

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1052

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE METODOLOGIAS PARA MONITORAMENTO
DA SEGURANÇA DO SISTEMA ELÉTRICO QUANTO À ESTABILIDADE DE
TENSÃO**

Raisa Dias Barbosa

DATA DA DEFESA: 13/04/2018

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE METODOLOGIAS PARA
MONITORAMENTO DA SEGURANÇA DO SISTEMA ELÉTRICO
QUANTO À ESTABILIDADE DE TENSÃO**

Raisa Dias Barbosa

Dissertação de Mestrado 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 Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Maria Helena Murta Vale

Belo Horizonte - MG

Abril de 2018

"Análise de Sensibilidade de Metodologias para Monitoramento da Segurança do Sistema Elétrico quanto à Estabilidade de Tensão"

Raisa Dias Barbosa

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 13 de abril de 2018.

Por:

Maria Helena Murta Vale

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

Rosilene Nietzsche Dias

Profa. Dra. Rosilene Nietzsche Dias
DEE (CEFET-MG)

Cláudia Rejane de Mesquita

Profa. Dra. Cláudia Rejane de Mesquita
DC (IFMG)

Ao meu filho,

João.

Agradecimentos

A Deus, meu pai e luz da minha vida.

A minha orientadora, professora Maria Helena Murta Vale, por cada ensinamento transmitido e pela paciência e orientação atenciosa durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu esposo, Pedro, pelo incentivo, compreensão e amor dedicados a mim e a nossa família.

Aos meus pais, Luiz e Shirlene, pelo estímulo e pelo apoio em toda minha vida acadêmica. E aos irmãos, Paula e Felipe, pelo companheirismo em todos os momentos.

Aos professores do LRC, pelas disciplinas ministradas.

Aos colegas do LRC pelo compartilhamento de conhecimento e ajuda nos momentos necessários. Em especial, a Fábio, Carlos, Edmar, Letícia, Alex e Pablo.

Resumo

A presente dissertação de mestrado aborda o tema Estabilidade de Tensão, nos aspectos relacionados ao monitoramento da segurança dos sistemas elétricos. De forma mais específica, o trabalho apresenta uma análise de sensibilidade de metodologias, projetadas para cálculo de equivalentes de redes elétricas em tempo real, quanto ao impacto das variações dos parâmetros que compõem seus equacionamentos, nos resultados dos estudos de estabilidade. As metodologias analisadas são fruto de trabalhos desenvolvidos pela equipe de pesquisadores do LRC/PPGEE/UFGM. Estas se baseiam na construção de equivalentes de redes a partir de medições de fasores de tensão e de correntes coletadas em barramentos do sistema elétrico.

Partindo das equações que definem cada uma das metodologias, a análise de sensibilidade registra o comportamento das mesmas, frente à variação de seus parâmetros. Com base em tal análise, é apresentada uma Proposta de Ajuste de Parâmetros, visando à escolha mais adequada dos valores que favoreçam a convergência das impedâncias do equivalente para a referência analítica.

Adicionalmente, a dissertação apresenta uma Proposta de Adaptação das Metodologias para Aplicação em Tempo Real. Tal proposta se baseia em resultados de análises realizadas a partir de dados de medição real obtidos de barramento do Sistema Interligado Nacional.

Palavras-chave: Estabilidade de Tensão, Equivalente de Rede, Monitoramento em Tempo Real, Segurança do Sistema Elétrico.

Abstract

This master thesis addresses the topic of Voltage Stability in aspects related to the monitoring of power systems security. The work presents, specifically, a sensitivity analysis of some methodologies used for the calculation of Network Equivalent in real-time operation. The analysis evaluates the impact of the variation of the methodologies parameters in the results of the power system security studies. The analyzed methodologies are a result of the work developed by the researcher team of LRC/PPGEE/UFMG. The methodologies are projected to build network equivalents, using voltage and currents phasors measuring data, collected in power system buses.

The sensitivity analysis evaluates and registers the behavior of the equations that define each of the studied methodologies, during their parameters variation. This analysis gave rise to a proposal of the adjustment in the equations parameters, aiming at the appropriate choice of values that lead to the convergence of the equivalent impedances to the analytical reference.

In addition, this master thesis presents a proposal of adaptation for the real-time application methodologies. This proposal is based on the result of analyzes performed with the actual measurement data of a bus, obtained from the Brazilian National Interconnected System.

Key-words: Voltage Stability, Network Equivalent, Real-Time Monitoring, Power System Security.

Lista de Figuras

Figura 2-1 Sistema elétrico simplificado.....	5
Figura 2-2 Comportamento das relações de potência, tensão e corrente.	8
Figura 2-3 Comportamento da potência ativa em função do fator de potência da carga.	9
Figura 2-4 Curva PV.....	10
Figura 2-5 Equivalente de Thèvenin.	12
Figura 3-1 Fluxo de potência da barra K.....	16
Figura 3-2 Constituição do Equivalente de Thèvenin a partir da YB_{mod}	24
Figura 4-1 Fluxograma do Ambiente de Simulação.	30
Figura 4-2 Variação da ponderação em M2 quando altera-se o valor de M2.	33
Figura 4-3 Z_{th} ponderada pela Metodologia 2 para diferentes valores de M2, com $j = 5$	34
Figura 4-4 Tendência de variação de Z_{th} em função de M2, com $j = 5$	36
Figura 4-5 Z_{th} ponderada pela Metodologia 2 para diferentes valores de j , com $M2 = 2$	37
Figura 4-6 Z_{th} ponderada pela Metodologia 2 para diferentes valores de j , com $M2 = 2$ e $j_a = 5$	38
Figura 4-7 Tendência de variação de Z_{th} em função de j na Metodologia 2, $M2 = 2$	40
Figura 4-8 Z_{th} ponderada pela Metodologia 3 para diferentes valores de M3, com $j = 20$	42
Figura 4-9 Tendência de variação de Z_{th} em função de M3, $j = 20$	44
Figura 4-10 Z_{th} ponderada pela Metodologia 3 para diferentes valores de j , com $M3 = 10$	45
Figura 4-11 Z_{th} ponderada pela Metodologia 3 para diferentes valores de j , com $M3 = 10$ e $j_a = 5$	46
Figura 4-12 Tendência de variação de Z_{th} em função de j na Metodologia 3, com $M3 = 10$..	48
Figura 4-13 Diagrama esquemático de M4.	49
Figura 4-14 Z_{th} ponderado pela Metodologia 4 para diferentes valores de M4, com $j = 5$	50
Figura 4-15 Tendência de variação de Z_{th} em função de M4, com $j = 5$	52
Figura 4-16 Z_{th} ponderada pela Metodologia 4 para diferentes valores de j , com $M4 = 3$	53
Figura 4-17 Z_{th} ponderada pela Metodologia 4 para diferentes valores de j , com $M4 = 3$ e $j_a = 5$	53
Figura 4-18 Tendência de variação de Z_{th} em função de j na Metodologia 4, com $M4 = 3$	55
Figura 5-1 Correlação entre M3 e a janela de dados.....	58
Figura 5-2 Correlação entre M4 e janela de dados.....	59
Figura 5-3 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 2 em função de M2 e de j	61
Figura 5-4 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 3 em função de M3 e de j	62
Figura 5-5 Relação entre os valores de M3 e j	63
Figura 5-6 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 4 em função de M4 e de j	64
Figura 5-7 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 4 em função de M4 e de j	65
Figura 6-1 Diagrama esquemático do barramento de Rurópolis.....	68
Figura 6-2 Módulos das impedâncias da carga e de Thèvenin.....	69
Figura 6-3 Módulos das impedâncias da carga e de Thèvenin antes (a) e depois do reset (b)....	71
Figura A-1 Sistema IEEE 14 barras.	78

Lista de Tabelas

Tabela 4-1 Metodologia 2 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	35
Tabela 4-2 Metodologia 2 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	35
Tabela 4-3 Metodologia 2 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	38
Tabela 4-4 Metodologia 2 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	39
Tabela 4-5 Metodologia 3 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	43
Tabela 4-6 Metodologia 3 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	43
Tabela 4-7 Metodologia 3 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	46
Tabela 4-8 Metodologia 3 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	47
Tabela 4-9 Metodologia 4 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	51
Tabela 4-10 Metodologia 4 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	51
Tabela 4-11 Metodologia 4 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	54
Tabela 4-12 Metodologia 4 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica.....	54
Tabela A-1 Dados das barras do sistema IEEE 14 barras estudado	78
Tabela A-2 Dados dos ramos do sistema IEEE 14 barras estudado.....	79

Lista de Siglas e Abreviaturas

AEP	America Electric Power
ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LRC	Lightning Research Center
LT	Linha de Trasmissão de Energia Elétrica
MET	Margem de Estabilidade de Tensão
MST	Margem de Segurança de Tensão
MVS	Mínimo Valor Singular
ONS	Operador Nacional do Sistema
PIT	Índice Previsor de Instabilidade
PMC	Ponto de Máximo Carregamento
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
SE	Subestação de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SISMEF	Sistema de Medição Fasorial
SMFS	Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
VSD	Valor Singular a Direita
VSE	Valor Singular a Esquerda

Sumário

1. Capítulo 1 Introdução	1
2. Capítulo 2 Revisão de Conceitos Básicos	4
2.1. Considerações Iniciais.....	4
2.2. Teorema da Máxima Transferência de Potência.....	4
2.3. Curvas do Tipo PV e Margens de Estabilidade.....	9
2.4. Sistemas de Grande Porte – Uso de Equivalentes de Rede	11
2.5. Considerações Finais	14
3. Capítulo 3 Metodologias e Aplicativos Utilizados nas Análises de Estabilidade de Tensão.....	15
3.1. Considerações Iniciais.....	15
3.2. Metodologias de Cálculo de Carga.....	15
3.3. Metodologias para Cálculo de Equivalentes de Rede	17
3.3.1. Equivalente de Thèvenin e Estimador dos Mínimos Quadrados.....	18
3.3.2. Correção dos Parâmetros do Equivalente	18
3.3.3. Metodologias para Cálculo de Equivalentes de Redes	19
3.3.4. Impedância de Thèvenin Calculada Analiticamente.....	22
3.4. Aplicativos para Análise da Segurança do Sistema Elétrico quanto à Estabilidade de Tensão.....	24
3.4.1. Monitor - Simulador para Avaliação de Estabilidade de Tensão.....	25
3.4.2. SimC – Simulador de Cenários Operativos de SEP	26
3.5. Considerações Finais	27
4. Capítulo 4 Análise das Metodologias de Equivalentes de Redes	29
4.1. Considerações Iniciais.....	29
4.2. Sistema Elétrico Selecionado e Caracterização dos Casos Estudados.....	29
4.3. Ambiente de Simulação Desenvolvido para as Análises	30
4.4. Análise de Sensibilidade – Metodologia 2.....	32
4.4.1. Equacionamento Original	32
4.4.2. Novo Equacionamento Proposto	33
4.4.3. Análise de Sensibilidade – Variação da Ponderação M2.....	34
4.4.4. Análise de Sensibilidade – Variação da Janela de Dados j.....	36
4.4.5. Análise Global – Metodologia 2.....	40
4.5. Análise de Sensibilidade – Metodologia 3.....	41

4.5.1.	Equacionamento	41
4.5.2.	Análise de Sensibilidade – Variação da Ponderação M3.....	41
4.5.3.	Análise de Sensibilidade – Variação da Janela de Dados j.....	44
4.5.4.	Análise Global – Metodologia 3.....	48
4.6.	Análise de Sensibilidade – Metodologia 4.....	49
4.6.1.	Equacionamento	49
4.6.2.	Análise de Sensibilidade – Variação da Ponderação M4.....	50
4.6.3.	Análise de Sensibilidade – Variação da Janela de Dados j.....	52
4.6.4.	Análise Global – Metodologia 4.....	55
4.7.	Considerações Finais	56
5.	Capítulo 5 Proposta de Ajuste dos Parâmetros das Metodologias	57
5.1.	Considerações Iniciais.....	57
5.2.	Propostas para Ajuste de Parâmetros.....	57
5.2.1.	Proposta para a Metodologia 2.....	57
5.2.2.	Proposta para a Metodologia 3.....	58
5.2.3.	Proposta para a Metodologia 4.....	59
5.3.	Avaliação das Propostas de Ajuste de Parâmetros Considerando Medições com Erro do Tipo Ruído	60
5.3.1.	Avaliação da Proposta para a Metodologia 2	60
5.3.2.	Avaliação da Proposta para a Metodologia 3	62
5.3.3.	Avaliação da Proposta para a Metodologia 4	63
5.4.	Considerações Finais	65
6.	Capítulo 6 Proposta de Adaptação das Metodologias para Aplicação em Tempo Real	67
6.1.	Considerações Iniciais.....	67
6.2.	Sistema Elétrico Analisado	67
6.3.	Aplicação da Metodologia Utilizando Dados de Medições Reais	68
6.4.	Proposta de Adaptação das Metodologias – Reset.....	70
6.5.	Considerações Finais	72
7.	Capítulo 7 Conclusões e Propostas de Continuidade	73
	Referências Bibliográficas	75
A.	Anexo Sistema IEEE 14 Barras (IEEE-14).....	78

Capítulo 1

Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem como objetivo principal o fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Nem sempre os fornecedores de energia elétrica conseguem garantir que a expansão da rede elétrica acompanhe o crescimento da demanda, forçando o sistema a operar próximo aos limites de segurança. Assim, buscam-se melhorias no desempenho do sistema elétrico, a fim de evitar que esses limites de segurança sejam atingidos, o que acarretaria impactos negativos na qualidade do fornecimento de energia. No contexto desta dissertação, é feita uma avaliação no que diz respeito aos limites que representam risco de perda de Estabilidade de Tensão.

Em [IEEE, 1990], estabilidade de tensão é definida como “*a capacidade do sistema de manter as suas tensões, de forma que, quando a admitância da carga crescer, a sua potência também aumentará, pois tanto a demanda quanto as tensões são controláveis*”. Quando essas condições não são atendidas pelo sistema, diz-se que ele atinge a instabilidade de tensão que é o “*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*”. Nesse contexto, caso as tensões mantenham-se decaindo, é possível que haja um colapso de tensão, o que ocasiona grandes desligamentos e significativos prejuízos ao sistema elétrico.

O risco da perda de estabilidade de tensão tem aumentado de forma significativa, principalmente em decorrência da fragilidade das redes elétricas. Apesar dos estudos preparados nas etapas de planejamento serem fundamentais para o desempenho do sistema, seus resultados apresentam certo grau de incerteza inerente à elaboração de planos futuros (erro de previsão de carga, atraso de obras previstas etc.).

Sendo assim, torna-se fundamental o monitoramento do comportamento do SEP em relação à estabilidade de tensão na etapa da operação em tempo real. O conhecimento da condição operativa do sistema elétrico possibilita que ações preventivas possam ser realizadas, para se evitarem situações críticas de emergência.

Para monitorar em tempo real a segurança do SEP quanto à estabilidade de tensão, é preciso supervisionar a distância do seu ponto de operação atual ao ponto crítico, quando atinge a instabilidade de tensão. Nas análises estáticas de estabilidade de tensão, esse ponto crítico tem sido caracterizado pelo Ponto de Máximo Carregamento (PMC), para cargas do tipo potência constante.

Visando monitorar essa distância do ponto operativo ao PMC em tempo real, são desenvolvidas técnicas para cálculo de equivalentes de rede baseadas em medições de grandezas coletadas em barramentos no próprio sistema. Esses equivalentes possibilitam maior agilidade na análise do ponto operativo, não sendo necessário o uso de programas de fluxo de potência para análise da estabilidade de tensão. A construção em tempo real de equivalentes de rede, vistos por um barramento de interesse do sistema, constitui o cerne das metodologias estudadas neste trabalho.

Apesar de existir vasta literatura relacionada à estabilidade de tensão e muitas pesquisas sendo desenvolvidas em vários centros no mundo, são raras as publicações que tratam da construção de equivalentes de rede que, de fato, são aplicáveis à análise de estabilidade de tensão em tempo real, conforme discutido em [Silva, 2017] e [Silva, 2018].

A equipe de pesquisadores do LRC¹/UFMG vem realizando intensa pesquisa no campo de estabilidade de tensão, levando ao desenvolvimento de metodologias para cálculo de equivalentes e de indicadores para avaliação do risco da perda da estabilidade de tensão de sistemas elétricos. Um conjunto de trabalhos de natureza acadêmica e prática desenvolvidos pela equipe estão registrados em várias dissertações, projetos e publicações.

Apenas em termos de dissertações, citam-se: [Lobato, 1998], [Cortez, 2001], [Mariano Jr., 2008], [Silva, 2010], [Ribeiro, 2011], [Condega, 2013], [Leal, 2013], [Andrade, 2014], [Vilela, 2014], [Silva, 2015], [Roquette, 2016], [Andrade, 2018], [Silva, 2018] e [Souza, 2018].

Dentre os desenvolvimentos, destaca-se a implementação do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SISMEF), fruto de projeto de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento), em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) e a empresa Concert Technologies [Cemig, 2010]. No SISMEF, encontra-se implantado o Módulo PIT (Previsor de Instabilidade de Tensão) que, a partir do cálculo de equivalente em tempo real, calcula diversas grandezas relacionadas às análises de estabilidade de tensão e o indicador de risco, o PIT, em intervalos de um décimo de segundo.

Dois aplicativos também se destacam, o SimC – Simulador de Cenários Operativos de Sistemas Elétricos de Potência [Silva, 2015] e [Silva, 2018] – e o Monitor – Simulador para Avaliação de Estabilidade de Tensão [Vale Visacro, 2014]. Esses aplicativos contribuem de forma significativa para o desenvolvimento e validação das metodologias de avaliação de estabilidade de tensão.

Na dissertação [Silva 2018], é proposto um Equivalente Analítico de Redes Elétricas, com a determinação de parâmetros de referência para avaliação dos equivalentes. O ambiente SimC-Monitor abre campo para a evolução das metodologias e, até mesmo, para a proposição de novas abordagens.

A presente dissertação constitui uma continuação desses trabalhos. Mesmo que as metodologias já desenvolvidas apresentem resultados bastante consistentes, o ambiente de análise disponibilizado para as pesquisas permite que estas sejam ainda mais aprimoradas.

¹ LRC – Lightning Research Center - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas - Convênio UFMG-CEMIG.

Do exposto, pode-se caracterizar o objetivo do trabalho: investigar o tema estabilidade de tensão por meio da elaboração de uma análise de sensibilidade das metodologias desenvolvidas até o momento no LRC/UFMG. De forma mais específica, seu objetivo é identificar os valores mais adequados de parâmetros adotados nos equacionamentos que definem as metodologias, a fim de aproximar as impedâncias de Thèvenin calculadas, por cada uma delas, da impedância de Thèvenin analítica, considerada como referência. Também são propostos ajustes nas metodologias de cálculo de equivalentes, visando aprimorá-las para aplicação em tempo real.

A relevância do trabalho se encontra, principalmente, na melhoria da segurança do sistema elétrico, uma vez que contribui para a evolução das análises de segurança quanto à estabilidade de tensão na etapa de operação em tempo real.

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, incluindo este primeiro, introdutório, e um anexo.

O Capítulo 2 aborda os principais conceitos e definições referentes aos temas Estabilidade de Tensão, Equivalentes de Rede e Estimador de Estados dos Mínimos Quadrados.

No Capítulo 3 é feita uma contextualização da dissertação nas pesquisas que têm sido desenvolvidas no LRC/UFMG. São descritas as metodologias desenvolvidas até o momento, as quais estão diretamente relacionadas às análises realizadas nesta dissertação.

No Capítulo 4, é apresentada uma análise de sensibilidade das metodologias descritas no Capítulo 3, com relação ao ajuste de parâmetros. Foram utilizados cenários gerados pelo aplicativo SimC, aplicados ao sistema de 14 barras do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

No Capítulo 5, a partir das análises apresentadas no Capítulo 4, é proposta uma metodologia de ajuste de parâmetros das metodologias.

No Capítulo 6, a metodologia proposta é aplicada, utilizando medições provenientes de um barramento do Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro. A partir dessa aplicação, é proposta uma adaptação para melhor adequação das metodologias para operação em tempo real.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e propostas de continuidade deste trabalho.

Ao final do texto encontram-se as Referências Bibliográficas e um Anexo, que apresenta as características do sistema de 14 barras do IEEE utilizado nos estudos.

Capítulo 2

Revisão de Conceitos Básicos

2.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta os conceitos básicos relacionados ao tema estabilidade de tensão que são de fundamental importância para o entendimento dos estudos realizados nesta dissertação.

As definições adotadas neste trabalho, para caracterizar as condições de estabilidade e de instabilidade de tensão, foram introduzidas no capítulo anterior. Neste capítulo, são destacados conceitos relevantes no contexto da análise estática de estabilidade. A identificação do Ponto de Máximo Carregamento da rede elétrica, da Margem de Segurança de Tensão e da Margem de Estabilidade de Tensão é importante para a caracterização da proximidade do ponto de operação do SEP ao ponto de instabilidade de tensão.

Os conceitos são introduzidos a partir de um sistema simples de duas barras. Ampliando a análise para sistemas de grande porte, é discutida a importância dos Equivalentes de Rede contruídos em tempo real, a partir de dados provenientes de medição. Como a presença de erros associados às incertezas de medição é inerente às grandezas medidas, a formulação básica do Estimador dos Mínimos Quadrados é introduzida, visando mostrar a sua função de filtrá-las. A descrição desses temas decorre do fato de constituírem o ponto de partida para os equivalentes de tempo real desenvolvidos no LRC/UFG, objeto principal desta dissertação.

2.2. Teorema da Máxima Transferência de Potência

O Teorema da Máxima Transferência de Potência é utilizado para definir o Ponto de Máximo Carregamento, PMC, de um sistema elétrico.

Entende-se por máximo carregamento o valor específico de potência máxima que cada barra é capaz de entregar ou distribuir para as suas cargas. Quando a carga é do tipo potência constante e o valor da sua potência tenta ultrapassar a potência do PMC, o sistema, não sendo capaz de suprir essa demanda, entra em processo de instabilidade de tensão.

Para descrever esse teorema, a literatura técnica, como em [Kundur, 1994], utiliza tradicionalmente um sistema elétrico de potência simplificado composto por duas barras, conforme Figura 2-1 retirada de [Andrade, 2014]. Esse sistema é composto por uma fonte de tensão ideal, $E \angle 0^\circ$, uma linha de transmissão, de impedância $Z_L \angle \theta_L$, e uma carga, de impedância de $Z_C \angle \theta_C$.

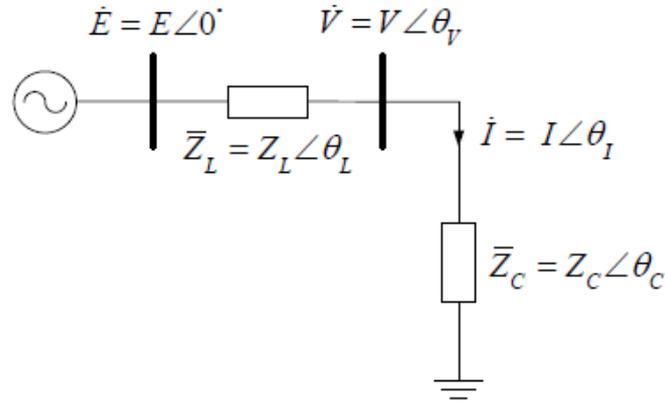


Figura 2-1 Sistema elétrico simplificado.
Fonte: [Andrade, 2014]

Considerando a fonte de tensão como referência angular para o problema, tem-se a seguinte relação para o cálculo da corrente:

$$\dot{i} = \frac{\dot{E}}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_C} \quad (2.1)$$

Sabe-se que:

$$|\bar{Z}_L + \bar{Z}_C| = \sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (2.2)$$

Logo, o módulo da corrente é dado pela expressão:

$$I = \frac{E}{\sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.3)$$

A corrente de curto-circuito (\dot{I}_{CC}) é o valor de \dot{I} quando a impedância de carga é nula. Assim é possível obter a expressão do módulo de \dot{I}_{CC} a partir da equação (2.3).

$$I_{CC} = \frac{E}{Z_L} \quad (2.4)$$

Utilizando as equações (2.3) e (2.4), pode-se representar o módulo da corrente no circuito em função da corrente de curto-circuito, de acordo com a expressão (2.5).

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

Sendo V e Z_C os módulos da tensão e da impedância na carga, respectivamente, a expressão para cálculo de V torna-se:

$$V = Z_C I = \frac{Z_C I_{CC}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.6)$$

A potência ativa consumida pela carga é calculada por:

$$P = V I \cos\theta_C = \frac{V I_{CC}^2 \cos\theta_C}{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (2.7)$$

O valor da potência ativa no PMC é o valor de potência máxima que pode ser transferida para a carga pelo sistema. Para encontrar esse ponto de máximo é preciso fazer a derivada de P em função de Z_C , e igualar essa derivada a zero.

A derivada da equação de potência ativa consumida pela carga em relação ao módulo da impedância da carga é dada pela expressão (2.8):

$$\frac{dP}{dZ_C} = \frac{I_{CC}^2 \cos\theta_C \left[1 - \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2\right]}{\left[1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right) \cos(\theta_L - \theta_C)\right]^2} \quad (2.8)$$

Conforme já descrito, para encontrar o ponto máximo da função acima deve-se fazer:

$$\frac{dP}{dZ_C} = 0 \quad (2.9)$$

Analisando a equação, nota-se que isso só é possível quando o numerador da equação (2.8) for nulo, ou seja:

$$I_{CC}^2 \cos\theta_C \left[1 - \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2\right] = 0 \Rightarrow 1 - \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 = 0 \quad (2.10)$$

$$Z_C = Z_L \quad (2.11)$$

Portanto, pode-se concluir que a máxima transferência de potência ocorre quando o módulo da impedância da carga (Z_C) é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão (Z_L). Sendo assim, o valor do máximo carregamento trata-se de uma limitação física do sistema.

Como já citado, se a carga é modelada como sendo do tipo potência constante, o sistema atinge a instabilidade de tensão quando a potência da carga tenta superar a

potência do PMC. Isso ocorre, de acordo com a equação (2.11), a partir do momento em que a impedância da carga torna-se menor que a impedância da linha de transmissão. Tal ocorrência, em sistemas mais complexos, pode levar ao desligamento parcial ou completo do SEP, enfatizando a importância da monitoração do comportamento do mesmo, alertando para quando este se aproxima do PMC.

Três relações importantes, que permitem descrever o comportamento das grandezas tensão, corrente e potência, em função do aumento da carga do sistema, podem ser derivadas dos desenvolvimentos apresentados nesse item:

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{Z_C}{Z_L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.12)$$

$$\frac{I}{I_{CC}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.13)$$

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta_L - \theta_C)}{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)\cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (2.14)$$

A Figura 2-2 apresenta estas relações. As curvas apresentadas nesta figura foram obtidas simulando um sistema de duas barras, como o representado na Figura 2-1. Para tal foi realizado um incremento da carga, diminuição de \bar{Z}_C , mantendo-se seu fator de potência constante.

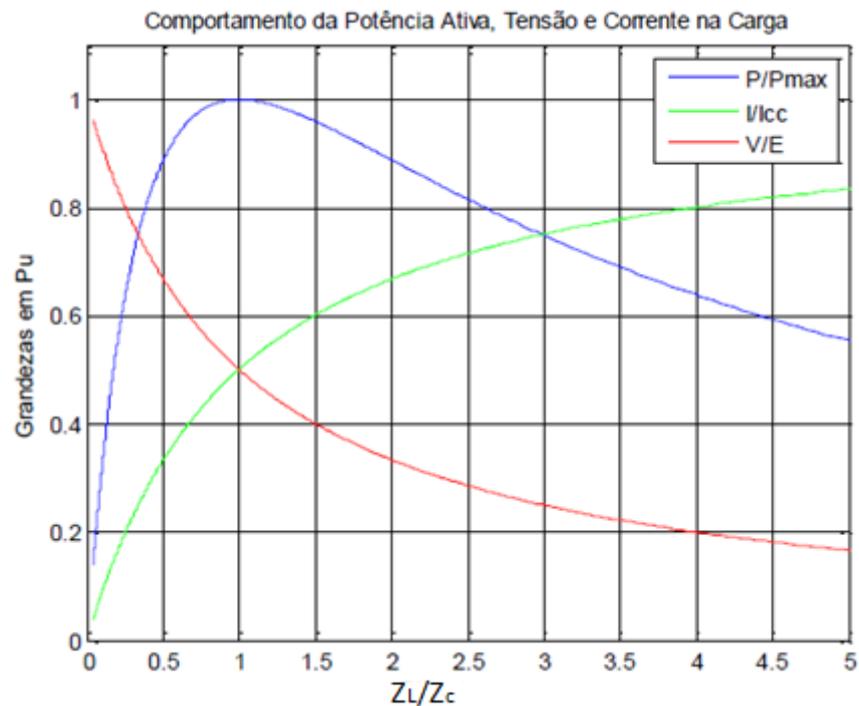


Figura 2-2 Comportamento das relações de potência, tensão e corrente.
 Fonte: [Silva, 2015]

Uma análise das curvas da Figura 2-2 leva a algumas conclusões importantes sobre o comportamento desse sistema em função do incremento de carga. Nota-se que em situações de carga leve, ou seja, quando $Z_C \gg Z_L$, os valores de potência ativa e de corrente no sistema são baixos, enquanto a tensão na carga é próxima da tensão operativa inicial. À medida que ocorre o incremento da carga (diminuição de Z_C), a corrente aumenta e, também, a potência ativa demandada pela carga. O aumento da corrente acarreta o aumento da queda de tensão na linha de transmissão, e, conseqüentemente, a diminuição da tensão na carga.

