadas na Figura 5.9 (a) permite tecer observações importantes em relação aos métodos comparados. No cenário de medições puras, com desvio padrão de 0%, todos os métodos indicam a condição de instabilidade de tensão, de forma consistente. A igualdade entre $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ é atingida para os métodos C e D, nas iterações finais do cálculo do fluxo de potência continuado. Para os demais métodos, a igualdade não é atingida, embora $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ apresentem valores muito próximos. Em relação à comparação com a referência adotada, os valores estimados para $|\bar{Z}_{TH}|$ apresentam-se distantes de $|\bar{Z}_{TH(EARE)}|$ no início do carregamento, sendo que essa distância é reduzida à medida que se aproxima do ponto de máxima transferência de potência. Esse comportamento é observado para todos os métodos avaliados, embora o método C apresente um melhor desempenho, visto que se aproxima da referência em iteração anterior aos demais. A descontinuidade observada no comportamento de $|\bar{Z}_{TH(C)}|$, na iteração 163, se deve ao algoritmo de cálculo utilizado, que

considera diferentes valores assumidos para o erro de identificação, dependendo das variações da tensão de Thévenin entre instantes consecutivos. Esse erro de identificação refere-se ao parâmetro que determina a variação da resposta do equivalente durante o processo adaptativo, uma vez que são adicionados ou subtraídos das grandezas calculadas em instantes anteriores, a depender das variações do módulo da carga e da reatância de Thévenin.

A análise dos resultados apresentados na Figura 5.9 (b) permite avaliar a influência das incertezas das medições no comportamento dos equivalentes, representadas pelo desvio padrão de 0,1% nos fasores de tensão e de corrente. O método D apresentou variações abruptas e inconsistentes para a impedância de Thévenin e teve sua curva removida, para facilitar a visualização dos demais. Os métodos V e H não se mostram eficientes no que diz respeito à habilidade de filtragem dos ruídos de medição, por apresentarem variações muito bruscas para $|\bar{Z}_{TH}|$, inconsistentes com o esperado na representação do comportamento do sistema elétrico. No caso desses métodos, mostra-se necessário utilizar grandes janelas de dados para a supressão das variações e minimização do erro do tipo ruído. Entretanto, é importante lembrar que deve haver um compromisso entre o conjunto de medições a serem consideradas e a premissa de que as grandezas do equivalente permanecem constantes para todo esse conjunto.

A impedância de Thévenin estimada pelo método C não apresenta variações bruscas. Atribui-se isto ao fato das grandezas calculadas serem obtidas de somas ou subtrações de erros de identificação, que é um parâmetro controlado e da ordem de 10^{-5} , durante o processo adaptativo. Nesse sentido, independente das incertezas das medições, o Método C varia em pequenos passos o valor de $|\dot{E}_{TH}|$, que corresponde à grandeza na qual os outros valores são baseados. Embora esse método apresente uma resposta amortecida, a grandeza estimada $|\bar{Z}_{TH(C)}|$ não converge para os mesmos valores do caso em que são consideradas medições puras, mostrando a dificuldade de filtragem. Além disso, o método indica uma condição de instabilidade de tensão, de forma equívoca, próximo à iteração 1000, em que $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ se igualam. Portanto, apesar do método C ter se destacado no ambiente de medições puras, ele apresenta fragilidades para aplicação no ambiente de tempo real, na presença de ruídos de medição.

A metodologia proposta neste trabalho se diferencia pela capacidade de filtragem do erro do tipo ruído na determinação do equivalente. O comportamento de $|\bar{Z}_{TH}|$ tende a convergir para os mesmos valores estimados no caso das medições puras. Além disso, a resposta do equivalente mostra-se amortecida, tanto pelo Estimador dos Mínimos Quadrados quanto pelas

ponderações inseridas no cálculo da impedância de Thévenin, tornando os parâmetros compreensíveis e consistentes para avaliação da estabilidade de tensão de sistemas elétricos.

5.3.2 Dados de Entrada Obtidos de SMFS

A comparação do equivalente desenvolvido neste trabalho com outras propostas de equivalentes também é feita considerando o uso de medições fasoriais reais de tensão e de corrente. Tais medições referem-se às mesmas utilizadas da Seção 5.2.3, coletadas no barramento de Taquaril, de 345 kV. Esse conjunto de dados se caracteriza por apresentar uma medição de tensão e nove medições de corrente, referentes a cada um dos ramos conectados ao barramento. Dessa forma, torna-se necessário aplicar um método de cálculo de carga-equivalente, visto que não há uma carga definida. Dentre os equivalentes escolhidos para comparação, somente o método C apresenta uma técnica de cálculo de carga. Para que a comparação possa ser feita com os demais métodos, considerou-se a Metodologia de Carga 1, adotada neste trabalho e descrita na Seção 4.2.2, para determinação da carga-equivalente do barramento.

Nas simulações, os parâmetros de entrada dos métodos foram definidos com base nas sugestões propostas pelos autores, exceto a dimensão da janela de dados para os métodos V e H. Conforme visto nas simulações de fluxo de potência, ao se considerar apenas duas medições de tensão e de corrente no cálculo do equivalente, as respostas apresentam variações abruptas. Portanto, nessa etapa de simulações, optou-se por expandir o tamanho da janela de dados para 120, que corresponde ao mesmo valor assumido na aplicação do equivalente deste trabalho.

Os módulos das impedâncias de Thévenin e da carga obtidas da aplicação dos métodos são mostradas na Figura 5.10. Novamente, o método D apresentou variações abruptas e inconsistentes para a impedância de Thévenin e teve sua curva removida, para facilitar a visualização dos demais.

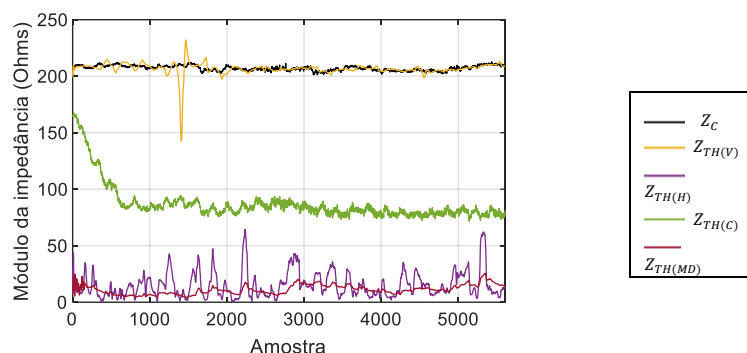


Figura 5.10 – Impedâncias de Thévenin e da carga considerando medições fasoriais coletadas no barramento de Taquaril

Conforme pode ser observado pela análise das curvas da Figura 5.10, os parâmetros estimados apresentam comportamentos bem distintos para cada um dos métodos avaliados. O parâmetro $|\bar{Z}_{TH(V)}|$ se caracteriza por um comportamento inconsistente, tendo em vista que caminha junto com $|\bar{Z}_C|$, indicando uma condição equivocada de instabilidade de tensão ao longo de todo o período monitorado. O método H apresenta variações bruscas para $|\bar{Z}_{TH(H)}|$, mesmo considerando uma janela de dados expandida, resultando em uma avaliação inconsistente em termos de estabilidade de tensão. As respostas dos equivalentes obtidos da aplicação do método C e da metodologia proposta neste trabalho (MD) não apresentam variações muito bruscas, indicando, a princípio, a capacidade de filtragem do erro do tipo ruído, em ambos os casos. Entretanto, pode-se afirmar que o equivalente deste trabalho apresenta melhor desempenho, com base em observações importantes em relação à resposta de $|\bar{Z}_{TH}|$.

A aplicação da janela de aceleração proposta na metodologia desenvolvida favorece a convergência rápida e exata, no início das simulações, para o valor amortecido do parâmetro $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$. O método C apresenta uma variação significativa nos instantes iniciais, variando de aproximadamente 165Ω a 80Ω , em um intervalo de 1000 amostras, até atingir o valor de convergência de $|\bar{Z}_{TH(C)}|$. O comportamento de $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ possui uma característica mais amortecida em relação ao obtido da aplicação do método C, caracterizando outro aspecto positivo, visto que, em condições normais de operação, as grandezas do sistema elétrico de potência não apresentam grandes variações em um curto intervalo de tempo. Os valores médios estimados de $|\bar{Z}_{TH(C)}|$ e $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ mostram-se bem distintos, sendo que o primeiro se encontra na faixa de 80Ω e o segundo em torno de 10Ω . Não é possível afirmar, com exatidão, qual desses valores é mais consistente, já que não há um valor de referência para comparação. Entretanto, duas constatações favorecem o equivalente deste trabalho. A primeira refere-se ao fato do método C, na etapa de simulações pelo fluxo de potência, identificar um cenário de

instabilidade em condição operativa onde esta não ocorre, indicando um aspecto bem conservador. Novamente aqui, esse aspecto é observado, em que $|\bar{Z}_{TH(C)}|$ apresenta valores maiores e mais próximos a $|\bar{Z}_C|$ em comparação a $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$. A segunda constatação é que os valores obtidos de $|\bar{Z}_{TH(MD)}|$ estão em sintonia com o valor médio de $|\bar{Z}_{TH(H)}|$ obtido da aplicação do método H, apesar das variações bruscas características desse método.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, a metodologia desenvolvida é aplicada considerando três conjuntos distintos de dados de entrada: fasores de tensão e de corrente obtidos do cálculo do fluxo de potência, do Gerador de Dados Fasoriais e de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada. Em todos os casos, verifica-se a consistência do equivalente proposto, no que diz respeito à indicação da condição de instabilidade de tensão, com destaque ao tratamento de erros inerentes ao processo de medição fasorial.

A etapa mais importante na avaliação da estabilidade de tensão em tempo real é a determinação do equivalente. O comportamento dos parâmetros desse equivalente influencia diretamente no cálculo da margem de estabilidade de tensão e no desempenho de índices previsores de instabilidade. Portanto, estes devem caracterizar, da forma mais exata possível, as condições de operação do sistema elétrico. Nesse contexto, se enquadra a metodologia desenvolvida neste trabalho.

A resposta dos parâmetros do equivalente obtidos da aplicação da metodologia proposta foi comparada com aquelas obtidas de outros métodos de cálculo do equivalente, encontrados na literatura. Apesar desses métodos se proporem à aplicação em tempo real, são significativamente impactados pelos desafios desse ambiente devido às limitações em seus desenvolvimentos. Os equivalentes escolhidos para fins de comparação mostram-se impossibilitados de serem utilizados em situações práticas devido às variações bruscas nas suas respostas ou por levarem a avaliações de estabilidade de tensão incorretas, tanto em cenários simulados na presença de erro do tipo ruído quanto em cenários de medições reais. O bom desempenho do equivalente desenvolvido diante de tais situações mostra a sua consistência e sua aplicabilidade no ambiente de tempo real.

