

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 766

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE EQUIVALENTE DE REDE PARA
MONITORAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS
DE POTÊNCIA EM TEMPO REAL**

Ósis Eduardo Silva Leal

DATA DA DEFESA: 01/02/2013

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE EQUIVALENTE DE REDE
PARA MONITORAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO DOS
SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA EM TEMPO REAL**

Ósis Eduardo Silva Leal

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

Fevereiro de 2013

**"Metodologia Para Cálculo de Equivalente de Rede Para
Monitoração da Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos
de Potência Em Tempo Real"**

Ósis Eduardo Silva Leal

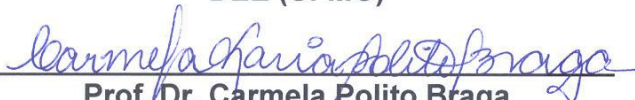
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 01 de fevereiro de 2013.

Por:



**Prof. Dr. Maria Helena Murta Vale
DEE (UFMG)**



**Prof. Dr. Carmela Polito Braga
DELT (UFMG)**



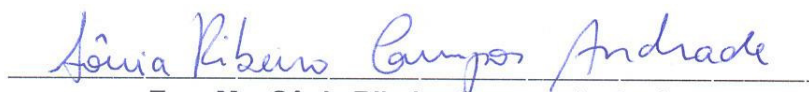
**Dr. Fabrício Silveira Chaves
LRC (UFMG)**

**“Metodologia para Cálculo de Equivalente de Rede para
Monitoração da Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos
de Potência em Tempo Real”**

Ósis Eduardo Silva Leal

Dissertação de Mestrado apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais em 01 de fevereiro de 2013.

Convidada Especial:



**Eng. Ms. Sônia Ribeiro Campos Andrade
(CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais)**

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por sempre iluminar meu caminho para que obras como esta possam sempre se concretizar em minha vida.

Aos meus pais, Rita e Marilson, pela força e incentivo dedicados durante toda a minha vida.

À minha esposa Cristiane e minha filha Cecília, pela paciência, força e compreensão dedicadas a mim.

Aos meus irmãos Renato, Lays e Arlem, por lembrar-me do valor da família.

A todos os meus amigos, por todo apoio dedicado durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de pesquisa, Alyson e Sandro, pelo apoio e pelas profundas discussões “épicas” durante a realização deste trabalho.

A todos os professores do PPGEE/LRC/UFMG e ao professor Fabrício que muito me ensinaram nos diversos encontros por salas e corredores do LRC.

À engenheira Sônia, da Cemig, que, por meio do projeto de pesquisa e desenvolvimento por ela gerenciado, possibilitou a aplicação prática deste trabalho.

Em especial à minha orientadora, professora Maria Helena, cujos ensinamentos transcenderam, e muito, o escopo deste trabalho.



A Deus por compartilhar conosco a sabedoria e a vida!



Resumo

A presente dissertação propõe um método para cálculo de Equivalente de Rede para monitoração da Estabilidade de Tensão dos sistemas elétricos de potência em tempo real denominado **Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados**. Dentre as características inovadoras deste método, destaca-se que a formulação desenvolvida permite a utilização de dados provenientes dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada no cálculo dos parâmetros. O uso de equivalentes de rede é fundamental para a avaliação do risco de instabilidade de tensão em tempo real, pois permite que ações preventivas possam ser realizadas para se evitarem situações de operação críticas. O texto inclui o registro dos estudos realizados sobre equivalentes e das análises de diferentes formulações para obtenção dos parâmetros mais adequados. Adicionalmente, são apresentados os resultados práticos da aplicação do método proposto na avaliação da estabilidade de tensão de barramentos da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional.

Abstract

This master thesis proposes a method for calculating Networks Equivalent for monitoring power system Voltage Stability in real time operation called Least-Squares & Weighted Method. Among its innovative characteristics, it can be mentioned the specific formulation developed to consider data provided by the Synchronized Phasor Measurement Systems in order to calculate the parameters. The use of network equivalent is fundamental to evaluate the risk of voltage instability in real time as it allows preventive measures to be taken to avoid critical operative situations. The text includes the studies carried out regarding equivalent concepts and also the analysis of a sequence of different formulations investigated in order to obtain the most suitable parameters. Additionally, practical results are presented, concerning the application of the proposed method in the voltage stability monitoring of buses of the Brazilian Interconnected National System.

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Estabilidade de Tensão – <i>Conceitos Básicos e Contextualização do Trabalho</i>	4
2.1. Considerações Iniciais	4
2.2. Conceitos Básicos Sobre Estabilidade de Tensão	5
2.3. Sistema de Medição Fasorial Sincronizada – Componentes Básicos	10
2.4. Desenvolvimentos Anteriores – Contextualização da Pesquisa	11
2.5. Considerações Finais	13
3. Equivalente de Thévenin – <i>Estudos Complementares</i>	15
3.1. Considerações Iniciais	15
3.2. Revisão Bibliográfica Sobre o Uso de Equivalentes em Tempo Real.....	16
3.3. Descrição do Equivalente – Método de Identificação dos Parâmetros	19
3.4. Definição da Carga	21
3.5. Análises de Sensibilidade do Equivalente.....	22
3.5.1. Caso Teste 1	23
3.5.2. Caso Teste 2.....	31
3.5.3. Caso Teste 3.....	35
3.6. Observações e Conclusões Sobre a Análise de Sensibilidade	40
3.7. Aplicação do Equivalente Usando Dados Provenientes de Medições.....	42
3.8. Seleção do Método para Estimação dos Parâmetros de Thévenin na Presença de Ruídos nas Medições	49
3.9. Considerações Finais	50
4. Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados – <i>Proposta de Equivalente para Aplicação em Tempo Real</i>	52
4.1. Considerações Iniciais	52
4.2. Aproximação Polinomial das Medições – APM	53
4.3. Aproximação Polinomial da Impedância – APZ	54
4.4. Equivalente Ponderado – E&P	55
4.4.1. Obtenção da Equação Peso 1.....	56
4.4.2. Obtenção da Equação Peso 2.....	64
4.5. Mínimos Quadrados e Ponderados – MQ&P ₀	68
4.6. MQ&P ₀ com Correção no Ângulo da Impedância Equivalente – MQ&P ₁	69
4.7. MQ&P ₁ com Correção no Módulo da Tensão Equivalente – MQ&P ₂	72
4.8. Equivalente para Aplicação em Tempo Real – Algoritmo Proposto – Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados	72
4.9. Considerações Finais	74

5.	Aplicação do Método Proposto em Sistemas Elétricos Reais	75
5.1.	Considerações Iniciais	75
5.2.	Subestação Montes Claros 2 – MCLAR2.....	76
5.3.	Medição Subestação Tucuruí	79
5.4.	Medição Subestação Altamira	82
5.5.	Considerações Finais	85
6.	Conclusões e Propostas de Continuidade	86
	Referências Bibliográficas	88
	Anexo A – Descrição dos Estimadores de Mínimos Quadrados	91
A.1	Estimador de Mínimos Quadrados.....	91
A.2	Estimador Estendido de Mínimos Quadrados	92
A.3	Estimador de Mínimos Quadrados Totais	92

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Sistema de duas barras.	5
Figura 2.2 – Evolução das relações $P_c/P_{m\acute{a}x}$, V/E e I_2/I_{cc}	7
Figura 2.3 – Evolução de $P/P_{m\acute{a}x}$ para diferentes cargas.	8
Figura 2.4 – Curva PV.	9
Figura 2.5 – Sistema de medição fasorial sincronizada.	10
Figura 2.6 – Fluxograma da metodologia apresentada em [Silva, 2010].	12
Figura 3.1 – Sistema equivalente com duas barras – B1 e Bk.	19
Figura 3.2 – Fluxo de potência da barra k.	22
Figura 3.3 – Evolução da Eth_{EM} e da Eth para o caso 1.1.	24
Figura 3.4 – Evolução da Zth_{EM} , da Zth e da Z_c para o caso 1.1.	24
Figura 3.5 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.1.	25
Figura 3.6 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.1.	25
Figura 3.7 – Tensões no plano complexo para os casos 1.1 e 1.2.	26
Figura 3.8 – Tensões no plano complexo para o caso 1.2.	27
Figura 3.9 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.2.	27
Figura 3.10 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.2.	28
Figura 3.11 – Impedâncias no plano RX com representação da circunferência.	28
Figura 3.12 – Evolução da Eth_{EM} e da Eth para o caso 1.3.	29
Figura 3.13 – Evolução da Zth_{EM} , da Zth e da Z_c para o caso 1.3.	30
Figura 3.14 – Tensões no plano complexo para o caso 1.3.	30
Figura 3.15 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.3.	31
Figura 3.16 – Tensões no plano complexo para o caso 2.1.	32
Figura 3.17 – Impedâncias no plano RX para o caso 2.1.	32
Figura 3.18 – Tensões no plano complexo para o caso 2.2.	33
Figura 3.19 – Impedâncias no plano RX para o caso 2.2.	33
Figura 3.20 – Tensões no plano complexo para o caso 2.3.	34
Figura 3.21 – Impedâncias no plano RX para o caso 2.3.	35
Figura 3.22 – Evolução da Eth_{EM} e da Eth para o caso 3.1.	36
Figura 3.23 – Tensões no plano complexo para o caso 3.1.	36
Figura 3.24 – Evolução da Zth_{EM} , da Zth e da Z_c para o caso 3.1.	37
Figura 3.25 – Impedâncias no plano RX para o caso 3.1.	37
Figura 3.26 – Evolução da Eth_{EM} e da Eth para o caso 3.2.	38
Figura 3.27 – Tensões no plano complexo para o caso 3.2.	38
Figura 3.28 – Evolução da Zth_{EM} , da Zth e da Z_c para o caso 3.2.	39

Figura 3.29 – Impedâncias no plano RX para o caso 3.2.....	39
Figura 3.30 – Circuito equivalente de Thévenin.	40
Figura 3.31 – Z_c e $Z_{th_{EM}}$ na forma vetorial.	40
Figura 3.32 – Diagrama unifilar da barra da MCLAR2.....	42
Figura 3.33 – Evolução da tensão e da corrente em cada ramo da barra.	43
Figura 3.34 – Evolução da $E_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no tempo.	43
Figura 3.35 – Evolução da $E_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no tempo.	44
Figura 3.36 – $E_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no plano complexo.	45
Figura 3.37 – $E_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no plano complexo.	45
Figura 3.38 – $E_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no plano complexo.	46
Figura 3.39 – Evolução da $Z_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no tempo.	47
Figura 3.40 – Evolução da $Z_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no tempo.	47
Figura 3.41 – $Z_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no plano RX.....	48
Figura 3.42 – $Z_{th_{EM}}$ para M1 e M2 no plano RX.....	48
Figura 3.43 – Evolução de Z_{th} para MQ, EMQ e MQT no tempo.....	50
Figura 4.1 – Fluxograma para metodologia APM.	53
Figura 4.2 – Fluxograma para metodologia APZ.....	55
Figura 4.3 – Fluxograma para metodologia E&P.....	55
Figura 4.4 – Resposta da equação (4.7) com a evolução de “ x ” para $g = 2$	57
Figura 4.5 – Resposta da equação (4.8) com a evolução de “ x ” para $g = 2$	58
Figura 4.6 – Resposta da equação (4.8) para diferentes valores de “ g ”.....	58
Figura 4.7 – Aplicação do MQ&P ₀ para diferentes valores de “ g ”.	59
Figura 4.8 – Aplicação do MQ&P ₀ para diferentes valores de “ g ”.	60
Figura 4.9 – Histograma da variação de corrente.	60
Figura 4.10 – Histograma da variação de tensão.....	61
Figura 4.11 – Evolução do peso 1º equação 3D.	62
Figura 4.12 – Evolução da resposta de $p_m(t)$ em 2D.....	63
Figura 4.13 – Divisão em quadrantes de dv/di	65
Figura 4.14 – Evolução da resposta de p em 3D.	66
Figura 4.15 – Evolução da resposta de p em 2D.	66
Figura 4.16 – Evolução da resposta de p com limites em 3D.....	68
Figura 4.17 – Fluxograma para metodologia MQ&P ₀	68
Figura 4.18 – Regiões de operação do SEP.	70
Figura 4.19 – Outras regiões de operação do SEP.....	71
Figura 4.20 – Evolução $Z_{th_{MQ\&P_{ceq1}}}$ versus $Z_{th_{MQ\&P_{ceq2}}}$ no tempo.	73
Figura 4.21 – Fluxograma da metodologia PIT com MQ&P ₂	74

Figura 5.1 – Diagrama unifilar das subestações de Altamira e Tucuruí.....	75
Figura 5.2 – Evolução da $Zth_{MQ\&P}$ para M1 no tempo.	76
Figura 5.3 – Evolução da tensão e da corrente em cada ramo da barra.	77
Figura 5.4 – Evolução da $Eth_{MQ\&P}$ para M1 no tempo.	77
Figura 5.5 – Evolução da $Zth_{MQ\&P}$ para M2 no tempo.	78
Figura 5.6 – Evolução da $Eth_{MQ\&P}$ para M2 no tempo.	79
Figura 5.7 – Tensão medida na barra de Tucuruí.	80
Figura 5.8 – Corrente equivalente de carga em Tucuruí.	81
Figura 5.9 – Evolução de $Zth_{MQ\&P}$ para Tucuruí.....	81
Figura 5.10 – Evolução de $Eth_{MQ\&P}$ para Tucuruí.....	82
Figura 5.11 – Tensão medida na barra de Altamira.	83
Figura 5.12 – Corrente equivalente de carga em Altamira.	83
Figura 5.13 – Evolução de $Zth_{MQ\&P}$ para Altamira.....	84
Figura 5.14 – Evolução de $Eth_{MQ\&P}$ para Altamira.....	85

1 ■ Introdução

A energia elétrica há muito deixou de ser um complemento para a melhoria das condições de vida, para ser um item primordial à vida no planeta. Na indústria tem-se a energia elétrica como um insumo de produção e não mais um “artigo” de custo fixo comum. Portanto, o crescimento socioeconômico mundial torna-se intimamente ligado à capacidade de gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica com qualidade, eficiência e principalmente de maneira sustentável.

Neste contexto, encontram-se os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) responsáveis por gerar, transmitir e distribuir a energia para os seus consumidores. Para tal, vários são os setores responsáveis por planejar, operar e proteger o SEP com o intuito de mantê-lo realizando suas funções de maneira a não violar as diversas restrições a ele impostas.

No Brasil o setor elétrico é constituído por agentes, órgão normativo, órgão fiscalizador e órgão operador. Os agentes são responsáveis por gerir seus equipamentos (linhas de transmissão, usinas elétricas, transformadores, dentre outros) mantendo-os disponíveis para utilização; os órgãos normativos possuem como função a elaboração de normas para regular o setor; os órgãos fiscalizadores fiscalizam os agentes no que concerne o cumprimento das normas estabelecidas; o órgão operador é responsável por elaborar instruções operativas para manter o SEP operando.

A atividade de Operação é dividida em três fases principais: a primeira é o planejamento da operação onde são elaborados os planos operativos, por meio de diversos estudos baseados em simulações; a segunda é a operação em tempo real, cuja função é supervisionar e controlar o SEP seguindo as instruções operativas preparadas no planejamento; a terceira é a pós-operação que analisa os distúrbios e ocorrências registradas na operação, a fim de verificar sua causa e identificar ações para se evitarem situações indesejadas.

Um dos principais objetivos da operação do SEP é atuar de forma preventiva, visando evitar situações críticas que possam resultar a perda parcial ou total da sua integridade ou mesmo da qualidade do fornecimento de energia elétrica. Para tal, a execução das ações de controle realizadas em tempo real requer o conhecimento do comportamento dinâmico do sistema elétrico e dos fenômenos aos quais este pode estar submetido.

Dentre os vários fenômenos que podem ocorrer no SEP, destaca-se o da perda da Estabilidade de Tensão, devendo ser evitado, pois suas consequências podem ser muito graves para o sistema.