Nota-se que, no início do incremento da carga, apesar da tensão na carga diminuir, a potência ativa fornecida à mesma continua aumentando. Isso acontece porque o aumento da corrente do sistema é mais significativo que o decaimento da tensão. Esse fenômeno ocorre até determinado ponto, quando as impedâncias se igualam ($Z_C = Z_L$). Esse ponto é o PMC, ou seja, o ponto de máxima transferência de potência. Sendo assim, neste ponto a relação P/P_{max} é unitária, conforme pode ser observado na Figura 2-2.

Após o PMC, apesar do crescimento da carga, a potência ativa fornecida diminui. Conforme esperado, a tensão na carga continua decaindo, enquanto a corrente do sistema aumenta. Mas, nesse caso, a queda da tensão é mais significativa que o aumento da corrente, e, por isso, a potência ativa também diminui.

É importante destacar que a potência máxima transferida pelo sistema a uma determinada carga está diretamente relacionada com o fator de potência dessa carga. Quanto mais capacitiva for a carga, menor seu fator de potência, e maior será a capacidade

da rede em alimentá-la, ou seja, maior será a potência do PMC. Quanto mais indutiva for a carga, menor seu fator de potência, e menor será a capacidade da rede em alimentá-la, ou seja, menor será a potência do PMC. A Figura 2-3 retirada de [Silva, 2010], ilustra as curvas de potência ativa transferida para a carga, com relação ao seu fator de potência.

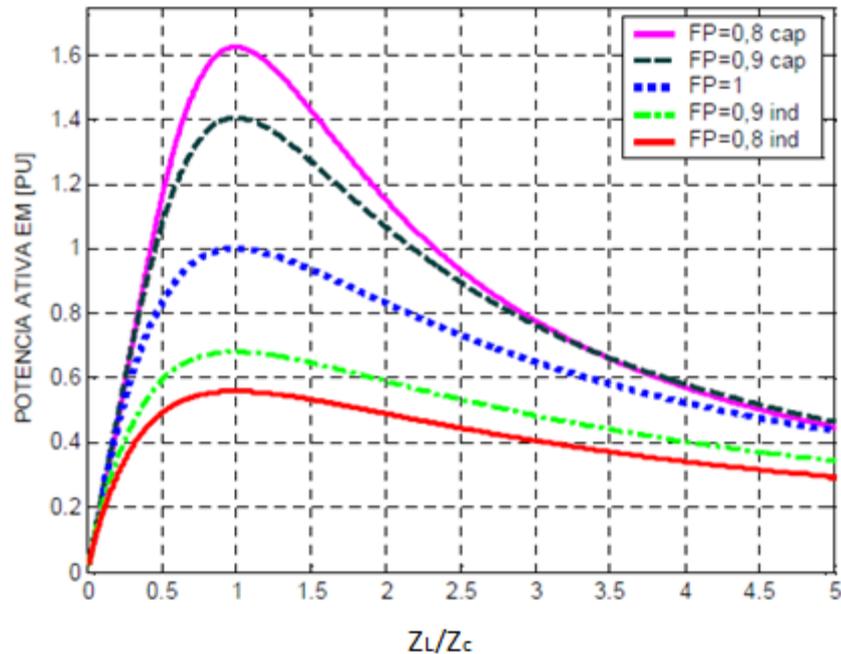


Figura 2-3 Comportamento da potência ativa em função do fator de potência da carga.
 Fonte: [Silva, 2010]

2.3. Curvas do Tipo PV e Margens de Estabilidade

Análises estáticas relativas à estabilidade de tensão utilizam as chamadas curvas do tipo PV, para determinar o PMC de uma barra de carga. Para construção dessa curva é preciso um monitoramento dos valores de potência ativa consumida pela carga conectada à barra em estudo e da tensão dessa barra. Esse estudo pode ser feito por meio de simulações, como a realizada para obtenção das curvas da Figura 2-2. Nessas simulações, é feito o incremento da carga da barra em estudo, conservando seu fator de potência constante. A Figura 2-4 apresenta uma curva PV, destacando suas principais características.

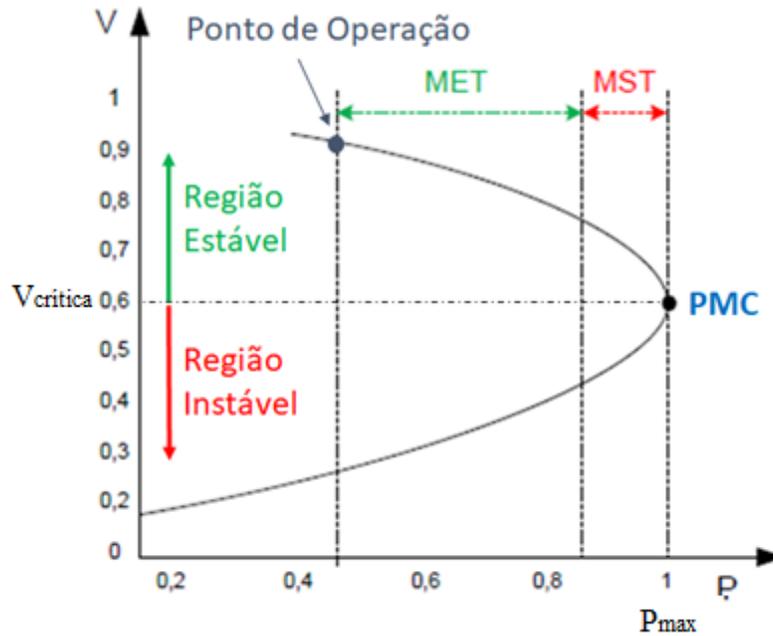


Figura 2-4 Curva PV.
Fonte: adaptada de [Andrade, 2014]

Como destacado na Figura 2-4, o PMC está na extremidade direita da curva PV. Este é caracterizado por uma Potência Máxima (P_{max}) e por uma Tensão Crítica (V_{crit}). Esse ponto também define, no eixo das tensões, o limite entre as regiões estável e instável de operação do sistema em estudo, para cargas do tipo potência constante. Sendo assim, conforme já introduzido anteriormente, esse ponto é considerado o Ponto Crítico de estabilidade de tensão, para cargas do tipo potência constante.

A Figura 2-4 também destaca dois outros conceitos importantes relativos à estabilidade de tensão: a Margem de Segurança de Tensão (MST) e a Margem de Estabilidade de Tensão (MET).

A MST define a distância mínima que deve ser respeitada entre o ponto de operação do sistema e o ponto de máximo carregamento. Trata-se de um valor constante e estabelecido por órgão do setor elétrico, a fim de evitar que o ponto operativo atinja o PMC e, conseqüentemente, a instabilidade de tensão. No Brasil, esta margem é definida nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [ONS, 2016a]. Atualmente esse valor é de 4% da potência máxima, para a operação em tempo real.

A MET, também destacada na Figura 2-4, consiste na distância entre o ponto de operação e o ponto de segurança definido pela MST. A figura deixa clara a diferença entre essas duas margens.

Considerando um circuito simplificado de duas barras, como o apresentado na Figura 2-1, não é necessário construir a curva PV, para serem obtidos os valores da tensão crítica, V_{crit} , e da potência ativa no PMC, P_{max} . Esses valores podem ser definidos por meio de equações derivadas das equações já desenvolvidas no item 2.2 desta dissertação.

Substituindo a equação (2.4), que define a corrente de curto-circuito, na equação (2.7), considerando a condição característica do PMC ($Z_C = Z_L$), obtém-se a expressão para potência máxima que o sistema é capaz de transferir.

$$P_{max} = \frac{E^2 \cos \theta_C}{2Z_L [1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]} \quad (2.15)$$

A expressão para cálculo da tensão crítica pode ser obtida a partir da equação (2.6), fazendo-se as mesmas considerações para obtenção da expressão de P_{max} .

$$V_{crit} = \frac{E}{\sqrt{2 + 2\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.16)$$

Observando as equações (2.15) e (2.16) nota-se que, para definir o PMC, em um sistema simplificado de duas barras, são necessárias apenas informações dos parâmetros da fonte geradora de tensão, da linha de transmissão e da carga, no ponto de operação.

2.4. Sistemas de Grande Porte – Uso de Equivalentes de Rede

Nas análises de sistemas elétricos de grande porte, a construção das curvas PV é implementada por meio de programas de Fluxo de Potência Continuado, como, por exemplo, o *software* Anarede (Análise de Redes Elétricas), desenvolvido pelo Cepel (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica). Para cada barra de carga, podem ser determinados os valores de P_{max} , V_{crit} e das margens. Essa metodologia de análise é a adotada nas etapas de estudos, onde todo o detalhamento da rede encontra-se disponibilizado e o tempo das simulações não constitui fator determinante na solução.

Em tempo real, onde o monitoramento da condição operativa do SEP precisa ser realizado de forma a acompanhar a dinâmica do mesmo, esforços têm sido feitos para se agilizarem as análises. Neste sentido, surgem as técnicas para representar o sistema por meio de Equivalentes de Redes, construídos a partir de medições de grandezas elétricas coletadas no próprio sistema.

Diante dessa realidade, o LRC/UFMG, tem desenvolvido metodologias de análise de estabilidade de tensão implementando equivalentes de redes elétricas. Assim, qualquer sistema de grande porte pode ser transformado em um sistema de duas barras, como o da Figura 2-1, viabilizando a análise em tempo real. Adicionalmente, os conceitos relacionados ao Teorema da Máxima Transferência de Potência, aplicados ao sistema de duas barras, passam a ser adotados para o equivalente. Esse tema é detalhado posteriormente devido à grande importância que tem para desenvolvimento do presente trabalho.

Uma das primeiras propostas nesta direção é aquela apresentada em [Vu, 1999]. O equivalente reduz o SEP original a um sistema de duas barras, denominado Equivalente de Thèvenin, conforme ilustrado na Figura 2-5. As grandezas que compõem o

equivalente, tensão e impedância de Thèvenin, \dot{E}_{th} e \bar{Z}_{th} , são obtidas a partir de medições de grandezas coletadas no barramento k sob análise.

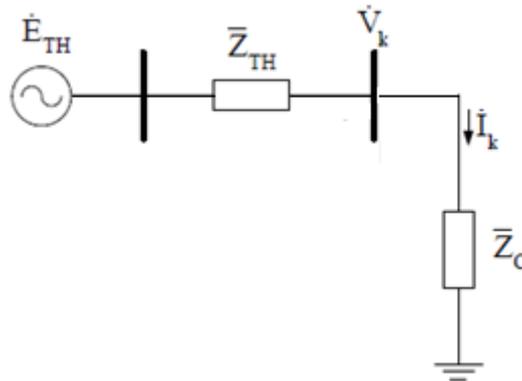


Figura 2-5 Equivalente de Thèvenin.

Considerando a Figura 2-5, quando os fasores de tensão (\dot{V}_k) e corrente (\dot{I}_k) na barra de carga são conhecidos, a impedância da carga (\bar{Z}_c) pode ser obtida por:

$$\bar{Z}_c = \frac{\dot{V}_k}{\dot{I}_k} \quad (2.17)$$

Para se calcularem as grandezas do equivalente de Thèvenin, \dot{E}_{th} e \bar{Z}_{th} , é adotado o equacionamento que se segue. Pela Figura 2-5, e de acordo com as Leis de Kirchhoff, tem-se:

$$\dot{E}_{th} = \dot{V}_k + \bar{Z}_{th}\dot{I}_k \quad (2.18)$$

Uma forma de solução da equação (2.18) é escrever os fasores em sua forma retangular e, assim, separar a parte real (r) da parte imaginária (m), formando um sistema de duas equações.

$$E_{th_r} + jE_{th_m} = V_{k_r} + jV_{k_m} + (R_{th} + jX_{th}) * (I_{k_r} + jI_{k_m}) \quad (2.19)$$

$$E_{th_r} - R_{th}I_{k_r} + X_{th}I_{k_m} = V_{k_r} \quad (2.20)$$

$$E_{th_m} - R_{th}I_{k_m} - X_{th}I_{k_r} = V_{k_m} \quad (2.21)$$

Observa-se que este apresenta duas equações e quatro incógnitas. A solução proposta por Vu, para se obter um novo conjunto de equações, tornando possível a solução do problema, é considerar dados de tensão e de corrente de uma medição consecutiva à primeira. Dessa forma, podem ser calculadas as grandezas do equivalente, \dot{E}_{th} e \bar{Z}_{th} .

A equação pode ser escrita na forma matricial por meio da expressão (2.22).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k_r1} & I_{k_m1} \\ 0 & 1 & -I_{k_m1} & -I_{k_r1} \\ 1 & 0 & -I_{k_r2} & I_{k_m2} \\ 0 & 1 & -I_{k_m2} & -I_{k_r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{th_r} \\ E_{th_m} \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{th_r1} \\ V_{th_m1} \\ V_{th_r2} \\ V_{th_m2} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

É importante destacar que esse método de solução considera que, entre os dois instantes consecutivos de medições, os parâmetros da rede são mantidos constantes. Isto sugere que o tempo entre tais medições não possa ser muito elevado, garantido a não alteração da rede representada pelo equivalente.

O equivalente descrito acima possui relevância para os desenvolvimentos de equivalentes de tempo real que se baseiam em medições. Entretanto, ele não considera uma característica inerente aos equivalentes desta natureza: a presença de erros de medições. Tal presença traz grande complexidade à construção dos equivalentes, os quais precisam introduzir técnicas para considerá-la.

Conforme discutido em [Vale, 1986], as grandezas elétricas medidas em um SEP sempre estão contaminadas pelos chamados erros do tipo ruído², associados às incertezas inerentes às medições, e podem, também, estar contaminadas por erros do tipo grosseiro³.

Diferentemente do erro grosseiro, que não possui modelagem própria, o ruído pode ser tratado por meio de técnicas de filtragem. Dentre elas, destacam-se os Estimadores de Estados.

A maioria dos estimadores utiliza o método dos mínimos quadrados. Em [Aguirre, 2007] este é descrito como a solução da equação (2.22), onde A é a matriz de regressores (ordem $N \times M$), b é o vetor de amostras conhecidas (N amostras), e x é o vetor de coeficientes desejados (M coeficientes), ou vetor solução.

$$b = Ax \quad (2.23)$$

O método dos mínimos quadrados considera a presença de um erro (ζ) associado à solução do sistema e procura um resultado que minimize tal erro. Assim, a equação (2.23) pode ser escrita como:

$$b = Ax - \zeta \quad (2.24)$$

Para encontrar um vetor solução em que o erro ζ^2 seja o menor possível, a matriz A e o vetor b são sobredimensionados. No caso do cálculo de equivalentes de rede para sistemas elétricos, esse sobredimensionamento é feito considerando várias medições consecutivas.

² Ruído: associado às incertezas inerentes aos dados provenientes de medição; está sempre presente e é modelado como variável aleatória normalmente distribuída com valor esperado zero e desvio padrão conhecido.

³ Grosseiro: associado a medições realizadas durante transitórios, falhas de dispositivos de medição etc.; sua ocorrência e localização são desconhecidas e não possui modelo que o represente.

Ao se sobredimensionar a matriz A , ela deixa de ser quadrada e torna-se retangular. Sendo assim, a solução é obtida por meio da matriz pseudo-inversa, conforme equação (2.25).

$$x = A_{pseudo_inversa}b \quad (2.25)$$

A matriz $A_{pseudo_inversa}$ pode ser calculada pela expressão:

$$A_{pseudo_inversa} = [A^T A]^{-1} A^T \quad (2.26)$$

O número de medições utilizadas, para sobredimensionar a matriz A e o vetor b , pode variar de acordo com as características do sistema e com a taxa de amostragem dos dados de medição. Isso porque, como já citado anteriormente, o cálculo do equivalente considera que os parâmetros da rede são constantes entre os instantes final e inicial de amostragem escolhidos.

Os equivalentes de tempo real desenvolvidos no LRC/UFGM, objeto desta dissertação, constituem avanços a esta formulação básica, conforme tratado posteriormente neste texto. Vale já registrar, inclusive, que o parâmetro que determina o número de medições consideradas para cada cálculo do equivalente é denominado nesse trabalho como Janela de Dados (j).

2.5. Considerações Finais

Os estudos relacionados à segurança do sistema elétrico quanto à estabilidade de tensão são importantes desde a fase de planejamento da expansão até a operação em tempo real.

As análises realizadas nas etapas de estudos podem ser feitas utilizando métodos estáticos, como construção da curva PV, característica da solução do fluxo de potência. Mas esses métodos, normalmente, tornam-se inviáveis para a operação em tempo real, quando é necessário ter agilidade e rapidez na determinação da distância do ponto de operação ao PMC. Faz-se necessário o uso de outras metodologias que atendam às necessidades da operação em tempo real. Dentre elas destaca-se o uso dos equivalentes de redes de duas barras.

As metodologias estudadas neste trabalho associam os equivalentes de Thèvenin, determinados a partir de medições fasoriais de tensão e de corrente, e os estimadores dos mínimos quadrados, a técnicas que buscam calcular em tempo real os parâmetros \dot{E}_{th} e \bar{Z}_{th} de maneira a representarem o comportamento dinâmico do SEP. No próximo capítulo, essas metodologias são descritas e são apresentados os dois aplicativos, Monitor e SimC, que deram suporte essencial para os estudos realizados.

Capítulo 3

Metodologias e Aplicativos Utilizados nas Análises de Estabilidade de Tensão

3.1. Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta as metodologias desenvolvidas pelo LRC/UFMG no que diz respeito à análise da segurança do sistema elétrico em tempo real quanto à estabilidade de tensão. Os trabalhos são complementares, conforme descrito no Capítulo 1, o que contribui para a implementação de metodologias consistentes com os requisitos próprios da operação em tempo real do SEP.

No texto, são descritas as metodologias para cálculo de equivalentes de rede propostas em [Andrade, 2014], as quais consistem o principal foco de estudo desta dissertação. São também identificadas as duas metodologias para cálculo de carga equivalente utilizadas no trabalho, propostas em [Ribeiro, 2011].

Além das metodologias de cálculo também foi proposto inicialmente em [Silva, 2010] e estendido em [Andrade, 2014] o Índice Previsor de Instabilidade de Tensão (PIT).

Diante da evolução das pesquisas, fez-se necessária a implementação das diversas metodologias em um único aplicativo, o Monitor, apresentado em [Vale Visacro, 2014]. Esse aplicativo permite estudos de diferentes estados operativos do SEP, de forma sistemática e completa, sendo descrito neste capítulo.

A existência e disponibilidade de medições realizadas em sistemas elétricos reais são vitais para o desenvolvimento de metodologias de análise de estabilidade de tensão em tempo real. No entanto, a grande maioria das medições disponíveis é relativa a sistemas operando em condição normal de operação. Por outro lado, os valores obtidos diretamente de programas de fluxo de potência são livres dos erros que estão presentes nas medições. Diante destas questões, foi desenvolvido o aplicativo SimC, [Silva, 2015] e [Silva, 2018]. Este cria cenários operativos, inclusive com a aproximação do sistema ao PMC, e possibilita inserir a presença de erros nas medições simuladas.

Assim, é necessário utilizar o ambiente de simulação para obter cenários em que o sistema se aproxime do PMC. A fim de obter cenários controlados, incluindo situações onde o SEP atinge o PMC, foi projetado o SimC. Esse aplicativo foi muito utilizado no estudo de sensibilidade das metodologias realizado neste trabalho, e, por isso, também é descrito neste capítulo.

3.2. Metodologias de Cálculo de Carga

Para determinação do equivalente de Thèvenin é preciso definir a carga característica do barramento estudado, para que se possam obter os módulos e ângulos de tensão e corrente referentes à mesma.

A definição de carga equivalente utilizada neste trabalho foi proposta por [Ribeiro, 2011] e se baseia no conceito de correntes equivalentes. São utilizadas duas metodologias, denominadas Metodologia de Cálculo de Carga 1 (CM1), e Metodologia de Cálculo de Carga 2 (CM2), as quais são definidas de acordo com o sentido dos fluxos de potência nos ramos incidentes na barra estudada.

Para explicar essas metodologias utiliza-se o exemplo retirado de [Ribeiro, 2011]. A Figura 3-1 mostra uma barra k , com os sentidos dos fluxos de potência nos ramos incidentes, onde o sinal positivo indica fluxo saindo da barra e sinal negativo indica fluxo entrando na mesma.

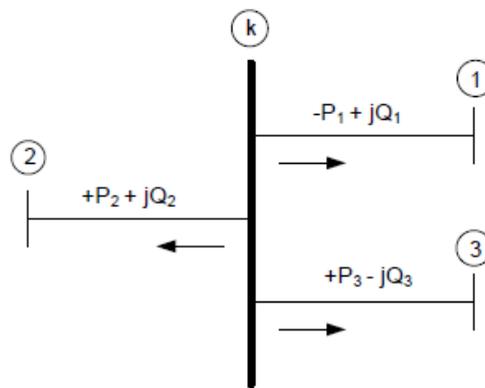


Figura 3-1 Fluxo de potência da barra K.
Fonte: [Ribeiro, 2011]

A metodologia CM1 considera como carga a potência aparente referente à barra k constituída pela soma das potências aparentes dos ramos que apresentam potência ativa com sinal positivo, independente do sinal da potência reativa. Logo, a potência aparente da carga da barra k , \bar{S}_{CM1} , apresentada na Figura 3-1, bem como a corrente equivalente \dot{I}_{kCM1} e a carga equivalente \bar{Z}_{kCM1} , são dadas por:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{CM1} &= (P_2 + P_3) + j(Q_2 - Q_3) & (3.1) \\ \dot{I}_{kCM1} &= \frac{\bar{S}_{CM1}^*}{\dot{V}_k^*} \\ \bar{Z}_{kCM1} &= \frac{\dot{V}_k}{\dot{I}_{kCM1}} \end{aligned}$$

A maioria das cargas do sistema elétrico brasileiro tem característica indutiva, ou seja, a potência reativa por elas consumida é positiva. A metodologia CM2 é desenvolvida a partir desse pressuposto. Assim, a potência aparente da carga referente à barra k é constituída pelas potências ativa e reativa de sinais positivos, independente do ramo a que pertencem. A potência aparente da carga característica da barra k , \bar{S}_{CM2} , apresentada na Figura 3-1, bem como a corrente equivalente \dot{I}_{kCM2} e a carga equivalente \bar{Z}_{kCM2} , são dadas por:

$$\bar{S}_{CM2} = (P_2 + P_3) + j(Q_1 + Q_2) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{kCM2} &= \frac{\bar{S}_{CM2}^*}{\dot{V}_k^*} \\ \bar{Z}_{kCM2} &= \frac{\dot{V}_k}{\dot{I}_{kCM2}} \end{aligned}$$

Observa-se que as metodologias CM1 e CM2 se diferem com relação ao sinal da potência reativa nos ramos incidentes na barra. Enquanto na CM1, é feita a soma das potências aparentes com potência ativa positiva e potências reativas seguindo o sinal da potência ativa, a CM2 considera sempre potências ativas e reativas com sinal positivo.

Para a realização dos cálculos de equivalentes, as metodologias estudadas na dissertação utilizam medições de módulo e ângulo de tensão e módulo e ângulo de corrente. Entretanto, em algumas barras do sistema elétrico não há medições de corrente, mas os valores de módulo e ângulo dessa grandeza podem ser obtidos a partir das medições de tensão e de potências ativa (P) e reativa (Q). As equações abaixo apresentam as expressões utilizadas para tal.

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} * V_{\phi\phi}} \quad (3.3)$$

$$\theta_{vi} = \text{arctg} \frac{Q}{P} \quad (3.4)$$

Nestas equações, $V_{\phi\phi}$ é a tensão fase-fase e θ_{vi} é o ângulo entre os fasores de tensão e corrente.

3.3. Metodologias para Cálculo de Equivalentes de Rede

Com base em medições de fasores (módulos e ângulos) de tensão e de correntes obtidas em um barramento do sistema estudado, as metodologias que utilizam equivalentes de rede calculam, em tempo real, equivalentes dinâmicos, cuja função é representar toda a rede vista por esta barra. Desta forma, as metodologias não requerem o cálculo da rede completa.

Em [Leal, 2013] foi proposta uma metodologia para cálculo de equivalente utilizando medições fasoriais. Posteriormente, em [Andrade, 2014], são apresentadas novas metodologias. Estas se baseiam em três etapas principais: (i) um equivalente inicial é obtido a partir de um conjunto de soluções do estimador dos mínimos quadrados; (ii) os parâmetros são corrigidos, quando necessário, a fim de aproximá-los das condições do sistema elétrico; (iii) o equivalente final é calculado, utilizando-se equações de ponderações aplicadas às impedâncias de Thévenin determinadas a partir de um conjunto de equivalentes calculados no passo (i).

3.3.1. Equivalente de Thèvenin e Estimador dos Mínimos Quadrados

O equivalente calculado na etapa (i), identificada anteriormente, aplica a técnica de estimação dos mínimos quadrados, descrita no Capítulo 2. Tal estimador considera um conjunto de dados de medição em que se supõe que os parâmetros da rede fiquem constantes entre os instantes inicial e final da janela de dados, j , escolhida.

Para medições originadas de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizado (SMFS), pode-se considerar uma janela de dados maior, pois a taxa de amostragem é elevada. No SISMEF, por exemplo, a taxa é de dez medições por segundo. Considerando que os parâmetros do SEP apresentam variação lenta, em estado normal de operação, estes podem ser considerados constantes por certo tempo. Assim, j pode ser da ordem de dezenas de amostras. Quando a taxa de amostragem é pequena, como no caso de medições provenientes de sistemas supervisórios convencionais, os quais muitas vezes fornecem medições de 1 em 1 minuto, o valor de j não deve ser muito grande, pois os parâmetros da rede não podem ser considerados constantes durante dezenas de minutos.

Em [Andrade, 2014] foi mostrado que, quanto menor a janela de dados considerada no cálculo do equivalente, maiores são as variações da impedância de Thèvenin, mas esta converge mais rápido para valor menos variável. Quanto maior o valor de j , mais amortizada é a resposta, porém a convergência da impedância para um valor menos variável demanda mais tempo.

Sendo assim, deve-se escolher de forma crítica o valor de j , considerando as características do SEP, a taxa de amostragem do sistema de medição e os tempos viáveis para a convergência da resposta de Z_{th} , principalmente quando se considera a rapidez e a agilidade da operação em tempo real.

Uma das formas apresentadas em [Andrade, 2014], para contornar essa questão, foi a inclusão de uma janela de aceleração nas primeiras medições, fazendo com que a resposta caminhe mais rapidamente para o resultado final. Após essa janela de aceleração, uma janela de dados maior fornece resultados mais amortizados. A dimensão da janela de aceleração, o número de amostras com aceleração e o tamanho da janela de dados deve ser escolhido de forma crítica, considerando os aspectos citados anteriormente. No Capítulo 4 é apresentada uma discussão mais detalhada sobre a escolha do valor de j para as metodologias aqui estudadas.

3.3.2. Correção dos Parâmetros do Equivalente

Muitas vezes os parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados, apesar de matematicamente corretos, podem apresentar inconsistências com relação àqueles esperados para o SEP. São então adotadas correções para garantir a consistência dos mesmos. Em [Leal, 2013] foi proposta uma correção baseada no módulo da tensão de Thèvenin, considerando os limites mínimo e máximo aceitáveis para tensão. Esses

limites são determinados pelos Procedimentos de Rede do ONS [ONS, 2016b] e variam de acordo com o nível de tensão considerado. As metodologias estudadas nessa dissertação consideram o mínimo como 0,9 p.u. e o máximo como 1,1 p.u., para qualquer nível de tensão.

Após o cálculo dos equivalentes, verifica-se se a tensão de Thèvenin calculada está dentro dos limites operativos aceitáveis. As características da carga e do sistema também influenciam nessa correção. Se ambos são predominantemente indutivos, espera-se que o módulo da tensão de geração (E_{th}) seja maior que o módulo da tensão na barra da carga (V). Logo, considerando essa informação e a faixa operativa, tem-se:

$$V < E_{th} < 1,1V_{nom} \quad (3.5)$$

Caso a carga e o sistema sejam predominantemente capacitivos, o módulo da tensão na barra de carga pode ser maior que o módulo da tensão da barra de geração. Nessa situação, tem-se:

$$0,9V_{nom} < E_{th} < 1,1V_{nom} \quad (3.6)$$

Quando as condições impostas pelas equações (3.5) e (3.6) são violadas, \dot{E}_{th} do instante atual é substituída pela \dot{E}_{th} calculada na iteração anterior, ou seja:

$$\dot{E}_{th}(t) = \dot{E}_{th}(t - 1) \quad (3.7)$$

3.3.3. Metodologias para Cálculo de Equivalentes de Redes

A solução direta do método dos mínimos quadrados pode apresentar curvas de E_{th} e Z_{th} pouco amortecidas, com variações bruscas, comportamento nem sempre consistente com o esperado para o sistema elétrico operando em condição normal.

Diante desse cenário, em [Leal, 2013], foi proposto o Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados, visando amortecer a resposta do equivalente. Em [Andrade, 2014] é feita uma revisão desse método e são apresentadas novas propostas, a fim de aproximar o comportamento do equivalente àquele apresentado pelo SEP.