CAPÍTULO 6

EQUIVALENTES GLOBAL E INDIVIDUAIS EM BARRAMENTOS COM MÚLTIPLOS RAMOS: UMA PROPOSTA COMPLEMENTAR

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A investigação relacionada às barras com múltiplos ramos, por meio do conceito de carga-equivalente, ampliou a perspectiva de aplicação dos equivalentes, independentemente de alimentarem ou não uma carga específica. Neste capítulo é apresentada uma proposta que conjuga as informações relativas à barra sob análise e aquelas relacionadas aos ramos a ela conectados.

Adicionalmente aos estudos que consideram a carga-equivalente vista pela barra, a proposta consiste em se calcularem equivalentes individuais relacionados aos ramos incidentes, caracterizando assim duas análises que se complementam:

- Visão global da barra: obtenção do equivalente de redes em barras com múltiplos ramos, considerando a modelagem de carga-equivalente.
- Visão individual dos ramos: obtenção dos equivalentes individuais dos ramos, dadas as medições de corrente em cada um deles e a de tensão da barra.

A abordagem detalhada neste capítulo visa a ampliar o uso da metodologia proposta neste trabalho, mostrando que, em conjunto, as análises global e individual por ramos podem contribuir de forma significativa para o monitoramento e a avaliação da estabilidade de tensão dos barramentos da rede elétrica na operação em tempo real.

6.2 APLICAÇÃO DOS EQUIVALENTES GLOBAL E INDIVIDUAIS

As Metodologias de Carga 1 e 2 (MC1 e MC2), adotadas na determinação da carga-equivalente do equivalente desenvolvido neste trabalho, foram propostas em (RIBEIRO, 2011) e encontram-se descritas na Seção 4.2.2. As análises feitas no capítulo anterior mostram o bom desempenho do equivalente, considerando o uso dessas metodologias. É importante lembrar que, apesar dos resultados apresentados se referirem à MC1, a aplicação de MC2 proporciona resultados semelhantes.

Tendo em vista que, em medições fasoriais coletadas nos barramentos com múltiplos ramos, há uma medição de corrente para cada ramo e uma de tensão do barramento, verifica-se a possibilidade de se obterem equivalentes global da barra e individuais dos ramos que se caracterizam como carga elétrica. Em sintonia com a definição de carga-equivalente adotada neste trabalho, partindo da premissa de que a potência ativa flui dos geradores em direção aos consumidores, a carga é definida como as potências ativas positivas que partem da barra monitorada, sendo a potência reativa ditada pelo sinal positivo da potência ativa.

O equivalente calculado em barras com múltiplos ramos, considerando o conceito de carga-equivalente, traz uma informação global a respeito da estabilidade de tensão destas barras, com base no comportamento das impedâncias de Thévenin e da carga-equivalente. Contudo, a informação global sobre a barra não permite observar a individualidade de cada ramo nela incidente, ou seja, identificar qual dos ramos apresenta um fluxo de potência que cause maior impacto na condição de operação da barra em análise. Os equivalentes individuais dos ramos visam a informar sobre tal individualidade, atuando como complementos ao equivalente global.

É importante observar que a informação global de uma barra não constitui uma “soma” das informações obtidas pelos equivalentes individuais. O equivalente individual de um ramo informa sobre a condição operativa específica desse ramo. Por exemplo, ao se calcular a potência de máximo carregamento utilizando o equivalente individual de um ramo, tal valor indica o limite da potência desse ramo, considerando fixa a potência dos demais. Já a potência de máximo carregamento referente ao equivalente global indica o valor limite da potência dessa barra, considerando a variação de potência em todos os ramos conectados a ela.

Para exemplificar a aplicação dos equivalentes global e individuais, são considerados um sistema de teste, nas simulações envolvendo fluxo de potência, e um sistema elétrico real, a partir de medições fasoriais coletadas em barramento específico.

6.2.1 Dados de Entrada Obtidos de Simulações de Fluxo de Potência

A proposta do cálculo dos equivalentes é aplicada em duas barras específicas do Sistema de Teste RVS: 113 e 123. Para uma melhor visualização das características dessas barras, na Figura 6.1 é apresentada a parte do sistema elétrico RVS onde estão inseridas. Cada um dos ramos conectados aos barramentos foi numerado para facilitar as análises dos resultados.

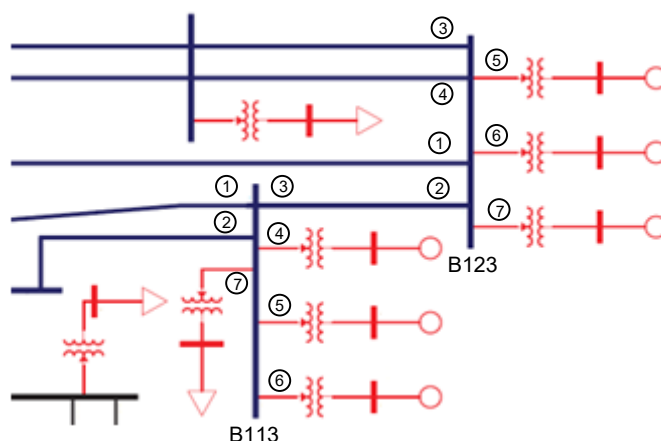


Figura 6.1 – Parte do Sistema de Teste RVS onde estão inseridos os barramentos 113 e 123

O cenário de instabilidade de tensão foi obtido por meio do incremento gradual das potências aparentes de todas as barras de carga em um passo de 0,1%, mantendo o fator de potência constante. Nessa etapa de simulações, não foi considerada a presença de erro do tipo ruído nas medições, já que não é o foco da presente análise. No cálculo dos equivalentes, considerou-se a janela de dados com 10 medições e o fator de ponderação $f_3 = 6$.

A primeira barra estudada, 113, possui sete ramos incidentes, sendo três referentes a transformadores ligados a geradores, três a linhas de transmissão e um a transformador conectado a uma carga. A Figura 6.2 mostra as potências ativas que fluem através de cada um desses ramos. Conforme pode ser observado, os ramos 1, 2 e 7 apresentam potência ativa positiva, indicando fluxo de potência saindo da barra, o que os caracteriza como sendo destinados à alimentação de cargas. Eles se referem a duas linhas de transmissão e ao transformador conectado a uma carga, respectivamente. O aumento de potência mais significativo corresponde ao ramo 7, o que era esperado, visto que há uma carga conectada em sua extremidade. Os demais ramos referem-se aos três transformadores ligados aos geradores e à terceira linha de transmissão e, por isso, apresentam fluxo de potência entrando na barra, indicando suprimento de energia. As curvas da potência ativa dos ramos 4, 5 e 6 estão sobrepostas pelo fato de corresponderem a transformadores ligados a geradores com fluxos de energia semelhantes. Diante dos fluxos de potência ativa apresentados, verifica-se a possibilidade de se calcularem equivalentes individuais para os ramos 1, 2 e 7.

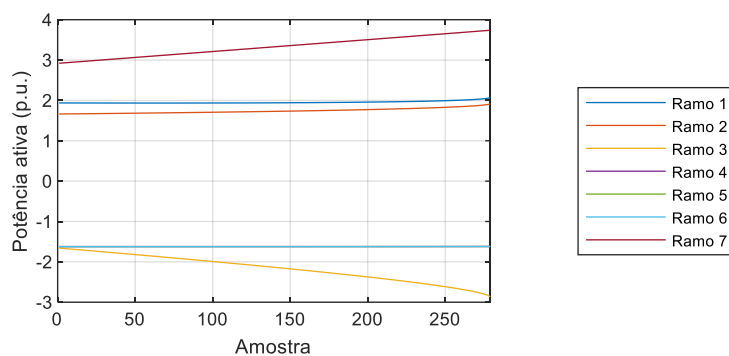


Figura 6.2 – Fluxo de potência ativa dos ramos conectados à barra 113 do sistema RVS

A Figura 6.3 mostra os módulos das impedâncias de Thévenin e da carga calculadas para o barramento 113 e para os ramos 1, 2 e 7.

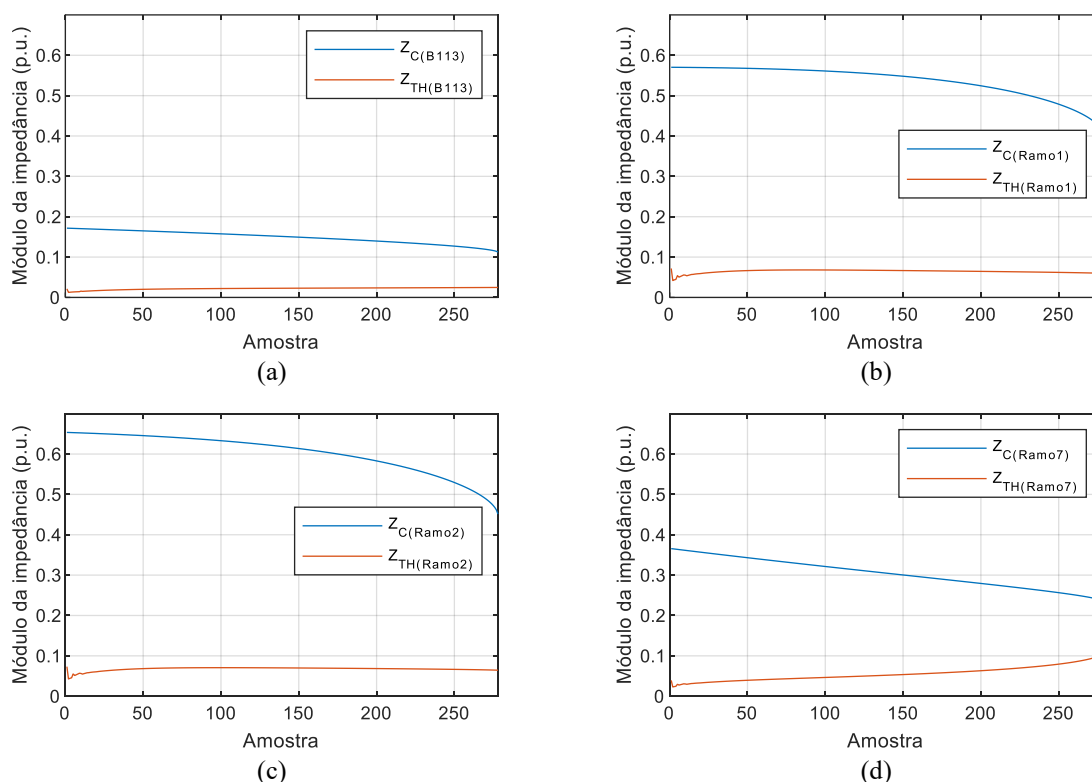


Figura 6.3 – Impedâncias de Thévenin e da carga referentes (a) à barra 113, (b) ao ramo 1, (c) ao ramo 2 e (d) ao ramo 7

A análise global da barra 113, através das curvas da Figura 6.3 (a), mostra que a impedância de Thévenin, $|\bar{Z}_{TH}|$, permanece praticamente constante ao longo do carregamento do sistema, com uma variação bem pequena, enquanto a impedância da carga, $|\bar{Z}_C|$, diminui, indicando o aumento da corrente. Consequentemente, a distância entre $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ diminui à medida que se aumenta a potência das cargas. Ao fim do carregamento, verifica-se que a barra

113 não atinge o ponto de máxima transferência de potência, embora apresente uma redução da margem de estabilidade de tensão, indicada pela distância entre as impedâncias.