Esta dissertação se insere nas atividades relacionadas à operação, mais especificamente à etapa de Operação em Tempo Real. Seu objetivo básico é

contribuir para o controle preventivo para se evitarem situações de Instabilidade de Tensão.

Várias são as definições apresentadas na literatura relacionadas à Estabilidade de Tensão ou Instabilidade de Tensão do sistema elétrico. No capítulo 2 desta dissertação são tratados conceitos básicos e definições relacionadas ao tema. Neste capítulo introdutório, visando dar início às colocações do trabalho, vale citar uma definição muito adotada no setor para a Instabilidade de Tensão definida pelo [IEEE, 1990]: “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”.

Esta definição mostra o impacto negativo para o SEP caso haja a perda de estabilidade de tensão, reforçando a necessidade de se atuar preventivamente.

Atualmente, uma tecnologia que tem sido explorada para melhorar a monitoração dos sistemas elétricos é a de medição fasorial. Os chamados Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) permitem a medição dos fasores de tensão e de corrente, de forma sincronizada, em grandes áreas do SEP.

Os temas *estabilidade de tensão e sistemas de medição fasorial sincronizada* têm sido objeto de intensa pesquisa por parte da equipe do LRC¹/PPGEE/UFMG já há algum tempo, como comprovam as dissertações já defendidas [Lobato, 1998], [Cortez, 2001], [Andrade, 2008], [Júnior, 2008], [Silva, 2010], [Ribeiro, 2011] e os inúmeros artigos publicados, os quais são citados ao longo do texto, quando necessário.

Dentre os temas investigados, de especial interesse tem sido o desenvolvimento de uma metodologia, para identificação em tempo real do risco de instabilidade de tensão, tendo como entrada de dados os fasores obtidos dos SMFS.

Na avaliação da estabilidade em tempo real, as análises com base em cálculos de fluxo de potência se tornam inviáveis e parte-se para o uso de equivalentes de redes calculados a partir das medições fasoriais.

O uso de equivalentes de rede para determinação do ponto crítico de estabilidade não é recente. Entretanto, raras são as publicações relacionadas à construção destes em tempo real. Conforme discutido ao longo deste trabalho, tal carência se deve à necessidade de serem tratadas questões próprias do ambiente de tempo real, tais como o tratamento dos erros presentes nas medições e, principalmente, à dinâmica do comportamento do SEP, nem sempre fácil de ser modelada. A construção de equivalentes com base nos dados fasoriais representa, então, desafio, mostrando-se crucial para implementações na operação.

Do exposto acima, dando continuidade às pesquisas realizadas no LRC/PPGEE, pode-se caracterizar o **objetivo** desta dissertação como sendo: *desenvolver uma metodologia para construir equivalentes de rede a partir de medições fasoriais, para*

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

fins de avaliar o comportamento do SEP, em tempo real, quanto aos riscos de perda de estabilidade de tensão.

Tal meta configurou grande desafio, exigindo a realização de diversas etapas. Dentre elas destacam-se os estudos aprofundados sobre os equivalentes, a análise de diferentes formulações para identificação das ponderações mais adequadas com respeito ao teste de consistência das propostas intermediárias que se apresentavam e a realização de inúmeros testes considerando medições obtidas de barramentos da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional (SIN). As investigações levaram ao desenvolvimento de um método inovador denominado **Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados**, aqui proposto.

Para cumprir seu objetivo, esta dissertação está estruturada em 6 capítulos da seguinte maneira:

- No Capítulo 1 é feita uma introdução do assunto tratado, além da identificação do objetivo do trabalho.
- No Capítulo 2 são lembrados conceitos relevantes sobre os temas Estabilidade de Tensão e Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada e é feita a contextualização da dissertação nas pesquisas que vêm sendo realizadas no LRC.
- O Capítulo 3 apresenta uma revisão das metodologias desenvolvidas a respeito da utilização dos equivalentes de rede em tempo real. Também é apresentado um estudo aprofundado sobre o comportamento do equivalente utilizado nas pesquisas.
- O Capítulo 4 descreve as metodologias desenvolvidas ao longo deste mestrado com suas fundamentações teóricas, e apresenta o método dos Mínimos Quadrados & Ponderados.
- No Capítulo 5 o método é aplicado utilizando medições provenientes de barramentos do SIN, comprovando a consistência de seus resultados.
- O Capítulo 6 expõem as conclusões e propostas de continuidade deste trabalho.

Finalizando o texto, encontram-se as referências bibliográficas utilizadas e um anexo denominado Descrição dos Estimadores de Mínimos Quadrados.

2. Estabilidade de Tensão – *Conceitos Básicos e Contextualização do Trabalho*

2.1. Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo abordar os principais conceitos relacionados aos temas *estabilidade de tensão e sistemas de medição fasorial sincronizada*, facilitando o entendimento do fenômeno e a identificação do cenário no qual se inserem os estudos desta dissertação, no contexto das pesquisas que vêm sendo desenvolvidas pela equipe do LRC/UFMG.

As investigações realizadas neste trabalho se baseiam na abordagem estática do fenômeno. Esta abordagem é fundamentada na teoria de fluxo de potência, onde as principais variáveis utilizadas são as potências injetadas e as tensões nos barramentos.

A análise estática relaciona o fenômeno à capacidade da rede elétrica em entregar potência à carga por ela alimentada. Nesta análise, o Ponto de Máxima Transferência de Potência (**MTP**) é considerado o ponto de perda de estabilidade, para cargas do tipo potência constante. Sendo assim, o SEP deve operar a uma distância mínima deste ponto, a fim de se manter a segurança na operação. Esta distância é conhecida no setor elétrico como Margem de Segurança de Tensão (**MST**). Os fundamentos básicos da modelagem estática estão descritos em diversos livros que tratam sobre o tema, tais como [Kundur, 1994], [Cutsem, 1998].

A análise do MTP e da MST pode ser realizada por meio das curvas do tipo PV. Nestas curvas, é visualizado o comportamento do módulo da tensão de uma barra do sistema em função da potência ativa entregue à carga a ela conectada. Conforme mostrado no próximo item, na PV o ponto crítico de MTP fica evidenciado, permitindo a identificação da margem de estabilidade.

A construção das curvas PV requer uma sequência de soluções de cálculos de fluxos de potência, exigindo, assim, todas as informações necessárias à execução deste tipo de ferramenta. Para utilização nas etapas de estudos, há programas computacionais que constroem as curvas PV para os diferentes cenários analisados [Anarede, 2012] e [PowerWorld, 2012].

Entretanto, durante a operação em tempo real do SEP, este tipo de construção se torna inviável. Diante disto, surgem abordagens que, utilizando valores de medições disponíveis em tempo real, procuram modelar a rede por meio de equivalentes,

eliminando a necessidade da modelagem completa da rede exigida pela ferramenta de cálculo de fluxo de potência.

Nestas abordagens, o equivalente da rede é calculado para a(s) barra(s) de interesse. O MTP é determinado para o circuito equivalente, a construção explícita da curva PV é dispensada e, com cálculos mais simplificados, é indicada a relação entre o ponto de operação e o MTP de maneira rápida, viabilizando seu uso em tempo real. As pesquisas realizadas no LRC/UFGM têm possibilitado muitos avanços nesta direção, conforme mostrado nos próximos itens, onde fica evidenciada a contribuição desta dissertação.

2.2. Conceitos Básicos Sobre Estabilidade de Tensão

Conforme já salientado, tratando-se de Estabilidade de Tensão, é importante descrever a relação entre o fenômeno e o ponto de MTP, fazendo-se necessária a recordação do teorema de máxima transferência de potência. Para isto, considera-se o sistema de duas barras (B1 e B2) ilustrado na Figura 2.1 composto por uma fonte ideal, onde a tensão (\dot{E}) é a referência angular do sistema, \bar{Z}_L é a impedância da linha² que interliga as barras B1 e B2, \bar{Z}_c , \dot{I}_2 e \dot{V}_2 são respectivamente a impedância da carga, a corrente de carga e a tensão na barra B2.

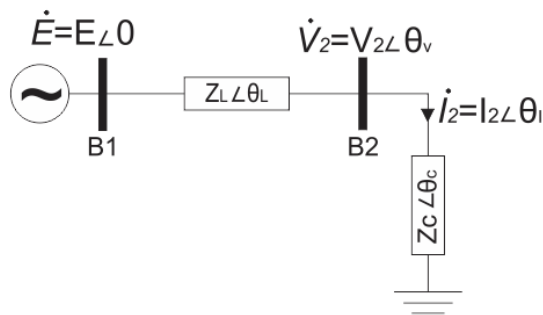


Figura 2.1 – Sistema de duas barras.

Para se obter I_2 é utilizada a equação (2.1) e seu módulo como (2.2).

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_c} \quad (2.1)$$

$$I_2 = \frac{E}{\sqrt{Z_L^2 + Z_c^2 + 2Z_L Z_c (\cos(\theta_L - \theta_c))}} \quad (2.2)$$

Como a corrente de curto-circuito franco na barra B2 (I_{cc}) é calculada pela equação (2.3), para se calcular I_2 em função de I_{cc} , isola-se E em (2.3), substituindo na equação (2.2), após algumas manipulações obtém-se a equação (2.4).

² Nesta dissertação são adotados os sobrescritos \cdot e $\bar{\cdot}$, para representar, respectivamente, fasores e números complexos. Para o módulo das grandezas é adotado o nome da variável sem sobrescrito.

$$I_{cc} = \frac{E}{Z_L} \quad (2.3)$$

$$I_2 = \frac{I_{cc}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L}\right)^2 + \frac{2Z_c}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c)}} \quad (2.4)$$

Considerando a equação (2.5), para se calcular a potência ativa na carga, substituindo (2.4) em (2.5) chega-se à equação (2.6).

$$P_c = Z_c(I_2)^2 \cos(\theta_c) \quad (2.5)$$

$$P_c = \frac{I_{cc}^2 \cos(\theta_c)}{\frac{1}{Z_c} + \frac{Z_c}{Z_L^2} + \frac{2}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c)} \quad (2.6)$$

Realizando a derivada de P_c em relação a Z_c tem-se a equação (2.7).

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = \frac{0 \left[\frac{1}{Z_c} + \frac{Z_c}{Z_L^2} + \frac{2}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c) \right] - I_{cc}^2 \cos(\theta_c) \left[-\frac{1}{Z_c^2} + \frac{1}{Z_L^2} \right]}{\left[\frac{1}{Z_c} + \frac{Z_c}{Z_L^2} + \frac{2}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c) \right]^2}$$

$$\frac{dP_c}{dZ_c} = -I_{cc}^2 \cos(\theta_c) \frac{\left[\frac{Z_c^2}{Z_L^2} - 1 \right]}{\left[Z_c + \frac{Z_c^3}{Z_L^2} + \frac{2Z_c^2}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c) \right]} \quad (2.7)$$

Para se determinar o ponto de máximo desta função, faz-se $\frac{dP_c}{dZ_c} = 0$, ou seja, é encontrada a impedância de carga que corresponde ao MTP.

$$\frac{Z_c^2}{Z_L^2} - 1 = 0$$

$$Z_c = Z_L \quad (2.8)$$

A partir da equação (2.8), pode-se concluir que, quando o módulo da impedância da carga (Z_c) for igual ao módulo da impedância da linha (Z_L), para o sistema da Figura 2.1, tem-se a transferência máxima de potência da fonte para a carga.

Importantes relações entre potência, corrente e tensão, com base nos desenvolvimentos apresentados, podem ser encontradas, tais como $P_c/P_{m\acute{a}x}$, V/E e I_2/I_{cc} descritas nas respectivas equações (2.9), (2.10) e (2.11).

$$\frac{P_c}{P_{m\acute{a}x}} = \frac{\frac{2Z_c}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c)}{1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L}\right)^2 + \frac{2Z_c}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c)} \quad (2.9)$$

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{Z_c}{Z_L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L}\right)^2 + \frac{2Z_c}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c)}} \quad (2.10)$$

$$\frac{I_2}{I_{cc}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L}\right)^2 + \frac{2Z_c}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c)}} \quad (2.11)$$

Utilizando as equações (2.9), (2.10) e (2.11) e realizando um aumento da carga (diminuição de Z_c) na barra B2, mantendo seu fator de potência constante, obtêm-se curvas tais como aquelas presentes na Figura 2.2, retirada do exemplo apresentado em [Silva, 2010]. A análise destas curvas é tradicional nos estudos de estabilidade de tensão, sendo importante recordá-la, pois tratam de importantes conceitos relacionados à análise estática.

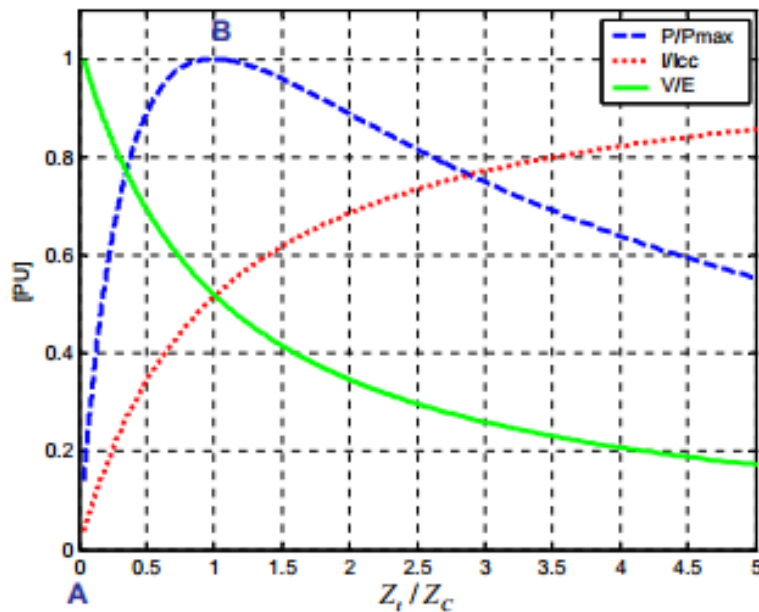


Figura 2.2 – Evolução das relações $P_c/P_{m\acute{a}x}$, V/E e I_2/I_{cc} .
Fonte: [Silva, 2010].

Analisando o comportamento das grandezas ilustradas na Figura 2.2, nota-se que, quando a relação entre os módulos das impedâncias da carga e da linha é igual a um, a curva que representa a relação de potência está em seu valor máximo (indicado por “B”), fato que confirma a equação (2.8). Verifica-se, também, que neste ponto as curvas de tensão e de corrente se cruzam.

Ainda analisando o comportamento da curva da potência ativa entregue à carga, podem ser consideradas duas situações: antes e depois do ponto de máximo. A

primeira, compreendida na região onde Z_L/Z_c se encontra entre 0 e 1, apresenta um aumento da potência com o aumento da relação das impedâncias; neste intervalo, as variações de tensão não superam as variações de corrente, justificando o aumento da potência com o decréscimo da tensão. Já na segunda região, onde Z_L/Z_c é superior a 1, a potência diminui com o aumento da relação das impedâncias; nesta região, as variações de tensão superam as variações de corrente, fazendo com que a potência entregue à carga diminua com o aumento da relação Z_L/Z_c .

Ao substituir (2.8) e (2.3) em (2.6) e após algumas manipulações encontra-se a equação (2.12) para potência máxima transferida ($P_{m\acute{a}x}$) conforme (2.12).

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{E^2 \cos(\theta_c)}{2Z_L[1 + \cos(\theta_L - \theta_c)]} \quad (2.12)$$

Pela equação (2.12) verifica-se que a potência máxima que o sistema pode transferir à carga é diretamente proporcional ao seu fator de potência (fator de potência da carga) e inversamente proporcional ao fator de potência da diferença entre os ângulos da carga e da linha. Assim, considerando uma linha predominantemente indutiva, situação normalmente encontrada nas redes de tensão elevada, comparando-se duas cargas de mesmo módulo, mas com fatores de potência diferentes (uma indutiva e outra capacitiva, por exemplo), $P_{m\acute{a}x}$ será menor na carga com fator de potência indutivo, conforme apresentado na Figura 2.3, retirada do exemplo mostrado em [Silva, 2010].