Este item apresenta uma síntese das metodologias apresentadas em [Andrade, 2014], as quais são assim denominadas:

- A. Média da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados – Metodologia 1
- B. Média Ponderada da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados
 - a) Metodologia 2: Ponderação Linear
 - b) Metodologia 3: Ponderação Exponencial
- C. Média do Estimador dos Mínimos Quadrados com Ponderação da Medição Atual – Metodologia 4

As metodologias apresentam equações para \bar{Z}_{th} , e \dot{E}_{th} é calculada a partir do valor da impedância, conforme equação (3.8).

$$\dot{E}_{th}(t) = I_c(t)(\bar{Z}_c(t) + \bar{Z}_{th}(t)) \quad (3.8)$$

A. Metodologia 1: Média da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados – M1

Cada solução do estimador dos mínimos quadrados utiliza uma janela de dados, aqui representando uma janela de j medições. A Metodologia 1 utiliza este mesmo conceito de janela de dados, porém representando j soluções dos mínimos quadrados.

A Metodologia 1 faz apenas uma média das impedâncias obtidas da solução direta do estimador dos mínimos quadrados. Na determinação da média, são considerados os valores da impedância de Thévenin do instante atual e dos $(j - 1)$ instantes anteriores. A impedância do equivalente, \bar{Z}_{th} , determinada por essa metodologia, é expressa pela equação (3.9).

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{thMQ}(t-n)}{j} \quad (3.9)$$

Nessa expressão, t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela e \bar{Z}_{thMQ} à impedância calculada pelo estimador dos mínimos quadrados.

B. Metodologias 2 e 3: Média Ponderada da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados

A Metodologia 1 se baseia apenas nas impedâncias obtidas pelos estimadores dos mínimos quadrados \bar{Z}_{thMQ} . As Metodologias 2 e 3 apresentam formulação distinta, mais avançada. Calculam a impedância atual do equivalente de Thévenin, $\bar{Z}_{th}(t)$, a partir das últimas impedâncias $\bar{Z}_{th}(t-n)$, considerando aqui também o conceito de janela de dados, j . Só a última impedância calculada exclusivamente a partir do estimador dos mínimos quadrados $\bar{Z}_{thMQ}(t)$ é utilizada de forma direta.

Adicionalmente, as metodologias adotam técnicas de ponderação, visando privilegiar os cálculos mais recentes, o que significa buscar dar maior peso às últimas medições, no resultado final do equivalente.

As Metodologias 2 e 3 são descritas pela equação:

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{p(t)\bar{Z}_{thMQ}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} p(t-n)\bar{Z}_{th}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)} \quad (3.10)$$

Nesta expressão, t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela, $\bar{Z}_{th_{MQ}}$ à impedância calculada pelo estimador dos mínimos quadrados e p ao fator de ponderação.

O que difere as duas ponderações é o fator de ponderação, p , utilizado.

a) Metodologia 2: Ponderação Linear – M2

Para a ponderação linear, o fator de ponderação é definido por:

$$p_{lin}(t - n) = f_{max} \left(1 - \frac{n}{j}\right) \quad (3.11)$$

Observa-se que f_{max} é o fator máximo de ponderação, que caracteriza o parâmetro referente ao instante atual, ou seja, $p_{lin}(t) = f_{max}$.

O aplicativo Monitor, descrito no item 3.4.1 desse capítulo, possui implementadas todas as metodologias propostas em [Andrade, 2014]. Esse aplicativo adota uma correlação direta entre os nomes das metodologias e o fator de ponderação utilizado em cada uma delas. Essa correlação é utilizada nesta dissertação, a fim de facilitar a discussão sobre a sensibilidade de cada metodologia em função dos seus fatores de ponderação.

Substituindo f_{max} por M_2 e reescrevendo a equação (3.11), já no contexto deste trabalho, tem-se:

$$p_{lin}(t - n) = M_2 \left(1 - \frac{n}{j}\right) \quad (3.12)$$

b) Metodologia 3: Ponderação Exponencial – M3

Para a ponderação exponencial, o fator de ponderação é definido por:

$$p_{exp}(t - n) = e^{f_{max} \left(1 - \frac{n}{j}\right)} - 1 \quad (3.13)$$

Observa-se que f_{max} é o fator máximo de ponderação, que caracteriza o parâmetro referente ao instante atual, ou seja, $p_{exp}(t) = e^{f_{max}} - 1$.

Novamente, considera-se, como no aplicativo Monitor, a correlação direta entre os nomes das metodologias e o fator de ponderação utilizado em cada uma delas.

Substituindo f_{max} por M_3 e reescrevendo a equação (3.13), já no contexto desta dissertação, tem-se:

$$p_{exp}(t - n) = e^{M_3 \left(1 - \frac{n}{j}\right)} - 1 \quad (3.14)$$

C. Metodologia 4: Média do Estimador dos Mínimos Quadrados com Ponderação da Medição Atual – M4

A fim de considerar um peso maior para a última impedância $\bar{Z}_{th_{MQ}}(t)$, foi proposta a Metodologia 4, onde $\bar{Z}_{th}(t)$ é definida pela equação (3.15).

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1} + \frac{\bar{Z}_{th_{MQ}}(t) - \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1}}{f} \quad (3.15)$$

Nesta expressão, t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela, $\bar{Z}_{th_{MQ}}$ à impedância calculada pelo estimador dos mínimos quadrados e f ao fator de ponderação. Observa-se que, quanto menor o fator de ponderação, menor o peso das amostras anteriores.

Como para as metodologias anteriores, considera-se a correlação direta feita no aplicativo Monitor entre os nomes das metodologias e o fator de ponderação utilizado em cada uma delas. Assim, o fator de ponderação f pode ser substituído por M_4 .

Reescrevendo a equação (3.15), já no contexto desta dissertação, tem-se:

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1} + \frac{\bar{Z}_{th_{MQ}}(t) - \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1}}{M_4} \quad (3.16)$$

3.3.4. Impedância de Thèvenin Calculada Analiticamente

Uma maneira de verificar a exatidão das metodologias de cálculo de equivalentes de rede é determinar uma referência para comparação destas. Diante desta necessidade foi proposto em [Silva, 2018] um método analítico denominado Algoritmo Baseado em \tilde{Y}_B^{mod} . Esta é a matriz admitâncias de barra modificada.

Conhecendo-se a topologia e o estado do SEP, é possível determinar o equivalente de Thèvenin visto de cada barra desse sistema, a partir de \tilde{Y}_B^{mod} . Na montagem da matriz os geradores conectados às barras do tipo PV são representados como uma fonte de tensão (\dot{E}_g) em série com uma reatância síncrona (X_g). As barras que têm tensão terminal controlada, V_g , são modeladas como uma fonte de tensão ideal. As cargas em uma barra k são determinadas pela seguinte equação:

$$\bar{Z}_C^k = \frac{V_k^2}{(\bar{S}_C^k)^*} \quad (3.17)$$

Nessa equação, \bar{Z}_C^k é a impedância da carga conectada à barra k, V_k é o módulo da tensão na barra k, e \bar{S}_C^k é a potência aparente da carga conectada à barra k.

A solução do fluxo de potência gera as matrizes de admitâncias de barras da rede (\tilde{Y}_B) e de admitâncias de barras das cargas e dos geradores (\tilde{Y}_B^{C-G}). Os elementos da rede, que compõem a \tilde{Y}_B , são representados pelo circuito π -equivalente. As admitâncias das cargas e geradores, \tilde{Y}_B^{C-G} , são calculadas de acordo com o tipo de barra. Para barras do tipo PV tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{Y}_g \approx \infty \\ \bar{Z}_C^k = \frac{V_k^2}{(\bar{S}_C^k)^*}, \log o \bar{Y}_C = \frac{1}{\bar{Z}_C} \end{array} \right. \quad (3.18)$$

Para barras do tipo PQ, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{Y}_g = 0 \\ \bar{Z}_C^k = \frac{V_k^2}{(\bar{S}_C^k)^*}, \log o \bar{Y}_C = \frac{1}{\bar{Z}_C} \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Nessa equação, \bar{Z}_C^k é a impedância da carga conectada à barra k, V_k é o módulo da tensão na barra k, e \bar{S}_C^k é a potência aparente da carga conectada à barra k, \bar{Y}_g é a admitância do gerador e \bar{Y}_C é a admitância da carga.

A matriz \tilde{Y}_B^{C-G} de um sistema com n barras é uma matriz diagonal de dimensões $n \times n$, com os elementos da diagonal principal igual à soma das admitâncias da carga e do gerador.

$$\tilde{Y}_B^{C-G} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{c_{11}} + \bar{Y}_{g_{11}} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \bar{Y}_{c_{nn}} + \bar{Y}_{g_{nn}} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

A matriz \tilde{Y}_B^{mod} é dada pela soma das matrizes \tilde{Y}_B^{C-G} e \tilde{Y}_B e seu aspecto final será:

$$\tilde{Y}_B^{mod} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{11} + \bar{Y}_{c_{11}} + \bar{Y}_{g_{11}} & \cdots & \bar{Y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \cdots & \bar{Y}_{nn} + \bar{Y}_{c_{nn}} + \bar{Y}_{g_{nn}} \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

A matriz \tilde{Z}_B^{mod} , matriz de impedância modificada, é calculada pelo inverso de \tilde{Y}_B^{mod} . Os elementos da diagonal principal dessa matriz de impedâncias são definidos como \bar{Z}_{kk} , e carregam o efeito da impedância da carga conectada à barra k. A tensão resultante pelo fluxo de potência nesta barra, dada por \check{V}_k , é a tensão equivalente do circuito.

É possível separar o efeito de \bar{Z}_C em \bar{Z}_{kk} e assim calcular a fonte e impedância de Thèvenin do sistema visto a partir de uma barra k . A Figura 3-2, retirada de [Silva, 2017] mostra essa separação:

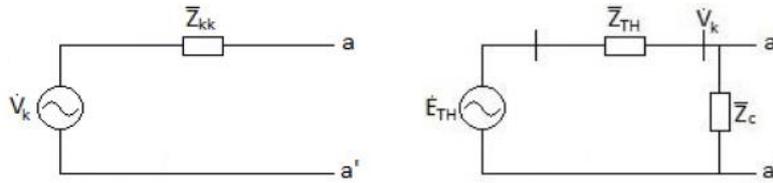


Figura 3-2 Constituição do Equivalente de Thèvenin a partir da \check{Y}_B^{mod} .
Fonte: [Silva, 2017].

A impedância de Thèvenin vista da barra de carga k é calculada por:

$$\bar{Z}_{th} = \left(\frac{1}{\bar{Z}_{kk}} - \frac{1}{\bar{Z}_C} \right)^{-1} \quad (3.22)$$

Como a tensão terminal \check{V}_k é conhecida, utiliza-se o conceito de divisor de tensão, para calcular a tensão de Thèvenin \check{E}_{th} .

$$\check{E}_{th} = \left(1 + \frac{\bar{Z}_{th}}{\bar{Z}_C} \right) \check{V}_k \quad (3.23)$$

3.4. Aplicativos para Análise da Segurança do Sistema Elétrico quanto à Estabilidade de Tensão

Conforme já descrito neste capítulo, os trabalhos desenvolvidos no LRC/UFGM, para monitoração da segurança do sistema quanto à estabilidade de tensão em tempo real, são contínuos e complementares. Diversas são as metodologias propostas tanto para definição de carga quanto para cálculo dos equivalentes de rede. Diante desse cenário, fez-se necessário o desenvolvimento de aplicativos que proporcionassem um ambiente computacional, no âmbito do laboratório de pesquisas, para análise de estabilidade de tensão, de maneira a consolidar as metodologias elaboradas e implementar novas propostas.

Nesta direção, foram desenvolvidas duas ferramentas computacionais: o **SimC** – *Simulador de Cenários Operativos de SEP* – e o **Monitor** – *Simulador para Avaliação de Estabilidade de Tensão*.

O aplicativo Monitor, apresentado em [Vale Visacro, 2014], implementa as metodologias descritas nos itens anteriores desse capítulo, reunindo-as em um único ambiente. Este aplicativo possibilita o estudo de diferentes cenários de forma sistemática e completa, conforme detalhado em [Andrade, 2017]. O Monitor foi projetado para

receber dados de medições fasoriais de tensão e de corrente relativas a barramentos do SEP. Tais medições podem ser reais, coletadas em campo, ou obtidas de simulações.

A equipe dispõe de dados provenientes de medições reais de diversos barramentos do SIN. Contudo, tais barramentos têm se apresentado bastante seguros com respeito à estabilidade de tensão, não permitindo avaliar de forma plena as metodologias frente a situações críticas do SEP.

Visando investigar o comportamento das metodologias diante de diferentes estados do sistema, foi implementado o SimC, aplicativo cujo objetivo é criar diversos cenários operativos de forma controlada. Desenvolvido inicialmente em [Silva, 2015] e aprimorado em [Silva, 2018], o programa gera arquivos que apresentam valores de grandezas elétricas como se fossem provenientes de medições coletadas no SEP. As grandezas calculadas pelo programa apresentam valores que podem estar contaminados ou não por erros presentes nas medições. Os arquivos de medição contêm os valores dos fasores de tensão e de corrente do barramento selecionado para a análise.

3.4.1. Monitor - Simulador para Avaliação de Estabilidade de Tensão

O Monitor implementa as duas metodologias de cálculo de carga equivalente, CM1 e CM2, e as quatro metodologias para cálculo de Equivalentes de Redes, Metodologias 1, 2, 3 e 4. O usuário pode selecionar os valores dos fatores de ponderação (M2, M3 e M4) e a dimensão da janela de dados utilizada em cada simulação. O aplicativo permite a utilização da janela de aceleração, proposta em [Andrade, 2014] e calcula diversas grandezas de interesse para as análises de estabilidade.

Como explicado no Capítulo 2, o estimador dos mínimos quadrados filtra apenas os erros do tipo ruído. O Monitor possui um sistema para identificar medições suspeitas, quando os valores de corrente nos ramos incidentes da barra estudada não atendem a uma porcentagem considerada razoável, considerando a Lei de Kichhoff para correntes em um nó. Dessa forma, o aplicativo busca identificar a presença de erros diferentes do tipo ruído. A variável utilizada para determinar a sensibilidade desse sistema é denominada *Sigma Limite*.

A utilização do aplicativo Monitor pode ser dividida em quatro passos, conforme detalhado em [Andrade, 2017]:

Passo (i) – Aquisição de Dados:

Inicialmente o usuário deve escolher um arquivo de entrada com dados de medição de fasores de tensão (módulo e ângulo) na barra em estudo e corrente nos ramos nela incidentes.

Passo (ii) – Escolha dos Parâmetros:

Após a seleção dos dados de entrada, o usuário pode definir os valores dos parâmetros utilizados para cálculo dos equivalentes de rede: janela de dados (j), fatores de ponderação das metodologias (M2, M3 e M4), janela de aceleração, número de amostras com aceleração, MST, *Sigma Limite*, potência e tensão base.

Passo (iii) – Processamento:

Durante o processamento, o aplicativo calcula os equivalentes de redes de todas as metodologias e as grandezas de interesse para as análises de estabilidade de tensão: tensão medida, corrente de carga equivalente, impedância de carga, impedância e tensão do equivalente de Thèvenin, potência do ponto de máximo carregamento, potência de operação, potência limite de MST e índices PIT.

Passo (iv) – Apresentação dos Resultados:

Após o processamento, o Monitor apresenta todas as grandezas calculadas por meio de gráficos, de acordo com as escolhas do usuário. Todos os resultados calculados são armazenados em arquivos. O usuário pode escolher quais as grandezas deseja analisar, além de quantas e quais metodologias utilizará na análise.

3.4.2. SimC – Simulador de Cenários Operativos de SEP

O aplicativo SimC, conforme já introduzido, foi implementado com o objetivo de criar cenários de dados simulados, com características semelhantes às obtidas de medições nos barramentos dos sistemas elétricos, para fins de composição dos equivalentes de redes.

O SimC realiza cálculos com base em soluções de fluxo de potência e permite a criação de quatro tipos de cenários: (i) medições sem a presença de erro; (ii) medições com a presença de erro do tipo ruído; (iii) medições com a presença de erro do tipo grosseiro; (iv) medições com a presença de erro do tipo grosseiro e erro do tipo ruído.

Dentre as grandezas do sistema elétrico que podem ser obtidas a partir do SimC, merece destaque a impedância de Thèvenin calculada analiticamente. Essa impedância é considerada o valor de referência para os resultados da impedância de Thèvenin obtida por meio de medições.

A utilização do aplicativo SimC pode ser dividida em quatro passos:

Passo (i) – Aquisição de Dados:

Inicialmente o usuário deve escolher um arquivo de entrada. Este deve ter formato adequado à simulação do Fluxo de Potência por meio do *software* PFLOW, disponível em (CHOW, 1991), (extensão .xlsx).

Passo (ii) – Escolha dos Parâmetros:

Após a seleção dos dados de entrada, o usuário pode selecionar a(s) barra(s) que deve(m) sofrer incremento de carga e o valor desse incremento nas potências ativa e reativa, bem como a barra de interesse de estudo. Também pode ser escolhida a inserção de erros do tipo ruído e/ou do tipo grosseiro, tanto nos módulos quanto nos ângulos das tensões e correntes. Como os erros do tipo ruído são modelados como variáveis aleatórias normalmente distribuídas, com valor esperado nulo, é indicado o desvio padrão a ser adotado.

Passo (iii) – Processamento:

Durante o processamento, o aplicativo calcula uma sequência de soluções de fluxo de potência de acordo com a variação de carga escolhida no passo (ii). Os fasores de tensão e de corrente do sistema calculados nesse primeiro momento são chamados *valores puros*, uma vez que não possuem erros de medição. Posteriormente, a partir de uma rotina que simula distribuição normal de probabilidades, a presença de erros do tipo ruído é acrescentada a esses *valores puros* gerados pelo Fluxo de Potência, de acordo com o desvio padrão definido. Para inserir erros do tipo grosseiro, o programa apenas insere um erro sem modelagem específica, de acordo com a própria natureza deste tipo de erro.

Passo (iv) – Armazenamento e Apresentação dos Resultados:

Após o processamento, o SimC gera arquivos com o valor do fasor tensão da barra de interesse para o estudo e os valores dos fasores de corrente de todos os ramos nela incidentes. O aplicativo também permite a apresentação de gráficos de diferentes grandezas envolvidas nos cálculos realizados e importantes para análise em relação à estabilidade de tensão. O usuário pode escolher os gráficos de: módulos da tensão e corrente, valores singulares da matriz jacobiana, vetor singular à direita (VSD) relativo ao MVS (Mínimo Valor Singular), relacionado ao fasor tensão, vetor singular à esquerda (VSE) relativo ao MVS, relacionado às injeções de potências ativa e reativa, determinante das matrizes jacobianas reduzidas e impedâncias de Thévenin analíticas.

3.5. Considerações Finais

Os estudos de avaliação da estabilidade de tensão em tempo real são alvo de muitas pesquisas devido a sua importância para o setor elétrico. O LRC/UFMG já realizou grandes avanços nesse campo. Uma análise bibliográfica mostra que as pesquisas realizadas são complementares, enriquecendo as metodologias já desenvolvidas.

A utilização de equivalentes para a análise da estabilidade de tensão em tempo real apresenta resultados consistentes. As metodologias de amortecimento desses

equivalentes são um ganho importante para a avaliação em tempo real da segurança do sistema elétrico quanto a estabilidade de tensão.

O método analítico para cálculo do equivalente de Thèvenin, algoritmo baseado em \tilde{Y}_B^{mod} , também é enriquecedor para o desenvolvimento das pesquisas. A partir desse equivalente analítico é possível criar uma referência para os valores das impedâncias calculadas por cada uma das metodologias propostas.

O ambiente SimC-Monitor representa ganho significativo para as análises de estabilidade. O SimC possibilita a validação e aprimoramento de técnicas e metodologias de análise, por permitir a criação de vários cenários operativos. O Monitor favorece os estudos a partir das metodologias nele implementadas, uma vez que apresenta resultados de forma ágil e eficaz para inúmeras situações operativas.

A fim de aprofundar os estudos das Metodologias 2, 3 e 4, apresentadas em [Andrade, 2014], no Capítulo 4 é feita uma análise de sensibilidade destas metodologias em função dos seus fatores de ponderação e da janela de dados.

Capítulo 4

Análise das Metodologias de Equivalentes de Redes

4.1. Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo analisar as metodologias de ponderação da impedância de Thévenin descritas no capítulo anterior. É feita uma análise de sensibilidade das Metodologias 2, 3 e 4 em função dos parâmetros de ajuste, janela de dados e fator de ponderação, das equações que as definem.

A análise de sensibilidade permite identificar as tendências dos valores das impedâncias de Thévenin obtidas pelas metodologias, quando tais parâmetros são variados. Como referência para os valores de impedância é utilizada a impedância de Thévenin calculada analiticamente de acordo com a metodologia apresentada em [Silva, 2018], descrita no Capítulo 3.

Para criação dos cenários aqui estudados foi utilizado o aplicativo SimC. O sistema elétrico selecionado para a realização dos estudos é o sistema de 14 Barras do IEEE (IEEE-14).

4.2. Sistema Elétrico Selecionado e Caracterização dos Casos Estudados

O sistema de 14 Barras do IEEE encontra-se ilustrado na Figura A-1 no Anexo, onde estão registrados os dados detalhados deste sistema.

Observando a Figura A-1 e a Tabela A-1, nota-se que o sistema em estudo possui 9 barras do tipo PQ, sendo estas as barras 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13 e 14. Os estudos para análise de sensibilidade foram feitos de forma geral, considerando, em cada momento, uma dessas barras PQ como barra de interesse. No SimC foram simulados cenários com incremento de carga em todas as barras que possuem carga, sendo o aumento da carga igual a 0,1%, tanto na potência ativa quanto na potência reativa, mantendo-se assim o fator de potência constante. A escolha do valor do passo de carga está consistente com variações típicas de cargas de barramentos de sistemas elétricos reais.

Devido à impossibilidade de se apresentar todo o conjunto de resultados das análises realizadas, foi selecionada uma barra para a apresentação dos estudos mais detalhados. Para a escolha dessa barra foi utilizado o Vetor Singular a Direta, VSD, calculado pelo SimC. Esse vetor pode ser utilizado para indicar as barras mais críticas com relação à estabilidade de tensão. A barra que apresenta valores mais elevados no VSD é considerada a barra mais sensível do sistema ou barra crítica. Para o sistema de 14 barras do IEEE, observou-se que a barra mais sensível é a barra 5, e os resultados dos estudos relativos a essa barra são apresentados neste capítulo.

Os primeiros estudos realizados consideram cenário sem erros. Isso porque o objetivo inicial é examinar a exatidão das metodologias aqui estudadas.

4.3. Ambiente de Simulação Desenvolvido para as Análises

Para realização da análise de sensibilidade, foi desenvolvido um ambiente de simulação utilizando o software MATLAB®. Este ambiente é fundamentado nas metodologias de cálculo de equivalentes de rede desenvolvidas no LRC/UFMG.

Observa-se que o Monitor permite a análise das metodologias utilizando-se diferentes parâmetros, conforme mostra a intensa investigação desenvolvida em [Andrade, 2018]. Entretanto, tais parâmetros constituem dados de entrada do aplicativo.

O ambiente desenvolvido nesta dissertação permite uma análise mais aprofundada de sensibilidade das metodologias estudadas. Isso porque possibilita estudos com alterações de parâmetros e estruturas das equações que definem as metodologias. O fluxograma da Figura 4-1 apresenta os passos utilizados para a simulação, os quais são descritos a seguir.

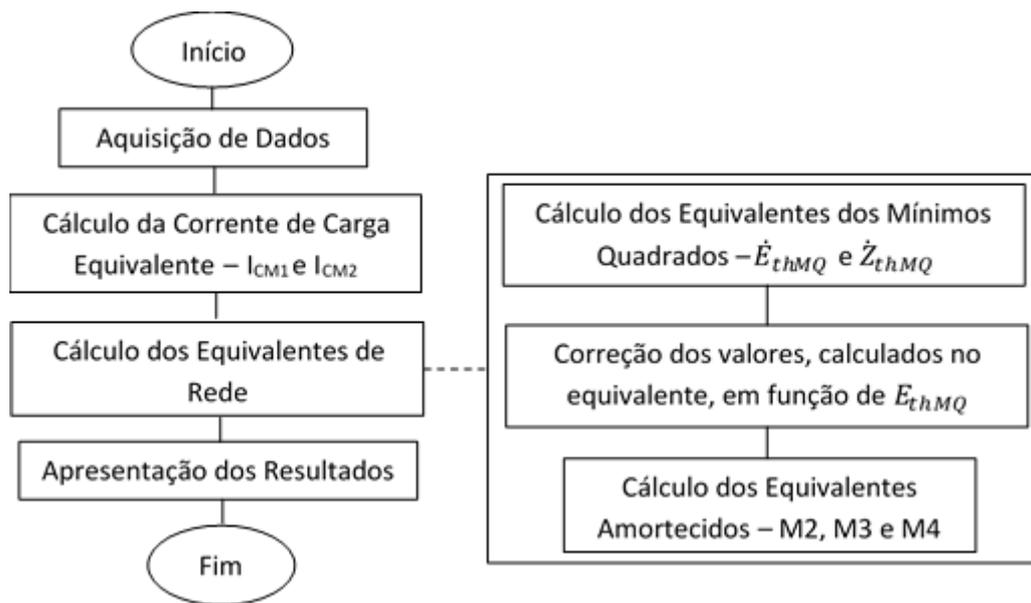


Figura 4-1 Fluxograma do Ambiente de Simulação.

Passo (i) – Aquisição de Dados:

Definida a barra de interesse para análise de estabilidade de tensão, são necessários como dados de entrada os fasores sincronizados de tensão nesta barra e de corrente em todos os ramos nela incidentes.

Mesmo que não haja SMFS na barra de interesse, é possível obter fasores de tensão e de corrente a partir de valores de medição de tensão, potências ativa e reativa, como descrito no Capítulo 3. Esses valores são fornecidos por sistemas supervisórios tradicionais, amplamente utilizados no sistema elétrico.

Passo (ii) – Cálculo da Corrente de Carga Equivalente – I_{CM1} e I_{CM2} :

Obtidos os fasores de tensão e de corrente, é possível determinar as correntes de carga equivalente. Para calcular essas correntes são utilizadas as metodologias de cálculo de carga CM1 e CM2, apresentadas em [Ribeiro, 2011] e descritas no Capítulo 3.

Passo (iii) – Cálculo do Equivalente de Rede:

Após a determinação da carga equivalente, são calculados os parâmetros do equivalente de rede: tensão e impedância de Thèvenin, \dot{E}_{th} e \bar{Z}_{th} .

O cálculo é feito em três etapas. Primeiro calcula-se um equivalente inicial a partir do método dos mínimos quadrados. Depois é feita a correção dos valores de \dot{E}_{thMQ} como descrito no item 3.3.2 do Capítulo 3. Como esse equivalente apresenta resultados pouco amortecidos, faz-se necessária uma terceira etapa para amortecer os valores encontrados, a fim de aproximá-los do comportamento do sistema elétrico. As metodologias utilizadas para amortecimento são as Metodologias 2, 3 e 4, apresentadas em [Andrade, 2014] e descritas no Capítulo 3.

Passo (iv) – Apresentação dos Resultados:

Os resultados do estudo são apresentados em forma de gráficos, nos quais é possível comparar o comportamento dos parâmetros do equivalente de Thèvenin variando-se os fatores de ponderação e a janela de dados utilizados nas equações que definem cada uma das metodologias.

Os valores calculados para o módulo de \bar{Z}_{th} também são comparados ao valor da impedância de Thèvenin calculada analiticamente, desenvolvida em [Silva, 2018] e fornecida pelo SimC. Dessa forma, é possível perceber o comportamento das impedâncias calculadas em função da variação dos parâmetros. Também podem ser identificados os valores desses parâmetros que mais aproximam a impedância de Thèvenin, ponderada a partir das metodologias de amortização do equivalente, da impedância calculada analiticamente.

4.4. Análise de Sensibilidade – Metodologia 2

4.4.1. Equacionamento Original

A Metodologia 2 consiste em uma ponderação linear dos valores da \bar{Z}_{th} , a partir da equação (3.10), aqui reescrita a fim de facilitar o acompanhamento dos desenvolvimentos realizados neste capítulo.

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{p(t)\bar{Z}_{th_{MQ}}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} p(t-n)\bar{Z}_{th}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)} \quad (4.1)$$

Na equação, t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela, $\bar{Z}_{th_{MQ}}$ à impedância calculada pelo estimador dos mínimos quadrados e p ao fator de ponderação.

O fator de ponderação já definido na equação (3.12) também é aqui reescrito:

$$p_{lin}(t-n) = M_2 \left(1 - \frac{n}{j}\right) \quad (4.2)$$

Na equação, M_2 é o fator máximo de ponderação, que caracteriza o parâmetro referente ao instante atual.

Desenvolvendo as equações que descrevem essa metodologia, percebe-se que o fator de ponderação M_2 é anulado no numerador e no denominador da expressão para cálculo de $\bar{Z}_{th}(t)$, como demonstrado pelas equações (4.3) e (4.4). Sendo assim, para a Metodologia 2, a única variável que influencia a solução da equação é a dimensão da janela de dados, j , como mostra a equação (4.5).