Ao se avaliar o comportamento das impedâncias para os ramos 1 e 2, ilustradas nas Figura 6.3 (b) e (c), respectivamente, verifica-se uma melhor condição em termos da estabilidade de tensão, indicando uma margem em relação ao aumento de potência nesses ramos, já que $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ mostram-se bem distantes ao fim do carregamento. No caso do ramo 7, observa-se o aumento da impedância de Thévenin e a redução da impedância da carga, conforme mostra a Figura 6.3 (d). Esse comportamento era esperado, visto que há uma carga conectada na extremidade desse ramo, cujo aumento provoca um impacto significativo no equivalente individual calculado e na impedância da carga. Nas iterações finais do fluxo de potência, $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ mostram-se relativamente próximos. Ao se compararem os resultados referentes aos equivalentes individuais, verifica-se que o ramo 7 é mais crítico em relação à estabilidade de tensão, visto que $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ encontram-se mais próximos ao longo do carregamento. Portanto, pode-se dizer que um possível aumento de potência nos ramos 1 e 2 não comprometeria tanto a condição de operação da barra 113 quanto o aumento de potência no ramo 7.

Diferentemente da barra 113, a segunda barra avaliada não possui ramo que alimenta diretamente uma carga. Conforme pode ser observado na Figura 6.1, o barramento 123 possui sete ramos incidentes, sendo quatro referentes a linhas de transmissão e três a transformadores ligados a geradores. A Figura 6.4 mostra as potências ativas que fluem através desses ramos.

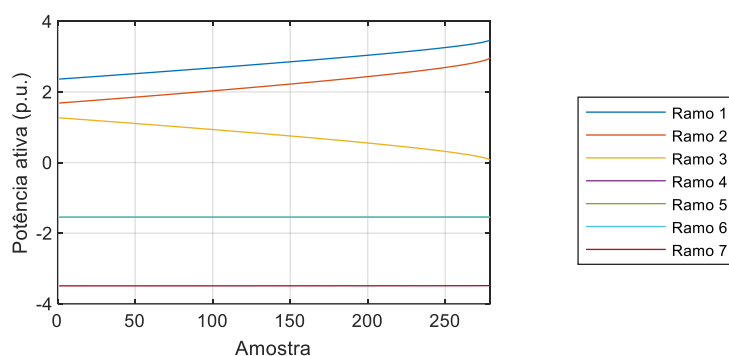


Figura 6.4 – Fluxo de potência ativa dos ramos conectados à barra 123 do sistema RVS

Na Figura 6.4, as curvas da potência ativa dos ramos 5 e 6 estão sobrepostas pelo fato de que estes se referem a transformadores ligados a geradores que possuem as mesmas características. O mesmo acontece com as potências dos ramos 3 e 4, que correspondem a linhas de transmissão com fluxos semelhantes. Os quatro ramos referentes às linhas de transmissão

apresentam potência ativa positiva, indicando o fluxo de potência saindo da barra em direção à alimentação de cargas. Ao longo do carregamento, a potência dos ramos 1 e 2 aumenta enquanto a dos ramos 3 e 4 diminui. Os demais ramos, referentes a transformadores ligados a geradores, possuem fluxo de potência entrando no barramento, o que caracteriza suprimento de energia, como esperado. Diante dessas condições do fluxo de potência, é possível calcular equivalentes individuais para os ramos 1, 2, 3 e 4.

A Figura 6.5 mostra os módulos das impedâncias de Thévenin e da carga calculadas para o barramento 123 e para os ramos 1, 2, 3 e 4.

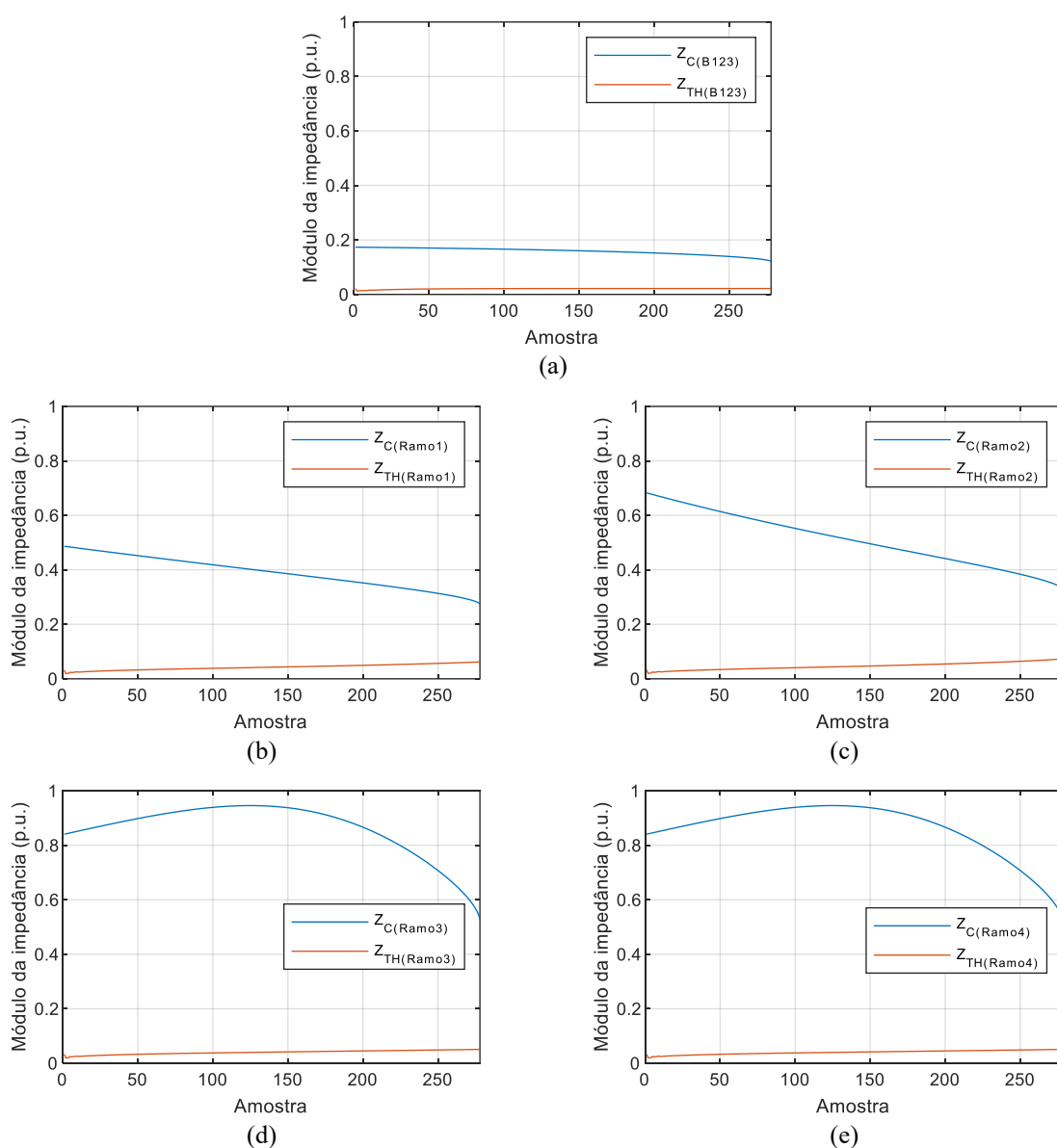


Figura 6.5 – Impedâncias de Thévenin e da carga referentes (a) à barra 123, (b) ao ramo 1, (c) ao ramo 2, (d) ao ramo 3 e (e) ao ramo 4

Novamente aqui, a análise geral da barra 123, por meio das curvas ilustradas na Figura 6.5 (a), mostra a impedância de Thévenin praticamente constante ao longo do carregamento do sistema enquanto a impedância da carga diminui, caracterizando o aumento da corrente. Assim, a distância entre $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ se reduz à medida que se aumenta a potência das cargas. Nas iterações finais do fluxo de potência, observa-se a diminuição da margem de estabilidade de tensão, pela menor distância entre as impedâncias. É importante ressaltar que, desde o início do carregamento, a impedância da carga da barra 123 apresenta um valor menor, comparada com as impedâncias da carga dos ramos, visto que representa a carga total equivalente.

As curvas apresentadas nas Figura 6.5 (b) e (c), referentes aos ramos 1 e 2, respectivamente, mostram as impedâncias de Thévenin com aspecto crescente e as impedâncias da carga diminuindo. Tais comportamentos são coerentes, visto que se referem aos ramos das linhas de transmissão que apresentam aumento das potências ativas ao longo do carregamento. Devido às distâncias características entre $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ nas iterações finais do fluxo de potência, observa-se que o ramo 1 apresenta condição de operação mais crítica, em relação à estabilidade de tensão, comparado ao ramo 2. Em relação aos ramos 3 e 4, as curvas que representam as impedâncias são semelhantes, conforme ilustrado nas Figura 6.5 (d) e (e), tendo em vista que se trata de linhas de transmissão com as mesmas características de fluxo de potência. Em ambos os casos, a impedância da carga aumenta nos instantes iniciais e, posteriormente, diminui, indicando o comportamento contrário da corrente. Ao fim do carregamento, $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ mostram-se bem distantes, indicando uma melhor condição de operação destes ramos, em termos da estabilidade de tensão.