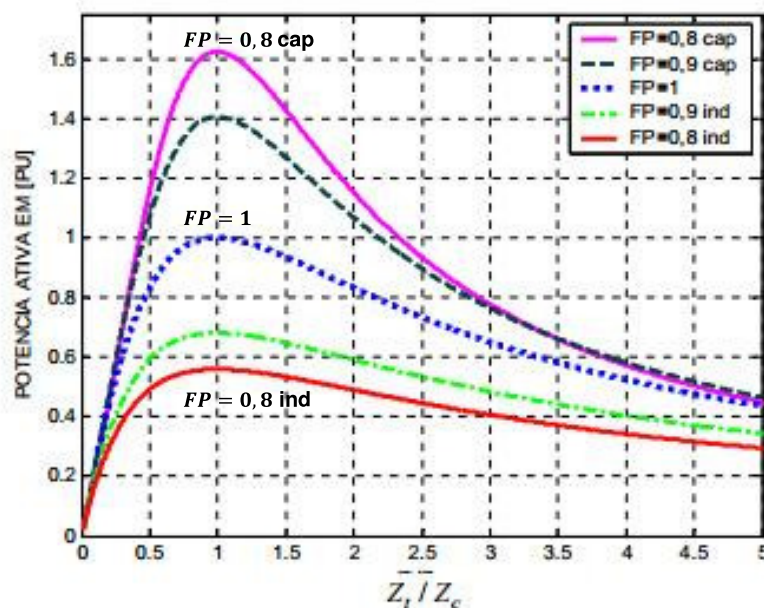


Figura 2.3 – Evolução de $P/P_{m\acute{a}x}$ para diferentes cargas.
Fonte: [Silva, 2010].

Observa-se que, na situação de linha com fator de potência capacitivo, caso incomum em sistemas elétricos reais, a afirmação anterior se inverte, ou seja, cargas com fator de potência indutivo terão $P_{m\acute{a}x}$ maior quando comparadas às cargas com fator de potência capacitivo. Tal fato se justifica na compensação existente no cálculo do fator de potência da diferença entre os ângulos das impedâncias envolvidas.

A referência [Silva, 2010] apresenta um conjunto de análises bastante detalhadas sobre o impacto das diferentes grandezas envolvidas na equação (2.11) no valor de $P_{m\acute{a}x}$.

Conforme já salientado, outra forma de visualizar o ponto de MTP é por meio da curva PV, onde, para as mesmas simulações realizadas anteriormente, traça-se a curva de potência em função da tensão na barra de carga. A Figura 2.4 ilustra a curva PV. Nesta curva, $P_{m\acute{a}x}$, maior valor de potência, corresponde ao ponto de MTP que, para cargas do tipo potência constante, corresponde ao ponto crítico de estabilidade de tensão.

Em [Cortez, 2001] é realizado estudo detalhado sobre o ponto de MTP, incluindo sua análise sob o ponto de vista da estabilidade estrutural, onde este configura um ponto de bifurcação sela-nó. Esta referência apresenta discussões interessantes sobre as simplificações e limitações da metodologia estática, analisando, por meio de curvas PV, como a parte superior ao ponto crítico caracteriza uma região estável e a inferior consiste em região instável.

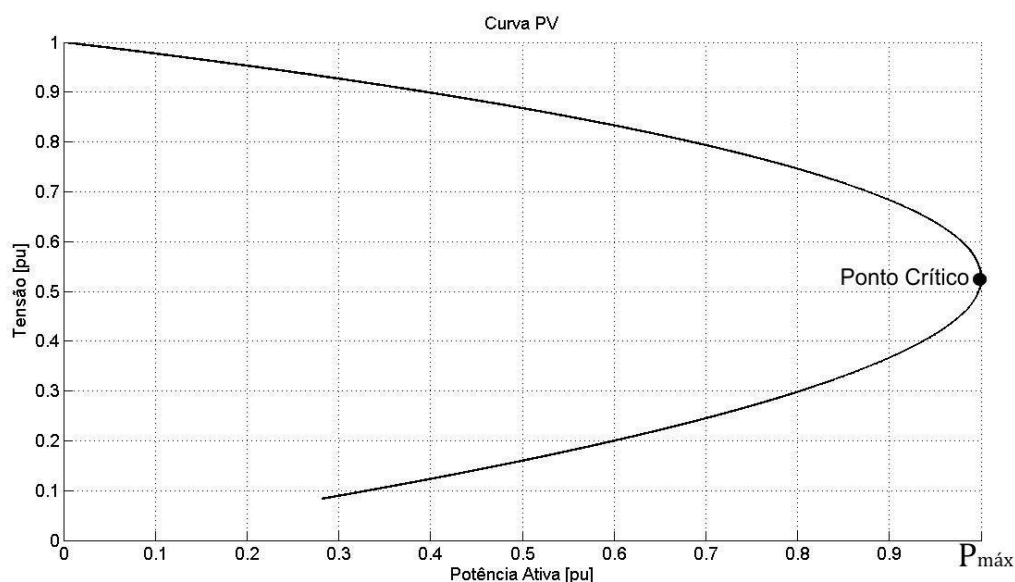


Figura 2.4 – Curva PV.

No contexto desta dissertação, a curva PV possui especial relevância, pois é exatamente o ponto crítico nela indicado (MTP) que irá representar o “perigo”, ou seja, o ponto de instabilidade de tensão.

Algumas definições apresentadas na literatura podem ser compreendidas analisando-se a curva PV. Por exemplo: segundo [Custem, 2000] “a instabilidade deriva da tentativa da dinâmica da carga em restaurar o consumo de energia para além da quantidade que pode ser fornecida pelo sistema de transmissão combinado com geração”. Outro exemplo é a definição adotada em [IEEE, 1990], onde a estabilidade de tensão corresponde à “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”.

Vale observar que a utilização de simulações de fluxo de potência por meio do Método de Newton-Raphson não permite a construção da curva PV até o ponto de MTP, pois neste ponto a matriz jacobiana torna-se singular. Mesmo antes da MTP, nas proximidades do ponto crítico, tal matriz já apresenta mau condicionamento. Para contornar este problema, é utilizado o método de fluxo de potência continuado. Os textos de [Lobato, 1998] e [Monticelli, 1983] são boas referências para o assunto.

No que diz respeito à operação em tempo real, conforme já salientado, a abordagem que tem sido proposta é o uso de equivalentes de redes de tal forma a permitir o estudo de grandes sistemas por meio do equacionamento descrito neste item para o sistema simples de duas barras ilustrado na Figura 2.1.

2.3. Sistema de Medição Fasorial Sincronizada – Componentes Básicos

Os SMFS são considerados uma das mais recentes tecnologias para se aumentar a confiabilidade da operação do SEP e, conseqüentemente, se obterem ganhos significativos em termos de melhor aproveitamento dos recursos já existentes e maior qualidade de energia fornecida. Tais sistemas possibilitam a medição dos chamados sincrofasores de tensão e de corrente, permitindo a monitoração do comportamento do SEP de forma mais exata.

Os principais componentes dos SMFS são as Unidades de Medições Fasoriais (*Phasor Measurement Unit* – PMU) e os Concentradores de Dados Fasoriais (*Phasor Data Concentrator* – PDC). As PMU são responsáveis por realizar as medições dos fasores de tensão e de corrente e enviá-los ao PDC. O sincronismo é realizado pelo sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* – GPS). Os PDC são responsáveis por coletar, processar, organizar, armazenar e disponibilizar os dados enviados pelas PMU aos diversos aplicativos conectados ao mesmo. As informações são trocadas entre os componentes por meio de *links* de conexão. Na Figura 2.5 tem-se ilustrado um SMFS.

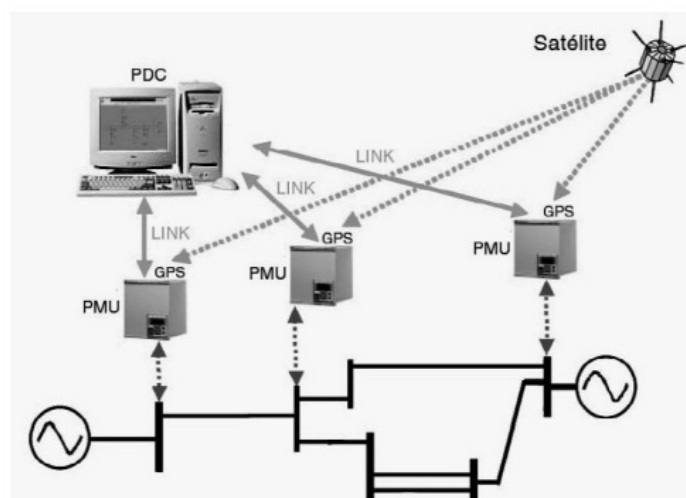


Figura 2.5 – Sistema de medição fasorial sincronizada.
Fonte: [Andrade 2008].

A literatura técnica sobre os SMFS é vasta. Referências interessantes que podem ser citadas são [Andrade, 2008], [IEEE, 2008] e [Phadke, 2008]. A dissertação [Andrade, 2008] trata das aplicações dos SMFS na operação dos sistemas elétricos, descrevendo aquelas desenvolvidas no Brasil e no Mundo. Já em [IEEE, 2008] é realizada uma detalhada revisão sobre os diversos aspectos dos SMFS, e em [Phadke, 2008] são detalhados seu funcionamento e aplicações ligadas ao tema.

2.4. Desenvolvimentos Anteriores – Contextualização da Pesquisa

A presente dissertação, conforme já citado, integra o conjunto de atividades de pesquisa que vêm sendo realizadas no LRC/PPGEE/UFMG nos temas *Estabilidade de Tensão e Aplicação de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada*.

Os primeiros trabalhos realizados sobre estabilidade de tensão resultaram na dissertação de mestrado [Lobato, 1998]. Esta referência, além de apresentar uma revisão bibliográfica sobre o assunto, trata do conhecimento básico do tema e sua contextualização no cenário matemático de instabilidade de tensão, e aborda as relações entre a instabilidade de tensão e o comportamento da carga e seus diversos modelos matemáticos. Ainda nesta referência, destaca-se o estudo realizado sobre as análises estáticas do problema.

Como continuidade das pesquisas tem-se o trabalho realizado por [Cortez, 2001] que vêm complementar o de Lobato, apresentando um estudo relacionado à instabilidade de tensão frente à dinâmica de diversos equipamentos do sistema, objetivando a identificação de critérios para avaliação do fenômeno. Sua investigação levou à proposta de uma margem de estabilidade de tensão, relacionada à potência do ponto de MTP, aplicada à etapa de planejamento da expansão do SEP.

Ainda no contexto das investigações sobre margem de estabilidade de tensão nos estudos de planejamento, porém com foco na tensão crítica do ponto de MTP, cita-se a dissertação [Júnior, 2008]. Na tese de doutorado [Chaves, 2007] é proposta uma metodologia otimizada para avaliação técnica do desempenho da compensação *shunt* capacitiva, aplicada nos estudos de expansão, visando evitar o risco de instabilidade de tensão que pode ser causado pelos capacitores em sistemas sobrecompensados.

As pesquisas sobre as aplicações dos SMFS na operação dos SEP conduziram à publicação da dissertação de mestrado [Andrade, 2008], que aborda os principais componentes dos sistemas fasoriais e suas características dentro do ambiente operativo. A referência descreve o cenário nacional e mundial sobre os SMFS e as diversas aplicações que podem ser introduzidas e/ou melhoradas com o advento dos mesmos.

Integrando as investigações relacionadas aos temas *estabilidade de tensão* e *SMFS*, foi desenvolvida a pesquisa apresentada na dissertação [Silva, 2010] que apresenta uma metodologia para avaliação da chamada margem de estabilidade de tensão (MET) utilizando dados fasoriais. O trabalho propõe um índice predictor de instabilidade, denominado Índice-PIT (Índice Predictor de Instabilidade de Tensão).

A Figura 2.6 mostra o fluxograma básico da metodologia proposta em [Silva, 2010] composta por quatro passos: no passo 1 é realizada a aquisição dos fasores de tensão e de corrente; no passo 2 é solucionado o equivalente de rede utilizando o método descrito em [Vu, 1999a]; no passo 3 é calculado o Índice-PIT; no passo 4 tem-se a apresentação dos resultados das grandezas relacionadas ao cálculo do índice, tais como a Potência de Máximo Carregamento, a Potência do Ponto de Operação etc.

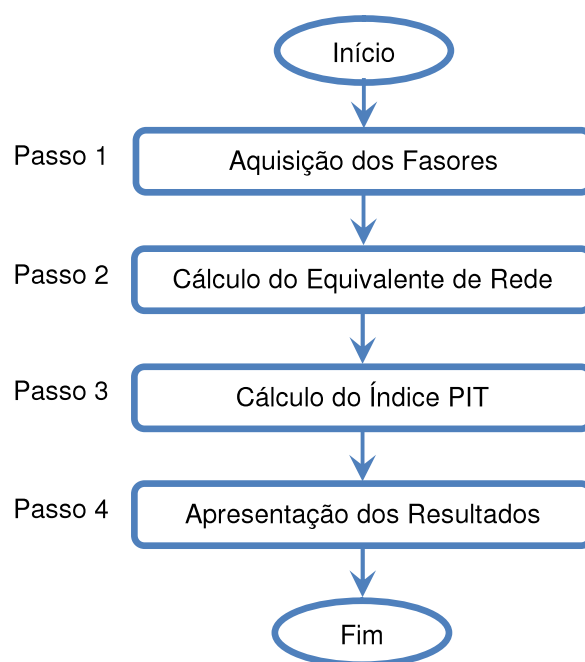


Figura 2.6 – Fluxograma da metodologia apresentada em [Silva, 2010].

Apesar dos desenvolvimentos para determinação do Índice-PIT terem sido elaborados visando a aplicação dos SMFS, as análises foram realizadas com dados simulados por meio de programas de fluxo de potência, tendo em vista a indisponibilidade de dados de medição fasorial até aquele momento.

Em [Silva, 2010], o equivalente é determinado para uma barra de carga com corrente bem especificada. Ampliando este conceito de carga, em 2011 é apresentada a dissertação [Ribeiro, 2011] que propõe metodologias para identificação da carga vista por barramentos que não possuem esta característica. As metodologias propostas visam a identificação de uma corrente equivalente de carga em barras que possuem vários ramos incidentes que variam entre carga e fonte devido ao sentido do fluxo de potência nos mesmos³. Dados simulados por meio de programas de fluxo de potência foram utilizados. Considerando os passos da metodologia, Figura 2.6, a pesquisa ampliou o passo 1, inserindo o cálculo da corrente equivalente de carga visto pela barra sob análise.

Em 2010 teve início um projeto de pesquisa fruto da parceria entre LRC/UFMG, CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e Concert Technologies denominado “Desenvolvimento de Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada” com a

³ Este tipo de barra é denominado na presente dissertação por “barra intermediária”.

finalidade de desenvolver um SMFS próprio da empresa [Cemig, 2010]. A participação dos pesquisadores do LRC seria a elaboração de uma metodologia para a monitoração do risco de intabilidade de tensão em tempo real. Tal projeto impulsionou a busca por dados alimentados por medições no SEP.

A aquisição dos primeiros dados provenientes de medição e sua aplicação no cálculo do equivalente da rede exigiram que novos estudos fossem realizados para incorporar as diferenças entre os ambientes simulado e de medições. Nesta direção, paralelamente às pesquisas elaboradas em [Ribeiro, 2011], teve início o trabalho apresentado em [Martins, 2012]. Este propõe e analisa o uso dos estimadores de estado, em especial os dos mínimos quadrados, na composição do equivalente, ampliando a formulação original de [Vu, 1999a] utilizada em [Silva, 2010]. Considerando os passos da metodologia, Figura 2.6, a pesquisa trouxe avanços para o passo 2.