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{M_2\bar{Z}_{th_{MQ}}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} M_2 \left(1 - \frac{n}{j}\right) \bar{Z}_{th}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} M_2 \left(1 - \frac{n}{j}\right)} \quad (4.3)$$

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{M_2 \left(\bar{Z}_{th_{MQ}}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} \left(1 - \frac{n}{j}\right) \bar{Z}_{th}(t-n) \right)}{M_2 \left(\sum_{n=0}^{j-1} \left(1 - \frac{n}{j}\right) \right)} \quad (4.4)$$

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{\bar{Z}_{th_{MQ}}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} \left(1 - \frac{n}{j}\right) \bar{Z}_{th}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} \left(1 - \frac{n}{j}\right)} \quad (4.5)$$

4.4.2. Novo Equacionamento Proposto

A fim de alcançar o objetivo inicial de quando foi proposta essa metodologia, sugere-se uma alteração na equação (4.2) que define a ponderação linear. A nova equação proposta é:

$$p_{lin}(t - n) = 1 - \frac{1}{(M_2 * j)} n \quad (4.6)$$

Nesse caso, a ponderação torna-se uma reta que, em função de n , possui inclinação igual a $(-\frac{1}{(M_2 * j)})$ e valor máximo igual a 1, ou seja, $p_{lin}(t) = 1$.

Utilizando essa nova ponderação é importante que o valor de M_2 seja sempre maior ou igual a 1, conforme equação (4.7).

$$M_2 \geq 1 \quad (4.7)$$

Dessa forma, garante-se que a ponderação dos valores calculados para Z_{th} nos instantes passados seja sempre positiva. Para uma janela de dados constante, quanto menor o valor de M_2 , maior será a inclinação da reta. Dessa forma, maior será o peso associado às impedâncias mais recentes em relação às anteriores. Assim, procura-se dar mais peso aos equivalentes que utilizam medições mais recentes. A Figura 4-2 mostra a variação da ponderação, quando se altera o valor de M_2 . Observa-se que n varia de 0 a $j - 1$, conforme descrito na equação (4.1), e que:

$$M2_1 < M2_2 < M2_3 \quad (4.8)$$

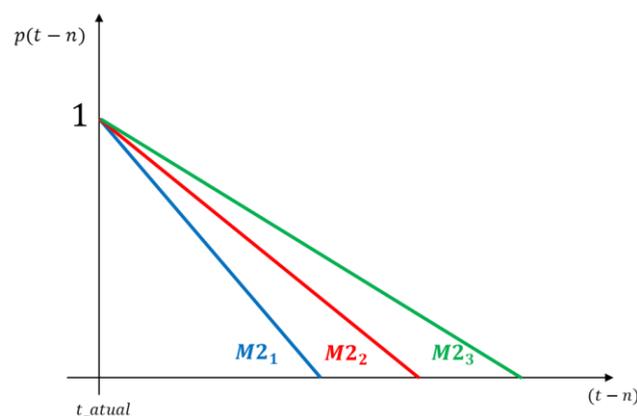


Figura 4-2 Variação da ponderação em M2 quando altera-se o valor de M2.

As análises de sensibilidade para a Metodologia 2, apresentadas a seguir, são realizadas utilizando o novo equacionamento proposto.

4.4.3. Análise de Sensibilidade – Variação da Ponderação M2

Neste item, são apresentados os resultados das análises realizadas no sistema de 14 barras do IEEE, em relação à barra 5. O cenário do SimC utilizado é de incremento de 0,1% de todas as cargas do sistema, mantendo-se o fator de potência constante, e sem inserção de nenhum tipo de erro. Os estudos foram realizados para as metodologias de carga CM1 e CM2.

A Figura 4-3 apresenta as impedâncias Z_{th} , em p.u., ponderadas a partir das equações (4.1) e (4.6) variando-se o fator de ponderação M_2 . Destacada em linha vermelha tracejada está a Z_{th} analítica fornecida pelo aplicativo SimC. Foi considerada uma janela de dados constante igual a 5, e respeitado o limite estabelecido na equação (4.7), ou seja, considerou-se M_2 maior ou igual a 1.

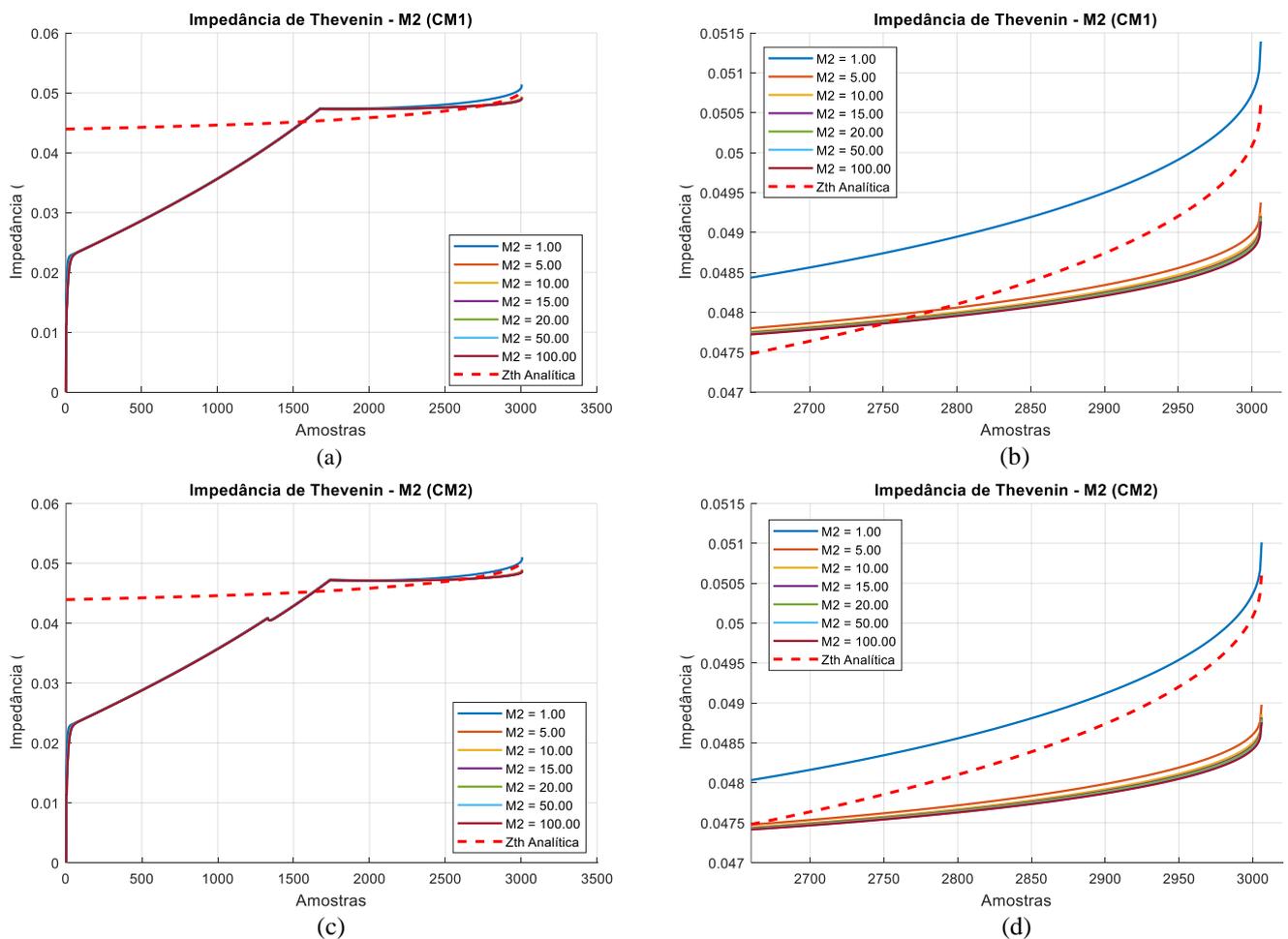


Figura 4-3 Z_{th} ponderada pela Metodologia 2 para diferentes valores de M_2 , com $j = 5$.

Na Figura 4-3(a) e (b) são apresentadas as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM1. A Figura 4-3(b) é uma ampliação da Figura 4-3(a), visando mostrar de maneira mais clara o comportamento da impedância na parte final das curvas. De maneira análoga, a Figura 4-3(c) e (d) apresenta as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM2. A

Figura 4-3(d) destaca o comportamento da impedância no fim da curva mostrada na Figura 4-3(c).

Analisando os gráficos, verifica-se que, aumentando-se M_2 , os valores de Z_{th} diminuem. A Tabela 4-1 e a Tabela 4-2 apresentam os valores de Z_{th} , em p.u., na última amostra, 3006, e a diferença entre esses valores e o valor da Z_{th} analítica. Todos os casos consideram uma janela de dados constante e igual 5.

Tabela 4-1 Metodologia 2 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 2 (CM1)				
M_2	Z_{th}	Z_{th} analítica	Diferença (Z_{th} analítica – Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica – Z_{th})
1	0,05139	0,05062	-0,00077	-1,52%
5	0,04937	0,05062	0,00125	2,47%
10	0,04925	0,05062	0,00137	2,71%
15	0,04921	0,05062	0,00141	2,79%
20	0,04919	0,05062	0,00143	2,82%
50	0,04915	0,05062	0,00147	2,90%
100	0,04914	0,05062	0,00148	2,92%

Tabela 4-2 Metodologia 2 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 2 (CM2)				
M_2	Z_{th}	Z_{th} analítica	Diferença (Z_{th} analítica – Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica – Z_{th})
1	0,05101	0,05062	-0,00039	-0,77%
5	0,04898	0,05062	0,00164	3,24%
10	0,04886	0,05062	0,00176	3,48%
15	0,04882	0,05062	0,0018	3,56%
20	0,04888	0,05062	0,00174	3,44%
50	0,04877	0,05062	0,00185	3,65%
100	0,04876	0,05062	0,00186	3,67%

Observando a Tabela 4-1, a Tabela 4-2 e os gráficos da Figura 4-3, pode-se dizer que os valores de Z_{th} mais próximos da Z_{th} analítica ocorrem para valores M_2 mais próximos de 1. É importante destacar que, para o fator de ponderação igual a 1, o equacionamento proposto iguala-se ao equacionamento original de [Andrade, 2014]. Nota-se, também, que, para uma janela de dados pequena, como a utilizada ($j = 5$), os valores de Z_{th} não sofrem grande variação em função de M_2 . Para M_2 variando entre 5 e 100 as curvas das impedâncias estão quase sobrepostas nos gráficos apresentados na Figura 4-3(a) e na Figura 4-3(c), sendo necessário destacar o comportamento das curvas nas amostras finais na Figura 4-3(b) e na Figura 4-3(d). Essa diferença é mais significativa para valores de M_2 variando entre 1 e 2. O mesmo comportamento é observado para janelas de dados maiores. Apesar da diferença entre as curvas das impedâncias aumentar

em função da variação de M_2 , para janelas de dados maiores, a diferença somente é significativa para fatores de ponderação entre 1 e 2.

A Figura 4-4 mostra a tendência do comportamento da Z_{th} , em p.u., em função da variação do fator de ponderação M_2 . Para construção dessa curva de tendência foram utilizados os valores de Z_{th} na última amostra das diversas curvas de impedância ponderadas variando-se os valores do fator de ponderação M_2 e mantendo a janela de dados igual a 5.

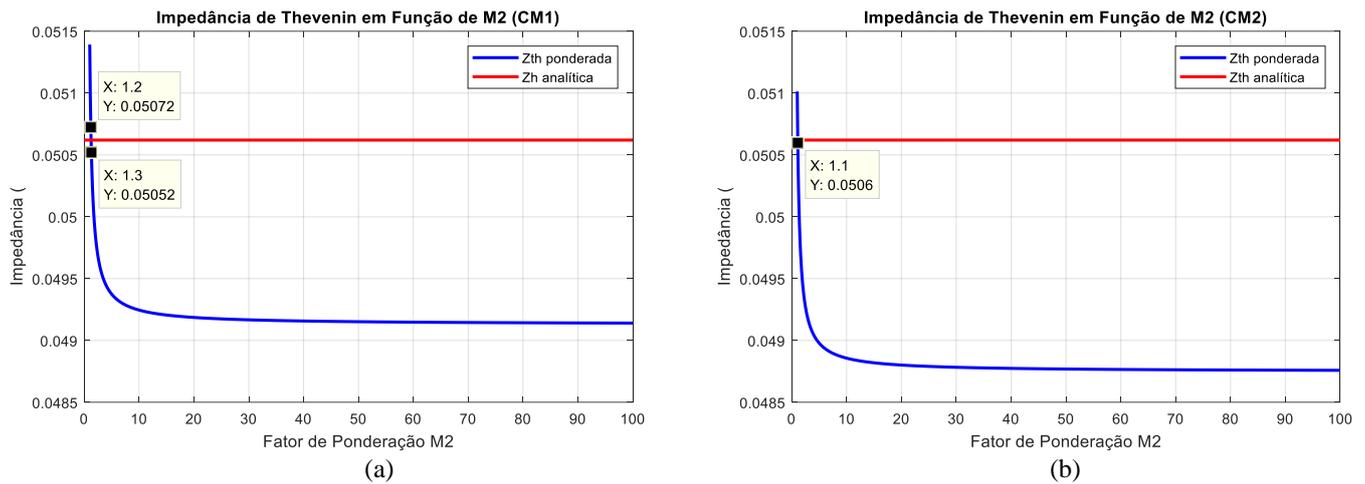


Figura 4-4 Tendência de variação de Z_{th} em função de M_2 , com $j = 5$.

Analisando a Figura 4-4 nota-se que, para valores de M_2 maiores que 20, em ambas as metodologias de cálculo de carga, não há diferença considerável no valor da impedância ponderada. Como destacado, os valores mais próximos de 1 são os que apresentam valores finais das curvas de Z_{th} mais próximos da curva de Z_{th} analítica. No caso em estudo, para CM1, o fator de ponderação M_2 , que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente, está entre 1,2 e 1,3 que são equidistantes do valor 0,05062 da Z_{th} analítica. Para CM2 o fator de ponderação que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é M_2 igual a 1,1. É importante destacar que mesmo para fatores de ponderação maiores que 20, a diferença entre de Z_{th} e Z_{th} analítica é pouco maior que 5%.

Os resultados apresentados neste item mostram que, mesmo com o novo equacionamento proposto, equação (4.6), a Metodologia 2 mostra-se pouco sensível à variação do fator de ponderação. A janela de dados continua sendo a variável que mais influencia o valor ponderado de Z_{th} . O próximo item discute essa influência.

4.4.4. Análise de Sensibilidade – Variação da Janela de Dados j

A dimensão da janela de dados (j) deve ser escolhida com cuidado, pois é diretamente dependente da variação da carga do sistema estudado. Como discutido no Capítulo 2, a janela de dados corresponde ao número de medições que serão utilizadas

para calcular uma $\bar{Z}_{th_{MQ}}$ e esse mesmo valor de j é utilizado nos equacionamentos das metodologias para cálculo de uma \bar{Z}_{th} ponderada. Uma vez que, no intervalo correspondente ao tamanho da janela de dados, os parâmetros do sistema elétrico estudado são considerados constantes, a escolha de j depende tanto das características do SEP, quanto da taxa de amostragem do sistema de medição.

Como já comentado, a Metodologia 2 é muito sensível à variação da janela de dados. A Figura 4-5 mostra as curvas de Z_{th} , em p.u., ponderada pelas equações (4.1) e (4.6) variando-se a dimensão de j . O cenário utilizado para simulação é o mesmo descrito no item anterior. Mas, neste caso, o fator de ponderação é mantido constante, $M_2 = 2$. Destacada em linha vermelha tracejada está a Z_{th} analítica fornecida pelo aplicativo SimC.

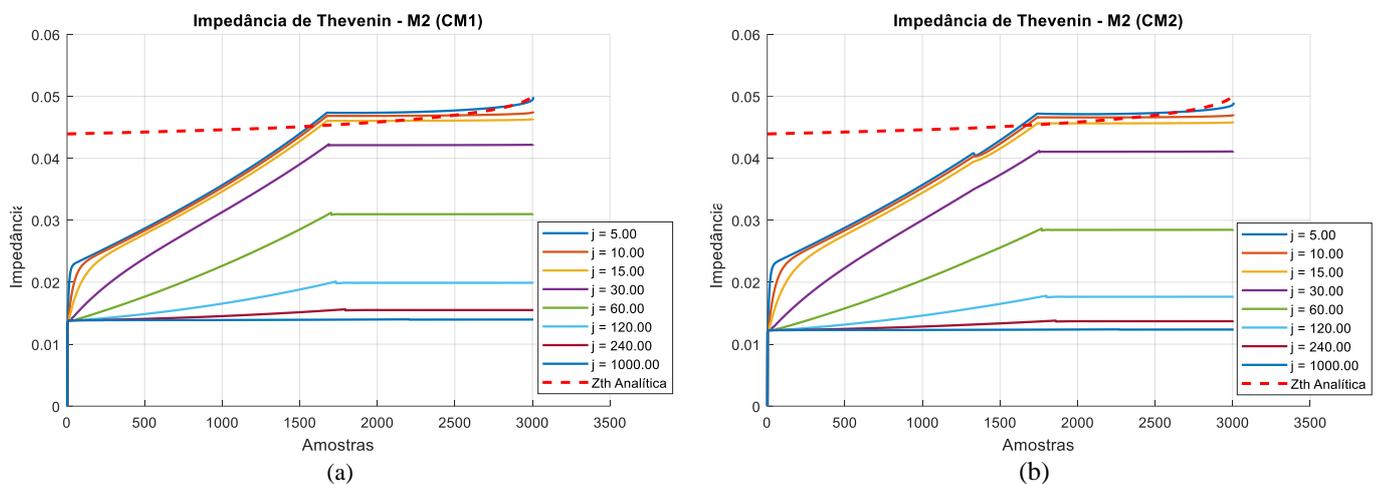


Figura 4-5 Z_{th} ponderada pela Metodologia 2 para diferentes valores de j , com $M_2 = 2$.

Na Figura 4-5(a) são apresentadas as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM1 e a Figura 4-5(b) apresenta as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM2. Analisando os gráficos pode-se concluir que, ao se aumentar o valor de j , os valores de Z_{th} diminuem. Esse comportamento está dentro do esperado. Em decorrência do incremento contínuo da carga em toda a rede, a impedância calculada pelo equivalente apresenta valores crescentes. Quanto maior o tamanho de j , mais impedâncias com valores menores são consideradas na ponderação da impedância, diminuindo assim o valor final.

Pode-se concluir, também, que os valores da Z_{th} ponderada são mais próximos da Z_{th} analítica para pequenas janelas de dados. Esse aspecto foi discutido em [Andrade, 2014] onde se destacou que menores valores de j favorecem a convergência mais rápida da impedância para valor menos variável. A vantagem de se utilizar uma janela de dados maior é devido ao amortecimento dos valores calculados para medições que possuem erros do tipo ruído. Por isso, aliando as duas vantagens citadas, em [Andrade, 2014] foi proposta a utilização de uma janela de aceleração (ja). Dessa forma, os primeiros valores de impedâncias são ponderados com uma janela de dados pequena, e depois é utilizada uma janela maior. Assim, fica favorecida a convergência de Z_{th} ponderada para valores menos variáveis e o amortecimento dos valores ponderados.

No caso em estudo, como os dados utilizados não possuem erros do tipo ruído, o amortecimento não será observado. No Capítulo 5 é apresentado um estudo de caso utilizando dados de medições reais, onde pode ser observado o amortecimento da curva de Z_{th} . Neste item são registrados os resultados utilizando uma janela de aceleração, ja , apenas para viabilizar uma comparação entre os resultados com e sem esta janela, ressaltando assim a vantagem da sua utilização. A Figura 4-6 mostra as curvas de Z_{th} , em p.u., ponderadas com diferentes valores de j , ja igual a 5, e 500 amostras com aceleração.

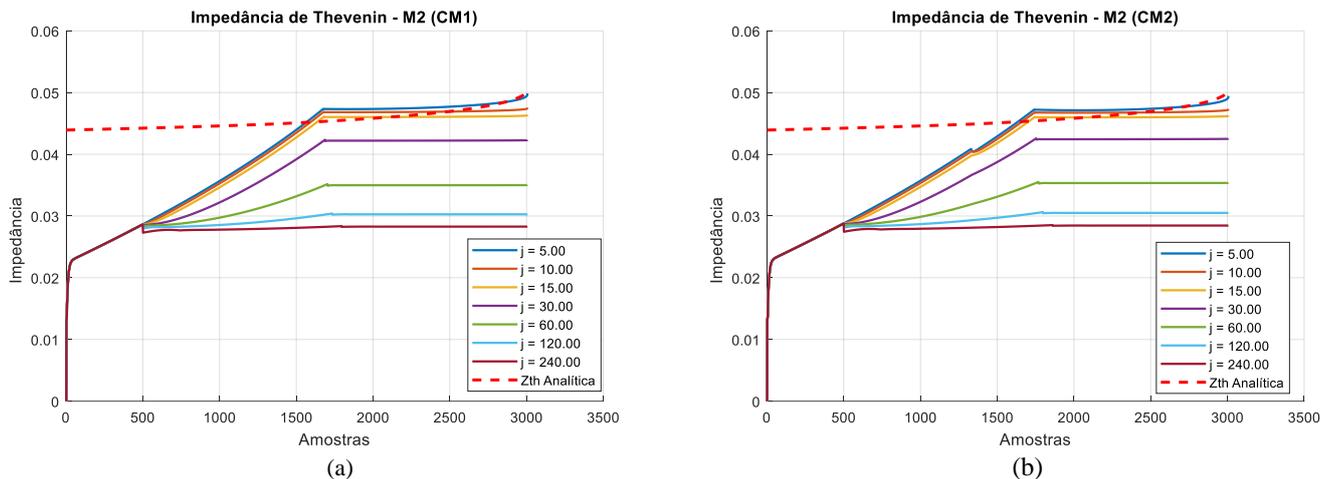


Figura 4-6 Z_{th} ponderada pela Metodologia 2 para diferentes valores de j , com $M_2 = 2$ e $ja = 5$.

Percebe-se que, apesar dos valores de Z_{th} ponderada diminuírem e se afastarem de Z_{th} analítica com o aumento da janela de dados, a utilização de uma janela de aceleração fez com que os valores convergissem para valores mais próximos da impedância analítica.

Quanto maior for o número de amostras com aceleração, mais próximos os valores da Z_{th} ponderada ficam da Z_{th} analítica. Isso porque o início das curvas será igual à curva com uma janela de dados pequena o que favorece a convergência para os valores finais esperados.

A Tabela 4-3 e a Tabela 4-4 apresentam os valores de Z_{th} , em p.u., ponderada na última amostra, 3006, e a diferença entre esses valores e o valor da Z_{th} analítica, para os dois cenários apresentados, com e sem a janela de aceleração, ja .

Tabela 4-3 Metodologia 2 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 2 (CM1)									
j	Z_{th} analítica	Z_{th} (Sem aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})	Z_{th}^a (Com aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença ($Z_{th}^a - Z_{th}$)	Diferença(%) ($Z_{th}^a - Z_{th}$)
5	0,05062	0,04987	0,00075	1,48%	0,04987	0,00075	1.48%	0	0,00%
10	0,05062	0,04755	0,00307	6,06%	0,04755	0,00307	6.06%	0	0,00%
15	0,05062	0,04604	0,00458	9,05%	0,04632	0,0043	8.49%	0,00028	0,60%
30	0,05062	0,04224	0,00838	16,55%	0,04233	0,00829	16.38%	0,00009	0,21%
60	0,05062	0,03102	0,0196	38,72%	0,03504	0,01558	30.78%	0,00402	11,47%

Impedância de Thèvenin – Metodologia 2 (CM1)									
j	Z_{th} analítica	Z_{th} (Sem aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})	Z_{th}^a (Com aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença ($Z_{th}^a - Z_{th}$)	Diferença(%) ($Z_{th}^a - Z_{th}$)
120	0,05062	0,01991	0,03071	60,67%	0,0303	0,02032	40,14%	0,01039	34,29%
240	0,05062	0,01551	0,03511	69,36%	0,02829	0,02233	44,11%	0,01278	45,17%

Tabela 4-4 Metodologia 2 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 2 (CM2)									
j	Z_{th} analítica	Z_{th} (Sem aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})	Z_{th}^a (Com aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença ($Z_{th}^a - Z_{th}$)	Diferença(%) ($Z_{th}^a - Z_{th}$)
5	0,05062	0,04945	0,00117	2,31%	0,04945	0,00117	2,31%	0	0,00%
10	0,05062	0,04707	0,00355	7,01%	0,04735	0,00327	6,46%	0,00028	0,59%
15	0,05062	0,04587	0,00475	9,38%	0,04629	0,00433	8,55%	0,00042	0,91%
30	0,05062	0,04114	0,00948	18,73%	0,04255	0,00807	15,94%	0,00141	3,31%
60	0,05062	0,02848	0,02214	43,74%	0,03539	0,01523	30,09%	0,00691	19,53%
120	0,05062	0,01767	0,03295	65,09%	0,03053	0,02009	39,69%	0,01286	42,12%
240	0,05062	0,01371	0,03691	72,92%	0,02847	0,02215	43,76%	0,01476	51,84%

Analisando a Tabela 4-3, a Tabela 4-4 e os gráficos da Figura 4-5 e da Figura 4-6 pode-se concluir que a utilização da janela de aceleração trouxe benefícios para a convergência de Z_{th} . A diferença entre os resultados com e sem a janela de aceleração é maior para valores mais elevados de j . Para janela de dados maior que 60 a diferença entre os resultados supera 20%. Para cenário de j igual a 120, que, sem a janela de aceleração, apresentava um valor 65% menor que o valor da impedância analítica, essa diferença cai para 42%, valor ainda elevado. Como dito anteriormente, essa diferença pode ser ainda menor aumentando-se o número de amostras com aceleração. Entretanto, os resultados do presente estudo comprovam que a Metodologia 2 apresenta valores de Z_{th} ponderada mais próximos de Z_{th} analítica para janelas de dados menores. Esta metodologia é muito sensível à variação da janela de dados.

A Figura 4-7 mostra a tendência do comportamento da Z_{th} em função da variação da janela de dados. Para construção dessa curva de tendência foram utilizados os valores de Z_{th} na última amostra das diversas curvas de impedância ponderadas variando-se os valores de j e mantendo o fator de ponderação constante, $M_2 = 2$. A impedância Z_{th} foi ponderada sem utilização da janela de aceleração, uma vez que o objetivo é apresentar a tendência das curvas das impedâncias ponderadas em função da variação da janela de dados.

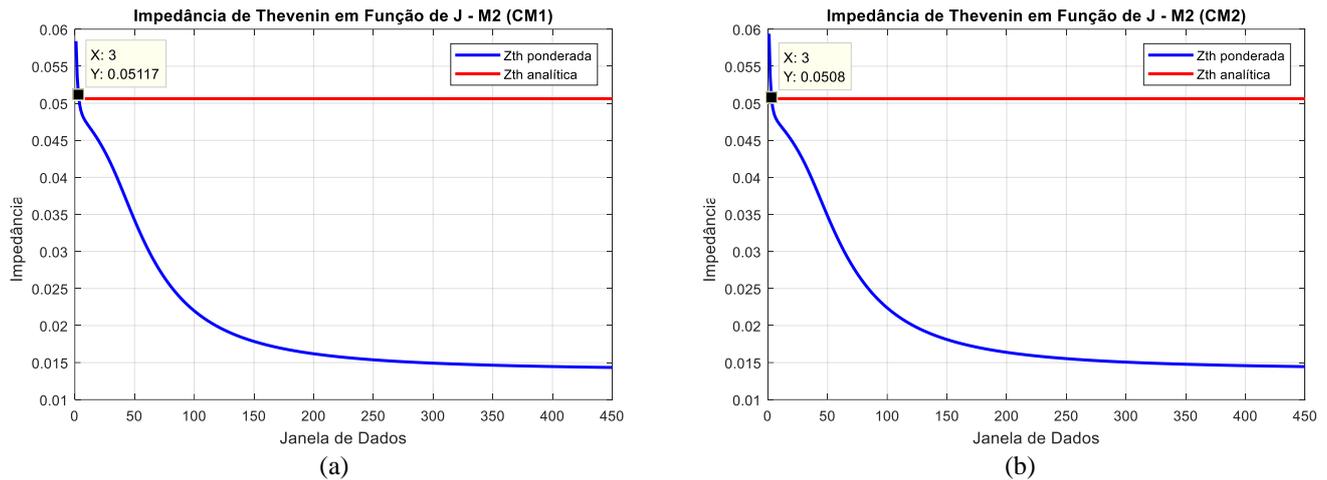


Figura 4-7 Tendência de variação de Z_{th} em função de j na Metodologia 2, $M_2 = 2$.

Analisando a Figura 4-7 nota-se que, para valores de j maiores que 250, nas duas metodologias de cálculo de carga, não há diferença considerável no valor da impedância ponderada. Para janelas maiores que 50 a diferença entre Z_{th} e Z_{th} analítica já é maior que 30%. Como destacado, as dimensões menores de j são as que apresentam valores finais das curvas de Z_{th} ponderada mais próximos da curva de Z_{th} analítica. No caso em estudo, com M_2 igual a 2, tanto para CM1 como para CM2, a janela de dados que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é j igual a 3.