6.2.2 Dados de Entrada Obtidos de SMFS

O cálculo dos equivalentes também é feito considerando dados reais de medição fasorial, a fim de avaliar suas aplicabilidades em ambiente de tempo real. Os dados são os mesmos utilizados no capítulo anterior, coletados no barramento de Taquaril, de 345 kV. O diagrama esquemático desse barramento é novamente ilustrado na Figura 6.6, para inclusão da numeração dos ramos. Como pode ser observado, há nove ramos incidentes, sendo quatro referentes a linhas de transmissão e cinco a transformadores de potência.

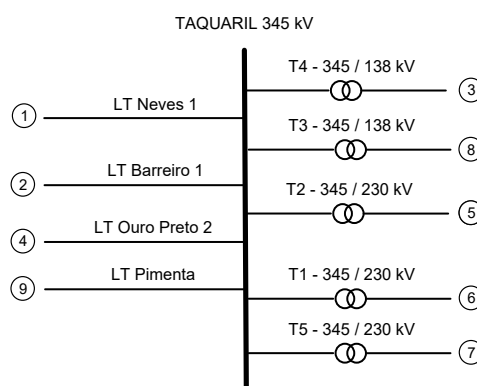


Figura 6.6 - Barramento de Taquaril, de 345 kV, com numeração dos ramos

Na obtenção dos equivalentes considerou-se a janela de aceleração com 5 amostras, durante as 150 primeiras medições e, posteriormente, aumentou-se o tamanho da janela para 120. O fator de ponderação assumido foi $f_3 = 6$.

A potência ativa que flui por cada um dos ramos conectados ao barramento de Taquaril está ilustrada na Figura 6.7.

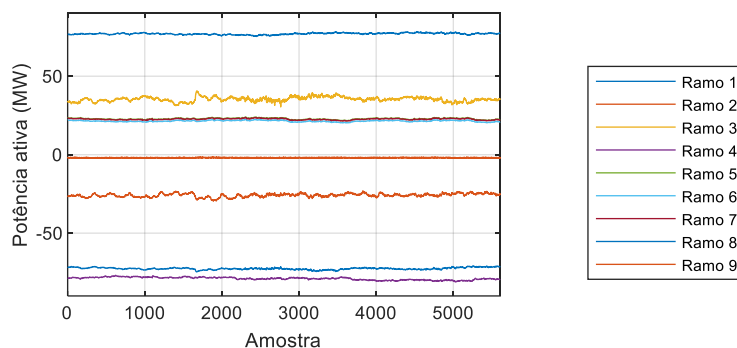


Figura 6.7 – Fluxo de potência ativa dos ramos conectados ao barramento de Taquaril

Conforme pode ser observado, os ramos 3, 5, 6, 7 e 8 apresentam potência ativa positiva, com fluxo de potência saindo do barramento de Taquaril em direção à alimentação de cargas. Portanto, é possível calcular os equivalentes individuais para esses ramos. A Figura 6.8 mostra os módulos das impedâncias de Thévenin e da carga calculadas para o barramento de Taquaril e para os ramos 3, 5, 6, 7 e 8.

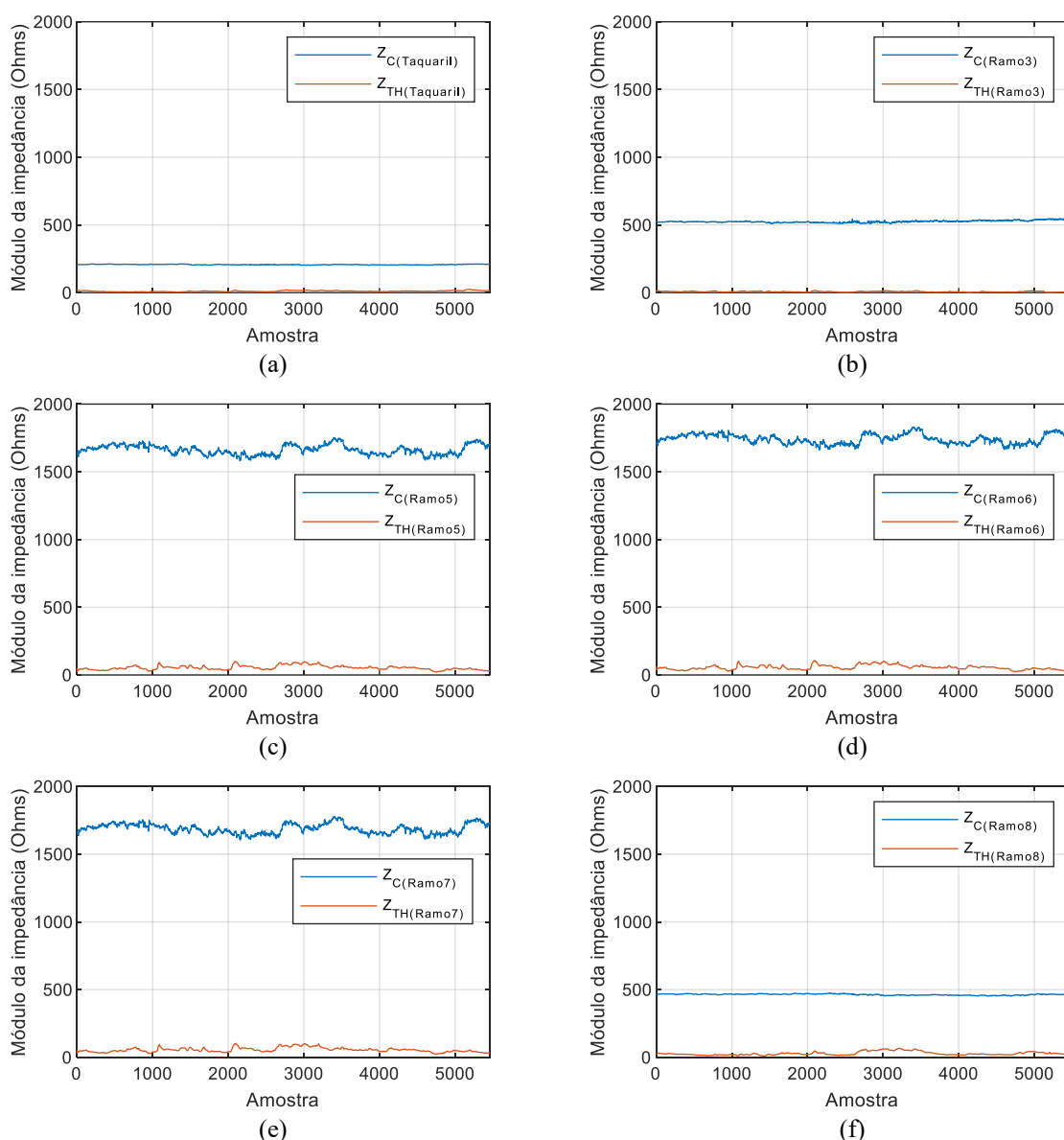


Figura 6.8 – Impedâncias de Thévenin e da carga referentes (a) ao barramento de Taquaril, (b) ao ramo 3, (c) ao ramo 5, (d) ao ramo 6, (e) ao ramo 7 e (f) ao ramo 8

Por meio da análise das curvas apresentadas na Figura 6.8 é possível identificar quais ramos indicam condição mais crítica em relação à estabilidade de tensão. Os ramos 5, 6 e 7 apresentam comportamentos semelhantes para as impedâncias, sendo que $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ encontram-se bem distantes entre si, sugerindo uma condição segura de operação. A título de informação, os valores de $|\bar{Z}_{TH}|$ estão na faixa de 55Ω enquanto $|\bar{Z}_C|$ gira em torno de 1700Ω . No caso dos ramos 3 e 8, as distâncias entre as impedâncias mostram-se menores. A impedância $|\bar{Z}_{TH}|$ calculada para o ramo 3 varia em torno de 7Ω enquanto $|\bar{Z}_C|$ encontra-se na faixa de 525Ω . Já no ramo 8, $|\bar{Z}_{TH}|$ e $|\bar{Z}_C|$ giram em torno de 29Ω e 464Ω , respectivamente. Mesmo com a redução da distância entre as impedâncias, sugere-se uma condição de operação segura, sem risco de instabilidade de tensão. Diante dessas considerações, pode-se dizer que os ramos

3 e 8 são mais críticos e um possível aumento da potência que flui através deles poderia causar maior impacto na condição de operação do barramento de Taquaril, comparados aos demais.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é apresentada uma nova perspectiva para a análise de estabilidade de tensão, introduzindo as visões de equivalente global da barra sob análise e de equivalentes individuais dos ramos nela incidentes. O equivalente global da barra considera uma carga-equivalente vista pela mesma. Os equivalentes individuais dos ramos incidentes são calculados para aqueles que apresentam fluxo de potência ativa positivo, caracterizando-os como destinados à alimentação de cargas.

Visando a mostrar a relevância do uso conjunto dos equivalentes global e individuais, estes foram aplicados considerando dados de entrada provenientes de simulações de fluxo de potência e medições reais de SMFS. Os resultados apresentados mostram a consistência desses equivalentes que viabilizam o monitoramento da barra e a identificação dos ramos mais críticos a ela conectados, em termos da estabilidade de tensão.

A determinação dos equivalentes global e individuais traz significativa contribuição para a operação em tempo real dos sistemas de potência. O monitoramento das grandezas elétricas obtidas com a aplicação desses equivalentes torna-se extremamente importante, para se evitarem situações críticas de instabilidade.

Finalizados os Capítulos 4, 5 e 6, considera-se cumprido o objetivo principal da pesquisa de doutorado, o qual engloba a concepção de um equivalente de redes em tempo real que represente de maneira consistente o comportamento dinâmico de sistemas elétricos e que possibilite a avaliação da estabilidade de tensão.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

O objetivo da tese consistiu no desenvolvimento de um equivalente de redes em tempo real que representasse o comportamento dinâmico de sistemas elétricos, com efetividade e consistência, garantindo aplicabilidade e bom desempenho no monitoramento da estabilidade de tensão.

Para cumprir com êxito esse objetivo, duas vertentes foram estudadas e trabalhadas, em nível aprofundado, considerando os diversos aspectos envolvidos. A primeira se refere ao desenvolvimento do equivalente em si, com foco na técnica aplicada para estimação dos parâmetros. A segunda diz respeito à identificação clara das especificidades do ambiente de tempo real, a fim de que estas fossem consideradas e devidamente tratadas no algoritmo de desenvolvimento do equivalente. A junção efetiva dessas vertentes permitiu a obtenção de um equivalente de redes consistente e com bom desempenho para o monitoramento da condição de operação dos sistemas elétricos em tempo real.