Apesar do elevado nível da investigação realizada, os estudos iniciados por Martins mostraram que os resultados dos equivalentes considerando medições favoráveis se comportavam de forma muito diferente daqueles obtidos com os dados simulados, mesmo adotando técnicas de estimação. Sendo assim, o cálculo do equivalente tornou-se o ponto crucial para a aplicação da metodologia em tempo real e, conseqüentemente, para a determinação do Índice-PIT.

A constatação acima trouxe novos desafios para a pesquisa na área, constituindo a motivação inicial para o desenvolvimento da dissertação de mestrado aqui apresentada. Dando continuidade aos trabalhos anteriores, pode-se caracterizar de forma mais específica sua **contribuição**: *propor uma metodologia para cálculo do equivalente de rede, visto por uma barra do SEP, que permita a identificação em tempo real do risco de perda de estabilidade de tensão, não apenas utilizando dados simulados, mas usando medições favoráveis diretamente coletadas do sistema elétrico.*

Para cumprir tal objetivo, esta dissertação utiliza as metodologias para determinação da corrente de carga propostas em [Ribeiro, 2011], explora e amplia o uso de equivalentes sugerido em [Martins, 2012], e propõe um novo método, o **Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados**, apresentado em detalhes neste texto.

2.5. Considerações Finais

Objetivando o entendimento sobre as questões básicas relativas à estabilidade de tensão, conceitos relevantes são relembrados neste capítulo, principalmente aqueles relacionados à análise estática do fenômeno.

Para a monitoração da condição operativa do SEP em tempo real, o tempo de obtenção da resposta sobre o risco de instabilidade é fundamental, enfatizando o uso dos equivalentes de rede.

Com relação aos trabalhos relacionados ao uso de equivalentes nos estudos de estabilidade de tensão, é vasto o número de publicações. Entretanto, quando a aplicação requer a determinação do equivalente em tempo real, poucos apresentam resultados envolvendo medições do SEP. Dentre eles, conforme tratado no capítulo

seguinte, destacam-se os de [Vu, 1997], [Taranto, 2007] e [Su, 2009] que propõem metodologias para indicação da proximidade da ocorrência de instabilidade de tensão por meio de equivalentes.

Esta carência de trabalhos indica que, mesmo com a sólida teoria desenvolvida sobre o fenômeno, existe uma grande diferença entre os estudos utilizando dados simulados e aqueles envolvendo medições. A “transição” entre os dois “mundos” (simulado e real) representa uma tarefa não trivial, sendo dificultada principalmente devido à dinâmica do comportamento do SEP, dificilmente representada em simulações, e à presença de erros nos dados provenientes de medições.

Sendo assim, as etapas iniciais dos trabalhos desta dissertação foram dedicadas ao estudo detalhado sobre os equivalentes de redes, sob a perspectiva de sua construção e aplicação a partir de dados obtidos dos SMFS. Tais investigações estão registradas no Capítulo 3 que se segue.

Concluindo, vale comentar que, atualmente, o SMFS desenvolvido no projeto [Cemig, 2010] já se encontra em fase final de testes e é denominado *SISMEF*. Neste ambiente, a metodologia desenvolvida pelo LRC, incluindo os resultados da pesquisa desta dissertação, faz parte do chamado Módulo-PIT.

3. Equivalente de Thévenin – *Estudos Complementares*

3.1. Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo registrar a base de estudos realizados acerca dos equivalentes de redes, os quais deram suporte à proposta do Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados desenvolvido nesta dissertação.

Conforme discutido nos capítulos anteriores, as pesquisas realizadas indicaram a necessidade de uma maior investigação sobre a aplicação dos equivalentes, para que pudessem ser utilizados em tempo real, usando dados provenientes de medição. Este foi o ponto de partida dos estudos realizados neste trabalho e seus resultados foram fundamentais para a compreensão das inconsistências apresentadas pelos algoritmos tradicionais, quando aplicados em tempo real, e para a proposição de novas abordagens.

Para cumprir seu objetivo, o capítulo está estruturado em itens que incluem a descrição do equivalente de Thévenin apresentado em [Vu, 1999a], adotado na metodologia indicada no fluxograma da Figura 2.6 (passo 2), e uma revisão bibliográfica sobre o uso de equivalentes em tempo real. As metodologias propostas em [Ribeiro, 2011], para determinação da corrente de carga nas barras intermediárias, são lembradas, por terem sido adotadas nas simulações.

Após esta discussão inicial, o capítulo apresenta uma detalhada análise de sensibilidade do cálculo apresentado por Vu com respeito a variações sistêmicas (ocorridas no sistema elétrico que alimenta a carga) e a variações da própria carga, além de suas correlações com a tensão e a corrente. Tal análise se baseia na comparação entre os resultados obtidos pela formulação de Vu e o método tradicional de cálculo de Thévenin. Vários casos de estudos são registrados, incluindo a aplicação com dados obtidos de medição da subestação Montes Claros 2 da CEMIG.

As investigações mostram que a utilização de fasores medidos diretamente do SEP traz nova dimensão ao uso do equivalente de Thévenin para representar a rede elétrica em tempo real. Além da dinâmica das grandezas, verifica-se a presença de erros nos dados provenientes de medição. Os resultados apresentados em alguns casos se mostram inconsistentes, não podendo ser utilizados diretamente, denotando a necessidade de tratamento dos dados. Neste sentido, a utilização de estimadores de estado do tipo *mínimos quadrados* na composição do equivalente, como introduzido em [Martins, 2012], é também tratada neste capítulo.

3.2. Revisão Bibliográfica Sobre o Uso de Equivalentes em Tempo Real

A elaboração de uma das etapas iniciais do projeto de pesquisa [Gemig, 2010] envolveu a realização de uma pesquisa bibliográfica intensa sobre a monitoração do risco de instabilidade de tensão dos SEP em tempo real, em especial ao uso de indicadores baseados no cálculo de equivalentes. Esta pesquisa bibliográfica gerou o relatório [Relatório, 2012]. Verificou-se que é vasto o número de publicações que abordam o uso de equivalentes na identificação do MTP. Entretanto, poucas tratam de como se obter o equivalente em tempo real, com base em medições obtidas do próprio SEP. Quase sempre são utilizados cenários simulados por meio do uso de programas de fluxo de potência.

Neste item, a revisão se dá no contexto desta dissertação, com foco direto nos trabalhos direcionados para a determinação do equivalente a partir de medições fasoriais.

Com relação aos equivalentes, estes são utilizados em análise de circuitos desde 1883, com a publicação do teorema de M. Leon Thévenin, engenheiro francês de telégrafos. Conhecido como teorema de Thévenin onde é *“estabelecido que, um circuito linear de dois terminais pode ser substituído por um circuito equivalente constituído por uma fonte de tensão (\dot{V}_{th}) em série com uma impedância (\bar{Z}_{th}), onde \dot{V}_{th} é a tensão de circuito aberto nos terminais considerados e \bar{Z}_{th} é a impedância equivalente ou de entrada dos terminais quando as fontes independentes são desligadas”* [Alexander, 2003].

Em 1926, E. L. Norton, engenheiro americano da Bell Telephone Laboratories, propôs um teorema muito similar ao teorema de Thévenin onde é *“estabelecido que, um circuito linear de dois terminais pode ser substituído por um circuito equivalente constituído por uma fonte de corrente (\dot{I}_N) em paralelo com uma impedância (\bar{Z}_N) onde \dot{I}_N é a corrente de curto-circuito através dos terminais e \bar{Z}_N é a impedância de entrada ou equivalente aos terminais quando as fontes independentes são desligadas”* [Alexander, 2003].

Estes dois teoremas facilitam diversas análises de circuitos, tais como o cálculo de correntes de curto-circuito, a aplicação do teorema de MTP e a análise do comportamento da corrente e tensão em um ponto do circuito frente a variações de uma determinada carga e/ou dispositivo, proporcionando, então, grandes avanços nos estudos realizados no setor elétrico.

Como o teorema de MTP pode ser aplicado em circuitos simplificados, conforme apresentado no capítulo 2, com a utilização do teorema de Thévenin, esta análise passa a ser introduzida para qualquer circuito que possa ser representado por este equivalente.

Nesta direção, um dos primeiros trabalhos envolvendo operação em tempo real e equivalente de rede, foi publicado por Vu em 1997 [Vu, 1997]. Este descreve a filosofia de um algoritmo relacionado àqueles utilizados em relés de proteção. Segundo o autor é nestes dispositivos que se baseia seu método denominado Preditor de Instabilidade de Tensão (VIP - *Voltage Instability Prediction*). Ainda neste artigo são descritas formas de controle que, com a implantação do VIP, passam a utilizar, como parâmetro de controle, a proximidade de instabilidade de tensão.

Contudo, somente em 1999 a metodologia adotada foi detalhada em [Vu, 1999a], onde são descritas as principais premissas e o equacionamento matemático envolvido. O principal ponto da metodologia é a utilização de duas medições consecutivas para o cálculo do equivalente, identificando a distância do ponto de operação ao ponto de risco de instabilidade de tensão fundamentado no teorema de MTP.

Observa-se que nesta metodologia é considerado que, entre duas medições consecutivas, o sistema não sofreu variação. Isto possibilita a aplicação do teorema de Thévenin, tendo em vista que este supõe que o sistema deva possuir comportamento linear. Convém ressaltar que, embora este fato não seja observado em SEP reais, quando são coletadas medições com intervalo de tempo muito pequeno, esta premissa implica um cálculo com boa aproximação.

Com o advento dos sistemas de medições fasoriais sincronizados, onde as medições são coletadas em intervalos da ordem de 16,67 ms (considerando uma taxa de amostragem de 60 fasores por segundo), a premissa adotada por Vu torna-se factível.

A continuidade dos trabalhos do grupo formado pela equipe da ABB (*Asea Brown Boveri*) em conjunto com AEP (*America Electric Power*) traz em 1999, com a publicação do artigo [Vu, 1999b], os resultados obtidos com a aplicação do VIP em um sistema de 7000 barras utilizado pela AEP na fase de planejamento em três diferentes casos: sistema radial, sistema não radial e sistema em contingência. O procedimento adotado na simulação é baseado no cálculo de fluxos de potência com incremento de carga.

Posteriormente, o trabalho [Vu, 2000] acrescenta a seus testes anteriores a avaliação da eficácia do VIP em simulações que incluem a dinâmica dos sistemas de excitação e a dependência da tensão e frequência em relação à carga. Segundo os autores, foram aplicadas ao sistema diversas contingências até o mesmo dividir-se em duas ilhas. Além destas simulações são apresentados neste trabalho os primeiros resultados da aplicação do VIP em medições retiradas do sistema elétrico da AEP, para a avaliação da robustez do algoritmo. Porém, conforme relatado pelos autores, foram detectados ruídos nas medições, denotando a necessidade de novos testes.

Já nos trabalhos de Vu, é descrita a necessidade do uso do método de mínimos quadrados para melhorar a qualidade da resposta, mas não é feita nenhuma análise a respeito do número de medições a serem utilizadas. Vale observar que este número possui ligação direta com a sensibilidade do método às variações do SEP.

Apesar dos desenvolvimentos realizados por Vu apontarem para a necessidade de continuidade, sua proposta é muito utilizada em diversos trabalhos que possuem como

objetivo a apresentação de índices para identificação da distância do ponto de operação ao ponto crítico. O fator predominante que explica esta grande aceitação é a facilidade na implementação e a velocidade na obtenção da resposta do seu método.

Em 2007 é publicado o trabalho [Taranto, 2007] que, baseado na publicação de [Vu, 1999a], apresenta uma nova maneira de obtenção dos parâmetros do equivalente. Este também considera que entre duas medições consecutivas não há alteração no sistema elétrico. Seu diferencial é o método de obtenção dos parâmetros, o qual envolve uma estimativa inicial que, segundo o autor, após algumas iterações converge, mantendo uma oscilação em torno dos valores desejados, com uma frequência igual à metade da taxa de amostragem, para a impedância e tensão de Thévenin.

Os autores dizem que a vantagem do método é a solução das dificuldades numéricas encontradas no método adotado em [Vu, 1999a] a respeito da singularidade da equação matricial utilizada e que este representa uma forma acelerada de obtenção do equivalente. Apesar das vantagens, é discutida brevemente a necessidade da utilização do método de mínimos quadrados para melhorar a qualidade de sua resposta. Um aspecto a destacar é o fato do algoritmo considerar nula a resistência da impedância do equivalente estimado para o SEP, consideração esta aceitável apenas para redes de alta tensão. Esta pode constituir uma desvantagem do método em relação ao proposto por [Vu, 1999a], além de sua implementação não ser trivial.

Já em 2009 na publicação do trabalho [Su, 2009] é proposta uma metodologia de obtenção do equivalente de Thévenin para as barras com mais de uma linha conectada. O diferencial desta metodologia para as já apresentadas é a utilização dos parâmetros das linhas que interligam a barra em análise às suas adjacentes. Neste artigo também é proposto um índice que relaciona as impedâncias da carga e do equivalente.

Um ponto em comum entre as metodologias citadas é o tratamento dos dados pelo método de mínimos quadrados.

Na referência [Han, 2009], é proposto um índice de estabilidade de tensão para grandes áreas, utilizando a junção de dois cálculos principais. O primeiro é a predição dos parâmetros das áreas, utilizando o VIP, e o segundo uma adaptação do modelo proposto em [Larsson, 2003] desenvolvido para monitoração de grandes corredores de potência.

É importante destacar que, em todos os trabalhos analisados, somente em [Taranto, 2007] os autores se preocuparam em diferenciar os ramos de injeção daqueles de consumo de potência, ou seja, diferenciar os ramos “alimentados”, dos ramos “alimentadores”. Porém, os autores salientam que pesquisa adicional precisaria ser elaborada.

A revisão bibliográfica realizada, em conjunto com os primeiros resultados obtidos no desenvolvimento de [Martins, 2012], mostrou que o uso de equivalentes calculados em tempo real, a partir de medições fasoriais, não constitui uma tarefa trivial e, sim, um campo de investigações que exige estudos adicionais.

Neste sentido, a pesquisa de dissertação de mestrado aqui apresentada, visando à proposição de uma metodologia para cálculo do equivalente, teve início com um estudo aprofundado sobre equivalentes de redes a partir do trabalho de Vu, conforme detalhado nos próximos itens.

3.3. Descrição do Equivalente – Método de Identificação dos Parâmetros

A formulação para obtenção das equações matriciais proposta em [Vu, 1999a] pode ser demonstrada por meio do sistema simplificado da Figura 3.1, onde estão indicadas a Tensão de Thévenin (\dot{E}_{th}), a Impedância de Thévenin (\bar{Z}_{th}), a Corrente na Barra k (\dot{I}_k) e a Tensão na Barra k (\dot{V}_k). A equação utilizada para calcular os parâmetros do equivalente de Thévenin é apresentada em (3.1). Este sistema é similar àquele da Figura 2.1, porém já no contexto do equivalente.

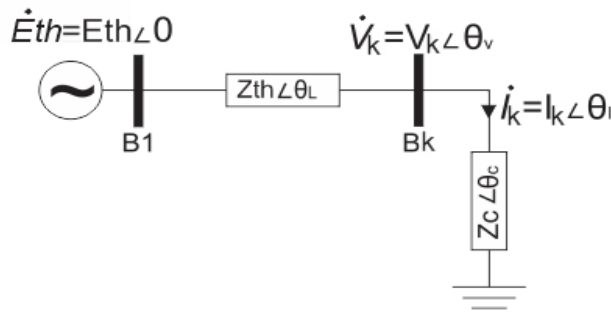


Figura 3.1 – Sistema equivalente com duas barras – B1 e Bk.