4.4.5. Análise Global – Metodologia 2

A análise do equacionamento original da Metodologia 2 mostra que o cálculo da Z_{th} ponderada não depende do fator de ponderação M_2 . Foi proposto um novo equacionamento que cumpre o objetivo inicial de realizar uma ponderação linear, possibilitando uma variação dos pesos a partir da alteração do valor de M_2 . As análises apresentadas foram feitas utilizando esse novo equacionamento.

Para o novo equacionamento, os valores de M_2 em que Z_{th} ponderada converge para valores mais próximos da Z_{th} analítica são muito baixos, entre 1 e 2, o que aproxima o equacionamento proposto do original. As análises mostram que essa metodologia é muito mais sensível à variação de j do que à variação de M_2 . Ainda assim há um ganho na utilização do novo equacionamento, que permite uma variação dos pesos, mesmo que limitada.

Pode-se concluir que, para uma ponderação linear, o valor da Z_{th} ponderada é muito dependente do valor da janela de dados j utilizada. Essa metodologia apresenta melhores resultados para j de pequenas dimensões. Diante desse fato, a utilização da janela de aceleração melhora significativamente os valores de Z_{th} , aproximando-os da impedância calculada analiticamente. Esse impacto positivo foi observado mesmo quando a amostra inicial de Z_{th} é nula.

4.5. Análise de Sensibilidade – Metodologia 3

4.5.1. Equacionamento

A Metodologia 3 consiste em uma ponderação exponencial dos valores da \bar{Z}_{th} a partir da mesma expressão utilizada pela Metodologia 2, equação (3.10), reescrita abaixo:

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{p(t)\bar{Z}_{thMQ}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} p(t-n)\bar{Z}_{th}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)} \quad (4.9)$$

Nesta equação, t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela, \bar{Z}_{thMQ} à impedância calculada pelo estimador dos mínimos quadrados e p ao fator de ponderação.

Conforme já apresentado no Capítulo 3, a diferença entre as Metodologias 2 e 3 está no fator de ponderação utilizado em cada uma delas. Para a ponderação exponencial, o fator de ponderação é definido pela equação (3.14) que é aqui reescrita:

$$p_{exp}(t-n) = e^{M_3\left(1-\frac{n}{j}\right)} - 1 \quad (4.10)$$

Nesta equação, M_3 é o fator máximo de ponderação que caracteriza o parâmetro referente ao instante atual, ou seja, $p_{exp}(t) = e^{M_3} - 1$.

Quanto maior o valor do expoente, maior a variação da inclinação da ponderação. Logo, para uma determinada janela de dados j , espera-se que, quanto maior for o valor de M_3 , maior será o peso associado à amostra atual de impedância calculada pelo método dos mínimos quadrados.

Assim como a Metodologia 2, esta metodologia utiliza o método recursivo para cálculo da impedância de Thèvenin. Dessa forma, alterando-se o fator de ponderação M_3 é possível escolher a relação de peso atribuído às impedâncias mais atuais e aquelas calculadas anteriormente. Maior valor de M_3 valoriza as impedâncias mais recentes, e menor valor deste fator valoriza o histórico de impedâncias.

4.5.2. Análise de Sensibilidade – Variação da Ponderação M3

Assim como feito para a Metodologia 2, aqui são apresentados os resultados das análises realizadas no sistema de 14 barras do IEEE, em relação à barra 5. O cenário do SimC utilizado é de incremento de 0,1% de todas as cargas do sistema, mantendo-se o fator de potência constante, e sem inserção de nenhum tipo de erro (ruído ou grosseiro). Os estudos foram realizados para as metodologias de carga CM1 e CM2.

A Figura 4-8 apresenta as impedâncias Z_{th} , em p.u., ponderadas a partir das equações (4.9) e (4.10) variando-se o fator de ponderação M_3 . Destacada em linha

vermelha tracejada está a Z_{th} analítica fornecida pelo aplicativo SimC. Foi considerada uma janela de dados constante igual a 20, e, para evitar trabalhar com exponenciais negativas, os valores de M_3 escolhidos são todos positivos.

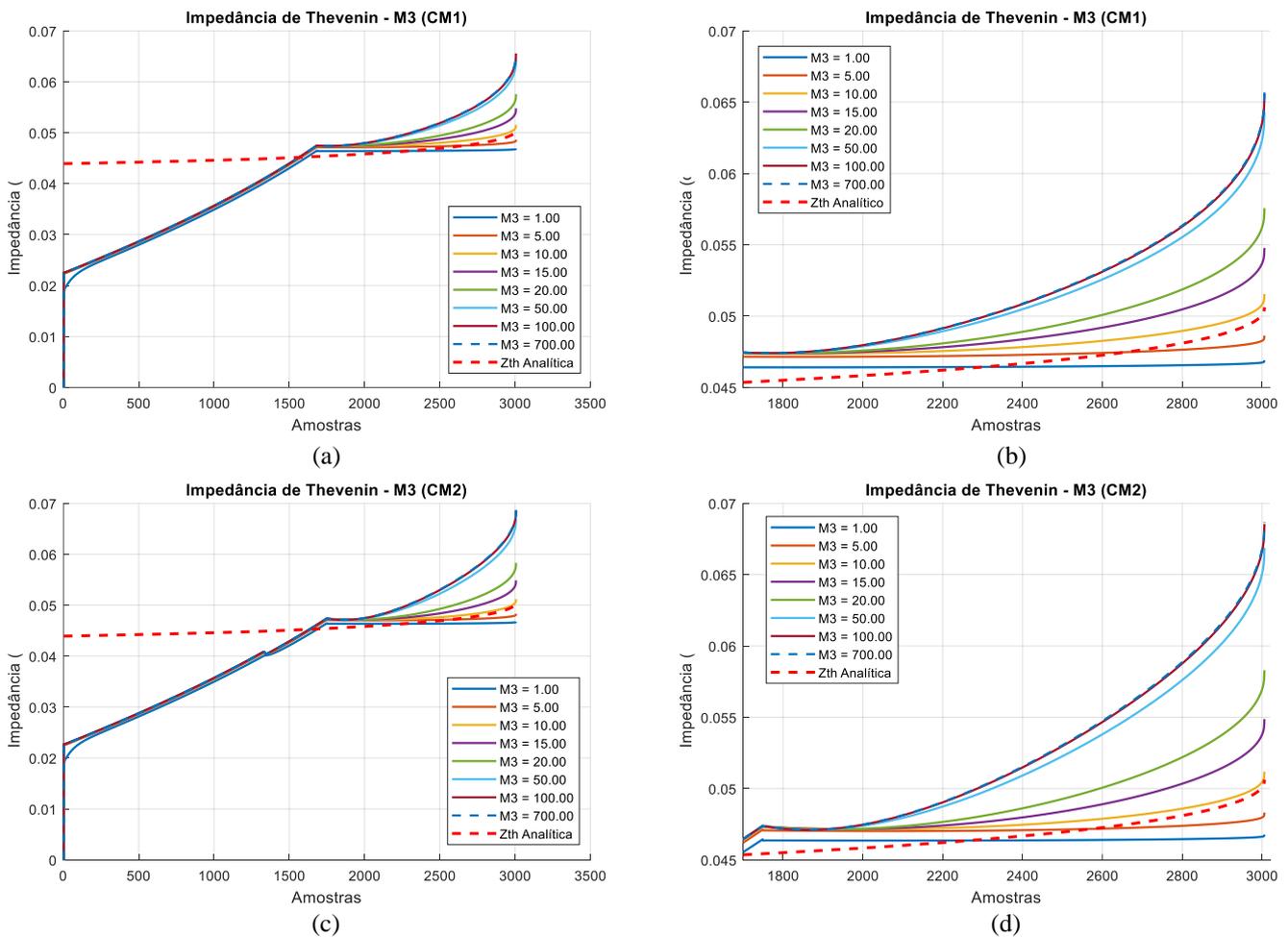


Figura 4-8 Z_{th} ponderada pela Metodologia 3 para diferentes valores de M_3 , com $j = 20$.

Na Figura 4-8(a) e (b) são apresentadas as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM1. A Figura 4-8(b) é uma ampliação da Figura 4-8(a), para destacar o comportamento da impedância no final da curva, quando Z_{th} já está convergindo para valores menos variáveis. De maneira análoga, a Figura 4-8(c) e (d) apresenta as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM2. A Figura 4-8(d) destaca o comportamento da impedância no fim da curva mostrada na Figura 4-8(c).

Da análise dos gráficos, percebe-se que o aumento do valor de M_3 causa o aumento dos valores de Z_{th} . A Tabela 4-5 e a Tabela 4-6 apresentam os valores de Z_{th} , em p.u., na última amostra, 3006, bem como a diferença entre esses valores e o valor da Z_{th} analítica. Todos os casos consideram uma janela de dados constante e igual a 20.

Tabela 4-5 Metodologia 3 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 3 (CM1)				
M_3	Z_{th}	Z_{th} analítica	Diferença (Z_{th} analítica – Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica – Z_{th})
1	0,0469	0,05062	0,00372	7,35%
5	0,04863	0,05062	0,00199	3,93%
10	0,05154	0,05062	-0,00092	-1,82%
15	0,05478	0,05062	-0,00416	-8,22%
20	0,05757	0,05062	-0,00695	-13,73%
50	0,06427	0,05062	-0,01365	-26,97%
100	0,06558	0,05062	-0,01496	-29,55%
700	0,06568	0,05062	-0,01506	-29,75%

Tabela 4-6 Metodologia 3 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 3 (CM2)				
M_3	Z_{th}	Z_{th} analítica	Diferença (Z_{th} analítica – Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica – Z_{th})
1	0,04677	0,05062	0,00385	7,61%
5	0,04831	0,05062	0,00231	4,56%
10	0,05118	0,05062	-0,00056	-1,11%
15	0,05487	0,05062	-0,00425	-8,40%
20	0,0583	0,05062	-0,00768	-15,17%
50	0,06688	0,05062	-0,01626	-32,12%
100	0,06855	0,05062	-0,01793	-35,42%
700	0,06869	0,05062	-0,01807	-35,70%

A Tabela 4-5, a Tabela 4-6 e os gráficos da Figura 4-8 indicam que, para j igual a 30, os valores de Z_{th} mais próximos da Z_{th} analítica ocorrem para M_3 menor que 10. Para M_3 maior que 10, a diferença entre os valores de Z_{th} ponderados e a Z_{th} analítica são maiores que 8%. Nota-se, também, que os valores de Z_{th} não sofrem grande variação em função de M_3 , quando este fator de ponderação assume valores maiores que 100. Para M_3 variando entre 100 e 700 as curvas das impedâncias estão praticamente sobrepostas nos gráficos apresentados na Figura 4-8.

Por tratar-se de uma função exponencial, que tende ao infinito quando o expoente possui valores muito elevados, por uma questão de limitação do próprio MATLAB®, existe um valor máximo para M_3 . Das análises realizadas conclui-se que M_3 deve ser menor ou igual a 700.

A Figura 4-4 mostra a tendência do comportamento de Z_{th} em função da variação do fator de ponderação M_3 . Para construção dessa curva de tendência foram utilizados os valores de Z_{th} , em p.u., na última amostra das diversas curvas de impedância ponderadas,

variando-se os valores do fator de ponderação M_3 e mantendo a janela de dados igual a 20.

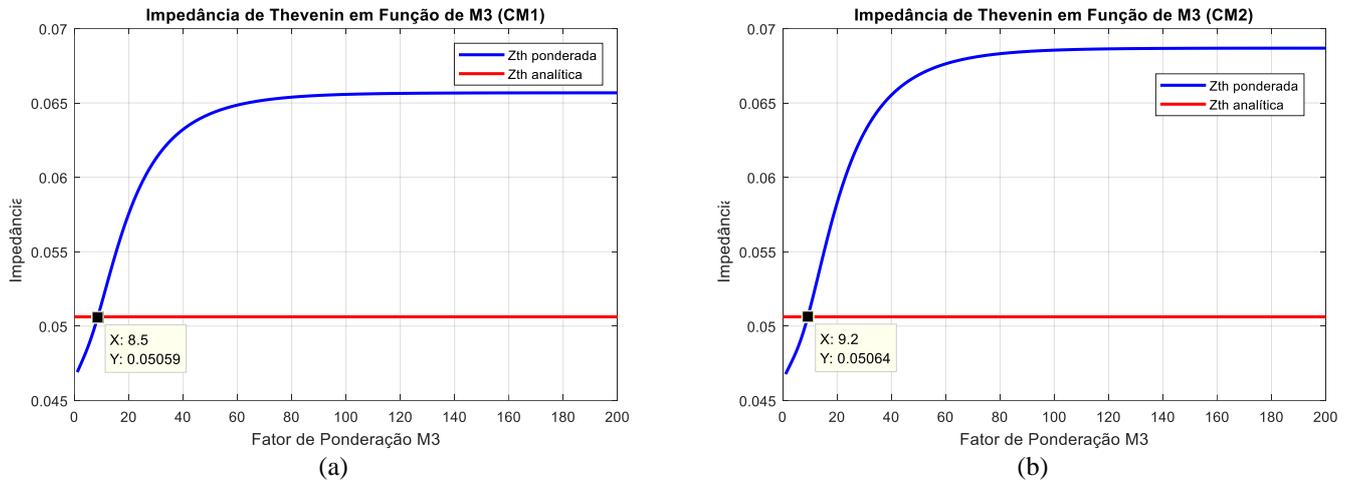


Figura 4-9 Tendência de variação de Z_{th} em função de M_3 , $j = 20$.

Analisando a Figura 4-9 nota-se que, para valores de M_3 maiores que 100, cinco vezes maior que a janela de dados, em ambas as metodologias de cálculo de carga, não há diferença considerável no valor da impedância ponderada. Para M_3 em torno de 10 os valores finais das curvas de Z_{th} são mais próximos dos valores da curva de Z_{th} analítica. No caso em estudo para CM1 o fator de ponderação que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é M_3 igual a 8,5. Para CM2, o fator de ponderação que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é M_2 igual a 9,2. Estes dois valores são menores do que a metade da janela de dados, uma vez que $j/2$ é igual a 10. Nota-se, também, que as impedâncias Z_{th} ponderadas utilizando CM2 atingem valores mais elevados que as impedâncias Z_{th} ponderadas utilizando CM1.

Análises realizadas utilizando outras dimensões para a janela de dados indicam haver uma correlação entre os valores de M_3 e j . Entretanto, apesar dos valores de M_3 serem diferentes, dependendo do valor de j , a tendência dos valores Z_{th} é a mesma para todas as janelas de dados.

4.5.3. Análise de Sensibilidade – Variação da Janela de Dados j

Como já discutido anteriormente, a escolha de j depende tanto das características do sistema elétrico quando da taxa de amostragem do sistema de medição. Mas, para as metodologias aqui estudadas, é possível identificar os tamanhos das janelas de dados utilizadas que favorecem a convergência da Z_{th} ponderada para valores próximos à Z_{th} analítica.

A Figura 4-10 mostra as curvas de Z_{th} , em p.u., ponderada pelas equações (4.9) e (4.10) variando-se o tamanho de j . O cenário utilizado para as simulações é o mesmo descrito no item 4.5.2, mas, neste caso, o fator de ponderação é mantido constante,

$M_3 = 10$. Destacada em linha vermelha tracejada está a Z_{th} analítica fornecida pelo aplicativo SimC.

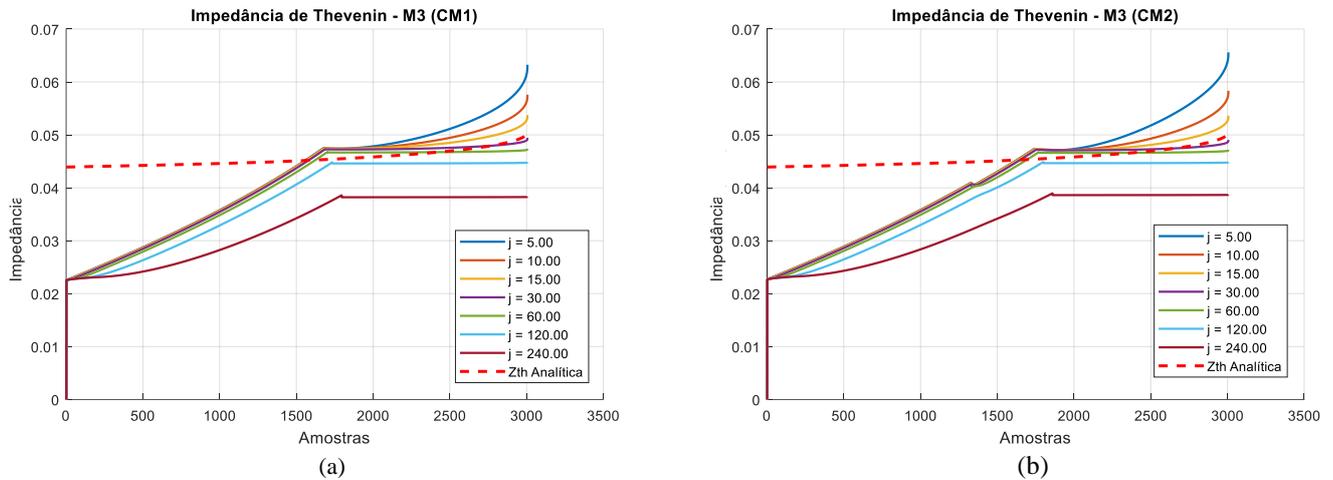


Figura 4-10 Z_{th} ponderada pela Metodologia 3 para diferentes valores de j , com $M_3 = 10$.

A Figura 4-10 (a) e (b) apresenta respectivamente as curvas para Z_{th} ponderadas utilizando CM1 e CM2. Assim como ocorre para a Metodologia 2, aumentando-se o valor de j , os valores de Z_{th} diminuem. Esse comportamento está dentro do esperado, uma vez que os valores de Z_{th} são crescentes ao longo do processo de aumento da carga em todo o sistema. Quanto maior o tamanho de j , mais impedâncias com valores menores são consideradas na ponderação.

Analisando os gráficos pode-se concluir que os valores de Z_{th} ponderados são mais próximos da Z_{th} analítica para janelas de dados menores que 30, quando se utiliza o fator de ponderação igual a 10. Novamente, confirma-se o que foi observado em [Andrade, 2014], que menores valores de j favorecem a convergência da impedância. Ressalta-se que as análises realizadas indicam que esta metodologia apresenta melhores resultados em janelas maiores que 5. A Figura 4-11 mostra as curvas de Z_{th} ponderadas utilizando a janela de aceleração, a fim de permitir uma comparação entre os resultados com e sem esta janela. O cenário utilizado é o mesmo que forneceu os resultados apresentados na Figura 4-10. As Z_{th} , em p.u., ponderadas foram calculadas para diferentes valores de j , M_3 igual a 10, ja igual a 5, e 500 amostras com aceleração.

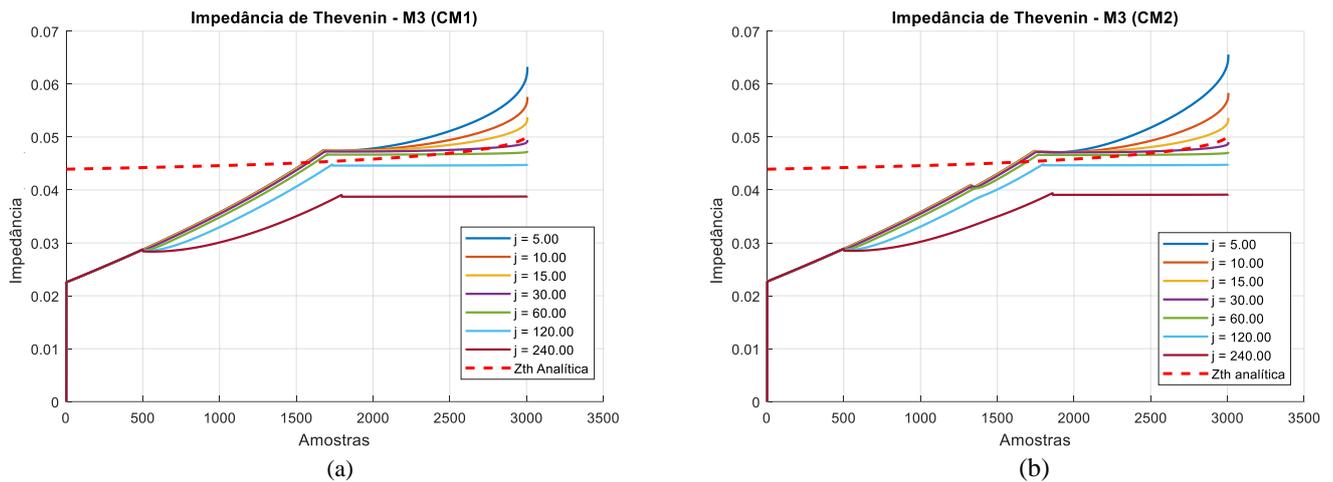


Figura 4-11 Z_{th} ponderada pela Metodologia 3 para diferentes valores de j , com $M_3 = 10$ e $ja = 5$.

Comparando-se a Figura 4-10 e a Figura 4-11, diferentemente do observado para a Metodologia 2, nota-se que a utilização de uma janela de aceleração não altera de forma considerável o valor da Z_{th} ponderada, para casos em que esta começa em zero. Mesmo aumentando o número de amostras com aceleração, as diferenças nos resultados não são muito significativas. Essa comparação entre os resultados é resumida na Tabela 4-7 e na Tabela 4-8. As tabelas apresentam os valores de Z_{th} , em p.u., ponderada na última amostra, 3006, e a diferença entre esses valores e o valor da Z_{th} analítica, para os dois cenários apresentados, com e sem a janela de aceleração, ja .

Tabela 4-7 Metodologia 3 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 3 (CM1)									
j	Z_{th} analítica	Z_{th} (Sem aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})	Z_{th}^a (Com aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença ($Z_{th}^a - Z_{th}$)	Diferença (%) ($Z_{th}^a - Z_{th}$)
5	0,05062	0,06325	-0,01263	-24,95%	0,06325	-0,01263	-24,95%	0	0,00%
10	0,05062	0,05759	-0,00697	-13,77%	0,05759	-0,00697	-13,77%	0	0,00%
15	0,05062	0,05375	-0,00313	-6,18%	0,05375	-0,00313	-6,18%	0	0,00%
30	0,05062	0,04943	0,00119	2,35%	0,04943	0,00119	2,35%	0	0,00%
60	0,05062	0,04737	0,00325	6,42%	0,04737	0,00325	6,42%	0	0,00%
120	0,05062	0,04485	0,00577	11,40%	0,04485	0,00577	11,40%	0	0,00%
240	0,05062	0,03832	0,0123	24,30%	0,03832	0,0118	23,31%	0,0005	1,29%

Tabela 4-8 Metodologia 3 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thèvenin – Metodologia 3 (CM2)									
j	Z_{th} analítica	Z_{th} (Sem aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})	Z_{th}^a (Com aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença ($Z_{th}^a - Z_{th}$)	Diferença (%) ($Z_{th}^a - Z_{th}$)
5	0,05062	0,06559	-0,01497	-29,57%	0,06559	-0,01497	-29,57%	0	0,00%
10	0,05062	0,05833	-0,00771	-15,23%	0,05833	-0,00771	-15,23%	0	0,00%
15	0,05062	0,05364	-0,00302	-5,97%	0,05364	-0,00302	-5,97%	0	0,00%
30	0,05062	0,04905	0,00157	3,10%	0,04905	0,00157	3,10%	0	0,00%
60	0,05062	0,04719	0,00343	6,78%	0,04719	0,00343	6,78%	0	0,00%
120	0,05062	0,04487	0,00575	11,36%	0,04487	0,00575	11,36%	0	0,00%
240	0,05062	0,03871	0,01191	23,53%	0,03917	0,01145	22,62%	0,00046	1,17%

Pode-se concluir que, para a Metodologia 3, quando a Z_{th} ponderada na amostra inicial vale zero, a utilização da janela de aceleração não traz grandes ganhos para a ponderação de Z_{th} . Analisando a Tabela 4-7 e a Tabela 4-8 pode-se notar que as diferenças entre os resultados com e sem a janela de aceleração são nulos para valores de j menores que 240. Mesmo para uma janela de dados igual a 240 essas diferenças são muito pequenas (menores que 1,5%). A utilização da janela de aceleração poderá trazer maiores benefícios, para casos em que o cálculo de Z_{th} ponderada é iniciado em qualquer instante, não apenas em cenários de carga leve, quando a impedância da rede é menor.

Pode-se dizer que a Metodologia 3 é menos sensível à variação da janela de dados que a Metodologia 2. Esse resultado deve-se ao fato de que a formulação da ponderação exponencial torna essa metodologia dependente tanto da variação de j quanto da variação de M_3 . Para fatores de ponderação em torno de 20, os valores de Z_{th} ponderada mais próximos da Z_{th} analítica ocorrem para uma janela de dados menores que 30. Novamente, os resultados para outros fatores de ponderação indicam que há uma relação direta entre os valores de j e M_3 , ou seja, os valores do fator de ponderação que contribuem para uma convergência mais próxima da Z_{th} analítica variam em função da janela de dados escolhida. Essa característica é detalhada no Capítulo 5.

A Figura 4-12 mostra a tendência do comportamento da Z_{th} em função da variação de j . Para construção dessa curva de tendência foram utilizados os valores de Z_{th} , em p.u., na última amostra das diversas curvas de impedância ponderadas, variando-se os tamanhos da janela de dados e mantendo o fator de ponderação constante, $M_3 = 10$. Aqui não foi utilizada a janela de aceleração, uma vez que o objetivo é apresentar a tendência de Z_{th} ponderada em função da janela de dados.

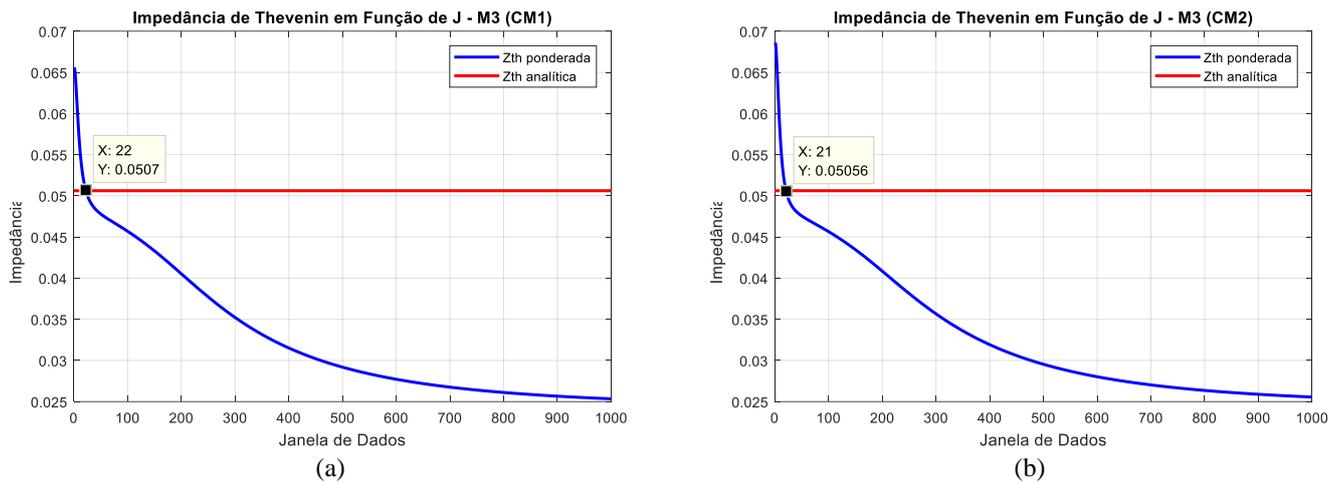


Figura 4-12 Tendência de variação de Z_{th} em função de j na Metodologia 3, com $M_3 = 10$.

Nota-se pela Figura 4-12 que, aumentando-se j , os valores de Z_{th} diminuem. Essa diminuição só se torna menos pronunciada para valores de j maiores que 1000. É bom ressaltar que, para um sistema elétrico real, uma janela de dados igual a 1000 seria um valor extremamente alto. No entanto, esses valores elevados de j foram utilizados no presente trabalho para auxiliar na compreensão da tendência das curvas de Z_{th} ponderada em função da variação desse parâmetro. No caso em estudo, com M_3 igual a 10, para CM1, a janela de dados que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é j igual a 22 e, para CM2, é j igual a 21.

4.5.4. Análise Global – Metodologia 3

Uma análise do equacionamento da ponderação da Metodologia 3 mostra que o peso dado à impedância calculada no instante atual e ao histórico de impedâncias pode ser alterado variando-se o valor do fator de ponderação M_3 . Aumentando-se o valor de M_3 aumenta-se o peso da impedância calculada no instante atual. Como a impedância de Thèvenin possui valor crescente com o incremento da carga, aumentando-se o peso da medição atual aumenta-se o valor final da Z_{th} ponderada. Esse comportamento é comprovado nas análises aqui apresentadas. O crescimento do valor final de Z_{th} em função do aumento de M_3 apresenta resultados significativos apenas para valores do fator de ponderação menores que um quinto da janela de dados.