Na pesquisa sobre os equivalentes de redes baseados em medições fasoriais locais, descrita no Capítulo 2, verificou-se que muitas metodologias propostas para aplicação em tempo real são testadas e validadas no ambiente de estudo, o que não garante a viabilidade de suas aplicações no ambiente de tempo real. Há muitas diferenças entre o ambiente de estudo, baseado em simulações de fluxo de potência, e o ambiente de tempo real, baseado em medições obtidas de SMFS, conforme indicando em detalhes no Capítulo 3. Nem sempre o acesso a dados reais de medição para aplicação e aprimoramento dos métodos é obtido com facilidade, visto que estão sob responsabilidade de concessionárias de energia elétrica. Além disso, a utilização de dados de barramentos reais, algumas vezes, não reflete as características dos diversos pontos do sistema elétrico. Essas condições motivaram a concepção de um gerador de dados de PMU, o Gerador de Dados Fasoriais. A ideia consistiu em gerar pares de medições fasoriais de tensão e de corrente que caracterizassem o ambiente de tempo real, considerando suas diversas especificidades, desvinculadas da solução de fluxo de potência.

A metodologia para cálculo do equivalente, descrita detalhadamente no Capítulo 4, se destaca por sua modelagem, que incorpora as especificidades do ambiente de medição, como as incertezas inerentes às medições, a taxa de amostragem dos dados e as variações de carga. As técnicas de amortecimento propostas reduzem as variações bruscas na resposta do

equivalente, tornando-os condizentes com os comportamentos esperados. A comparação dos resultados obtidos para o equivalente desenvolvido com a referência EARE demonstra a exatidão dos parâmetros estimados.

Após a etapa de validação, no Capítulo 5, o equivalente desenvolvido foi aplicado considerando três cenários distintos de geração de dados de entrada. Nas primeiras análises, foram utilizados dados fasoriais de tensão e de corrente obtidos do cálculo do fluxo de potência em sistema de teste e verificou-se a consistência das grandezas estimadas na indicação da instabilidade de tensão, garantindo a exatidão do equivalente em situações de risco, mesmo na presença de erro do tipo ruído nas medições. Posteriormente, foram criadas situações possíveis de ocorrer no ambiente de tempo real, através do Gerador de Dados Fasoriais, que poderiam levar a parâmetros estimados, cujas características indicassem, de forma equívoca, a condição de instabilidade de tensão. Entretanto, observou-se que a resposta do equivalente não sofreu impactos significativos, apresentando um comportamento condizente com o esperado, em termos da condição de operação do sistema elétrico. Finalmente, o equivalente foi avaliado considerando o uso de dados reais de medições fasoriais, atestando seu desempenho rápido e dinâmico, e respeitando fatores essenciais no monitoramento de sistemas elétricos em tempo real. Além disso, o comportamento dos parâmetros estimados do equivalente refletiu a condição de operação normal em que o sistema se encontrava, o que permitiu atestar sua exatidão e aplicabilidade ao setor elétrico. A comparação do equivalente desenvolvido com outros propostos na literatura reforçou a sua consistência e sua efetividade no tratamento de erros inerentes ao processo de medição, nem sempre observada nos demais equivalentes.

Sob a perspectiva de se realizar uma análise mais específica para o barramento monitorado, no Capítulo 6, foi apresentada uma proposta complementar, baseada no cálculo de equivalentes individuais em ramos conectados ao barramento principal. A partir das grandezas estimadas por esses equivalentes é possível avaliar a condição de operação de cada ramo e, a partir disso, identificar os ramos mais vulneráveis em relação à estabilidade de tensão. Tais informações são complementares ao equivalente geral do barramento, calculado considerando metodologias de carga-equivalente. O uso dos equivalentes individuais foi avaliado em barramentos de um sistema de teste e da rede elétrica de alta tensão do Sistema Interligado Nacional, atestando sua consistência, dentro de suas propostas de aplicação.

Como linhas de pesquisa sugeridas para dar continuidade a esta tese, citam-se:

- i. Avaliação matemática minuciosa e aprofundamento dos estudos, sob o ponto de vista de circuitos elétricos, do efeito de não se considerar a tensão medida como

referência angular no cálculo do equivalente desenvolvido. Foi verificado que os parâmetros estimados são mais exatos e consistentes ao assumir a tensão como grandeza de referência. Essa constatação foi feita com base no comportamento esperado das grandezas estimadas, dada a condição de operação em que o sistema se encontra, considerando simulações de fluxo de potência. Entretanto, é importante avaliar a razão das diferenças significativas obtidas, quando se considera os ângulos originais, obtidos do cálculo do fluxo de potência ou de medições de SMFS, e os ângulos deslocados, ao assumir a tensão como grandeza de referência.

- ii. Avaliação da resposta do equivalente nos instantes iniciais do carregamento de sistemas elétricos em simulações de fluxo de potência. Foi observado que, no início do carregamento em condição de carga leve, os parâmetros estimados mostram-se relativamente distantes da referência adotada neste trabalho, apesar de indicar com exatidão o ponto de instabilidade de tensão. Esse comportamento foi verificado para o equivalente desenvolvido e outros propostos na literatura.
- iii. Aprimoramento do Gerador de Dados Fasoriais, a fim de possibilitar a criação de cenários de instabilidade de tensão com características próprias do ambiente de tempo real. O principal desafio consiste em obter uma correlação entre a taxa de crescimento de corrente e o desvio padrão considerado na representação do erro do tipo ruído. A determinação precisa desses valores é fundamental para geração de fasores de corrente que possuam aspectos condizentes com dados reais de medição fasorial.
- iv. Avaliação do desempenho de indicadores global e individuais relacionados à estabilidade de tensão, considerando o emprego do modelo do equivalente de redes proposto. Tal avaliação pode ser feita por meio de indicadores já existentes na literatura ou através da proposta de um novo indicador, que considere, por exemplo, a inclusão da influência da margem VQ em sua proposta.
- v. Investigação do uso do equivalente de redes proposto em outras aplicações, além do monitoramento da estabilidade de tensão de sistemas elétricos.

O uso de equivalentes de redes consistentes voltados à avaliação da estabilidade de tensão em tempo real viabiliza o monitoramento e a avaliação contínua da condição operativa do sistema quanto ao risco de instabilidade. Essa é uma aplicação extremamente importante, pois possibilita a realização de ações preventivas, evitando situações operativas críticas do

sistema elétrico. Espera-se que esta tese possa contribuir no âmbito da operação de sistemas elétricos e no avanço das áreas de pesquisa acadêmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros:

- (AGUIRRE, 2015) AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas – Técnicas lineares e não lineares: teoria e aplicação**. 4. ed. Editora UFMG, 2015.
- (KUNDUR, 1994) KUNDUR, P. **Power system stability and control – EPRI power system engineering series**. 1. ed. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.

Periódicos:

- (APPASANI, 2018) APPASANI, B.; MOHANTA, D.K. **A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications**. Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 3, n. 37, p. 1-17, dez. 2018.
- (CORSI, 2008) CORSI, S.; TARANTO, G. N. **A real-time voltage instability identification algorithm based on local phasor measurements**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 23, n. 3, p. 1272-1279, 2008.
- (CUI, 2017) CUI, B.; WANG, Z. **Voltage stability assessment based on improved coupled single-port method**. IET Generation, Transmission and Distribution, v. 11, n. 10, p. 2703-2711, jun. 2017.
- (CUTSEM, 2020) CUTSEM, T. V.; GLAVIC, M.; ROSEHART, W.; SANTOS, J. A.; CANIZARES, C.; KANATAS, M.; LIMA, L.; MILANO, F.; PAPANGELIS, L.; RAMOS, R. A.; TAMIMI, B.; TARANTO, G.; VOURNAS, C. **IEEE PES task force on test systems for voltage stability analysis and security assessment**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 35, n. 5, p. 4078-4087, 2020.
- (HAJI, 2018) HAJI, M.M.; XU, W. **Online Determination of External Network Models Using Synchronized Phasor Data**. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 9, n. 2, p. 635-643, mar. 2018.
- (HAQUE, 2003) HAQUE, M. H. **Online monitoring of maximum permissible loading of a power system within voltage stability limits**. IEE Generation, Transmission and Distribution, v. 150, n. 1, p. 107-112, 2003.
- (IEEE, 1990) IEEE WORKING GROUP ON VOLTAGE STABILITY. **Voltage Stability of Power Systems Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience**. IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR, Piscataway, New Jersey, 1990.
- (KUNDUR, 2004) KUNDUR, P.; PASERBA, J.; AJJARAPU, V.; ANDERSSON, G.; BOSE, A.; CAÑIZARES, C.; HATZIARGYRIOU, N.; HILL, D.; STANKOVIC, A.; TAYLOR, C.; CUTSEM, T. V.; VITTAL, V. **Definition and classification of power system stability**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 3, n. 19, p. 1387-1401, ago. 2004.

- (LEE, 2019) LEE, Y.; HAN, S. **Real-Time Voltage Stability Assessment Method for the Korean Power System Based on Estimation of Thévenin Equivalent Impedance**. Applied Sciences, v. 9, n. 8, p. 1671-1689, abr. 2019.
- (MOHAMMADI, 2015) MOHAMMADI, H.; DEGHANI, M. **PMU based voltage security assessment of power systems exploiting principal component analysis and decision trees**. International Journal of Electrical Power Energy Systems - Elsevier, vol. 64, p. 655-663, jan. 2015.
- (PHADKE, 2018) PHADKE, A.; BI, T. **Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 6, n. 4, p. 619-629, jul. 2018.
- (POLSTER, 2017) POLSTER, S.; RENNER, H. **Voltage stability monitoring methods for distribution grids using the Thevenin impedance**. CIRED - Open Access Proceedings Journal, v. 2017, n. 1, p. 1535-1539, out. 2017.
- (ROSAS, 2012) ROSAS, G. B.; LOURENÇO, E. M.; FERNANDES, T. S. P. **Modelagem de ramos de impedância nula no problema de fluxo de potência ótimo**. Revista Sba Controle & Automação, vol.23, n.6, p. 766-781, dez. 2012.
- (SILVA, 2020) SILVA, F. D.; VALE, M. H. M.; ANDRADE, M. M. S. **Impact of local PMU-based equivalent methods on real-time voltage stability assessment**. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 14, n. 16, p. 3317-3126, abr. 2020.
- (SMON, 2006) SMON, I.; VERBIC, G.; GUBINA, F. **Local voltage-stability index using Tellegens' theorem**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 21, n. 3, p. 1267-1275, 2016.
- (SOBHY, 2022) SHOBY, A.; SAEED, M. A.; ELADL, A. A.; ABDELKADER, S. M. **Online estimation of Thévenin equivalent using discrete fourier transform**. Electric Power Systems Research, v. 205, jan. 2022.
- (SU, 2016) SU, H.Y. AND LIU, C.W. **Estimating the voltage stability margin using PMU measurements**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 31, n. 4, p. 3221-3229, jul. 2016.
- (SU, 2018) SU, H.; LIU, T. **Robust Thevenin Equivalent Parameter Estimation for Voltage Stability Assessment**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 33, n. 4, p. 4637-4639, jul. 2018.
- (TOBÓN, 2015) TOBÓN, J. E.; RAMIREZ, J. M.; GUTIERREZ, R. E. C. **Tracking the maximum power transfer and loadability limit form sensitivity-based impedance matching**. Electric Power System Research, v. 119, p. 355-363, 2015.
- (VU, 1999) VU, K. et al. **Use of local measurements to estimate voltage-stability margin**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 3, p. 1029-1035, 1999.