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

Considerando os vetores de tensão, corrente e impedância em sua forma complexa⁴, a equação (3.1) pode ser rescrita conforme a equação (3.2).

$$E_{th,r} + jE_{th,x} = (R_{th} + iX_{th})(I_{k,r} + iI_{k,x}) + (V_{k,r} + iV_{k,x}) \quad (3.2)$$

Efetuada as devidas multiplicações e separando o resultado em parte real e imaginária tem-se, respectivamente, as equações (3.3) e (3.4).

$$E_{th,r} + 0E_{th,x} - I_{k,r}R_{th} + I_{k,x}X_{th} = V_{k,r} \quad (3.3)$$

$$0E_{th,r} + E_{th,x} - I_{k,x}R_{th} - I_{k,r}X_{th} = V_{k,x} \quad (3.4)$$

As equações (3.3) e (3.4) podem ser reescritas na forma matricial conforme (3.5).

⁴ Nesta dissertação são adotados os subscritos r e x , para representar, respectivamente, parte real e parte imaginária dos números complexos.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k,r} & I_{k,x} \\ 0 & 1 & -I_{k,r} & -I_{k,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Eth}_r \\ \text{Eth}_x \\ \text{Rth} \\ \text{Xth} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k,r} \\ V_{k,x} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Observa-se que o sistema linear representado em (3.5) possui duas equações e quatro incógnitas a serem determinadas, ou seja, não apresenta solução. Considerando o sistema do tipo $Ax = B$ onde a solução é obtida com a inversão da matriz “A” ($x = A^{-1}B$), faz-se necessária a obtenção de mais duas equações, tornando a matriz “A” quadrada possibilitando o cálculo de x .

A alternativa proposta por Vu é a utilização de medições consecutivas, ou seja, em diferentes momentos de operação, para compor o conjunto de equações, considerando que o sistema, em termos do seu equivalente (tensão e impedância de Thévenin) não tenha sofrido alteração. Portanto, a equação (3.5) pode ser reescrita como (3.6).

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k1,r} & I_{k1,x} \\ 0 & 1 & -I_{k1,r} & -I_{k1,x} \\ 1 & 0 & -I_{k2,r} & I_{k2,x} \\ 0 & 1 & -I_{k2,r} & -I_{k2,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Eth}_r \\ \text{Eth}_x \\ \text{Rth} \\ \text{Xth} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k1,r} \\ V_{k1,x} \\ V_{k2,r} \\ V_{k2,x} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Outra formulação para obtenção dos parâmetros do equivalente respeitando a premissa de que o equivalente (tensão e impedância de Thévenin) manteve-se inalterado entre duas medições, é através da equação (3.7) que pode ser facilmente deduzida de (3.1). Sua diferença é a solução do sistema de equações sem utilizar as propriedades matriciais.

$$\bar{Z}_{th}\dot{I}_{k1} + \dot{V}_{k1} = \bar{Z}_{th}\dot{I}_{k2} + \dot{V}_{k2} \quad (3.7)$$

Isolando a impedância de Thévenin em (3.7) tem-se (3.8).

$$\bar{Z}_{th} = \frac{\dot{V}_{k2} - \dot{V}_{k1}}{\dot{I}_{k1} - \dot{I}_{k2}} \quad (3.8)$$

Pela equação (3.8) conclui-se que \bar{Z}_{th} é determinada em função da variação de tensão e corrente na barra, denotando a sensibilidade do método em relação às variações das grandezas medidas. A fim de evidenciar tal sensibilidade, leva-se em consideração a aplicação do teorema de MTP, onde o foco é o cálculo do módulo de \bar{Z}_{th} . Assim reescreve-se a equação (3.8) como (3.9).

$$Z_{th} = \left| \frac{\dot{V}_{k2} - \dot{V}_{k1}}{\dot{I}_{k1} - \dot{I}_{k2}} \right| \quad (3.9)$$

Adotando $\Delta V_{k12} = |\dot{V}_{k2} - \dot{V}_{k1}|$ e $\Delta I_{k21} = |\dot{I}_{k1} - \dot{I}_{k2}|$ e substituindo em (3.9) tem-se (3.10).

$$Z_{th} = \frac{\Delta V_{k12}}{\Delta I_{k21}} \quad (3.10)$$

Sendo assim, Z_{th} é diretamente proporcional a ΔV_{k12} e inversamente proporcional a ΔI_{k21} . Calculando o limite da função em relação ao módulo da variação da corrente, com o intuito de verificar o comportamento de Z_{th} para valores de variações comuns em medições coletadas muito próximas, tem-se a equação (3.11).

$$\lim_{\Delta I_{k21} \rightarrow x} Z_{th} = \lim_{\Delta I_{k21} \rightarrow x} \left(\frac{\Delta V_{k12}}{\Delta I_{k21}} \right) \quad (3.11)$$

Considerando $x = 0$, o $\lim_{\Delta I_{k21} \rightarrow 0} Z_{th} = \infty$, ou seja, quando a variação de corrente aproxima-se de zero, Z_{th} converge para valores elevados. Já ao fazer $x = \infty$, o $\lim_{\Delta I_{k21} \rightarrow \infty} Z_{th} = 0$, ou seja, com grandes variações de corrente, Z_{th} converge para valores próximos de zero.

Ainda considerando a equação (3.11), porém fazendo o limite em relação ao módulo da tensão, tem-se: para $x = 0$, o $\lim_{\Delta V_{k12} \rightarrow 0} Z_{th} = 0$, e para $x = \infty$, o $\lim_{\Delta V_{k12} \rightarrow \infty} Z_{th} = \infty$, ou seja, para valores muito pequenos de variação de tensão, Z_{th} aproxima-se de zero, e, para grandes variações de tensão, Z_{th} converge para valores elevados.

Do exposto, conclui-se que cuidados relativos à aplicação do método devem ser tomados, principalmente em se tratando de aplicações dos dados provenientes do SMFS. Como o intervalo de tempo entre as medições é da ordem de milissegundos, espera-se que as variações em tensão e corrente das medições consecutivas sejam muito pequenas, para o SEP em operação normal.

O método desenvolvido nesta dissertação busca o tratamento da sensibilidade do equivalente matricial no que diz respeito ao seu comportamento em relação às grandezas tensão e corrente.

3.4. Definição da Carga

Conforme já citado, a definição de carga utilizada neste trabalho é aquela proposta em [Ribeiro, 2011], onde são indicadas duas metodologias para a identificação da corrente de carga das denominadas barras intermediárias. Tais metodologias baseiam-se no sentido dos fluxos de potência dos ramos incidentes na barra: a primeira (M1) considera a carga sempre indutiva, e, na segunda (M2), o sentido da potência ativa é mandatório para a consideração sobre a parte reativa.

Visando esclarecer estas definições, vale aqui reescrever o exemplo apresentado em [Ribeiro, 2011], considerando os sentidos de fluxo de potência para a barra k ilustrados na Figura 3.2.

A potência aparente para M1 é constituída das potências ativas e reativas com sinais positivos independentemente do ramo a que pertence. Por exemplo, somente P_2 e P_3 serão cargas em potência ativa e Q_1 e Q_2 em potência reativa, ou seja, a potência aparente para M1 desta barra será $P_2 + P_3 + j(Q_1 + Q_2)$.

Já para M2 a potência aparente é constituída pelas parcelas ativas com sinais positivos e suas respectivas parcelas reativas, ou seja, para a barra da Figura 3.2, a potência aparente M2 será dada por $P_2 + P_3 + j(Q_2 - Q_3)$.

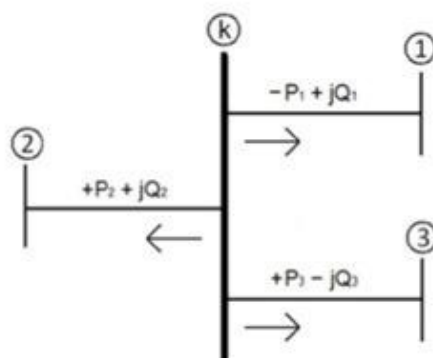


Figura 3.2 – Fluxo de potência da barra k.
Adaptada de [Ribeiro, 2011].

Nesta dissertação, todos os testes e análises são realizados considerando as duas metodologias de identificação de carga. Calculadas as potências equivalentes da carga para M1 e M2, podem ser calculadas as correntes equivalentes da carga, considerando a tensão da barra analisada.

3.5. Análises de Sensibilidade do Equivalente

As análises realizadas neste item visam adquirir um maior conhecimento sobre a resposta do método proposto por Vu, descrito no item 3.3, frente a diferentes condições operativas do SEP. O ponto de partida dos estudos é uma avaliação do seu comportamento, comparando-o com o equivalente calculado conforme teorema de circuitos, aqui denominado “equivalente tradicional”.

Para facilitar a compreensão das análises, o equivalente de Vu é denominado neste texto por “equivalente matricial” (EM). Seus parâmetros são identificados por $\dot{E}th_{EM}$ e $\bar{Z}th_{EM}$. O equivalente tradicional é identificado por $\dot{E}th$ e $\bar{Z}th$. A impedância da carga é indicada por \bar{Z}_c .

Observa-se que não se trata de uma avaliação da qualidade de resposta do algoritmo de Vu, pois, nos casos estudados, sua premissa básica (parâmetros do equivalente constantes entre medições consecutivas) não é respeitado. O que se pretende é justamente analisar os resultados de sua aplicação em condições de operação nas quais esta premissa não se verifica, para visualizar as possíveis tendências e comportamentos da sua resposta, quando o equivalente é submetido a situações observadas em medições retiradas do SEP.

Para estudar diferentes condições operativas, as simulações realizadas consideram variações de carga, \bar{Z}_c , variações no sistema, $\bar{Z}th$, e variações carga/sistema simultaneamente.

O circuito considerado como caso base para as simulações é apresentado na Figura 3.1, considerando como parâmetros iniciais: $\bar{Z}_{th} = 0,8 + 1,6i$, $\bar{Z}_c = 3 + 4,3i$ e $\dot{E}_{th} = 1,0 + 0i$. As equações utilizadas para o cálculo da corrente (\dot{I}_k) e tensão (\dot{V}_k) na barra k estão descritas respectivamente em (3.12) e (3.13). A expressão (3.13) é similar à (2.1), porém no contexto do equivalente.

$$\dot{V}_k = \dot{I}_k \bar{Z}_c \quad (3.12)$$

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{V}_k}{\bar{Z}_c + \bar{Z}_{th}} \quad (3.13)$$

As análises são apresentadas a seguir por meio de três conjuntos de simulações, denominados Casos Testes, cada um identificado por variações particulares das condições operativas.

3.5.1. Caso Teste 1

O primeiro teste consiste em verificar a resposta do EM quando há variações na impedância de Thévenin, \bar{Z}_{th} , mais significativas que as variações na impedância da carga, \bar{Z}_c , ou seja, quando o sistema encontra-se variando em maiores proporções quando comparado com as variações da carga. Estas variações podem ser ocasionadas por diversos fatores, tais como: variações das cargas em outras barras, operação de reguladores automáticos de tensão, operação de taps em transformadores, alteração no despacho de energia entre usinas etc. O caso teste 1 abrange três conjuntos de simulações, denominados caso teste 1.1, caso teste 1.2 e caso teste 1.3, caracterizados por diferentes variações das impedâncias.

Iniciam-se os testes a partir do caso 1.1 com Z_{th} variando entre $\pm 10\%$ e Z_c entre $\pm 0,1\%$, mantendo constantes seus respectivos fatores de potência.

Os resultados deste teste encontram-se nas Figura 3.3, 3.4 e 3.5. A Figura 3.3 representa as tensões $\dot{E}_{th_{EM}}$ e \dot{E}_{th} , em módulo e ângulo. A Figura 3.4 apresenta a evolução das impedâncias $\bar{Z}_{th_{EM}}$, \bar{Z}_{th} e \bar{Z}_c , em módulo e ângulo. Na Figura 3.5 tem-se estas mesmas impedâncias no plano RX.

Pela Figura 3.3 verifica-se que $\dot{E}_{th_{EM}}$ possui comportamento disperso, mas com pólo de concentração muito próximo de zero. Já seu ângulo possui dois pólos de concentração: zero e três graus. O valor pretendido é $1\angle 0^\circ$ pu (\dot{E}_{th}).

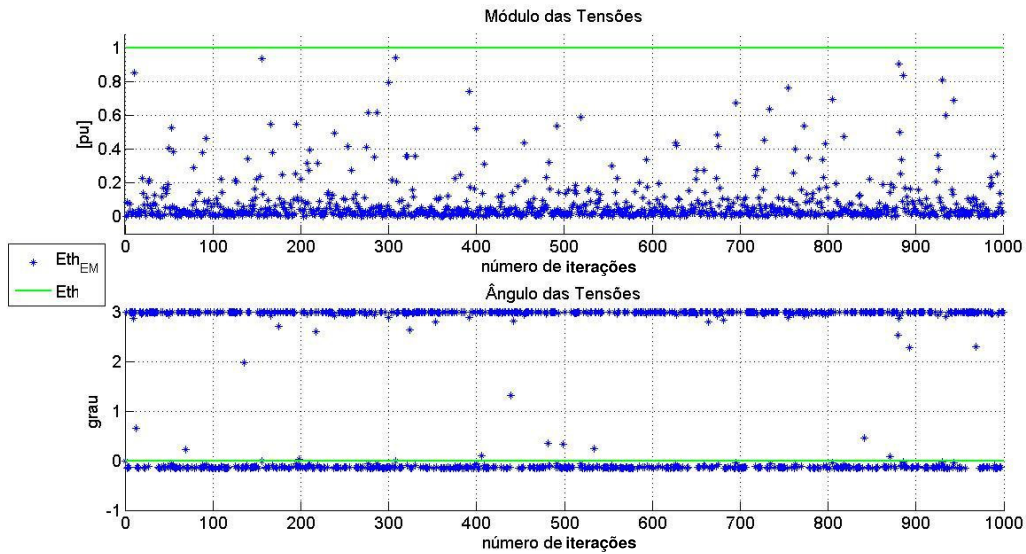


Figura 3.3 – Evolução da $\dot{E}th_{EM}$ e da $\dot{E}th$ para o caso 1.1.

No que diz respeito a $\bar{Z}th_{EM}$, Figura 3.4, observa-se que seu módulo oscila em valores próximos ao módulo da impedância da carga, \bar{Z}_c , e seu ângulo é suplementar ao negativo do ângulo da carga. Como o ângulo de $\bar{Z}th_{EM}$ é negativo maior que -180° e menor que -90° , a região de convergência do mesmo encontra-se no terceiro quadrante do plano RX, com foco em $-\bar{Z}_c$, conforme observado na Figura 3.5.

Continuando as análises referentes à Figura 3.4, nota-se que o ângulo de $\bar{Z}th_{EM}$ distribui-se no “espaço” de maneira mais comportada quando comparada ao seu módulo que, por sua vez, possui pontos com maior dispersão.

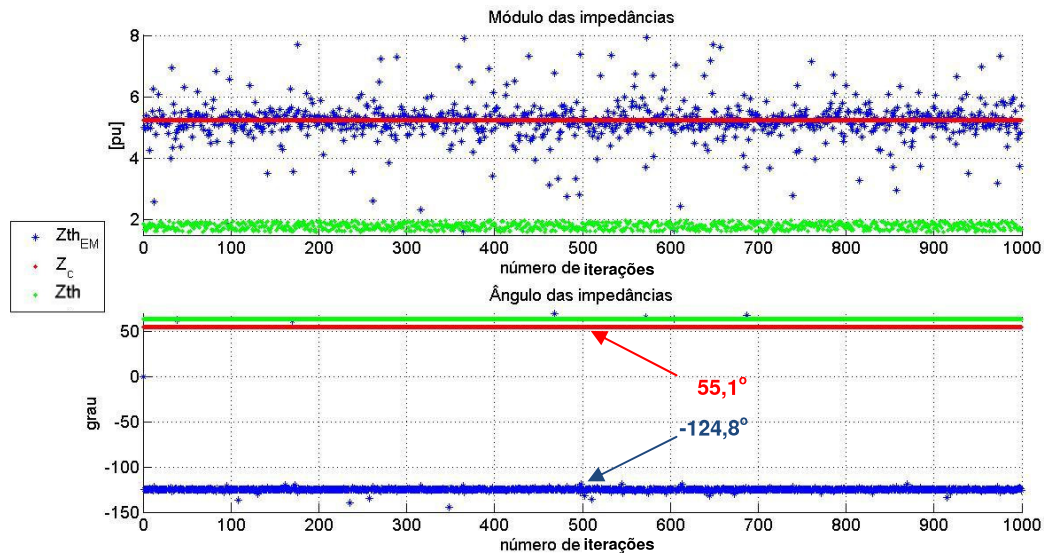


Figura 3.4 – Evolução da $\bar{Z}th_{EM}$, da $\bar{Z}th$ e da \bar{Z}_c para o caso 1.1.