O valor de Z_{th} ponderada por esta metodologia depende também da variação da janela de dados. O valor final de Z_{th} diminui com o aumento da janela de dados. Mas, como demonstrado, esse valor é menos dependente de j do que os valores ponderados pela Metodologia 2. Diferentemente do que ocorre para a Metodologia 2, quando o valor inicial de Z_{th} é nulo, a utilização da janela de aceleração não acarreta impactos significativos para os valores de Z_{th} . Como já destacado, o ganho da utilização de janelas de aceleração, para esta metodologia, poderia se dar quando a impedância inicial não for nula ou próxima disto.

As análises também mostram que há uma relação direta entre os valores de j e M_3 . Por isso no Capítulo 5 é apresentada uma proposta de ajuste de parâmetros com base nessa correlação.

4.6. Análise de Sensibilidade – Metodologia 4

4.6.1. Equacionamento

A Metodologia 4 foi proposta para cumprir o objetivo de aplicar um peso maior à última impedância calculada, procurando valorizar, assim, as últimas medições. Sua definição é dada pela equação (3.15), aqui reescrita, para facilitar o acompanhamento dos desenvolvimentos do capítulo.

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1} + \frac{\bar{Z}_{thMQ}(t) - \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1}}{M_4} \quad (4.11)$$

Nesta equação, t corresponde ao instante de tempo atual, j ao tamanho da janela de dados, n ao índice de deslocamento na janela, \bar{Z}_{thMQ} à impedância calculada pelo estimador dos mínimos quadrados e M_4 ao fator de ponderação.

A Figura 4-13 mostra um diagrama esquemático dessa metodologia.

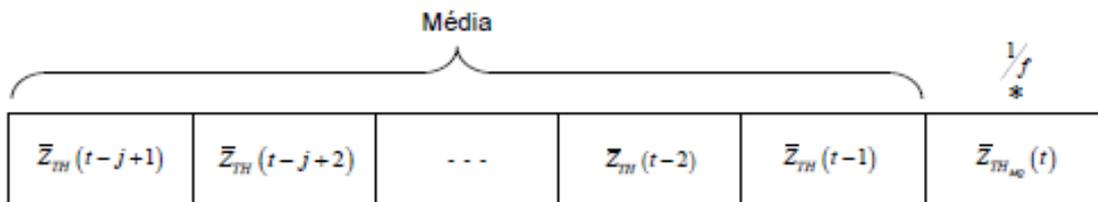


Figura 4-13 Diagrama esquemático de M4.
Fonte: adaptado de [Andrade, 2014]

Desenvolvendo a equação (4.11) tem-se:

$$\bar{Z}_{th}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1} + \frac{\bar{Z}_{thMQ}(t)}{M_4} - \left(\frac{1}{M_4} * \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1} \right) \quad (4.12)$$

$$\bar{Z}_{th}(t) = \left(1 - \frac{1}{M_4} \right) * \left(\frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{th}(t-n)}{j-1} \right) + \frac{\bar{Z}_{thMQ}(t)}{M_4} \quad (4.13)$$

Analisando a equação (4.13) pode-se concluir que, para que as impedâncias calculadas nos instantes anteriores tenham uma ponderação positiva, M_4 deve ser maior que 1. Caso M_4 seja igual a 1 será considerado apenas o resultado dos mínimos quadrados puro, sem ponderação.

Como essa metodologia também utiliza um método recursivo de cálculo, o valor de M_4 influencia diretamente no peso dado à amostra atual e ao histórico de dados. Pode-se concluir que, quanto maior o valor de M_4 , menor o peso da amostra atual e maior o peso das impedâncias passadas. De forma análoga, quanto menor o valor de M_4 , maior o peso da amostra atual e menor o peso das amostras passadas.

4.6.2. Análise de Sensibilidade – Variação da Ponderação M_4

Assim como feito para as Metodologias 2 e 3, aqui são apresentados os resultados das análises realizadas no sistema de 14 barras do IEEE, em relação à barra 5. O cenário do SimC utilizado é de incremento de 0,1% de todas as cargas do sistema, mantendo-se o fator de potência constante, e sem inserção de nenhum tipo de erro. Os estudos foram realizados para as metodologias de cálculo de carga equivalente CM1 e CM2.

A Figura 4-14 apresenta as impedâncias Z_{th} , em p.u., ponderadas a partir da equação (4.11) variando-se o fator de ponderação M_4 . Destacada em linha vermelha tracejada está a Z_{th} analítica fornecida pelo aplicativo SimC. Foi considerada uma janela de dados constante igual a 5, e respeitado o limite que estabelece M_4 maior ou igual a 1, para evitar ponderações negativas.

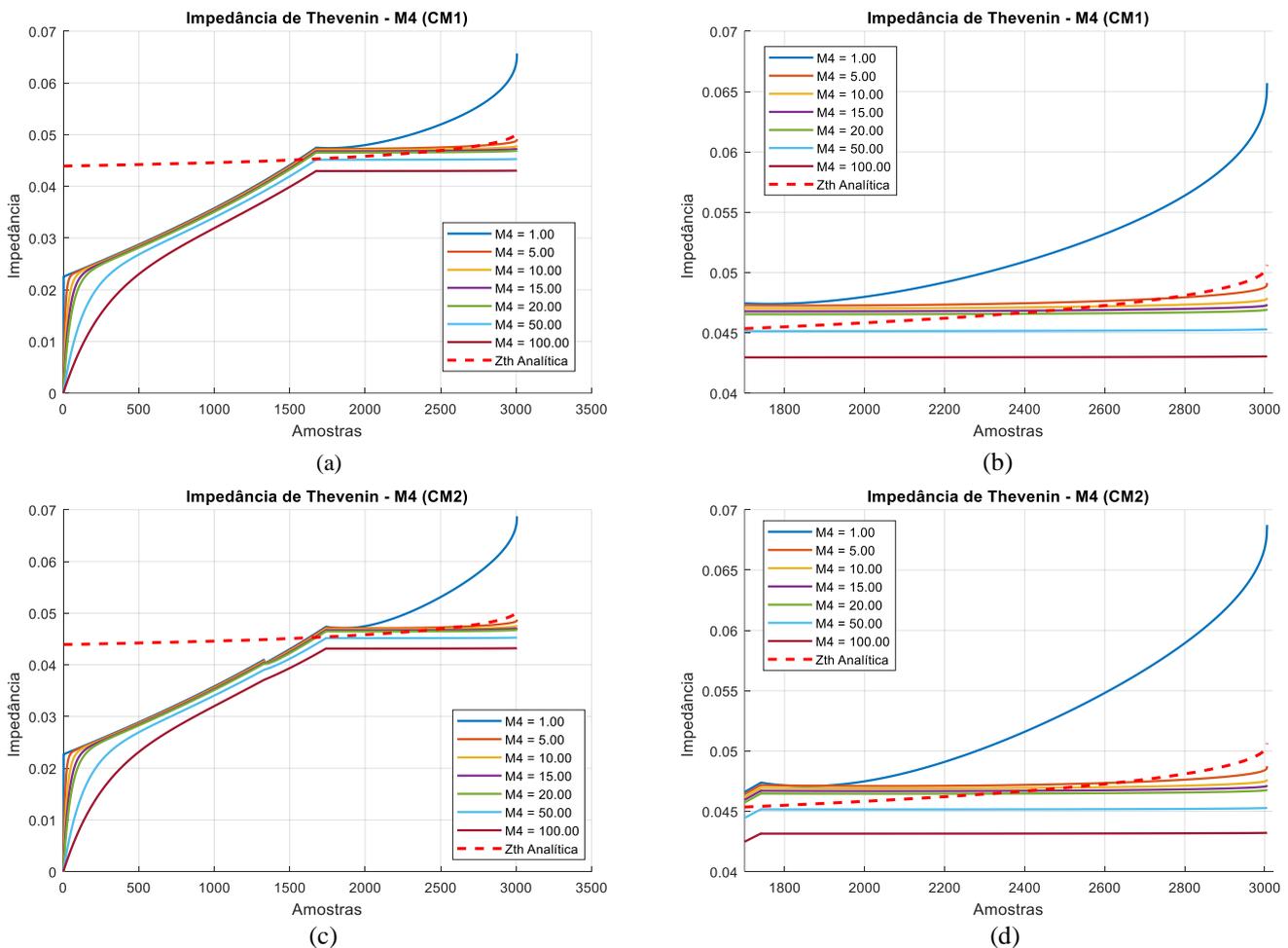


Figura 4-14 Z_{th} ponderado pela Metodologia 4 para diferentes valores de M_4 , com $j = 5$.

Na Figura 4-14(a) e (b) são apresentadas as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM1. A Figura 4-14(b) é uma ampliação da Figura 4-14(a), para destacar o comportamento da impedância no final da curva, quando Z_{th} já está convergindo para valores menos variáveis. De maneira análoga, a Figura 4-14(c) e (d) apresenta as curvas para Z_{th} calculadas a partir de CM2. A Figura 4-14(d) destaca o comportamento da impedância no final da curva mostrada na Figura 4-14(c).

Analisando os gráficos percebe-se que, aumentando-se o valor de M_4 , os valores de Z_{th} diminuem. A Tabela 4-9 e Tabela 4-10 apresentam os valores de Z_{th} , em p.u., na última amostra, 3006, e a diferença entre esses valores e o valor da Z_{th} analítica na mesma amostra. Todos os casos consideram uma janela de dados constante e igual 5.

Tabela 4-9 Metodologia 4 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thévenin – Metodologia 4 (CM1)				
M_4	Z_{th}	Z_{th} analítica	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})
1	0,0657	0,05062	-0,01508	-29,79%
5	0,04913	0,05062	0,00149	2,94%
10	0,0479	0,05062	0,00272	5,37%
15	0,04736	0,05062	0,00326	6,44%
20	0,04697	0,05062	0,00365	7,21%
50	0,04532	0,05062	0,0053	10,47%
100	0,04306	0,05062	0,00756	14,93%

Tabela 4-10 Metodologia 4 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thévenin – Metodologia 4 (CM2)				
M_4	Z_{th}	Z_{th} analítica	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})
1	0,06874	0,05062	-0,01812	-35,80%
5	0,04875	0,05062	0,00187	3,69%
10	0,04764	0,05062	0,00298	5,89%
15	0,04716	0,05062	0,00346	6,84%
20	0,04681	0,05062	0,00381	7,53%
50	0,04503	0,05062	0,00559	11,04%
100	0,04323	0,05062	0,00739	14,60%

Analisando os resultados das tabelas acima e dos gráficos da Figura 4-14 pode-se dizer que os valores de Z_{th} , em p.u., mais próximos da Z_{th} analítica ocorrem para M_4 em torno de 5. Para M_4 igual a 1, o primeiro termo da equação (4.13) é nulo, ou seja Z_{th} ponderada será o valor de $Z_{th_{M_4}}$ pura. Para M_4 maior ou igual a 50, a diferença entre os valores de Z_{th} ponderados e a Z_{th} analítica são maiores que 10%, ou seja, a partir desse ponto as impedâncias ponderadas afastam-se do valor de Z_{th} analítica.

A Figura 4-15 mostra a tendência do comportamento da Z_{th} em função da variação do fator de ponderação M_4 . Para construção dessa curva de tendência foram utilizados os valores de Z_{th} , em p.u., na última amostra das diversas curvas de impedâncias ponderadas variando-se os valores do fator de ponderação M_4 e mantendo-se a janela de dados igual a 5.

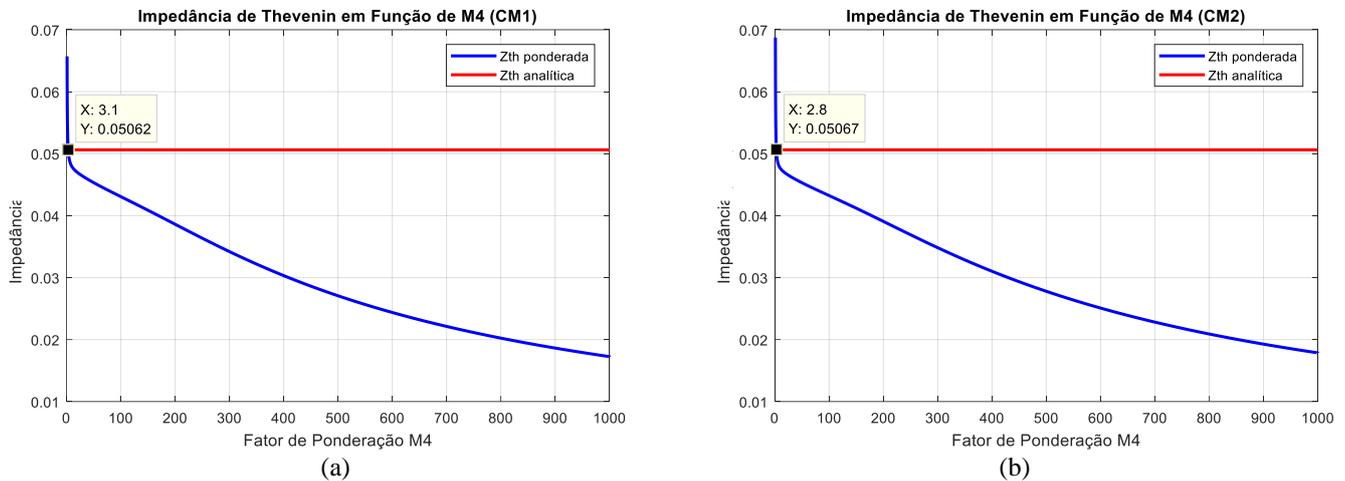


Figura 4-15 Tendência de variação de Z_{th} em função de M_4 , com $j = 5$.

Analisando a Figura 4-15 nota-se que, diferentemente do que foi observado para as Metodologias 2 e 3, não há um valor de M_4 em que a Z_{th} não sofra variações significativas com o aumento do fator de ponderação. Para uma janela de dados pequena, como a utilizada neste caso em estudo e para M_4 entre 2 e 5, os valores finais das curvas de Z_{th} são mais próximos dos valores da curva de Z_{th} analítica. No caso em estudo, para CM1, o fator de ponderação que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é M_4 igual a 3,1. Para CM2, o fator de ponderação que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é M_4 igual a 2,8. Nota-se, também, que as Z_{th} ponderadas utilizando CM1 atingem valores mais baixos que as Z_{th} ponderadas utilizando CM2.

As análises realizadas para outros valores de janela de dados mostram que, de uma forma geral, o fator de ponderação, M_4 , que favorece a convergência da Z_{th} para valores próximos ao da Z_{th} analítica, está entre 1 e 6. Esse valor tende a ser menor para janelas de dados maiores, ou seja, dentro dessa faixa de valores, quanto maior a janela de dados, mais próximo de 1 deve ser o fator de ponderação.

4.6.3. Análise de Sensibilidade – Variação da Janela de Dados j

Como já discutido anteriormente, a escolha de j depende tanto das características do sistema elétrico quanto da taxa de amostragem do sistema de medição. Entretanto, nos casos estudados, podem ser identificadas as dimensões das janelas de dados utilizadas que favoreçam a convergência da Z_{th} ponderada para valores próximos à Z_{th} analítica.

A Figura 4-16 mostra as curvas de Z_{th} , em p.u., ponderada pela equação (4.11) variando-se o tamanho de j . O cenário utilizado para a simulação é o mesmo descrito no item 4.6.2. Mas, neste caso, o fator de ponderação é mantido constante, $M_4 = 3$. Destacada em linha vermelha tracejada está a Z_{th} analítica fornecida pelo aplicativo SimC.

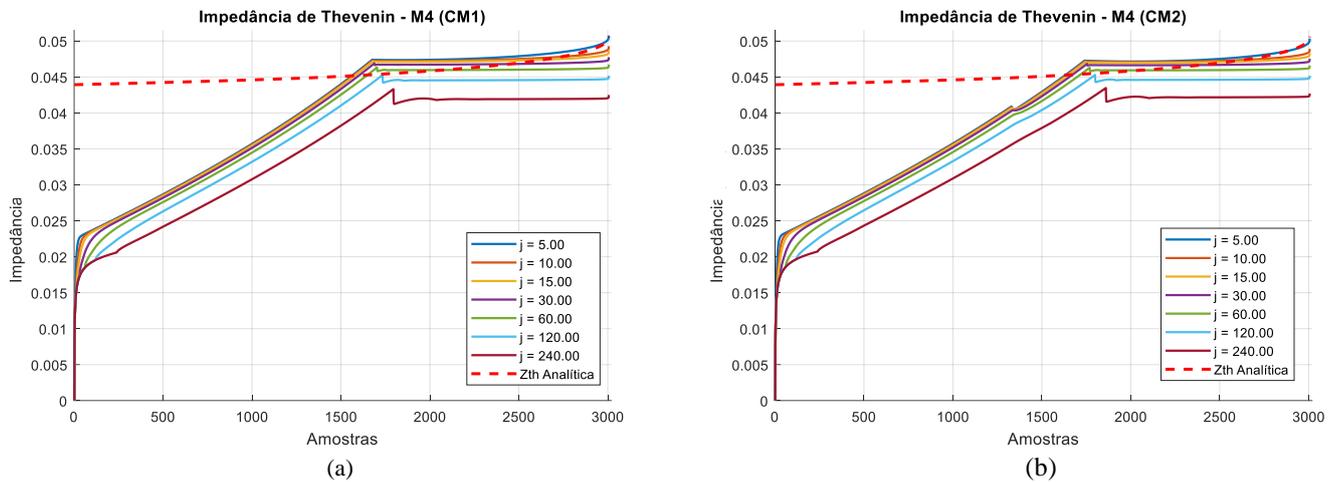


Figura 4-16 Z_{th} ponderada pela Metodologia 4 para diferentes valores de j , com $M_4 = 3$.

A Figura 4-16(a) e (b) apresenta respectivamente as curvas para Z_{th} ponderadas utilizando CM1 e CM2. Como observado para as Metodologias 2 e 3, aumentando-se o valor de j , os valores de Z_{th} diminuem.

Analisando os gráficos pode-se concluir que os valores de Z_{th} ponderados são mais próximos da Z_{th} analítica para janelas de dados menores. Assim como nas análises das Metodologias 2 e 3 confirma-se aqui que menores valores de j favorecem uma convergência mais rápida da impedância para um valor menos variável. A Figura 4-17 mostra as curvas de Z_{th} ponderadas utilizando a janela de aceleração. Essa figura possibilita uma comparação entre os resultados com e sem esta janela. O cenário utilizado é o mesmo que forneceu os resultados apresentados na Figura 4-16. As Z_{th} ponderadas foram calculadas para diferentes valores de j , M_4 igual a 3, ja igual a 5, e 500 amostras com aceleração.

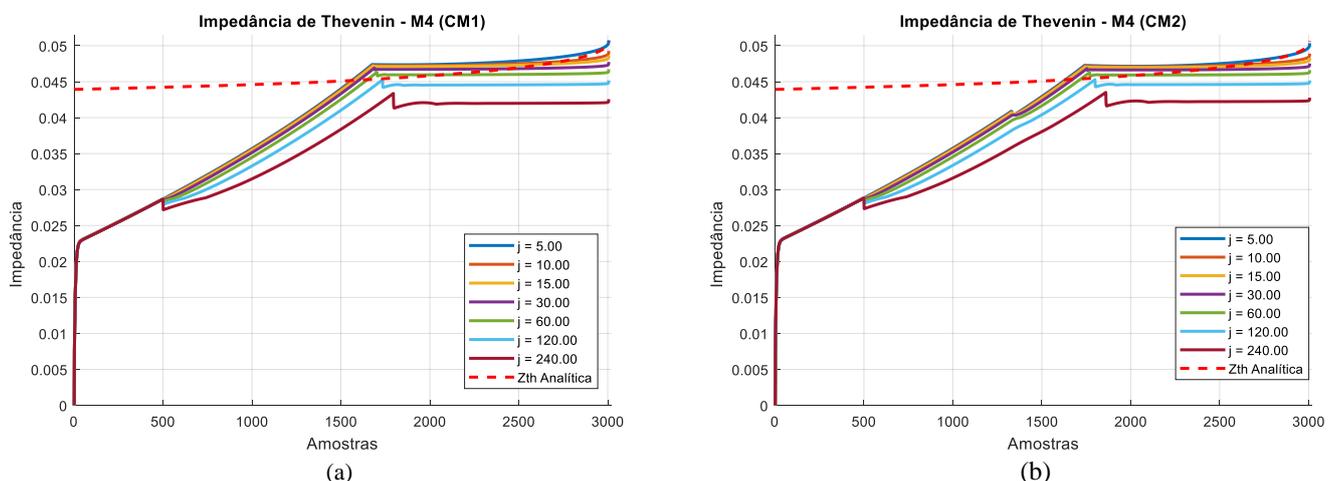


Figura 4-17 Z_{th} ponderada pela Metodologia 4 para diferentes valores de j , com $M_4 = 3$ e $ja = 5$.

Comparando a Figura 4-16 e a Figura 4-17, como observado para a Metodologia 3, a utilização de uma janela de aceleração não altera de forma considerável o valor da Z_{th} ponderada. Isso ocorre porque o valor inicial de Z_{th} é zero. Essa comparação entre os resultados é resumida na Tabela 4-11 e na Tabela 4-12. As tabelas apresentam os valores de Z_{th} , em p.u., ponderada na última amostra, 3006, e a diferença entre esses valores e o valor da Z_{th} analítica, para os dois cenários apresentados, com e sem a janela de aceleração.

Tabela 4-11 Metodologia 4 – CM1: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thévenin – Metodologia 4 (CM1)									
j	Z_{th} analítica	Z_{th} (Sem aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})	Z_{th}^a (Com aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença ($Z_{th}^a - Z_{th}$)	Diferença (%) ($Z_{th}^a - Z_{th}$)
5	0,05062	0,05076	-0,00014	-0,28%	0,05076	-0,00014	-0,28%	0	0,00%
10	0,05062	0,04927	0,00135	2,67%	0,04929	0,00135	2,67%	0	0,00%
15	0,05062	0,04866	0,00196	3,87%	0,04866	0,00196	3,87%	0	0,00%
30	0,05062	0,04775	0,00287	5,67%	0,04775	0,00287	5,67%	0	0,00%
60	0,05062	0,04673	0,00389	7,68%	0,04673	0,00389	7,68%	0	0,00%
120	0,05062	0,04518	0,00544	10,75%	0,04518	0,00544	10,75%	0	0,00%
240	0,05062	0,04249	0,00813	16,06%	0,04257	0,00805	15,90%	0,00008	0,19%

Tabela 4-12 Metodologia 4 – CM2: Comparação entre a Z_{th} e a Z_{th} analítica

Impedância de Thévenin – Metodologia 4 (CM2)									
j	Z_{th} analítica	Z_{th} (Sem aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th})	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th})	Z_{th}^a (Com aceleração)	Diferença (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença (%) (Z_{th} analítica - Z_{th}^a)	Diferença ($Z_{th}^a - Z_{th}$)	Diferença (%) ($Z_{th}^a - Z_{th}$)
5	0,05062	0,05035	0,00027	0,53%	0,05035	0,00027	0,53%	0	0,00%
10	0,05062	0,0489	0,00172	3,40%	0,0489	0,00172	3,40%	0	0,00%
15	0,05062	0,04833	0,00229	4,52%	0,04833	0,00229	4,52%	0	0,00%
30	0,05062	0,04753	0,00309	6,10%	0,04753	0,00309	6,10%	0	0,00%
60	0,05062	0,04661	0,00401	7,92%	0,04661	0,00401	7,92%	0	0,00%
120	0,05062	0,04517	0,00545	10,77%	0,04517	0,00545	10,77%	0	0,00%
240	0,05062	0,04271	0,00791	15,63%	0,04277	0,00785	15,51%	0,00006	0,14%

Pode-se concluir que, para a Metodologia 4, quando o valor inicial de Z_{th} é próximo de zero, a utilização da janela de aceleração não traz ganhos significativos para a ponderação de Z_{th} . Analisando as tabelas acima, percebe-se que as diferenças entre os resultados com e sem a janela de aceleração são nulas ou muito próximas de zero.

Do exposto, pode-se dizer que a Metodologia 4, assim como a Metodologia 3, é menos sensível à variação da janela de dados que a Metodologia 2. Esse resultado deve-se ao fato de que o equacionamento da sua ponderação torna essa metodologia um pouco menos dependente da variação de j , que é utilizada apenas para fazer uma média das impedâncias calculadas em instantes anteriores. Ainda assim, os valores de Z_{th}

ponderada mais próximos da Z_{th} analítica ocorrem para janelas de dados de pequena dimensão. No caso em estudo, para janelas próximas a 5.

A Figura 4-18 mostra a tendência do comportamento da Z_{th} em função da variação de j . Para construção dessa curva de tendência, foram utilizados os valores de Z_{th} , em p.u., na última amostra das diversas curvas de impedância ponderadas, variando-se os tamanhos da janela de dados e mantendo o fator de ponderação constante, $M_4 = 3$. Aqui não foi utilizada a janela de aceleração, uma vez que o objetivo é apresentar a tendência de Z_{th} ponderada em função da janela de dados.

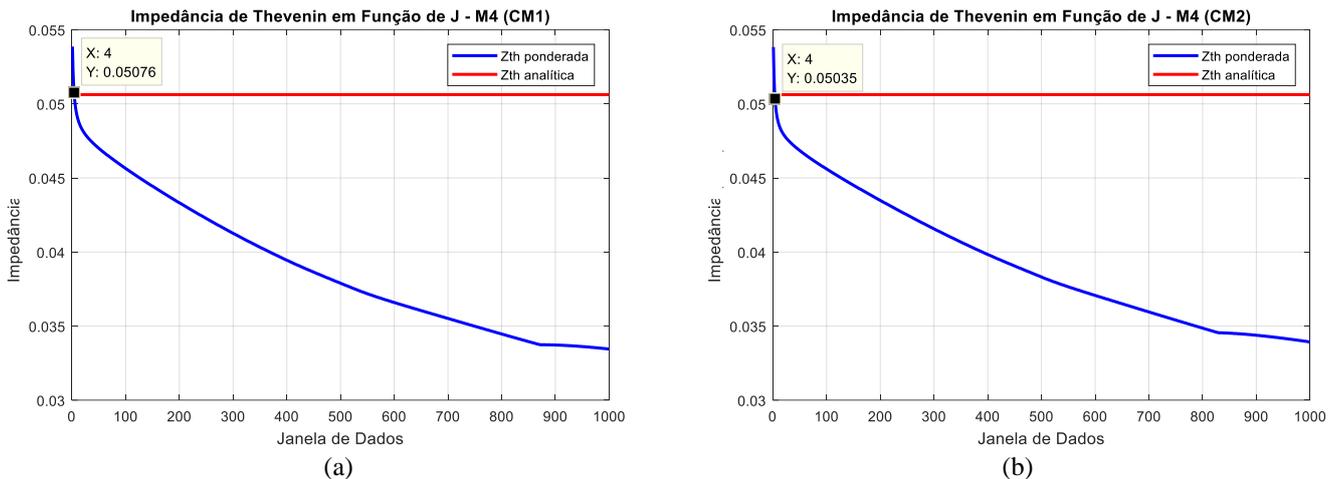


Figura 4-18 Tendência de variação de Z_{th} em função de j na Metodologia 4, com $M_4 = 3$.

Analisando a Figura 4-18 percebe-se que, aumentando-se j , os valores de Z_{th} diminuem. Essa diminuição é mais abrupta para janelas de dados menores que 30 e se torna menos pronunciada para valores de j maiores que 800. Assim como apresentado para a Metodologia 3, apesar de uma janela de dados igual a 800 ser um valor extremamente alto, para a realidade do sistema elétrico, valores elevados de j foram utilizados no presente estudo, para auxiliar na compreensão da tendência das curvas de Z_{th} ponderada em função da variação desse parâmetro. No caso em estudo, com M_4 igual a 3, a janela de dados que apresenta resultado mais próximo do valor calculado analiticamente é j igual a 4, para as duas metodologias de cálculo de carga equivalente.

4.6.4. Análise Global – Metodologia 4

Assim como ocorre para o equacionamento proposto da Metodologia 2 e para a Metodologia 3, na Metodologia 4 é possível alterar o peso dado à impedância calculada no instante atual e ao histórico de impedâncias, variando-se o valor do fator de ponderação M_4 . Diminuindo-se o valor de M_4 aumenta-se o peso da impedância no instante atual. Como a impedância de Thèvenin possui valor crescente com o incremento da carga, aumentando-se o peso da medição atual aumenta-se o valor final da Z_{th} ponderada. O decréscimo do valor de Z_{th} em função do aumento de M_4 é maior para valores pequenos do fator de ponderação.

O decréscimo do valor de Z_{th} , em função do aumento de M_4 , é maior para valores pequenos do fator de ponderação.

O valor da Z_{th} ponderada por esta metodologia depende também da variação da janela de dados. O valor final de Z_{th} diminui com o aumento da janela de dados. Porém, como ocorre para a Metodologia 3, esse valor é menos dependente de j do que os valores ponderados pela Metodologia 2. Assim como ocorre para a Metodologia 3, quando o valor inicial de Z_{th} é nulo, a utilização da janela de aceleração não acarreta impactos significativos nos valores de Z_{th} . O ganho da utilização da janela de aceleração, para esta metodologia, poderia ser sentido nos casos em que a impedância inicial não for nula ou próxima desse valor.

Para a Metodologia 4 foi observado que os valores de M_4 , que favorecem a convergência de Z_{th} para valores próximos à Z_{th} analítica, estão entre 1 e 6. Quanto maior a janela de dados, mais próximo de 1 deve ser M_4 . Portanto, diferentemente da Metodologia 3, esta metodologia apresenta maior limitação na escolha do fator de ponderação. Esse aspecto é detalhado no próximo capítulo.