- (WANG, 2019) WANG, Y.; XU, W.; YONG, J. **An Adaptive Threshold for Robust System Impedance Estimation**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 34, n. 5, p. 3951-3953, set. 2019
- (YUAN, 2014) YUAN, H., and LI, F. **A comparative study of measurement-based Thévenin equivalents identification methods**. 46th North American Power Symposium (NAPS), Pullman, USA, set. 2014.
- (ZHANG, 2020) ZHANG, A.; TAN, W.; CHENG, M.; YANG, W. **Thévenin Equivalent Parameter Adaptive Robust Estimation Considering the Erroneous Measurements of PMU**. Energies, v. 13, n. 18, p. 4865-4880, set. 2020.
- (ZIMMERMAN, 2011) ZIMMERMAN, R. D.; MURILLO-SANCHEZ, C. E.; THOMAS, R. J. **MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power system research and education**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 26, n. 1, p. 12-19, fev. 2011.

Artigos de Conferências:

- (GONG, 2006) GONG, Y., SCHULZ, N., AND GUZMÁN, A. **Synchrophasor-based real-time voltage stability index**. IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, USA, nov. 2006.
- (INNAH, 2011) INNAH, H. AND HIYAMA, T. **Neural network method based on PMU data for voltage stability assessment and visualization**. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, Bali, Indonesia, nov. 2011.
- (MOU, 2012) MOU, X., LI, W., AND LI, Z. **PMU placement for voltage stability assessment and monitoring of power systems**. IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference – ECCE, Harbin, China, jun. 2012.
- (NANDANWAR, 2016) NANDANWAR, S.R. AND WARKAD, S.B. **Voltage security assessment with application of PMUs using decision tree**. 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, Tehri, India, dez. 2016.
- (PHADKE, 1993) PHADKE A.G. **Recent advances in monitoring protection and control of power systems**. IEEE/NTUA, Power Tech Conference: “Planning, Operation and Control of Today’s Electric Power Systems”, Greece, set. 1993.
- (SHAH, 2016) SHAH, H. AND VERMA, K. **PMU-ANN based approach for real time voltage stability monitoring**. IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, mar. 2016.

Projetos Finais de Curso, Dissertações e Teses:

- (ANDRADE, 2008) ANDRADE, S. R. C. **Sistemas de medição fasorial sincronizada: aplicações para melhoria da operação de sistemas elétricos de potência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
- (ANDRADE, 2014) ANDRADE, M. M. S. **Uso de medições fasoriais na determinação de equivalentes para avaliação da estabilidade de tensão dos sistemas elétricos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.
- (ANDRADE, 2018) ANDRADE, P. R. A. **Metodologias para avaliação da estabilidade de tensão - Análise do comportamento dos equivalentes de redes elétricas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2018.
- (BARBOSA, 2018) BARBOSA, R. D. **Análise de sensibilidade de metodologias para monitoramento da segurança do sistema elétrico quanto à estabilidade de tensão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2018.
- (CONDEGA, 2013) CONDEGA, S. Y. C. **Metodologia para determinação da margem de estabilidade de tensão sob a perspectiva da expansão e da operação de sistemas de potência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.
- (CORTEZ, 2001) CORTEZ, A. N. **Proposta de critério e procedimentos para avaliação da estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2001.
- (DUONG, 2016) DUONG, D. T. **Online voltage stability monitoring and coordinated secondary voltage control.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Sciences and Technology, Trondheim, Noruega. 2016.
- (LEAL, 2013) LEAL, Ó. E. S. **Metodologia Para Cálculo de Equivalente de Rede Para Monitoração da estabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência em tempo real.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

- (LOBATO, 1998) LOBATO, M.V.C. **Estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica: estudos do fenômeno e de métodos para análise estática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1998.
- (MARIANO, 2008) MARIANO, L. **Procedimento para avaliação do impacto da compensação reativa shunt capacitiva na estabilidade de tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
- (MARTINS, 2012) MARTINS, D.S. **Aplicação de sistemas de medição fasorial sincronizada na previsão de instabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência**. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.
- (RIBEIRO, 2011) RIBEIRO, G. L. S. **O uso de equivalentes de redes na análise de estabilidade de tensão dos sistemas elétricos de potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.
- (SILVA, 2010) SILVA, R. G. F. **Aplicação dos sistemas de medição fasorial sincronizada na avaliação da estabilidade de tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.
- (SILVA, 2015) SILVA, F. S. **Influência das incertezas de medição no cálculo de equivalentes de redes aplicados nos estudos de estabilidade de tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2015.
- (SILVA, 2018) SILVA, F. D. **Equivalente analítico de redes elétricas – Determinação de parâmetros de referência para avaliação da estabilidade de tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2018.
- (SILVA, 2022) SILVA, F. D. **Cálculo de equivalente de rede elétrica para avaliação do risco de instabilidade de tensão em tempo real por meio de curvas PV e VQ**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2022.
- (SOUSA, 2018) SOUSA, C. E. D. **Índices de estabilidade de tensão - Uma análise comparativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2018.

- (VALE, 1986) VALE, M.H.M. **Centros modernos de supervisão e controle de sistemas de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1986.
- (VALE VISACRO, 2014) VALE VISACRO, S. **Implementação de uma ferramenta para análise de risco de instabilidade de tensão de sistemas elétricos**. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.
- (VILELA, 2014) VILELA, A. O. R. **Margem de estabilidade de tensão no planejamento dos sistemas elétricos - Análise do impacto do despacho da geração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.

Documentos e Normas Técnicas:

- (IEEE, 2011) IEEE Std C37.118.1-2011: **IEEE Standard for synchrophasor measurements for power systems**. Dez. 2011.
- (ONS, 2020) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede – Submódulo 2.13 – Requisitos mínimos para Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores**. Brasília, dez. 2020.
- (ONS, 2021) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede - Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos**. Brasília, ago. 2021.

Outros:

- (CEMIG, 2010) CEMIG, LRC, CONCERT. **Desenvolvimento de protótipo de sistema de medição fasorial sincronizada**. Projeto P&D GT 354 – CEMIG ANEEL, 2010.
- (ELECTRA, 2017) ANNAKAGE, U. D. et al. **Application of phasor measurement units for monitoring power system dynamic performance**. Technical Brochure – WC C4.34. Electra, nº 295, dez. 2017.

APÊNDICE A

SISTEMAS DE TESTE UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

No que diz respeito às simulações de fluxo de potência, os resultados apresentados ao longo deste trabalho referem-se aos Sistemas de Teste IEEE 14 Barras, RVS e IEEE 30 Barras. Tais sistemas são usuais e adotados por pesquisadores dedicados ao estudo de estabilidade de tensão. A seguir são apresentados os dados representativos desses sistemas.

A.1 SISTEMA IEEE 14 BARRAS

O Sistema de Teste IEEE 14 Barras é uma aproximação para o sistema estadunidense em fevereiro de 1962, sendo composto por 14 barras, 2 geradores, 3 compensadores síncronos e 11 cargas, como mostra a Figura A.1. O gerador conectado à barra número 1 é tomado como referência do sistema. Os dados das barras e dos ramos desse sistema, utilizados nas simulações, estão registrados nas Tabelas A.1 e A.2.

Nas tabelas, $|\dot{V}|$ corresponde ao módulo da tensão (p.u.), $\angle \dot{V}$ ao ângulo da tensão ($^\circ$), P_G à potência ativa gerada (p.u.), Q_G à potência reativa gerada (p.u.), P_C à potência ativa da carga (p.u.), Q_C à potência reativa da carga (p.u.), G à condutância (p.u.), B à susceptância (p.u.), R à resistência (p.u.) e X à reatância (p.u.). O tipo da barra é definido como 1 para barras PV, 2 para barras PQ e 3 para a *slack*. *Tap* refere-se ao *tap* do transformador e Deslocamento de Fase à defasagem angular para indicar transformador defasador.