A Figura 3.5 ilustra, sob outra visão, a posição de convergência de $\bar{Z}th_{EM}$ em relação a \bar{Z}_c e a $\bar{Z}th$. É possível identificar a existência de pontos localizados muito longe da região pretendida (proximidade de $\bar{Z}th$), porém a maior concentração de $\bar{Z}th_{EM}$ se

estabelece entre $-5,30 - 6,58i$ e $-1,20 - 1,98i$ pu, quando comparada aos pontos mais dispersos.

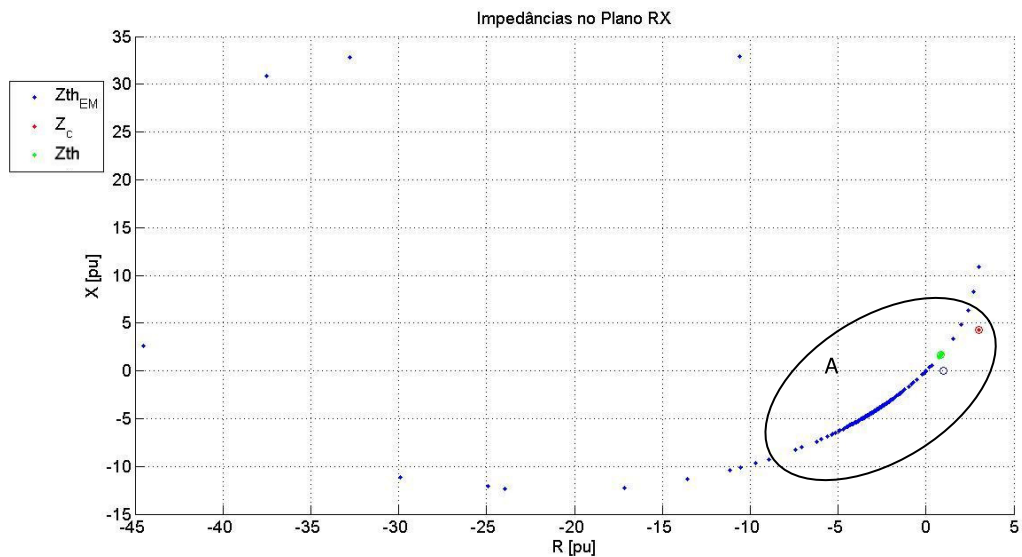


Figura 3.5 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.1.

Com a ampliação da região de maior incidência de $\bar{Z}th_{EM}$ e de \bar{Z}_c (região “A”) da Figura 3.5, por meio da Figura 3.6 nota-se que os valores de $\bar{Z}th_{EM}$ encontram-se concentrados com foco de convergência em $-\bar{Z}_c$ ($-3,0 - 4,3i$ pu), longe do valor pretendido ($0,8 + 1,6i$ pu).

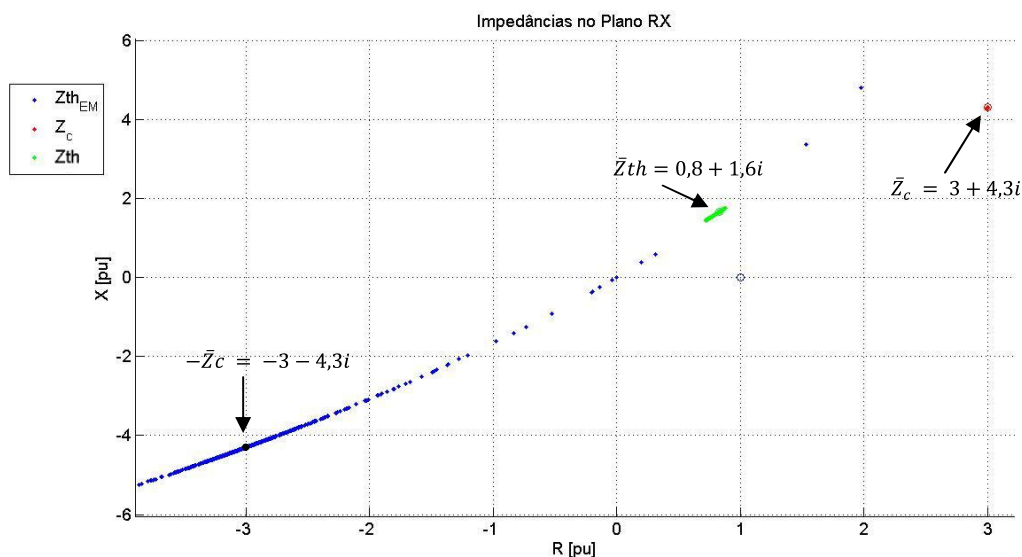


Figura 3.6 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.1. Ampliação de “A” da Figura 3.5.

Esta inconsistência está relacionada com a formulação matemática do cálculo do EM, já identificada nos trabalhos realizados por [Ribeiro, 2011], onde o mesmo propõe um método para uma possível correção. Entretanto, em suas simulações, a impedância que detinha maiores oscilações alternava-se entre carga e equivalente com intervalos

bem definidos, facilitando a identificação da tendência da $\bar{Z}th_{EM}$, fato não observado neste caso. Portanto, a aplicação de seu método de correção não é trivial para esta situação.

Prosseguindo nos testes, o caso 1.2 consiste em aplicar variações em módulo para $\bar{Z}th$ e \bar{Z}_c respectivamente em intervalos entre $\pm 5\%$ e $\pm 1\%$ de seus valores iniciais.

Nota-se que, em relação ao caso 1.1, houve um decréscimo no intervalo de variações sistêmicas e um aumento neste intervalo para a carga. Sendo assim, pode-se dizer que neste caso consideram-se variações na carga e variações sistêmicas respectivamente em maiores e menores proporções quando comparadas ao caso 1.1.

A Figura 3.7 ilustra a tensão $\dot{E}th_{EM}$ no plano complexo para os casos 1.1 e 1.2. Verifica-se que, com o decréscimo das variações sistêmicas e aumento das de carga (partindo do caso 1.1 para o caso 1.2), ou seja, aproximando as variações de $\bar{Z}th$ e \bar{Z}_c , mantendo seus respectivos fatores de potência constantes, houve uma maior dispersão nos valores de $\dot{E}th_{EM}$.

Observa-se que a região com maior incidência de soluções para o caso 1.2 (região “B” na Figura 3.7) compreende o valor de tensão pretendido ($\dot{E}th$), diferentemente desta região para o caso 1.1 (região “A” na Figura 3.7), que não contém o valor pretendido.

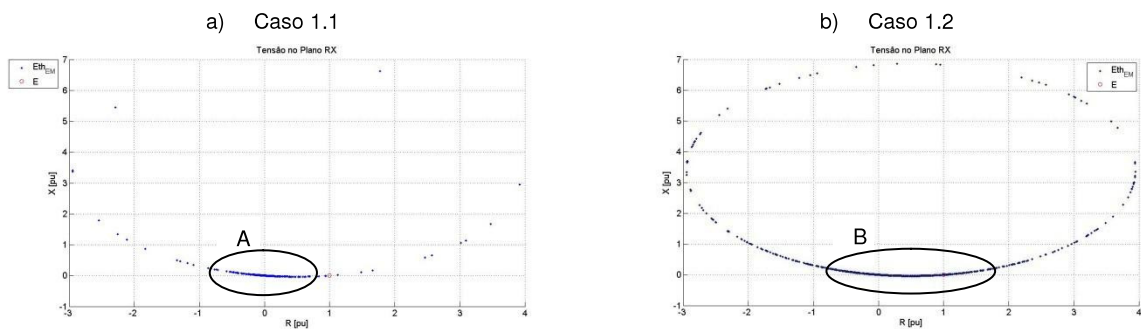


Figura 3.7 – Tensões no plano complexo para os casos 1.1 e 1.2.

Seguindo nas análises, a Figura 3.8 apresenta a Figura 3.7 (b) em maior escala, facilitando a visualização da área de convergência dos valores de $\dot{E}th_{EM}$ calculados. Também é indicado nesta figura o ponto de referência. Nota-se que a área de convergência possui limites de -1 a 2 pu no eixo R e próximo a 0 pu no eixo X, apresentando um alto erro de estimação para a maioria das iterações.

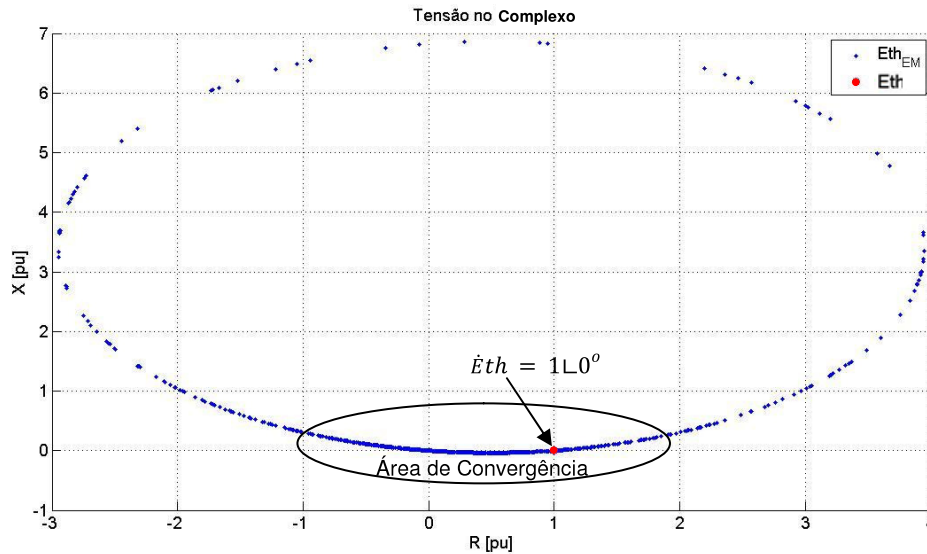


Figura 3.8 – Tensões no plano complexo para o caso 1.2.

Com a análise da região de maior incidência da resposta em impedância, região “A” ilustrada na Figura 3.9, observa-se que há uma mudança no foco quando comparado ao caso 1.1 (Figura 3.5). O foco para este caso torna-se as proximidades de $\bar{Z}th$ ($1,79\angle 63,4^\circ; \pm 5\%$), assim como observado para a tensão.

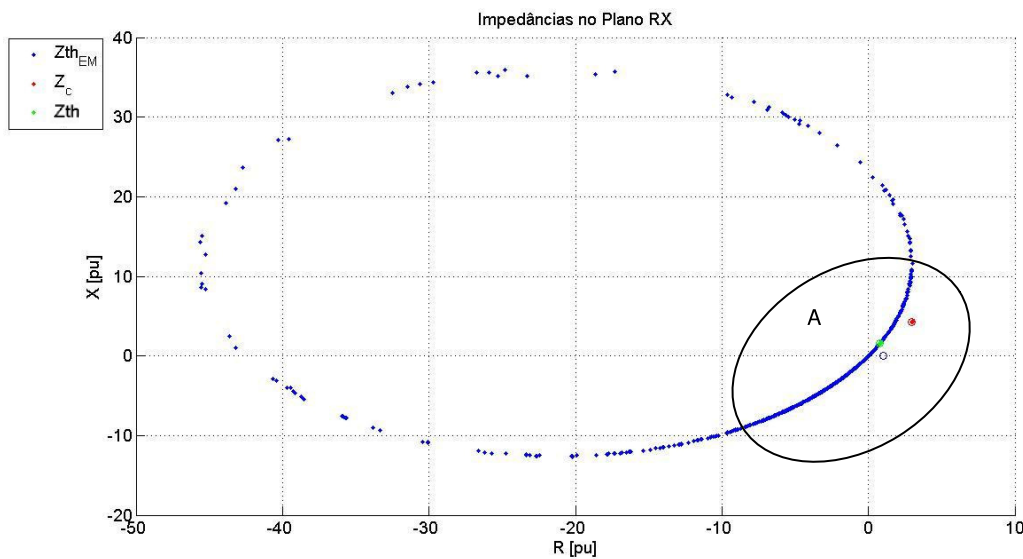


Figura 3.9 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.2.

Uma observação interessante refere-se à configuração no plano RX da dispersão dos valores de $\bar{Z}th_{EM}$ e $\hat{E}th_{EM}$. Esta lembra uma circunferência. Em tensão, passa pelo ponto correspondente ao encontro dos eixos e por $\hat{E}th$. Em impedância, passa por $-\bar{Z}_c$ e por $\bar{Z}th$. A ampliação da região “A” da Figura 3.9, representada na Figura 3.10, facilita a visualização desta afirmação para a configuração de $\bar{Z}th_{EM}$.

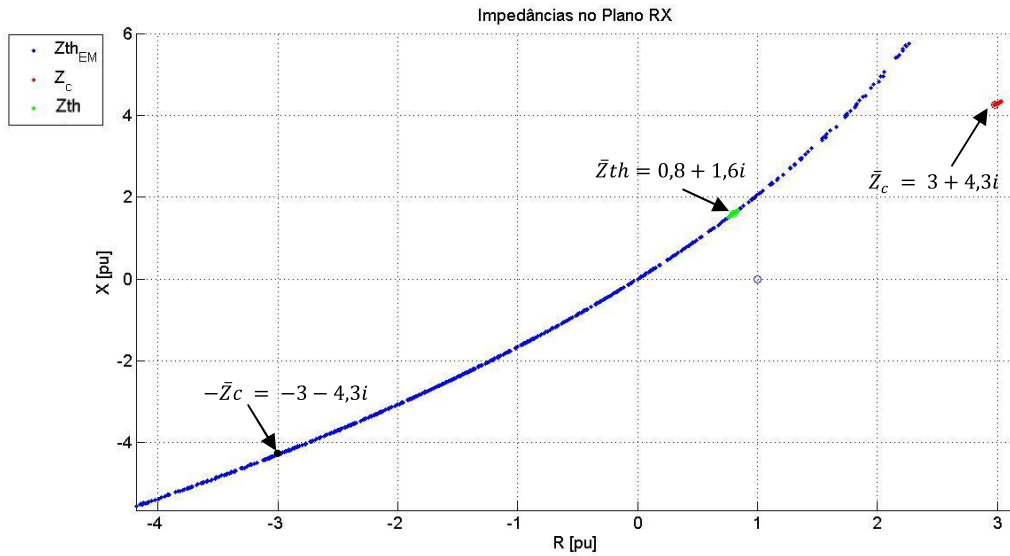


Figura 3.10 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.2. Ampliação de “A” da Figura 3.9.

Já na Figura 3.11 é ilustrada uma circunferência construída através de suas equações paramétricas. Para encontrar o centro e o raio foram utilizados quatro pontos situados em extremidades distintas da distribuição de $\bar{Z}_{th_{EM}}$. Uma correção nas coordenadas do centro pode fazer-se necessária. Denota-se que a distribuição da resposta de $\bar{Z}_{th_{EM}}$ no plano RX descreve aproximadamente uma circunferência.