4.7. Considerações Finais

As análises de sensibilidade das metodologias de ponderação de equivalentes de redes apresentadas neste capítulo possibilitaram um maior conhecimento sobre as características próprias de cada uma delas. A avaliação das equações que definem cada metodologia foi feita em função dos parâmetros que influenciam o valor da impedância de Thévenin ponderada, ou seja, a dimensão da janela de dados e o fator de ponderação.

A Metodologia 2 mostrou-se mais sensível à variação da janela de dados, apresentando resultados mais próximos à referência para pequenos valores de j . As Metodologias 3 e 4 possuem maior flexibilidade em relação ao tamanho da janela de dados, apresentando resultados próximos à referência mesmo para j maiores.

Definidas as tendências de variação dos valores da impedância em função de j e do fator de ponderação foi possível identificar a existência de uma correlação entre eles. O Capítulo 5 apresenta uma proposta de ajuste de parâmetros com base nas análises realizadas no presente capítulo e na correlação existente entre os parâmetros de ajuste.

Capítulo 5

Proposta de Ajuste dos Parâmetros das Metodologias

5.1. Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma proposta de ajuste dos parâmetros das metodologias, a fim de favorecer a convergência da impedância ponderada para valores próximos à referência. Essa proposta é feita a partir da análise de sensibilidade das Metodologias 2, 3 e 4 apresentada no Capítulo 4.

Para a apresentação da proposta foi utilizado o sistema de 14 Barras do IEEE, visto a partir da barra 5. O cenário utilizado para os estudos é o mesmo apresentado no Capítulo 4.

Inicialmente, a proposta é construída para um cenário sem inserção de erros do tipo ruído. Visando avaliar a eficácia das metodologias em cenários com a presença de erros, ao final deste capítulo são apresentados resultados que consideram erro do tipo ruído, com desvio padrão de 0,1% para módulo e ângulo da tensão e da corrente.

5.2. Propostas para Ajuste de Parâmetros

As análises de sensibilidade realizadas indicaram haver correlação entre os valores da janela de dados e do fator de ponderação que favorecem uma convergência final de Z_{th} para valores próximos à Z_{th} analítica. Essa correlação é maior para a Metodologia 3 e menor para as Metodologias 2 e 4.

Como os resultados apresentados no Capítulo 4 mostram que não há diferenças consideráveis para as tendências das curvas quando se utiliza CM1 ou CM2, as análises apresentadas neste item são as obtidas a partir da metodologia de cálculo e carga equivalente 1, CM1. Os resultados quando se utiliza CM2 são similares.

O objetivo da proposta de ajuste aqui apresentada é identificar a melhor escolha para o valor do fator de ponderação e da janela de dados. A janela de aceleração não será discutida, mas, por definição, deve possuir valores baixos para cumprir seu objetivo. O número de amostras com aceleração também depende da taxa de amostragem das medições e das características do sistema. Esse deve ser escolhido com o objetivo de favorecer a convergência dos valores das impedâncias.

5.2.1. Proposta para a Metodologia 2

Dentre as três metodologias estudadas, pode-se dizer que a Metodologia 2 é a mais limitada em relação aos ajustes dos parâmetros j e M_2 . Essa metodologia apresenta melhor desempenho para valores de M_2 baixos, entre 1 e 2, e janelas de dados pequenas. As análises mostraram que ela é muito mais sensível à variação de j do que à variação de M_2 . Para utilizar janelas de dados maiores na metodologia 2 é imprescindível o uso de

reta que representa essa correlação tem inclinação aproximadamente constante para janelas de dados maiores que 5. O valor dessa inclinação é 0,429. A Figura 5-1(b) mostra que, para os valores dos parâmetros identificados na Figura 5-1(a), a diferença entre Z_{th} e Z_{th} analítica é muito pequena. Para janelas de dados maiores que 50, essa diferença torna-se praticamente nula.

Com base nos resultados obtidos propõe-se a seguinte técnica para ajuste de parâmetros da Metodologia 3, a fim de se obterem melhores resultados:

Passo (i): Escolha da dimensão da janela de dados (j).

A escolha da janela de dados deve considerar as características da rede elétrica estudada e do sistema de medição.

A Metodologia 3 apresenta melhores resultados para janelas de dados maiores que 5.

Passo (ii): Escolha do fator de ponderação (M_3)

Definida a janela de dados escolhe-se o valor de M_3 . Quanto maior o valor de j maior deverá ser o valor M_3 . A relação entre esses parâmetros, para janelas de dados maiores que 5, pode ser definida pela equação (5.1).

$$M_3 = 0,429 * j \tag{5.1}$$

5.2.3. Proposta para a Metodologia 4

Para a Metodologia 4 nota-se que também há uma correlação entre os valores dos parâmetros j e M_4 , apesar destes serem um pouco mais restritos. A Figura 5-2 apresenta os gráficos da correlação entre os valores de j e M_4 que favorecem a convergência de Z_{th} para valores próximos a Z_{th} analítica. Esses gráficos foram obtidos utilizando a mesma metodologia descrita no item anterior para construção dos gráficos da Figura 5-1.

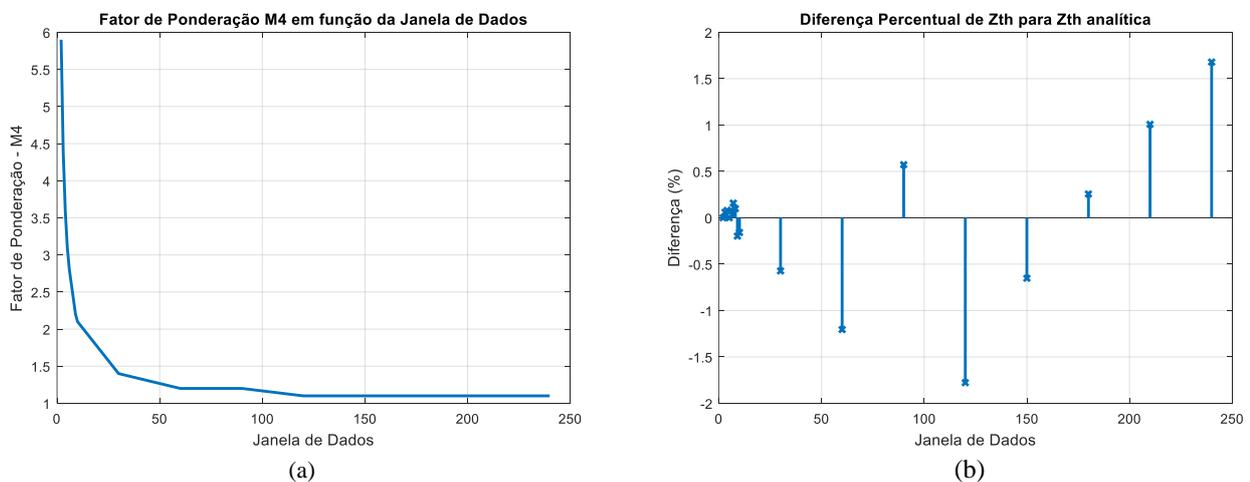


Figura 5-2 Correlação entre M_4 e janela de dados.

Analisando os resultados, nota-se que, como já citado no item 4.6.2, o valor de M_4 que resulta em melhores valores de Z_{th} está compreendido entre 1 e 6. Quanto maior o valor de j , mais próximo de 1 deve ser o valor de M_4 . Contudo, o gráfico da Figura 5-2(a) indica que, para janelas de dados maiores que 10, o fator de ponderação já deve assumir valores menores que 2. A Figura 5-2(b) mostra que, para os valores indicados na Figura 5-2(a), a diferença entre Z_{th} e Z_{th} analítica é menor que 2%. Essa diferença é praticamente nula para janelas de dados menores que 10.

Para ajuste dos parâmetros dessa metodologia sugere-se que:

- (i) Sejam utilizados valores de M_4 entre 1 e 2. Apesar de 1 ser o valor que iguala o resultado final de Z_{th} ao dos mínimos quadrados puros, esta faixa é a que apresenta melhores resultados para janelas de dados maiores que 10.
- (ii) Não há restrições para o valor da janela de dados, que pode ser livremente escolhida com base nas características do SEP e do sistema de medição dos fasores.

As análises indicam que, diferentemente da Metodologia 2, apesar da restrição de escolha no valor de M_4 , não há restrições para o valor da janela de dados, que pode ser livremente escolhida com base nas características do sistema.

5.3. Avaliação das Propostas de Ajuste de Parâmetros Considerando Medições com Erro do Tipo Ruído

Como na operação em tempo real do SEP as medições são contaminadas por erros, foram estudados também cenários com a inserção de erros do tipo ruído, a fim de verificar se os ajustes propostos podem ser aplicados de forma generalizada.

São apresentadas a seguir as análises para um cenário de estudo do sistema IEEE 14 barras visto a partir da barra 5, passo de carga 0,1% com fator de potência constante, e com inserção de um erro do tipo ruído. Foram realizadas simulações considerando desvios padrão de 0,01%, 0,1% e 1,0% para módulo e ângulo dos fasores de tensão e de corrente. Como as conclusões sobre os resultados são similares, são apresentadas neste item as análises para o caso de desvio padrão igual a 0,1%. A metodologia de cálculo de carga equivalente adotada é a CM1, pois, como já justificado, os resultados são similares, quando se utiliza a CM2.

5.3.1. Avaliação da Proposta para a Metodologia 2

A Figura 5-2 mostra a tendência de variação dos valores de Z_{th} para a Metodologia 2 em função de M_2 e de j . Para obtenção dessas curvas foram utilizados os mesmos procedimentos descritos no item 4.4 do Capítulo 4. Em azul são mostradas as curvas de tendência para as medições com erro do tipo ruído e em vermelho as curvas para medições sem erro.

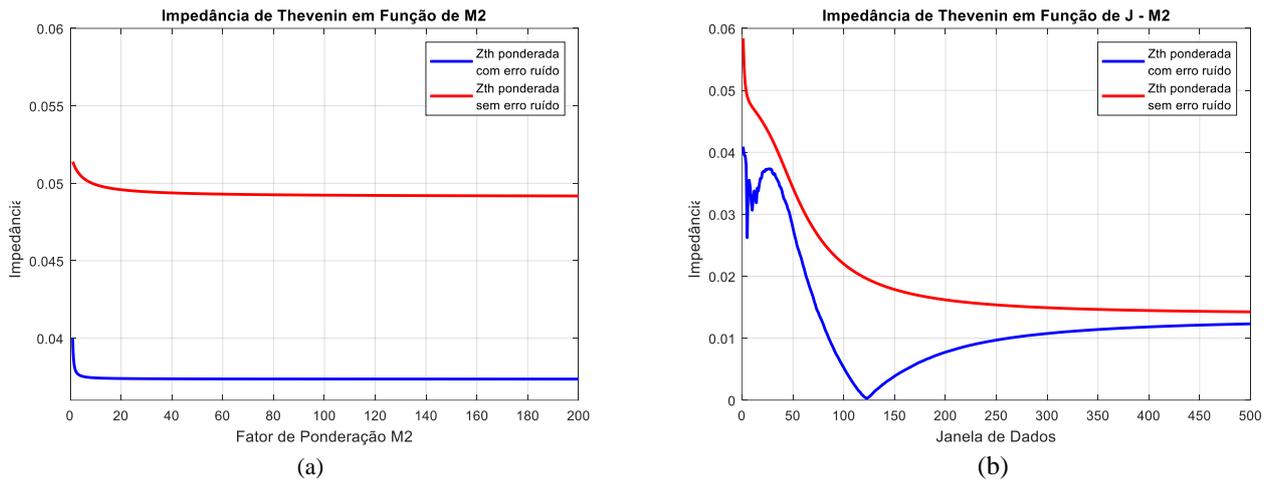


Figura 5-3 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 2 em função de M_2 e de j .

Nota-se que, para medições com erro do tipo ruído, a tendência da curva em função da ponderação (Figura 5-3(a)) é a mesma tendência para medições sem erro. A diferença é que a curva está deslocada em relação à referência, ou seja, apresenta valores mais distantes da Z_{th} analítica. As análises realizadas adotando-se maiores desvios padrão do erro indicam que, quanto maior o valor do desvio, maior será a distância de Z_{th} da Z_{th} analítica.

A curva de tendência em função da janela de dados mostra que os resultados obtidos para Z_{th} são sempre menores que Z_{th} analítica, mesmo utilizando um fator de ponderação dentro da faixa especificada anteriormente. A curva de tendência também apresenta valores bem variáveis no início do processamento, para janelas de dados menores que 350, depois tende para as mesmas características da curva de tendência para medições sem erro. As análises realizadas indicam que, quanto maior o desvio padrão do erro, maior é a variação de valores no início do processamento. Ainda assim, a curva mantém sua característica principal, os valores mais próximos da Z_{th} analíticas são para janelas de dados menores que 20.

Conclui-se que a Metodologia 2 não possui capacidade de filtragem para janela de dados pequenas. Para melhores resultados quanto ao amortecimento das curvas deve-se utilizar janelas maiores, o que afasta os valores de Z_{th} da Z_{th} analítica. Devido às características dessa metodologia, é imprescindível a utilização de uma janela de aceleração.

Portanto, mesmo para medições sem erro, os parâmetros de ajuste que favorecem a convergência de Z_{th} , para valores próximos à Z_{th} analítica, são: janela de dados pequenas e M_2 entre 1 e 2.

5.3.2. Avaliação da Proposta para a Metodologia 3

A Figura 5-4 mostra a tendência de variação dos valores Z_{th} para a Metodologia 3 em função de M_3 e de j . Para obtenção dessas curvas foram utilizados os mesmos procedimentos descritos no item 4.5 do Capítulo 4.

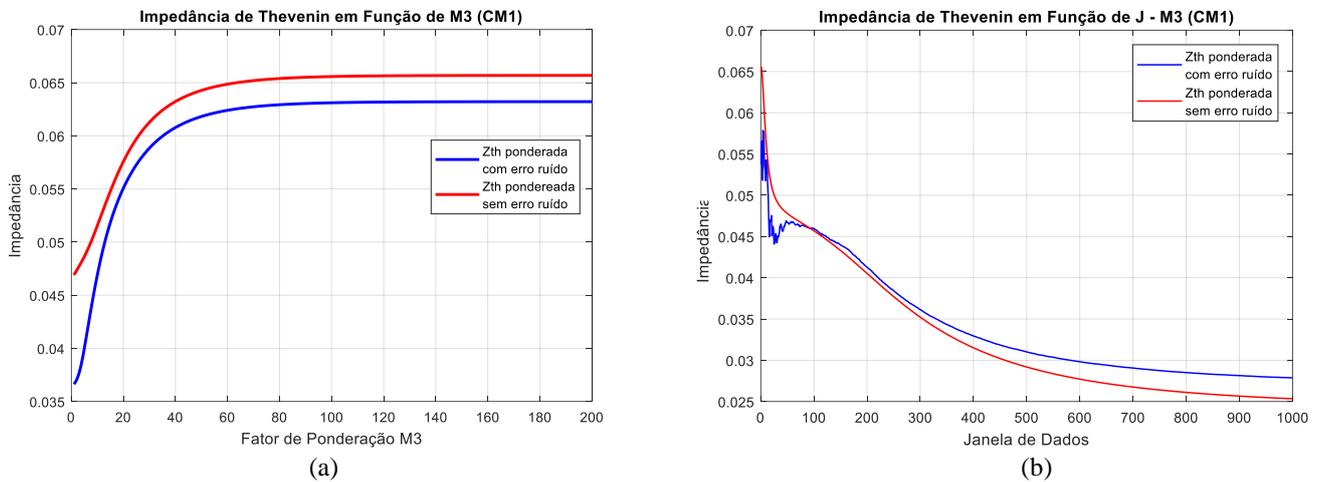


Figura 5-4 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 3 em função de M_3 e de j .

A Figura 5-4(a) apresenta a tendência da variação de Z_{th} em função de M_3 . Nota-se que a curva de tendência é semelhante à curva obtida para o cenário sem inserção de erro do tipo ruído.

A Figura 5-4(b) mostra a tendência do valor de Z_{th} em função de j . Em azul tem-se a curva para o cenário com erro de desvio padrão 0,1% e em vermelho a curva para o cenário sem erro. A curva de tendência em função de j para o cenário sem erro do tipo ruído não apresenta as variações para janelas de dados menores que 100 como ocorre no cenário com erro.

Os estudos realizados para outros valores de desvio padrão apresentam essa mesma tendência com variações para janelas de dados menores. Quanto maior o desvio padrão, mais pronunciadas são as variações e, quanto menor o desvio, mais próxima será a curva de tendência da curva obtida sem considerar a inserção de erros. Isso se deve ao fato de que ponderações com maiores valores de j amortecem melhor as medições contaminadas por erros do tipo ruído. Porém, nota-se que as curvas apresentam um formato semelhante, ou seja, de forma geral a tendência dos valores de Z_{th} em função de j é a mesma para cenários com e sem erro do tipo ruído.

A Figura 5-5 apresenta os gráficos de M_3 em função da janela de dados.

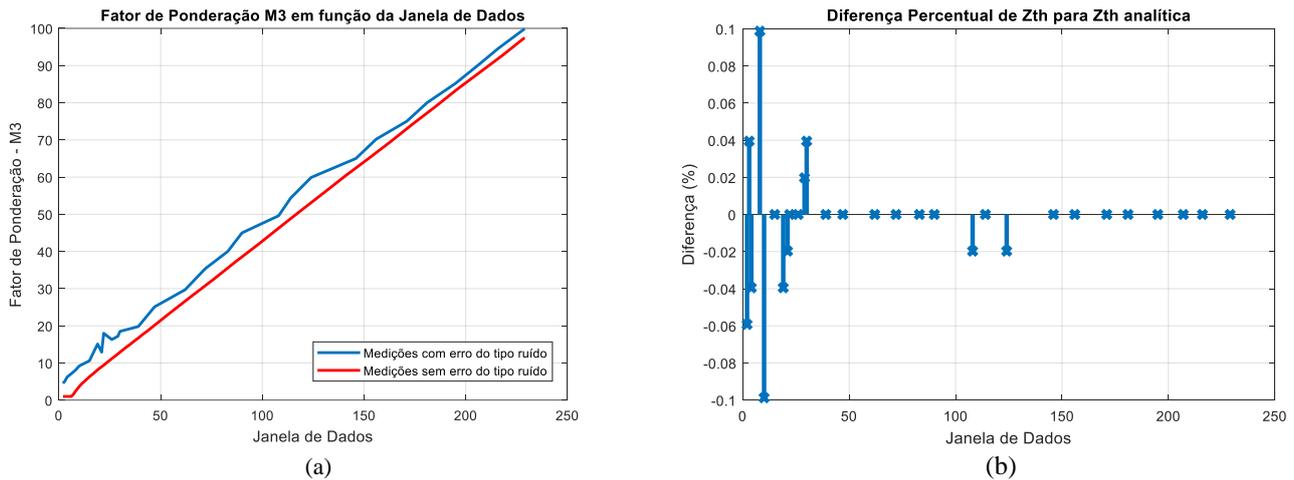


Figura 5-5 Relação entre os valores de M_3 e j .

A Figura 5-5(a) mostra que, mesmo para medições com erro do tipo ruído, mantém-se a correlação aproximadamente linear entre os valores de M_3 e j . A reta em vermelho foi obtida na análise das medições sem erro e em azul é mostrado o resultado das medições com erro. Apesar de existir um deslocamento entre elas, pode-se dizer que possuem uma inclinação semelhante. Portanto, mantém-se a relação estabelecida para ajuste dos parâmetros:

$$M_3 = 0,429 * j \quad (5.2)$$

É importante destacar os resultados apresentados na Figura 5-5(b). Essa figura mostra que, mesmo com a inserção de erro do tipo ruído, os valores de Z_{th} são muito próximos dos valores de Z_{th} analítica, apresentando uma diferença menor que 0,1% para os valores de M_3 definido em função de j na Figura 5-5(a). Esse fato mostra que a Metodologia 3 tem uma excelente capacidade de amortecimento da impedância, mesmo para janelas de dados pequena.

5.3.3. Avaliação da Proposta para a Metodologia 4

A Figura 5-6 mostra a tendência de variação dos valores Z_{th} para a Metodologia 4 em função de M_4 e de j . Para obtenção dessas curvas foram utilizados os mesmos procedimentos descritos no item 4.6 do Capítulo 4.

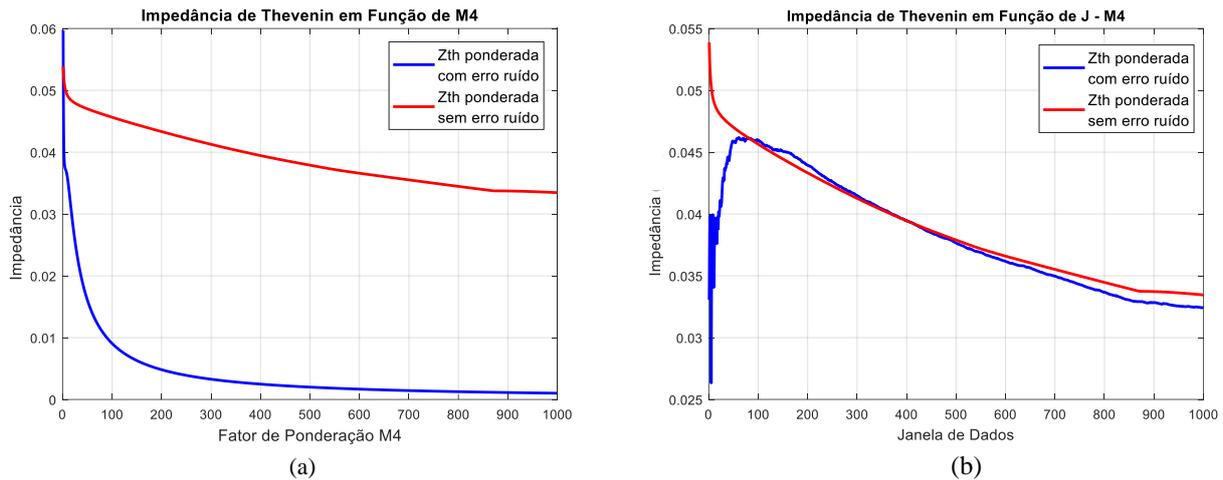


Figura 5-6 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 4 em função de M_4 e de j .

Nota-se que, para medições com erro do tipo ruído, a tendência da curva em função da ponderação apresentada na Figura 5-6(a) é diferente da tendência para medições sem erro. A curva em vermelho, que representa as medições sem erro, apresenta uma queda menos acentuada para fatores de ponderação menores que 100, comparada à curva em azul, que representa a tendência das medições com erro. Para as medições com erro, os valores de Z_{th} afastam-se mais rapidamente daqueles de referência, assumindo valores próximos de zero para fatores de ponderação maiores que 200. As análises realizadas indicaram que, quanto maior o desvio padrão do erro, maior será a distância de Z_{th} da Z_{th} analítica.

A Figura 5-6(b) indica que, para janelas de dados menores que 100, também há uma diferença na tendência das curvas para medições com erro do tipo ruído (em azul), e medições sem erro (em vermelho). Esse comportamento é análogo para outros valores de desvio padrão do erro inserido. A tendência dos valores da impedância é aumentar até uma janela de dados igual a 100, e depois diminuir, acompanhando a curva de tendência obtida para medições sem erro. Quanto maior o desvio padrão do erro, maior é o crescimento da impedância ponderada para janelas de dados menores que 100. Isso mostra que a Metodologia 4, assim com a Metodologia 2, possui uma capacidade de amortecimento baixa para janelas de dados menores que 100.

A Figura 5-7 mostra que, para medições com erro do tipo ruído, os valores de M_4 que favorecem a convergência de Z_{th} para valores mais próximos da Z_{th} analítica são menores que 1,5 para janelas de dados entre 2 e 250. A diferença entre esses valores de Z_{th} e Z_{th} analítica são menores que 3%.

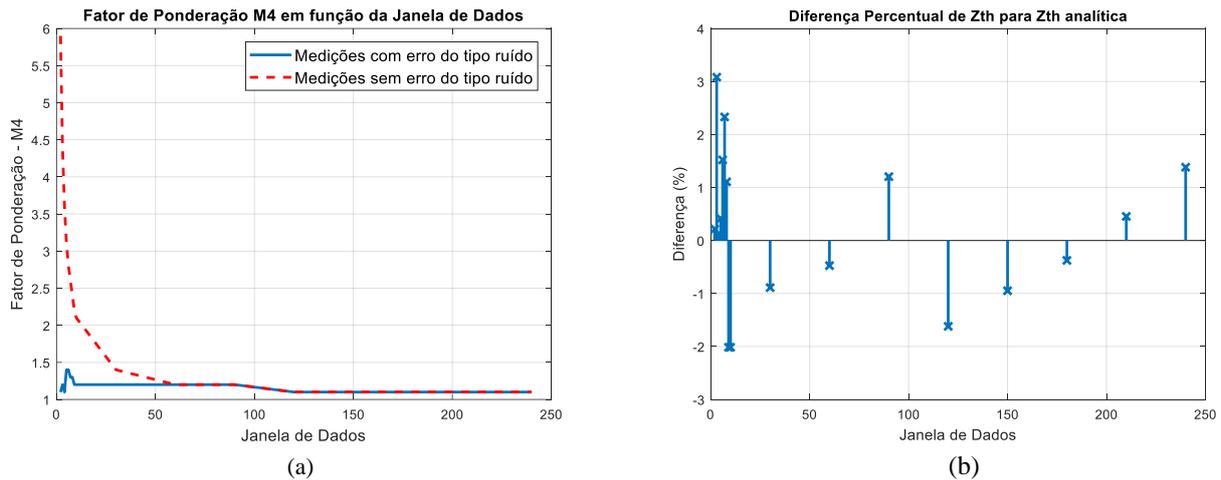


Figura 5-7 Tendência de variação de Z_{th} na Metodologia 4 em função de M_4 e de j .

Diante dessas análises, sugere-se manter o ajuste de M_4 para valores entre 1 e 2 e trabalhar com janelas de dados maiores que 100, quando as medições forem contaminadas por erros do tipo ruído, com elevados desvios padrão.

5.4. Considerações Finais

A proposta apresentada neste capítulo, para ajuste dos parâmetros das metodologias estudadas, visa ao aprimoramento na aplicação das mesmas. Os resultados apresentados quando esta é adotada se mostram bastante positivos.

As sugestões apresentadas se fundamentam na identificação da existência ou não de uma correlação entre a impedância do equivalente e os parâmetros que compõem as formulações das metodologias: fator de ponderação e dimensão da janela de dados.

Das três metodologias estudadas pode-se dizer que a Metodologia 2 é a mais limitada em relação ao ajuste de parâmetros. Essa metodologia apresenta resultados mais próximos da Z_{th} analítica para janelas de dados pequenas e fator de ponderação limitado entre 1 e 2.

A Metodologia 4 também apresenta limitação em relação aos fatores de ponderação que admitem menores diferenças entre Z_{th} da Z_{th} analítica. Adicionalmente, apresenta resultados mais variáveis para valores de Z_{th} , quando a janela de dados é menor que 100. Essa variação foi observada comparando os resultados analisados com e sem a presença de erros do tipo ruído. Contudo, em geral, para janelas de dados superiores a 100 e fator de ponderação menor que 2, os valores das impedências Z_{th} ficam próximos de Z_{th} analítica.

A Metodologia 3 apresentou-se a de maior aplicabilidade, em relação ao ajuste de parâmetros. Foi possível identificar uma correlação bem definida entre M_3 e j . A partir dessa correlação foi proposto um ajuste de parâmetros, a fim de garantir uma resposta de Z_{th} próxima aos valores de referência, para janelas de dados maiores que 5. A análise

com a presença de erros do tipo ruído mostra que a proposta de ajuste também apresenta bons resultados, quando se consideram as incertezas de medição.

A motivação, para investigar as metodologias de cálculo de equivalentes utilizando ambiente de estudos, decorreu do fato dos dados provenientes de medições nem sempre permitirem a exploração destas em sua totalidade. Entretanto, em tal ambiente, a análise é realizada até o PMC.

Durante a elaboração desta dissertação, sugiu a oportunidade de aplicar as metodologias estudadas utilizando medições reais coletadas em barramento do SIN, em condições operativas antes, durante e depois do ponto crítico. Isto permitiu ver a necessidade de se adaptarem as metodologias, originando a proposta apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 6

Proposta de Adaptação das Metodologias para Aplicação em Tempo Real

6.1. Considerações Iniciais

As metodologias estudadas neste trabalho têm sido aplicadas na análise de barramentos do SIN, utilizando dados de medições fasoriais reais. Contudo, os barramentos monitorados até o momento não apresentaram operação crítica, com relação à instabilidade de tensão.

A aplicação das metodologias utilizando os dados de medição recentemente adquiridos apresentou resultados consistentes. Entretanto, percebeu-se a necessidade de complementação das mesmas, para possibilitar o monitoramento do SEP, após a ocorrência de instabilidade.

Nesta direção vem este capítulo, que tem como objetivo propor uma adaptação das metodologias estudadas, visando ajustá-las à aplicação na operação em tempo real, quando da ocorrência de instabilidade de tensão.

Adicionalmente, nos estudos realizados neste capítulo, foram adotadas as propostas apresentadas no Capítulo 5, visando validar sua aplicação.