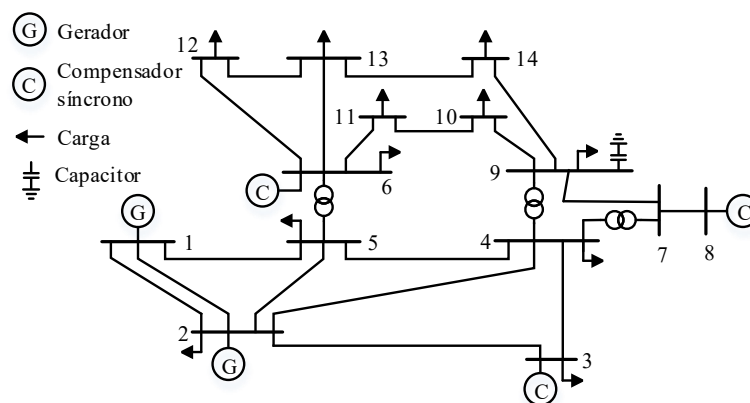


Figura A.1 – Diagrama unifilar do Sistema de Teste IEEE 14 Barras

Tabela A.1 – Dados das barras do Sistema de Teste IEEE 14 Barras

Barra	$ \dot{V} $	$\angle \dot{V}$	P_G	Q_G	P_C	Q_C	G	B	Tipo
1	1,06	0	2,324	-0,169	0	0	0	0	3
2	1,045	0	0,4	0,424	0,217	0,127	0	0	1
3	1,01	0	0	0,234	0,942	0,19	0	0	1
4	1	0	0	0	0,478	-0,039	0	0	2
5	1	0	0	0	0,076	0,016	0	0	2
6	1,07	0	0	0,122	0,112	0,075	0	0	1
7	1	0	0	0	0	0	0	0	2
8	1,09	0	0	0,174	0	0	0	0	1
9	1	0	0	0	0,295	0,166	0	0,19	2
10	1	0	0	0	0,09	0,058	0	0	2
11	1	0	0	0	0,035	0,018	0	0	2
12	1	0	0	0	0,061	0,016	0	0	2
13	1	0	0	0	0,135	0,058	0	0	2
14	1	0	0	0	0,149	0,05	0	0	2

Tabela A.2 – Dados dos ramos do Sistema de Teste IEEE 14 Barras

De	Para	R	X	B	Tap	Deslocamento de Fase
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	1	0
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	1	0
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	1	0
2	4	0,05811	0,17632	0,034	1	0
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	1	0
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	1	0
4	5	0,01335	0,04211	0	1	0
4	7	0	0,20912	0	0,978	0
4	9	0	0,55618	0	0,969	0
5	6	0	0,25202	0	0,932	0
6	11	0,09498	0,1989	0	1	0
6	12	0,12291	0,25581	0	1	0
6	13	0,06615	0,13027	0	1	0
7	8	0	0,17615	0	1	0
7	9	0	0,11001	0	1	0
9	10	0,03181	0,0845	0	1	0
9	14	0,12711	0,27038	0	1	0
10	11	0,08205	0,19207	0	1	0
12	13	0,22092	0,19988	0	1	0
13	14	0,17093	0,34802	0	1	0

A.2 SISTEMA RVS

O Sistema de Teste RVS é composto por 75 barras, 32 geradores, 2 bancos de reatores *shunt*, 17 cargas, 89 linhas de transmissão e 56 transformadores. O gerador conectado à barra número 10121 é tomado como referência do sistema. Os dados das barras e dos ramos do desse sistema utilizados nas simulações estão registrados nas Tabelas A.3 e A.4.

Tabela A.3 – Dados das barras do Sistema de Teste RVS

Barra	$ \dot{V} $	$\angle \dot{V}$	P_G	Q_G	P_C	Q_C	G	B	Tipo
101	1,0342	-18,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
102	1,0358	-18,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
103	1,0072	-16,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
104	1,0055	-20,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
105	1,0030	-20,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
106	1,0250	-23,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0	75,0	2
107	1,0286	-22,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
108	1,0136	-22,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
109	1,0280	-17,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
110	1,0088	-19,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	75,0	2
111	0,9872	-11,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
112	0,9851	-10,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
113	1,0191	-6,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
114	1,0033	-9,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
115	1,0111	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
116	1,0164	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
117	1,0338	4,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
118	1,0425	5,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
119	1,0180	-0,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
120	1,0349	0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
121	1,0459	6,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
122	1,0500	12,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
123	1,0499	1,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
124	0,9550	-5,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	2
1101	1,0497	-24,5	0,00	0,00	118,80	24,20	0	0,00	2
1102	1,0496	-24,1	0,00	0,00	106,70	22,00	0	0,00	2
1103	1,0446	-22,2	0,00	0,00	198,00	40,70	0	0,00	2
1104	1,0450	-26,5	0,00	0,00	81,40	16,50	0	0,00	2
1105	1,0488	-26,8	0,00	0,00	78,10	15,40	0	0,00	2
1106	1,0350	-29,5	0,00	0,00	149,60	30,80	0	0,00	2
1107	1,0497	-27,4	0,00	0,00	137,50	27,50	0	0,00	2
1108	1,0442	-28,6	0,00	0,00	188,10	38,50	0	0,00	2
1109	1,0477	-23,2	0,00	0,00	192,50	39,60	0	0,00	2

Barra	$ \dot{V} $	$\angle \dot{V}$	P_G	Q_G	P_C	Q_C	G	B	Tipo
1110	1,0484	-26,3	0,00	0,00	214,50	44,00	0	0,00	2
1113	1,0453	-12,5	0,00	0,00	291,50	59,40	0	0,00	2
1114	1,0433	-16,3	0,00	0,00	213,40	42,90	0	0,00	2
1115	1,0497	-5,6	0,00	0,00	348,70	70,40	0	0,00	2
1116	1,0496	-5,2	0,00	0,00	110,00	22,00	0	0,00	2
1118	1,0492	-0,5	0,00	0,00	366,30	74,80	0	0,00	2
1119	1,0498	-6,7	0,00	0,00	199,10	40,70	0	0,00	2
1120	1,0497	-4,9	0,00	0,00	140,80	28,60	0	0,00	2
G1	1,0342	-15,1	10,00	7,37	0,00	0,00	0	0,00	1
G2	1,0358	-15,2	10,00	9,54	0,00	0,00	0	0,00	1
CS1	1,0500	-23,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	1
G3	1,0286	-16,5	80,00	49,15	0,00	0,00	0	0,00	1
G4	1,0200	-0,1	162,50	82,78	0,00	0,00	0	0,00	1
CS2	1,0500	-9,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	1
G5	1,0113	8,4	12,00	6,00	0,00	0,00	0	0,00	1
G6	1,0164	7,8	155,00	65,98	0,00	0,00	0	0,00	1
G7	1,0432	12,6	400,00	200,00	0,00	0,00	0	0,00	1
G8	1,0468	13,4	398,64	182,77	0,00	0,00	0	0,00	3
G9	1,0500	20,3	50,00	3,75	0,00	0,00	0	0,00	1
G10	1,0499	8,8	155,00	68,84	0,00	0,00	0	0,00	1
G11	1,0342	-15,1	10,00	7,37	0,00	0,00	0	0,00	1
G12	1,0358	-15,2	10,00	9,54	0,00	0,00	0	0,00	1
G13	1,0286	-16,5	80,00	49,15	0,00	0,00	0	0,00	1
G14	1,0200	-0,1	162,50	80,00	0,00	0,00	0	0,00	1
G15	1,0113	8,4	12,00	6,00	0,00	0,00	0	0,00	1
G16	1,0500	20,3	50,00	3,75	0,00	0,00	0	0,00	1
G17	1,0499	8,8	155,00	68,84	0,00	0,00	0	0,00	1
G18	1,0342	-11,2	76,00	21,78	0,00	0,00	0	0,00	1
G19	1,0358	-11,3	76	21,78	0,00	0,00	0	0,00	1
G20	1,0286	-16,5	80	49,15	0,00	0,00	0	0,00	1
G21	1,0200	-0,1	162,5	80	0,00	0,00	0	0,00	1
G22	1,0113	8,4	12	6	0,00	0,00	0	0,00	1
G23	1,0500	20,3	50	3,751	0,00	0,00	0	0,00	1
G24	1,0499	8,8	350	128,9	0,00	0,00	0	0,00	1
G25	1,0342	-11,2	76	21,78	0,00	0,00	0	0,00	1
G26	1,0358	-11,3	76	21,78	0,00	0,00	0	0,00	1
G27	1,0113	8,4	12	6	0,00	0,00	0	0,00	1
G28	1,0500	20,3	50	3,751	0,00	0,00	0	0,00	1
G29	1,0113	8,1	12	6	0,00	0,00	0	0,00	1
G30	1,0500	20,3	50	3,751	0,00	0,00	0	0,00	1
G31	1,0113	8,4	155	80	0,00	0,00	0	0,00	1
G32	1,05	20,3	50	3,751	0	0	0	0	1

Tabela A.4 – Dados dos ramos do Sistema de Teste RVS

De	Para	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>B</i>	<i>Tap</i>	Deslocamento de Fase
101	102	0,00300	0,01400	0,46100	0,0000	0
101	103	0,05500	0,21100	0,05700	0,0000	0
101	105	0,02200	0,08500	0,02300	0,0000	0
102	104	0,03300	0,12700	0,03400	0,0000	0
102	106	0,05000	0,19200	0,05200	0,0000	0
103	109	0,03100	0,11900	0,03200	0,0000	0
104	109	0,02700	0,10400	0,02800	0,0000	0
105	110	0,02300	0,08800	0,02400	0,0000	0
106	110	0,01400	0,06100	2,45900	0,0000	0
107	108	0,00800	0,03000	0,00850	0,0000	0
107	108	0,00800	0,03000	0,00850	0,0000	0
108	109	0,04300	0,16500	0,04500	0,0000	0
108	110	0,04300	0,16500	0,04500	0,0000	0
111	113	0,00600	0,04800	0,10000	0,0000	0
111	114	0,00500	0,04200	0,08800	0,0000	0
112	113	0,00600	0,04800	0,10000	0,0000	0
112	123	0,01200	0,09700	0,20300	0,0000	0
113	123	0,01100	0,08700	0,18200	0,0000	0
114	116	0,00500	0,05900	0,08200	0,0000	0
115	116	0,00200	0,01700	0,03600	0,0000	0
115	121	0,00600	0,04900	0,10300	0,0000	0
115	121	0,00600	0,04900	0,10300	0,0000	0
115	124	0,00700	0,05200	0,10900	0,0000	0
116	117	0,00300	0,02600	0,05500	0,0000	0
116	119	0,00300	0,02300	0,04900	0,0000	0
117	118	0,00200	0,01400	0,03000	0,0000	0
117	122	0,01400	0,10500	0,22100	0,0000	0
118	121	0,00300	0,02600	0,05500	0,0000	0
118	121	0,00300	0,02600	0,05500	0,0000	0
119	120	0,00500	0,04000	0,08300	0,0000	0
119	120	0,00500	0,04000	0,08300	0,0000	0
120	123	0,00300	0,02200	0,04600	0,0000	0
120	123	0,00300	0,02200	0,04600	0,0000	0
121	122	0,00900	0,06800	0,14200	0,0000	0
101	G1	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
101	G11	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
101	G18	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
101	G25	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
102	G2	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
102	G12	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
102	G19	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
102	G26	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
107	G3	0,00254	0,12712	0,00000	1,0500	0
107	G13	0,00254	0,12712	0,00000	1,0500	0
107	G20	0,00254	0,12712	0,00000	1,0500	0