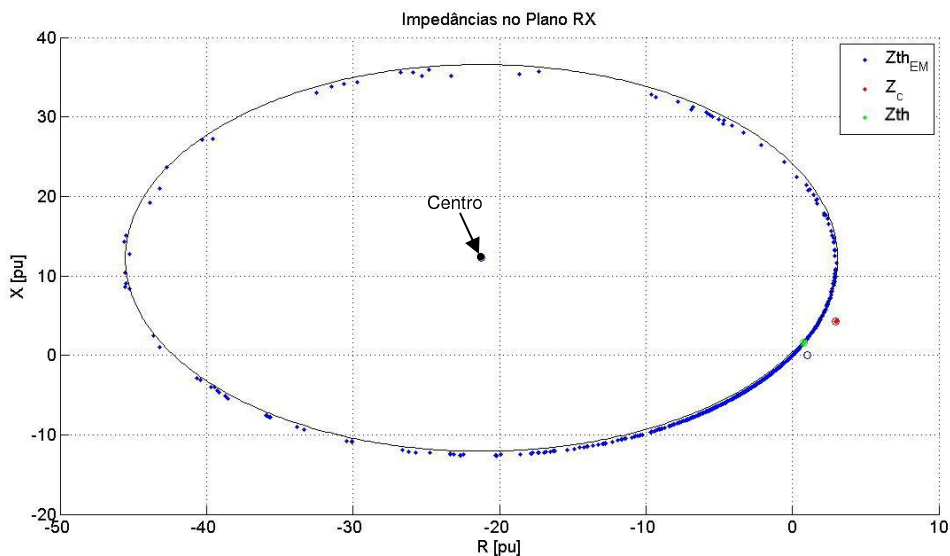


Figura 3.11 – Impedâncias no plano RX com representação da circunferência.

Em tempo real, contudo, o fator de potência não se mantém constante. Considerando este fato, visto que o foco do trabalho encontra-se nesta aplicação, “surge” o caso 1.3, que representa uma “variação” do caso 1.2, tendo como diferença somente a variação do fator de potência da carga e do equivalente de Thévenin de maneira aleatória.

Para se obter a alteração do fator de potência nas impedâncias, foram consideradas variações aleatórias para suas parcelas resistivas e reativas separadamente.

Para este caso são representadas na Figura 3.12 as tensões $\dot{E}th_{EM}$ e $\dot{E}th$, em módulo e ângulo. A resposta do EM possui oscilações em módulo predominantemente no intervalo de 0,2 a 0,6 pu e em ângulo no intervalo de 1° a -1° (representados respectivamente pelas regiões “A” e “B” da figura).

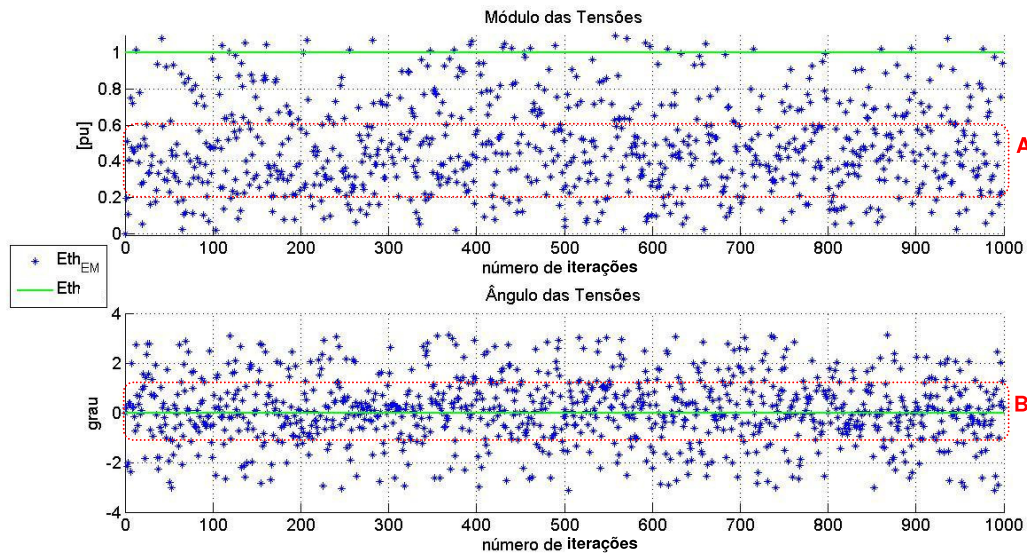


Figura 3.12 – Evolução da $\dot{E}th_{EM}$ e da $\dot{E}th$ para o caso 1.3.

Nota-se que a região “A” encontra-se entre 0 e 1 pu com maior concentração nas proximidades do ponto médio do intervalo (0,5 pu), ou seja, entre o foco do caso 1.1 e $\dot{E}th$. Como $\bar{Z}_c = 3 + 4,3i$ e $\bar{Z}_{th} = 0,8 + 1,6i$ e suas respectivas variações são $\pm 1\%$ e $\pm 5\%$, suas correspondentes variações em intensidades são $\pm 52,43 * 10^{-3} \angle 55,10^\circ$ pu e $\pm 89,44 * 10^{-3} \angle 63,43^\circ$ pu. Conclui-se que a região de concentração da resposta do EM deve-se à proximidade nas intensidades das variações de \bar{Z}_c e \bar{Z}_{th} .

Com respeito à impedância, observa-se pela Figura 3.13 que o módulo de $\bar{Z}_{th_{EM}}$, situa-se predominantemente nas “redondezas” do módulo da carga, com alguns pontos próximos ao módulo pretendido. Já seus respectivos ângulos estão concentrados entre -100° e -150° (região “A” da figura). Considerando o valor médio deste intervalo próximo de -125° tem-se, mais uma vez, o negativo do ângulo suplementar ao ângulo da carga, como no caso 1.1.

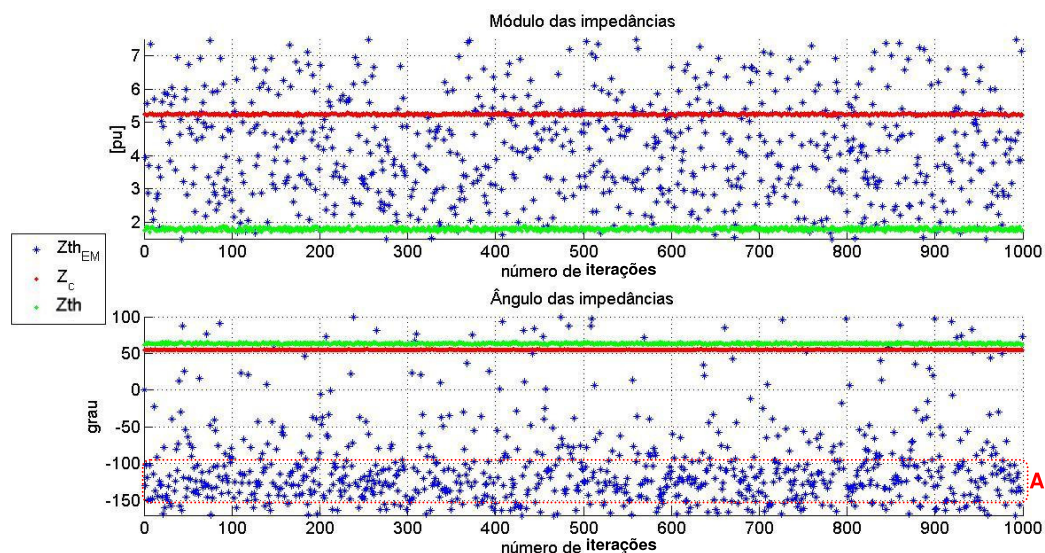


Figura 3.13 – Evolução da $\bar{Z}th_{EM}$, da $\bar{Z}th$ e da $\bar{Z}c$ para o caso 1.3.

Na Figura 3.14 é ilustrada a $\dot{E}th_{EM}$ e $\dot{E}th$. Nesta figura é apresentada a área de concentração dos resultados no plano complexo, que está compreendida aproximadamente entre $-1,30$ e $0,70$ pu no eixo X e entre $-0,20$ e $0,75$ pu no eixo R. Nota-se que o centro da área de concentração ou foco de $\dot{E}th_{EM}$ está descrito entre o ponto pretendido e o ponto zero dos eixos.

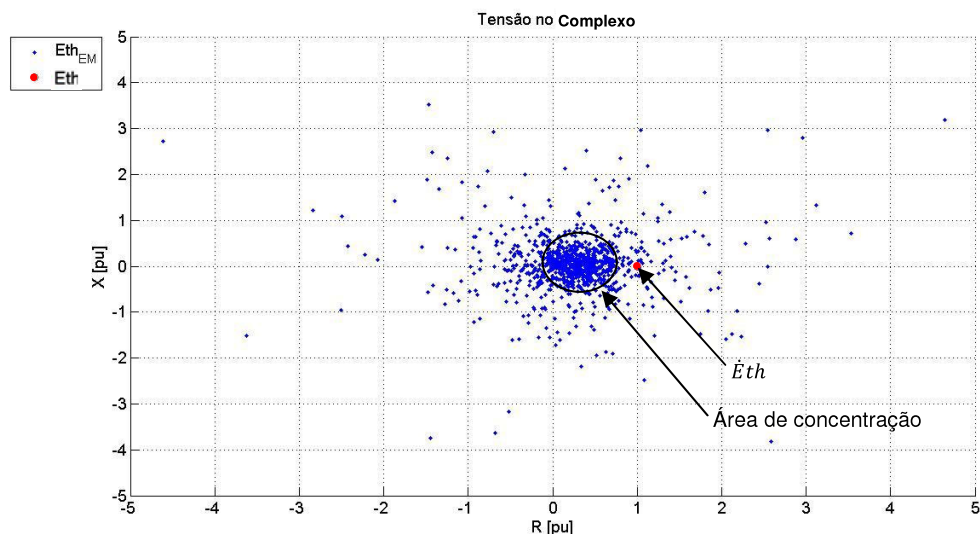


Figura 3.14 – Tensões no plano complexo para o caso 1.3.

Para este caso, a distribuição de $\bar{Z}th_{EM}$ no plano RX é ilustrada na Figura 3.15. Observa-se que o centro da área de concentração, destacada na figura, está localizado entre $-\bar{Z}c$ e $\bar{Z}th$ e, assim como para $\dot{E}th_{EM}$, o fato se dá em função da proximidade nas variações no módulo das impedâncias $\bar{Z}th$ e $\bar{Z}c$. O intervalo de maior incidência encontra-se entre -5 a 0 pu, no eixo R, e entre $-5,3$ a 0 pu, no eixo X.

A grande diferença entre os casos 1.1 e 1.2 em relação ao caso 1.3, além da localização dos resultados, consiste da não observabilidade da distribuição circular dos parâmetros calculados no caso 1.3, ou seja, ao considerar a variação no fator de

potência, a concentração dos parâmetros do EM, tornou-se mais nítida, porém dispersa no plano.

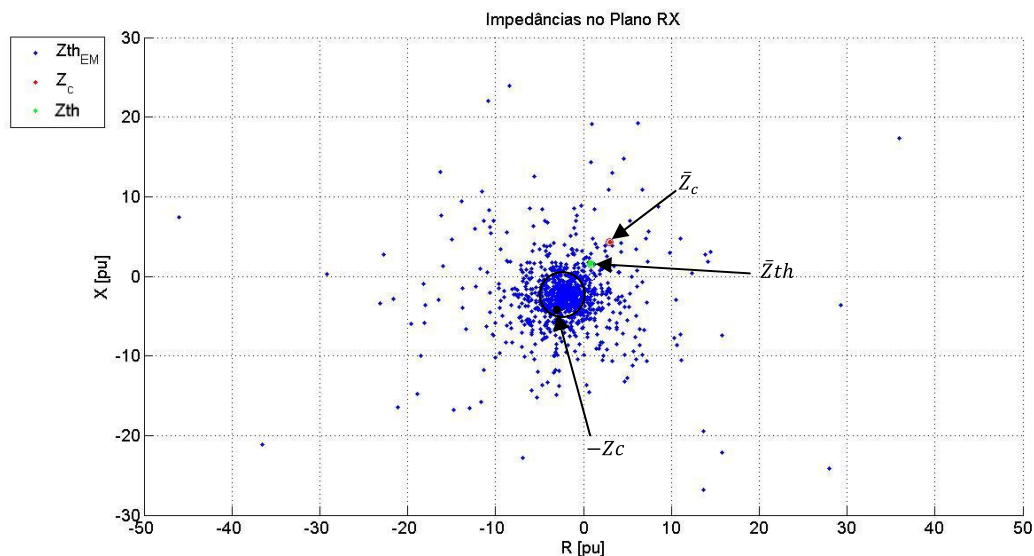


Figura 3.15 – Impedâncias no plano RX para o caso 1.3.

3.5.2. Caso Teste 2

Neste segundo conjunto de simulações o objetivo principal é verificar o comportamento da resposta do EM quando as variações na carga são superiores às variações sistêmicas.

Neste sentido o teste inicial (caso 2.1) consiste em aplicar uma variação de $\pm 0,1\%$ em \bar{Z}_{th} e $\pm 1\%$ em \bar{Z}_c mantendo as características do caso 1.1, ou seja, as variações serão somente no módulo das impedâncias, mantendo constante o fator de potência de ambas.

Como a variação da carga é superior ao da impedância de Thévenin, o intervalo de oscilação para $\dot{E}_{th_{EM}}$, conforme observado na Figura 3.16, concentra-se nas proximidades da tensão pretendida ($1L0^\circ$). Como o fator de potência das impedâncias é mantido constante, pode-se considerar que a distribuição dos mesmos descreve um semicírculo que passa por \dot{E}_{th} .

Analisando a Figura 3.16, nota-se que, para o caso 2.1, a região de maior incidência vai de 0,8 a 1,2 pu no eixo R e próxima a zero no eixo X. Observa-se que, mesmo com as pequenas variações no sistema, são encontradas variações consideráveis no valor de \dot{E}_{th} , da ordem de 20% em seu módulo.

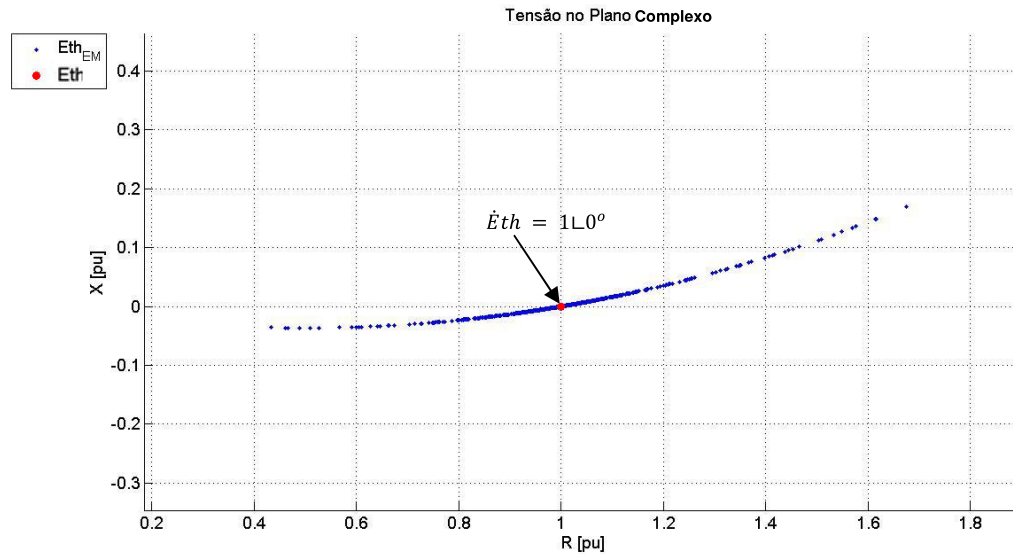


Figura 3.16 – Tensões no plano complexo para o caso 2.1.

A Figura 3.17 ilustra as impedâncias no plano RX, onde nota-se também que a resposta do EM convergiu para uma região da circunferência próxima ao valor de \bar{Z}_{th} , com oscilações predominantes no eixo R entre o intervalo de 0 a 1,5 pu e no eixo X entre 0 a 3 pu.