6.2. Sistema Elétrico Analisado

A partir de contatos da equipe de pesquisa do LRC/UFMG com o Operador Nacional do Sistema Elétrico, ONS, foram obtidos dados de medições de uma subestação (SE) pertencente à Rede Básica do SIN. Os dados são do barramento da SE Rurópolis de tensão nominal 230 kV, pertencente ao sistema de transmissão de energia denominado Tramo Oeste, responsável pelo atendimento das cargas na região oeste do estado do Pará. As medições referem-se a um período em que foram identificadas ocorrências de desligamentos de carga na região, como descrito em [ONS, 2013].

As análises realizadas com os dados da SE Rurópolis confirmam a aplicabilidade das metodologias de cálculo de equivalentes de rede para análise de estabilidade de tensão. Também mostraram que a proposta de ajuste de parâmetros apresentada neste trabalho é consistente.

A proposta de adaptação consiste, basicamente, na inclusão de um *reset* no cálculo dos equivalentes nos casos em que foram registradas ocorrências no sistema. Esta necessidade decorre do fato das impedâncias calculadas pelos equivalentes trazerem o histórico das impedâncias anteriores.

Quando o SEP volta ao normal, é importante que as impedâncias reflitam imediatamente esta condição. Sem a inclusão do *reset*, as impedâncias demorariam a convergir para a situação de operação normal, até desaparecem do seu histórico as medições correspondentes à situação de instabilidade.

A configuração do sistema elétrico na região e no período estudado consiste de um circuito em 230 kV, com 662 km de extensão, partindo da UHE Tucuruí, passando pelas subestações de Altamira e Transamazônica, chegando até a SE 230 kV de Rurópolis. O barramento possui três ramos incidentes, sendo dois transformadores (T1 e T2) e uma linha de transmissão (LT). A Figura 6-1 ilustra o diagrama esquemático desse barramento.

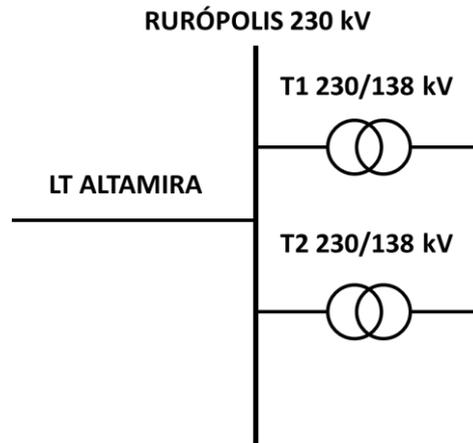


Figura 6-1 Diagrama esquemático do barramento de Rurópolis.

Os dados de medição fornecidos pelo ONS referentes ao barramento Rurópolis são de módulo de tensão no barramento, e potências ativa e reativa nos ramos incidentes. Utilizando as equações (3.3) e (3.4) foram calculados os fasores de tensão e corrente a partir desses dados.

A taxa de amostragem das medições é de uma medição por minuto. O período das medições analisadas no presente trabalho é de 24 horas, perfazendo 1440 amostras.

6.3. Aplicação da Metodologia Utilizando Dados de Medições Reais

Para ilustrar a aplicação das metodologias, utilizando as medições do barramento de Rurópolis, são apresentadas as curvas dos módulos das impedâncias de Thèvenin, Z_{th} , e da carga, Z_c . Quando esses valores se igualam, pelo Teorema da Máxima Transferência de Potência, sabe-se que o sistema atinge o PMC, ou seja, é atingida a condição crítica de instabilidade de tensão.

Como a taxa de amostragem é de uma medição por minuto, escolheu-se utilizar uma janela de dados igual a 20, para o cálculo e ponderação dos equivalentes de redes, valor este escolhido com base na variação da carga. Com j igual a 20, de acordo com a proposta de ajuste de parâmetros apresentada no Capítulo 5, os valores dos fatores de ponderação selecionados são: $M_2 = 1$, $M_3 = 9$ e $M_4 = 2$.

A Figura 6-2 mostra as curvas dos módulos das impedâncias da carga e de Thèvenin. A janela de aceleração é igual a 5, e o número de amostras com aceleração é igual a 300.

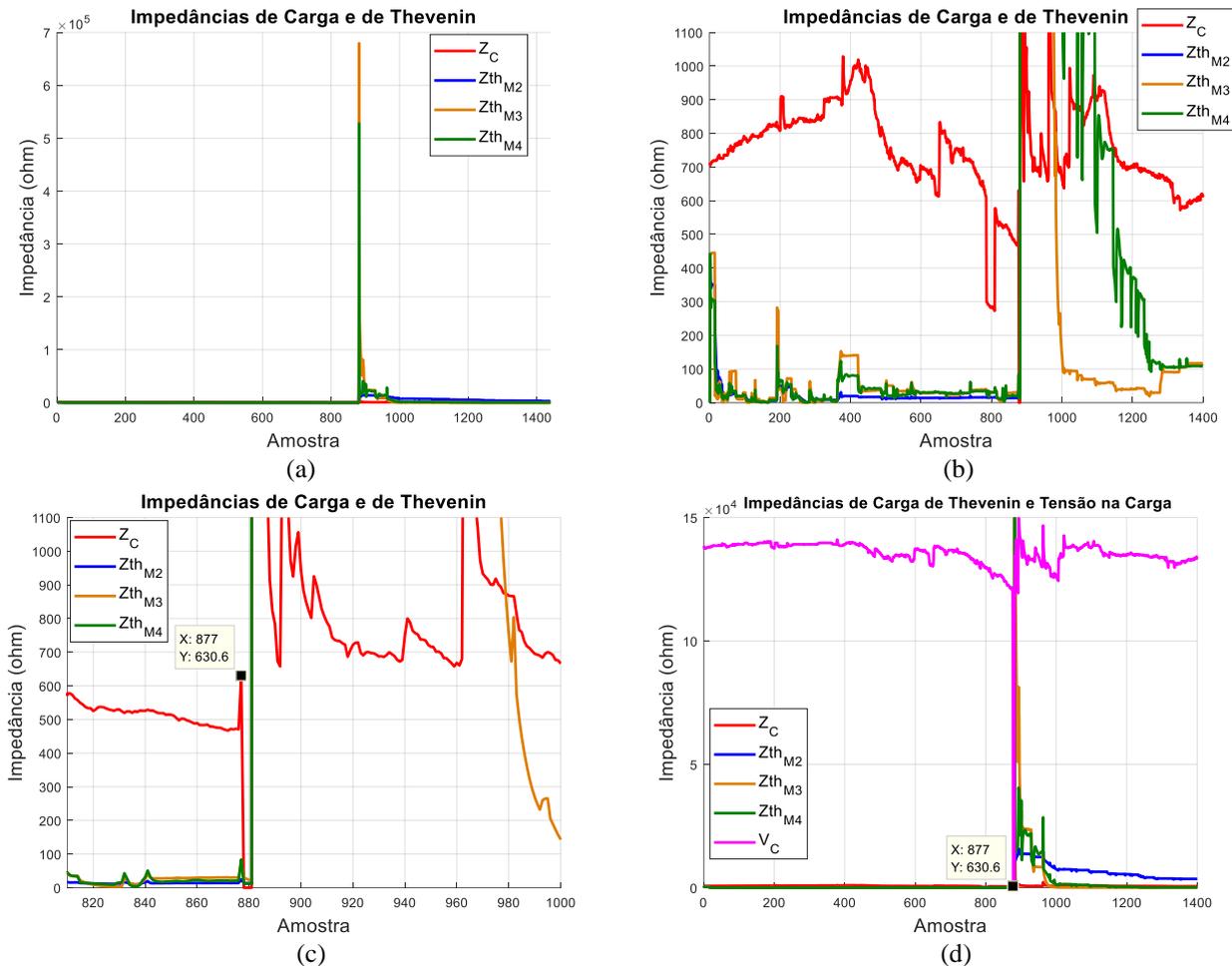


Figura 6-2 Módulos das impedâncias da carga e de Thèvenin.

A Figura 6-2 (a) apresenta uma visão geral do comportamento das curvas dos módulos das impedâncias da carga e de Thèvenin ponderadas pelas Metodologias 2, 3 e 4. Como os resultados são similares para CM1 e CM2 optou-se por apresentar aqui apenas os resultados de CM1. Como a escala da Figura 6-2 (a) não favorece a análise do comportamento das impedâncias, a Figura 6-2 (b) mostra de forma mais detalhada esse comportamento durante todo período de amostragem estudado.

Pela figura, pode-se notar que a curva da impedância da carga apresenta variações moderadas, na maior parte do período de análise, com variações bruscas em alguns momentos. Entre as amostras 877 e 878 há uma queda acentuada, destacada na Figura 6-2 (c), quando Z_c encontra Z_{th} , e torna-se menor que ela, indicando, portanto, a ocorrência de instabilidade de tensão.

É importante destacar que a queda acentuada da impedância da carga ocorre no mesmo instante em que há a queda da tensão, como mostrado na Figura 6-2 (d), o que indica uma consistência dos resultados obtidos.

Nota-se que, após a ocorrência de instabilidade, o valor de Z_{th} continua maior que o valor de Z_c por muitas horas, indicando que o sistema estaria operando na região instável da curva PV. Isso ocorre porque quando há alguma ocorrência no sistema, os

valores de tensão e corrente podem ser muito altos ou muito baixos, até mesmo nulos. Para as metodologias de cálculo utilizadas, o impacto de medições com ordem de grandeza completamente diferente das típicas influencia negativamente o resultado dos cálculos, apresentando valores que não condizem com a realidade. Diante desse fato é proposta a seguir uma adaptação nas metodologias a fim de viabilizar sua utilização na operação em tempo real de um sistema elétrico de potência.

6.4. Proposta de Adaptação das Metodologias – *Reset*

Analisando os resultados dos estudos dos dados de medição da SE Rurópolis, verificou-se que, após a interseção das curvas de Z_c e de Z_{th} , as amostras calculadas posteriormente carregam uma forte influência dos dados de medição durante a instabilidade de tensão.

Esse problema ocorre porque as equações são recursivas, e cada Z_{th} calculada carrega informações das Z_{th} calculadas nos instantes anteriores. As medições logo após uma ocorrência no SEP não são adequadas para o cálculo do equivalente da rede, pois fornecem valores muito alterados, uma vez que o sistema não está operando adequadamente.

Diante desse problema, propõe-se que seja feito um *reset* no cálculo do equivalente, logo após a interseção entre as curvas das impedâncias. Assim, garante-se que o cálculo da Z_{th} ponderada comece novamente, eliminando o histórico de medições com valores muito alterados.

Com a aplicação do *reset*, é importante utilizar uma janela de aceleração, pois é, de fato, um recomeço nos cálculos. A utilização de uma janela de dados menor pode favorecer a convergência mais rápida para valores esperados, mesmo que esses valores sejam pouco amortecidos. A quantidade de amostras com aceleração deve ser definida em função da taxa de amostragem dos dados de medição utilizados. Deve-se escolher um valor proporcional ao tempo necessário para a impedância ponderada convergir para valores próximos ao esperado. Para aplicações em tempo real não é possível calcular a Z_{th} analítica do sistema, mas o valor de Z_{th} é praticamente constante, em condição normal de operação. Assim, é possível saber qual o valor esperado para Z_{th} .

Mesmo com a utilização do *reset* e da nova janela de aceleração, os valores da Z_{th} ponderada podem demorar a se aproximarem do valor esperado. Isso porque as medições de algumas grandezas do sistema ainda podem apresentar alguma alteração devido à ocorrência sofrida. Essas alterações podem gerar falsos alarmes de proximidade do ponto de operação à MST. Também deve-se considerar que em tempo real as análises devem ser dinâmicas, principalmente quando o sistema não está operando em condição normal. Para melhorar os resultados e garantir maior agilidade nas análises sugere-se alterar, para os cálculos realizados dentro da janela de aceleração, os valores dos fatores de ponderação, de forma a dar maior peso para a medição atual.

Baseando-se nas análises apresentadas nos Capítulos 4 e 5, os fatores de ponderação devem ser alterados da seguinte maneira:

- **Metodologia 2:** O valor de M_2 pode ser mantido entre 1 e 2.
- **Metodologia 3:** O valor de M_3 deve ser elevado, pois dessa forma garante-se que o peso da última impedância será mais influente que as dos instantes anteriores. Podem ser utilizados valores em torno de 90, quando a curva de tendência apresentada na Figura 4-8 já não apresenta grandes variações para o aumento de M_3 . Aqui é importante destacar que a utilização de valores muito elevados não garante melhores resultados e que há um limite máximo para o valor de M_3 devido à capacidade de cálculo do MATLAB®. Isso porque a função exponencial tende a infinito com o aumento do expoente.
- **Metodologia 4:** O valor de M_4 deve ser baixo, podendo-se até utilizar M_4 igual a 1, pois assim serão consideradas apenas as amostras atuais e, nesse caso, o resultado será igual ao dos mínimos quadrados puros, sem ponderação.

Após a janela de aceleração, os parâmetros devem assumir os valores escolhidos antes da ocorrência. Esses valores são selecionados de acordo com as características do sistema elétrico analisado, da taxa de amostragem dos dados de medições e a proposta de ajuste apresentada no Capítulo 5.

A Figura 6-3 apresenta os resultados da aplicação das metodologias antes e depois da utilização do *reset*, para os dados de medições da SE Rurópolis. Os parâmetros utilizados inicialmente são os mesmos do item 6.4. Para o *reset* utilizou-se janela de aceleração, *ja*, igual a 2, 50 amostras com aceleração, e M_2 , M_3 e M_4 iguais a 1.

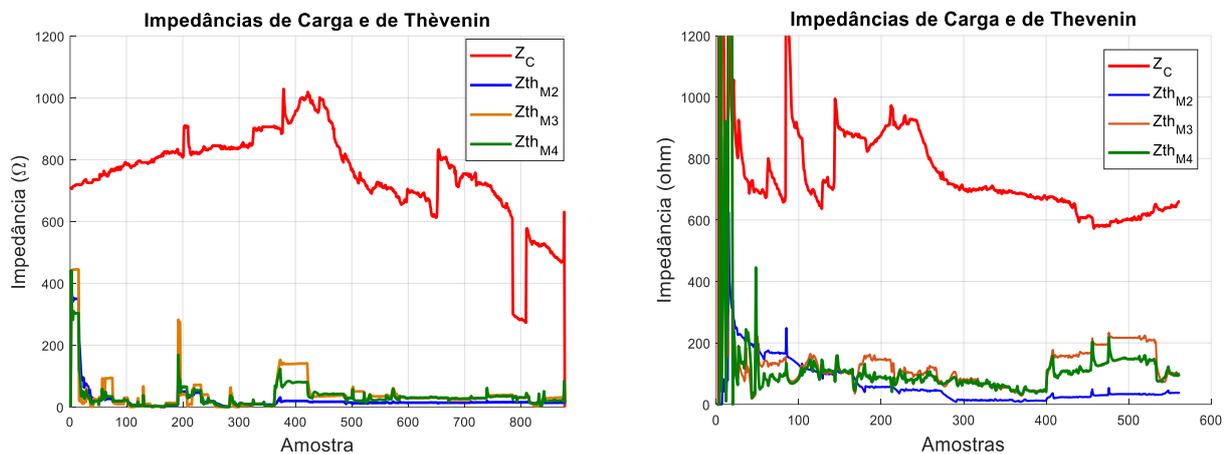


Figura 6-3 Módulos das impedâncias da carga e de Thévenin antes (a) e depois do *reset* (b).

Analisando a Figura 6-3, nota-se que a aplicação do *reset*, após a interseção das curvas de Z_c e de Z_{th} , atinge o objetivo proposto de forma satisfatória. Como os dados de medição são discretos, na maioria dos casos não é possível identificar o ponto exato em que ocorre a interseção. Pode-se identificar um ponto antes e um ponto depois desta.

Por esse motivo o *reset* deve ser aplicado no segundo ponto pós a interseção, evitando que se percam informações importantes sobre o comportamento do sistema.

Em alguns casos, mesmo após um primeiro *reset*, há mais interseções entre as impedâncias. Portanto, faz-se necessário o *reset* todas as vezes que ocorrer uma interseção.

6.5. Considerações Finais

Os resultados dos estudos apresentados neste capítulo são muito relevantes no contexto do monitoramento da segurança dos sistemas elétricos. A oportunidade de utilizar dados de medições reais, coletadas em um barramento do SIN sob condições normais e em situação crítica de estabilidade de tensão, possibilitou compreender várias questões: a consistência das metodologias, quando aplicadas na avaliação das margens de estabilidade; a necessidade de se efetuar um *reset* nas mesmas, após a ocorrência de situação de instabilidade; a consistência da proposta de ajuste de parâmetros apresentada no Capítulo 4 deste trabalho.

A natureza recursiva das metodologias de cálculo de equivalentes, vital para determinar Z_{th} de forma consistente para o monitoramento do SEP durante a operação normal, mostrou-se inadequada para a condição posterior à situação de instabilidade. Esta questão foi tratada com a aplicação de um *reset* após a interseção das curvas das impedâncias da carga e de Thévenin.

Quanto à utilização dos resultados das análises apresentadas no Capítulo 4, nos estudos da SE Rurópolis, foram propostos ajustes dos parâmetros. O objetivo foi garantir que o resultado das metodologias fosse condizente com o comportamento do sistema elétrico e produzisse uma resposta em tempo hábil, viável para a realidade de operação em tempo real. As análises destacaram a Metodologia 3, que apresentou bons resultados para um maior número de valores de parâmetros diferentes. Pode-se concluir que essa metodologia é a mais ampla no sentido de permitir o ajuste de parâmetros, e de responder a esse ajuste de forma mais satisfatória.

Do exposto neste capítulo, fica evidenciada a importância de se utilizarem dados de medições reais para validação de metodologias de análise de estabilidade de tensão. Muitos cenários que ocorrem na operação em tempo real SEP nem sempre são observados em casos simulados em programas de fluxo de potência.

Capítulo 7

Conclusões e Propostas de Continuidade

A pesquisa realizada nesta dissertação, acerca do tema Estabilidade de Tensão, se insere no contexto de desenvolvimentos que vêm sendo implementados pela equipe do LRC/UFG. De forma mais específica, o trabalho investiga Metodologias para Cálculo de Equivalentes de Rede projetadas para aplicações em tempo real.

Conforme discutido no texto, a construção de equivalentes, a partir de medições de grandezas coletadas no sistema elétrico, não é uma tarefa trivial. Várias abordagens apresentadas na literatura, como aplicáveis em tempo real, não se viabilizam, por desconsiderarem a presença de erros nos dados medidos e a dinâmica do próprio SEP.

A disponibilidade de dados provenientes de medição coletadas em barramentos do SIN permitiu à equipe o desenvolvimento de metodologias que incluem técnicas que buscam filtrar as incertezas de medição e consideram o comportamento variável do sistema.

Apesar de toda a evolução das metodologias, a criação do ambiente computacional SimC-Monitor trouxe uma nova perspectiva às pesquisas, pois possibilita o estudo de cenários operativos diversos, de forma ágil e bastante completa. Os estudos passaram a contar, não apenas com dados provenientes de medição, mas também com dados gerados a partir de simulações.

A possibilidade da geração de estados operativos de forma controlada permite a análise das metodologias sob as mais diversas situações, inclusive críticas. Adicionalmente, a definição de uma Impedância Analítica [Silva, 2017], que servisse de referência para aquelas calculadas pelos equivalentes, incentivou a análise das metodologias sob este aspecto. A referência [Andrade, 2017] registra as primeiras pesquisas realizadas neste contexto.

A presente dissertação aprofunda as investigações sobre o equacionamento matemático das metodologias, identificando com maior clareza seus pontos fortes e, também, fragilidades. Tais investigações levaram a uma das contribuições do trabalho, a *Proposta de Ajuste dos Parâmetros das Metodologias*, para que estas possam gerar impedâncias equivalentes mais próximas do valor analítico de referência.

Contribuição também bastante significativa da dissertação é a *Proposta de Adaptação das Metodologias para Aplicação em Tempo Real*. Tal proposta indica a realização de um *reset* nas metodologias para cálculo de equivalentes, após a ocorrência do encontro das impedâncias de Thévenin e da carga, no PMC. Esta proposta, ainda que simples, mostra-se fundamental para que o equivalente represente o comportamento do sistema de forma consistente com sua operação em tempo real.

Como propostas de continuidade do trabalho, sugere-se a evolução do equacionamento da Metodologia 3, tendo em vista a correlação linear entre o fator de ponderação e a janela de dados. Os resultados da análise de sensibilidade das metodologias levam a pensar em novas propostas que considerem o potencial de cada

uma delas. A disponibilidade de dados de medição que registram estados operativos antes, durante e após a ocorrência da instabilidade de tensão incentiva a exploração de novos cenários.

Espera-se que os resultados da pesquisa desenvolvida no mestrado contribuam de forma efetiva para o avanço do monitoramento da segurança do sistema elétrico, no que diz respeito à estabilidade de tensão.

Referências Bibliográficas

- [Aguirre, 2007] L.A. Aguirre, *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, Editora UFMG, 2007.
- [Andrade, 2014] M. M. S. Andrade, *Uso de Medições Fasoriais Sincronizadas na Determinação de Equivalentes para Avaliação da Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2014.
- [Andrade, 2018] P. R. A. Andrade, *Metodologias para Avaliação da Estabilidade de Tensão – Análise do Comportamento dos Equivalentes de Redes Elétricas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2018
- [Cardoso, 1999] M. R. Cardoso, *Ferramentas Computacionais Aplicadas ao Controle de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 1999.
- [Cemig, 2010] CEMIG, LRC, CONCERT, Desenvolvimento de Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, Projeto P&D GT 354 – CEMIG ANEEL, 2010.
- [Chow, 1991] CHOW, J. H.; CHEUNG, K. W. Power System Toolbox Webpage, 1991. Disponível em:
<http://www.eps.ee.kth.se/personal/vanfretti/pst/Power_System_Toolbox_Webpage/PST.html>. Acesso em: 20 dez. 2017.
- [Condega, 2013] S. Y. C. Condega, *Metodologia para Determinação da Margem de Estabilidade de Tensão sob a Perspectiva da Expansão e da Operação de Sistemas de Potência*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2013.
- [Cortez, 2001] A. N. Cortez, *Critérios e Procedimentos para Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2001.
- [Haque, 1995] M. H. Haque, *A Fast Method for Determining the Voltage Stability Limit of a Power System*, Electric Power Systems Research, vol. 32, pp. 35-43, 1995.
- [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 (N. Y.), December 1995. 300p.
- [Kundur, 1994] P. Kundur, *Power System Stability and Control, Electrical Engineering Series - EPRI Editors, Mc Graw-Hill*, 1994.

- [Leal, 2013] O.E.S Leal, *Metodologia para Indicação da Margem de Estabilidade de Tensão em Centros de Operação de Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2013.
- [Lobato, 1998] M. V. C. Lobato, *Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Estudo do Fenômeno e de Métodos Para Análise Estática*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 1998.
- [Mariano Jr., 2008] L. Mariano Jr., *Procedimento para Avaliação do Impacto da Compensação Reativa Shunt Capacitiva na Estabilidade de Tensão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2008.
- [ONS, 2013] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), *Definição de Limites de Estabilidade de Tensão para o Tramo Oeste*. Relatório ONS RE 3/130/2013, Rio de Janeiro, 2013.
- [ONS, 2016a] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Submódulo 23.3 – *Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*, Data da Vigência: 01/01/2017.
- [ONS, 2016b] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Submódulo 2.8 – *Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica*, Data da Vigência: 01/01/2017.
- [Ribeiro, 2011] G.L. Ribeiro, *O Uso de Equivalentes de Redes na Análise da Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2011.
- [Roquette, 2016] R. C. S Roquette, *Aplicação de Equivalentes de Redes na Avaliação da Estabilidade de Tensão de Sistemas de Baixa Tensão - Estudo de Caso Real com Inserção de Geração Distribuída*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2016
- [Silva, 2010] R.G.F. Silva, *Aplicação dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada na Avaliação da Estabilidade de Tensão*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2010.
- [Silva, 2015] F. S. Silva, *Influência da Incertezas de Medição no Cálculo de Equivalentes de Redes Aplicados nos Estudos de Estabilidade de Tensão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2015.
- [Silva, 2017] F. D. Silva, M. H. M. Vale, C. E. de Souza, L. C. Nunes, *Equivalentes de Redes para Análises da Estabilidade de Tensão – Abordagem Comparativa*. CLAGTEE, Argentina, Novembro de 2017.
- [Silva, 2018] F. D. Silva, *Equivalente Analítico de Redes Elétricas – Determinação e Parâmetros de Referência para Avaliação de*

- [Sousa, 2018] *Estabilidade de Tensão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte, 2018.
- [Sousa, 2018] C. E. Sousa, *Índices de Estabilidade de Tensão - Uma Análise Comparativa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2018
- [Vale Visacro, 2014] S. Vale Visacro, *Implementação de uma Ferramenta para Análise de Risco de Instabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos*. Projeto Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação, UFMG, Belo Horizonte, 2014.
- [Vale, 1986] M. H. M Vale, *Centros Modernos de Supervisão e Controle de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986.
- [Vilela, 2014] A.O. R. Vilela, *Margem de Estabilidade de Tensão no Planejamento dos Sistemas Elétricos - Análise do Impacto do Despacho da Geração*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2014
- [Vu, 1999] K.T. Vu, M.M. Begovic, D. Novosel, M.M. Saha, *Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin*. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 3, pp. 1029-1035, Agosto de 1999.

Anexo

Sistema IEEE 14 Barras (IEEE-14)

Para viabilizar o estudo das metodologias e a comparação com os valores de impedâncias calculados analiticamente, foram utilizados dados de medições simuladas. O sistema utilizado para essas simulações foi o sistema IEEE 14. O diagrama unifilar do sistema é apresentado na Figura A-1. Este possui 14 barras e 20 ramos.

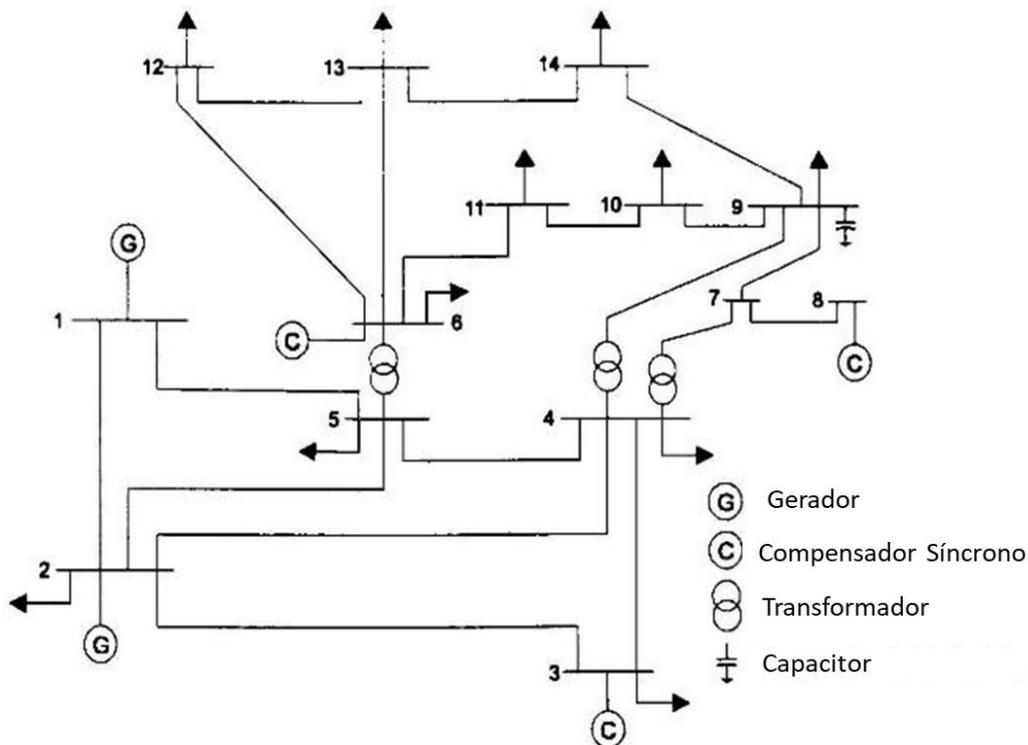


Figura A-1 Sistema IEEE 14 barras.
Fonte: Adaptada de [Cardoso, 1999]

Esse sistema representa uma parte da rede da companhia *American Electric Power* – AEP, nos Estados Unidos. Embora os dados apresentados sejam da configuração de fevereiro de 1962, é considerado como referência para diversos estudos e provas de conceito na literatura técnica, inclusive para estudos relacionados à Estabilidade de Tensão.

Os dados do sistema IEEE 14 barras são apresentados na Tabela A-1 e na Tabela A-2.

Onde: $Mod(V)$ é o módulo da tensão, $Ang(V)$ é o ângulo da tensão, P_g é a potência ativa do gerador, Q_g é a potência reativa do gerador, P_c é a potência ativa da carga, Q_c é a potência reativa da carga, G é a condutância e B a susceptância, R é a resistência e X a reatância. O tipo pode ser 1 para barras PV, 2 para barras PQ e 3 para a *slack*.

Tabela A-1 Dados das barras do sistema IEEE 14 barras estudado

Número da Barra	Mod(V)	Ang(V)	P_a	Q_a	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 IEEE 14 barras estudado

DE	PARA	R	X	B	TAPE	Deslocamento da 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