De	Para	R	X	B	Tap	Deslocamento de Fase
106	CS1	0,00300	0,15000	0,00000	1,0500	0
113	G4	0,00129	0,06466	0,00000	1,0500	0
113	G14	0,00129	0,06466	0,00000	1,0500	0
113	G21	0,00129	0,06466	0,00000	1,0500	0
115	G5	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G15	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G22	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G27	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G29	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G31	0,00165	0,08242	0,00000	1,0500	0
116	G6	0,00165	0,08242	0,00000	1,0500	0
118	G7	0,00064	0,03185	0,00000	1,0500	0
121	G8	0,00064	0,03185	0,00000	1,0500	0
122	G9	0,00566	0,28302	0,00000	1,0500	0
122	G16	0,00566	0,28302	0,00000	1,0500	0
122	G23	0,00566	0,28302	0,00000	1,0500	0
122	G28	0,00566	0,28302	0,00000	1,0500	0
122	G30	0,00566	0,28302	0,00000	1,0500	0
122	G32	0,00566	0,28302	0,00000	1,0500	0
123	G10	0,00165	0,08242	0,00000	1,0500	0
123	G17	0,00165	0,08242	0,00000	1,0500	0
123	G24	0,00073	0,03641	0,00000	1,0500	0
114	CS2	0,00150	0,07500	0,00000	1,0500	0
103	124	0,00050	0,02100	0,00000	0,9125	0
109	111	0,00050	0,02100	0,00000	0,9217	0
109	112	0,00050	0,02100	0,00000	0,9192	0
110	111	0,00050	0,02100	0,00000	0,9798	0
110	112	0,00050	0,02100	0,00000	0,9755	0
101	1101	0,00200	0,10000	0,00000	0,9568	0
102	1102	0,00200	0,10000	0,00000	0,9614	0
103	1103	0,00120	0,06000	0,00000	0,9359	0
104	1104	0,00300	0,15000	0,00000	0,9333	0
105	1105	0,00300	0,15000	0,00000	0,9298	0
106	1106	0,00150	0,07500	0,00000	0,9625	0
107	1107	0,00150	0,07500	0,00000	0,9561	0
108	1108	0,00120	0,06000	0,00000	0,9438	0
109	1109	0,00120	0,06000	0,00000	0,9534	0
110	1110	0,00120	0,06000	0,00000	0,9315	0
113	1113	0,00086	0,04286	0,00000	0,9448	0
114	1114	0,00120	0,06000	0,00000	0,9313	0
115	1115	0,00075	0,03750	0,00000	0,9324	0
116	1116	0,00200	0,10000	0,00000	0,9431	0
118	1118	0,00067	0,03333	0,00000	0,9640	0
119	1119	0,00120	0,06000	0,00000	0,9414	0
120	1120	0,00150	0,07500	0,00000	0,9611	0
101	102	0,00300	0,01400	0,46100	0,0000	0

De	Para	R	X	B	Tap	Deslocamento de Fase
101	103	0,05500	0,21100	0,05700	0,0000	0
101	105	0,02200	0,08500	0,02300	0,0000	0
102	104	0,03300	0,12700	0,03400	0,0000	0
102	106	0,05000	0,19200	0,05200	0,0000	0
103	109	0,03100	0,11900	0,03200	0,0000	0
104	109	0,02700	0,10400	0,02800	0,0000	0
105	110	0,02300	0,08800	0,02400	0,0000	0
106	110	0,01400	0,06100	2,45900	0,0000	0
107	108	0,00800	0,03000	0,00850	0,0000	0
107	108	0,00800	0,03000	0,00850	0,0000	0
108	109	0,04300	0,16500	0,04500	0,0000	0
108	110	0,04300	0,16500	0,04500	0,0000	0
111	113	0,00600	0,04800	0,10000	0,0000	0
111	114	0,00500	0,04200	0,08800	0,0000	0
112	113	0,00600	0,04800	0,10000	0,0000	0
112	123	0,01200	0,09700	0,20300	0,0000	0
113	123	0,01100	0,08700	0,18200	0,0000	0
114	116	0,00500	0,05900	0,08200	0,0000	0
115	116	0,00200	0,01700	0,03600	0,0000	0
115	121	0,00600	0,04900	0,10300	0,0000	0
115	121	0,00600	0,04900	0,10300	0,0000	0
115	124	0,00700	0,05200	0,10900	0,0000	0
116	117	0,00300	0,02600	0,05500	0,0000	0
116	119	0,00300	0,02300	0,04900	0,0000	0
117	118	0,00200	0,01400	0,03000	0,0000	0
117	122	0,01400	0,10500	0,22100	0,0000	0
118	121	0,00300	0,02600	0,05500	0,0000	0
118	121	0,00300	0,02600	0,05500	0,0000	0
119	120	0,00500	0,04000	0,08300	0,0000	0
119	120	0,00500	0,04000	0,08300	0,0000	0
120	123	0,00300	0,02200	0,04600	0,0000	0
120	123	0,00300	0,02200	0,04600	0,0000	0
121	122	0,00900	0,06800	0,14200	0,0000	0
101	G1	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
101	G11	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
101	G18	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
101	G25	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
102	G2	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
102	G12	0,01250	0,62500	0,00000	1,0500	0
102	G19	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
102	G26	0,00337	0,16854	0,00000	1,0500	0
107	G3	0,00254	0,12712	0,00000	1,0500	0
107	G13	0,00254	0,12712	0,00000	1,0500	0
107	G20	0,00254	0,12712	0,00000	1,0500	0
106	CS1	0,00300	0,15000	0,00000	1,0500	0
113	G4	0,00129	0,06466	0,00000	1,0500	0

De	Para	R	X	B	Tap	Deslocamento de Fase
113	G14	0,00129	0,06466	0,00000	1,0500	0
113	G21	0,00129	0,06466	0,00000	1,0500	0
115	G5	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G15	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G22	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G27	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G29	0,02143	1,07143	0,00000	1,0500	0
115	G31	0,00165	0,08242	0,00000	1,0500	0
116	G6	0,00165	0,08242	0,00000	1,0500	0
118	G7	0,00064	0,03185	0,00000	1,0500	0
121	G8	0,00064	0,03185	0,00000	1,0500	0
122	G9	0,00566	0,28302	0,00000	1,0500	0

A.3 SISTEMA IEEE 30 BARRAS

O Sistema de Teste IEEE 30 Barras é composto por 30 barras, 6 geradores, 2 bancos de reatores *shunt*, 21 cargas, 41 linhas de transmissão e 4 transformadores. O gerador conectado à barra número 1 é tomado como referência do sistema. Os dados das barras e dos ramos desse sistema utilizados nas simulações estão registrados nas Tabelas A.5 e A.6.

Tabela A.5 – Dados das barras do Sistema de Teste IEEE 30 Barras

Barra	$ \dot{V} $	$\angle \dot{V}$	P_G	Q_G	P_C	Q_C	G	B	Tipo
1	1,06	0	2,602	-0,161	0	0	0	0	3
2	1,043	0	0,4	0,5	0,217	0,127	0	0	1
3	1	0	0	0	0,024	0,012	0	0	2
4	1	0	0	0	0,076	0,016	0	0	2
5	1,01	0	0	0,37	0,942	0,19	0	0	1
6	1	0	0	0	0	0	0	0	2
7	1	0	0	0	0,228	0,109	0	0	2
8	1,01	0	0	0,373	0,3	0,3	0	0	1
9	1	0	0	0	0	0	0	0	2
10	1	0	0	0	0,058	0,02	0	0,19	2
11	1,082	0	0	0,162	0	0	0	0	1
12	1	0	0	0	0,112	0,075	0	0	2
13	1,071	0	0	0,106	0	0	0	0	1
14	1	0	0	0	0,062	0,016	0	0	2
15	1	0	0	0	0,082	0,025	0	0	2
16	1	0	0	0	0,035	0,018	0	0	2
17	1	0	0	0	0,09	0,058	0	0	2
18	1	0	0	0	0,032	0,009	0	0	2
19	1	0	0	0	0,095	0,034	0	0	2

Barra	$ \dot{V} $	$\angle \dot{V}$	P_G	Q_G	P_C	Q_C	G	B	Tipo
20	1	0	0	0	0,022	0,007	0	0	2
21	1	0	0	0	0,175	0,112	0	0	2
22	1	0	0	0	0	0	0	0	2
23	1	0	0	0	0,032	0,016	0	0	2
24	1	0	0	0	0,087	0,067	0	0,043	2
25	1	0	0	0	0	0	0	0	2
26	1	0	0	0	0,035	0,023	0	0	2
27	1	0	0	0	0	0	0	0	2
28	1	0	0	0	0	0	0	0	2
29	1	0	0	0	0,024	0,009	0	0	2
30	1	0	0	0	0,106	0,019	0	0	2

Tabela A.6 – Dados dos ramos do Sistema de Teste IEEE 30 Barras

De	Para	R	X	B	Tap	Deslocamento de Fase
1	2	0,0192	0,0575	0,0528	1	0
1	3	0,0452	0,1652	0,0408	1	0
2	4	0,057	0,1737	0,0368	1	0
2	5	0,0472	0,1983	0,0418	1	0
2	6	0,0581	0,1763	0,0374	1	0
3	4	0,0132	0,0379	0,0084	1	0
4	6	0,0119	0,0414	0,009	1	0
4	12	0	0,256	0	0,932	0
5	7	0,046	0,116	0,0204	1	0
6	7	0,0267	0,082	0,017	1	0
6	8	0,012	0,042	0,009	1	0
6	9	0	0,208	0	0,978	0
6	10	0	0,556	0	0,969	0
6	28	0,0169	0,0599	0,013	1	0
8	28	0,0636	0,2	0,0428	1	0
9	10	0	0,11	0	1	0
9	11	0	0,208	0	1	0
10	17	0,0324	0,0845	0	1	0
10	20	0,0936	0,209	0	1	0
10	21	0,0348	0,0749	0	1	0
10	22	0,0727	0,1499	0	1	0
12	13	0	0,14	0	1	0
12	14	0,1231	0,2559	0	1	0
12	15	0,0662	0,1304	0	1	0
12	16	0,0945	0,1987	0	1	0
14	15	0,221	0,1997	0	1	0
15	18	0,1073	0,2185	0	1	0
15	23	0,1	0,202	0	1	0
16	17	0,0524	0,1923	0	1	0
18	19	0,0639	0,1292	0	1	0
19	20	0,034	0,068	0	1	0

De	Para	R	X	B	Tap	Deslocamento de Fase
21	22	0,0116	0,0236	0	1	0
22	24	0,115	0,179	0	1	0
23	24	0,132	0,27	0	1	0
24	25	0,1885	0,3292	0	1	0
25	26	0,2544	0,38	0	1	0
25	27	0,1093	0,2087	0	1	0
27	29	0,2198	0,4153	0	1	0
27	30	0,3202	0,6027	0	1	0
28	27	0	0,396	0	0,968	0
29	30	0,2399	0,4533	0	1	0