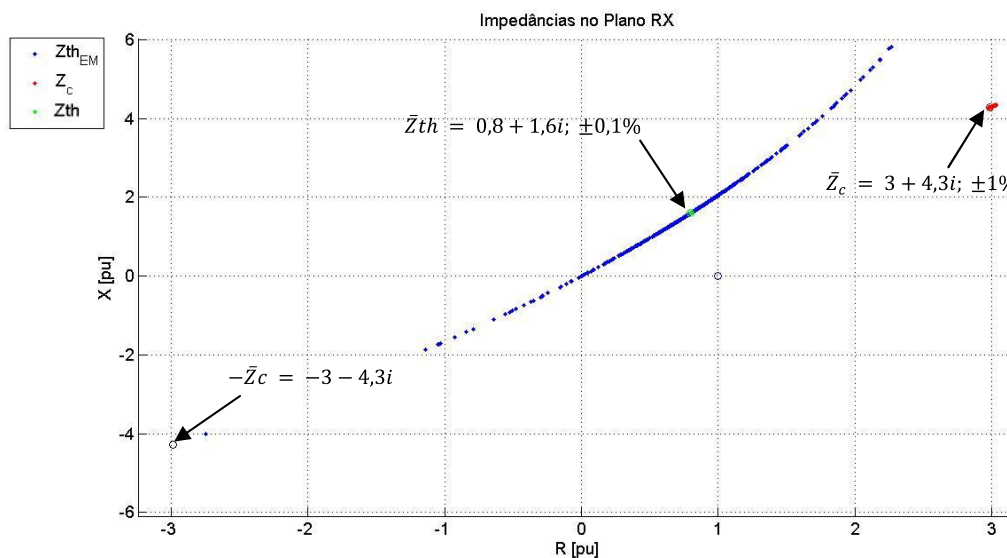


Figura 3.17 – Impedâncias no plano RX para o caso 2.1.

No caso 2.2, as variações para as impedâncias são mantidas conforme caso 2.1, porém o fator de potência não é mantido constante. Nesta direção, a Figura 3.18 ilustra o comportamento da tensão $\dot{E}_{th_{EM}}$.

Verifica-se novamente que, com a variação do fator de potência, a distribuição das respostas do EM deixa de representar uma circunferência, como observado no caso 1.3, tornando mais nítida a identificação da convergência destes pontos para as “redondezas” do valor de tensão pretendida. Observa-se que as oscilações

predominantes nos eixos R e X encontram-se, respectivamente, nos intervalos de 0,95 a 1,05 pu e de 0,09 a -0,09 pu, ou seja, apresentam variações da ordem de 5 %.

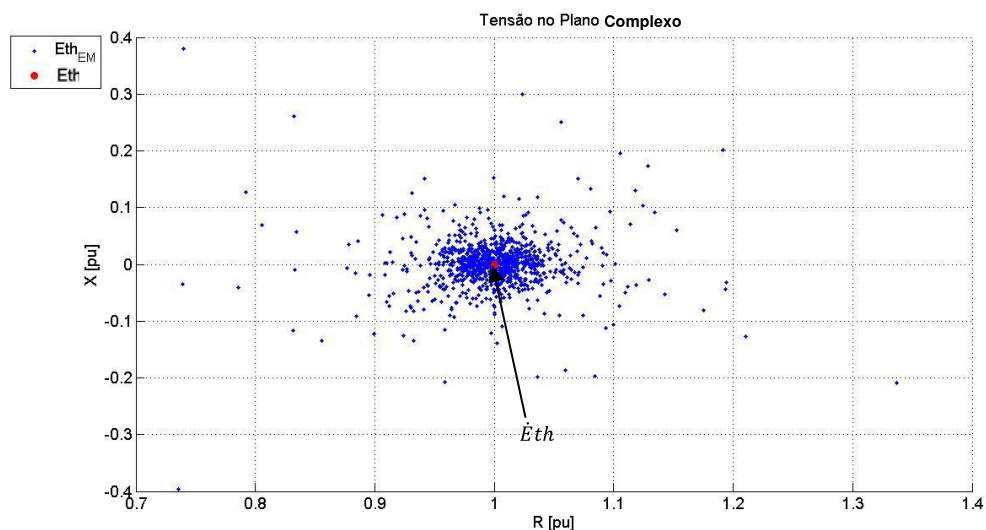


Figura 3.18 – Tensões no plano complexo para o caso 2.2.

Na Figura 3.19 é descrito o comportamento das impedâncias. Como as oscilações na carga são superiores aos da impedância de Thévenin, a resposta do EM possui oscilações muito próximas do valor pretendido. As variações predominantes estão entre os intervalos de 0,5 a 1,1 pu no eixo R e de 1,45 a 1,9 pu no eixo X.

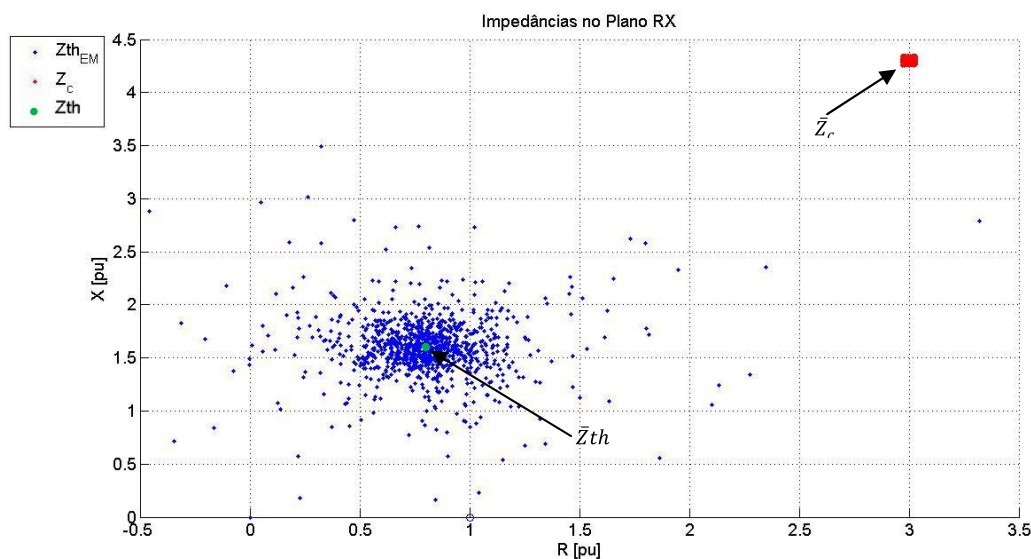


Figura 3.19 – Impedâncias no plano RX para o caso 2.2.

Para finalizar este item, o caso 2.3 foi desenvolvido conforme o trabalho [Leal, 2012], onde as oscilações máximas de carga adotadas são da ordem de 0,2% e, como os dados do SMFS são coletados em intervalos muito curtos de tempo, adotaram-se variações sistêmicas da ordem de 0,001%, com base no alto índice de controle ao qual o sistema elétrico está submetido.

Na Figura 3.20 é ilustrada no plano complexo a tensão $\hat{E}th_{EM}$ para o caso 2.3, onde os valores encontrados estão distribuídos dentro de uma circunferência imaginária de raio (R_1) igual a 0,05 pu, visto que, os mesmos possuem maior incidência dentro dos intervalos de 0,95 a 1,05 pu em R e de 0,05 a -0,05 pu em X. Pode-se considerar que as coordenadas do centro da circunferência são as da tensão pretendida, $\hat{E}th$.

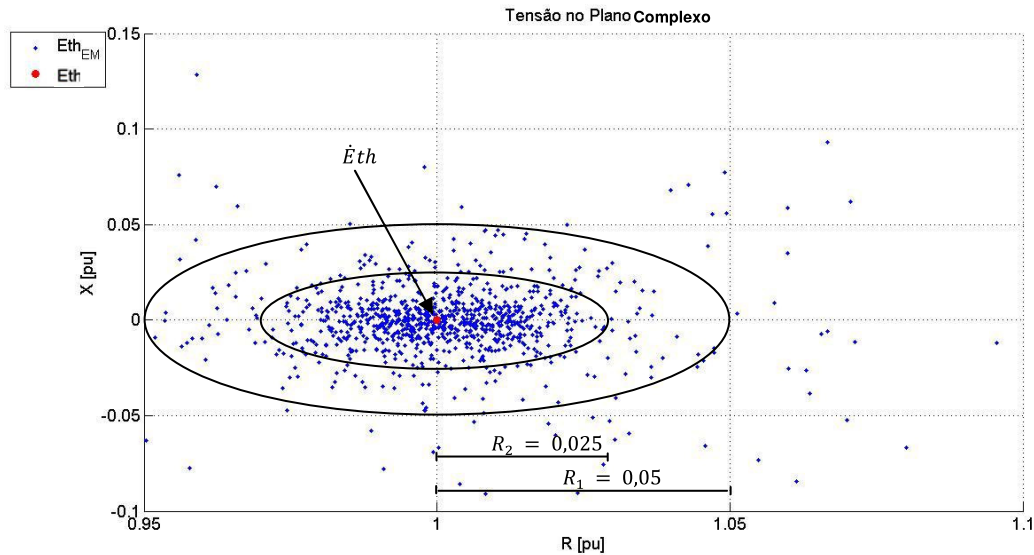


Figura 3.20 – Tensões no plano complexo para o caso 2.3.

Ainda a respeito da Figura 3.20, reduzindo o raio da circunferência imaginária pela metade, considerando um menor número de pontos, em virtude dos pontos que se localizam fora da circunferência, obtém-se uma região com maior grau de incidência dos valores calculados. Quando desconsiderado os resultados externos, as variações são reduzidas para intervalos menores de 0,975 a 1,025 pu em R e 0,025 a -0,025 pu em X, representado pelo círculo de raio $R_2 = 0,025$ pu.

Na Figura 3.21 são ilustradas as impedâncias, também no plano RX. Observa-se que as variações nos valores do EM determinam boas aproximações da impedância pretendida, mas, quando comparadas com a tensão (Figura 3.20), seus valores possuem variações maiores, da ordem de 0,1 pu em R e 0,2 pu em X, considerando somente a região com maior incidência de soluções.

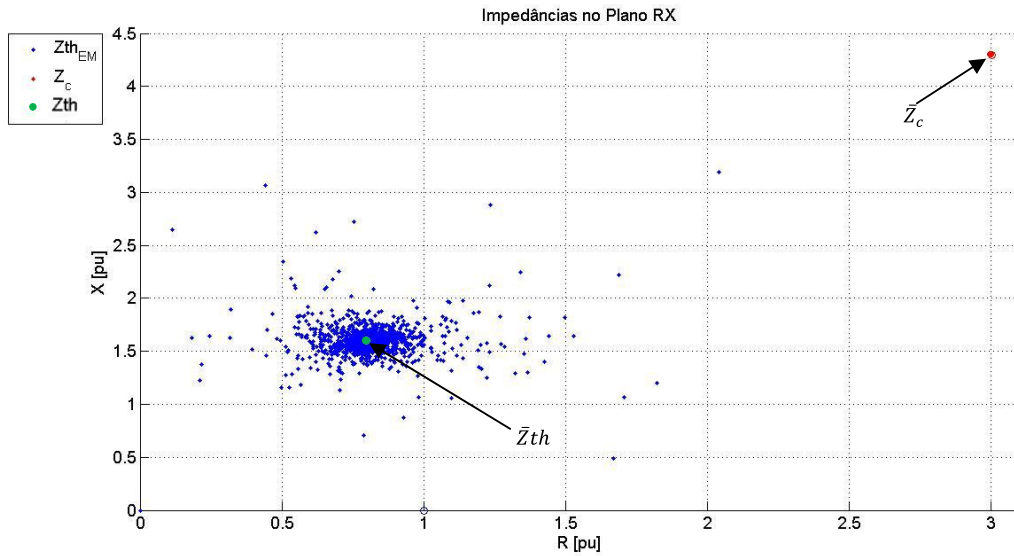


Figura 3.21 – Impedâncias no plano RX para o caso 2.3.

3.5.3. Caso Teste 3

Considera-se que no SEP as grandezas de caráter resistivo são predominantemente constantes e que a carga ao longo do tempo também possui variações resistivas menores que as reativas. No caso 3 as simulações adotam oscilações resistivas, para o sistema e para a carga, 100 vezes menores que as reativas de suas respectivas impedâncias.

É justificável assumir que as variações da componente reativa da impedância que representa o sistema oscilem (alterem seu valor) em maiores proporções que a componente resistiva. Isto decorre principalmente das características dos equipamentos que atuam no SEP cuja característica resistiva é muito menor que a reativa. Como exemplo citam-se as compensações *shunts* e os transformadores com mudança de tap.

Neste sentido, o caso 3.1 consiste em aplicar uma variação de $\pm 0,2\%$ na carga e $\pm 0,5\%$ na impedância de Thévenin, lembrando que suas respectivas resistências terão oscilações de $\pm 0,002\%$ e $\pm 0,005\%$.

Nota-se, pela Figura 3.22, que a região com maior concentração de soluções para $E_{th_{EM}}$ encontra-se abaixo do E_{th} , porém com valores dispersos em uma região delimitada pelo intervalo de 2 a 0 pu. O ângulo de $\dot{E}_{th_{EM}}$ possui, ao longo das iterações, maior concentração nas redondezas do ângulo pretendido (0°), com poucos resultados em $\pm 3^\circ$.

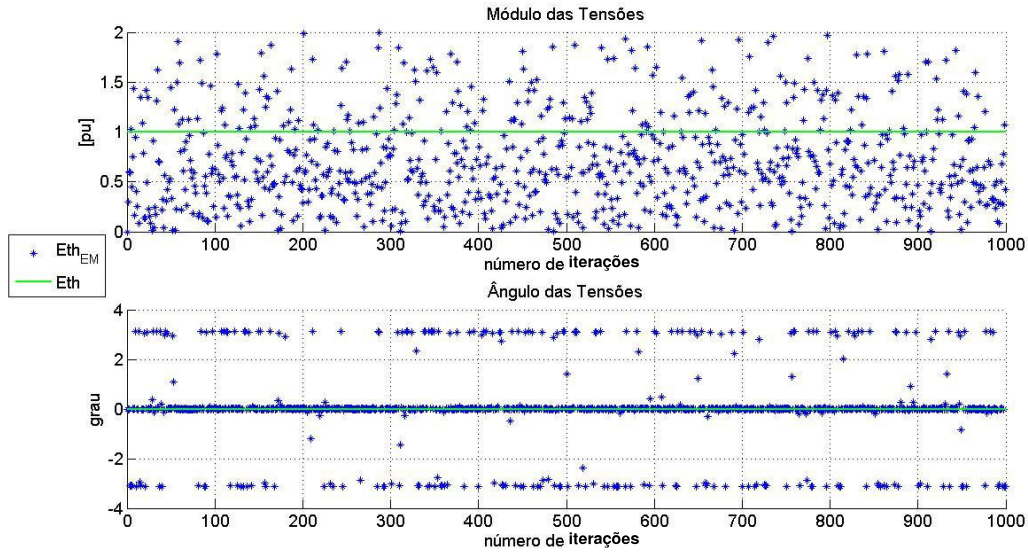


Figura 3.22 – Evolução da $\hat{E}th_{EM}$ e da $\hat{E}th$ para o caso 3.1.

Como o fator de potência não se mantém constante, esperava-se um comportamento dos parâmetros do EM com pólos bem definidos, conforme apresentado na Figura 3.18 (tensão) e Figura 3.19 (impedância) para o caso 2.3. Porém, a distribuição da resposta no plano complexo em termos de tensão, diferentemente dos casos 1 e 2, pode ser representada por uma reta que possui como coordenadas os parâmetros de $\hat{E}th$, conforme observado na Figura 3.23. À medida que a solução se distancia da região de maior incidência, há um aumento na dispersão nos pontos em relação à reta estimada.

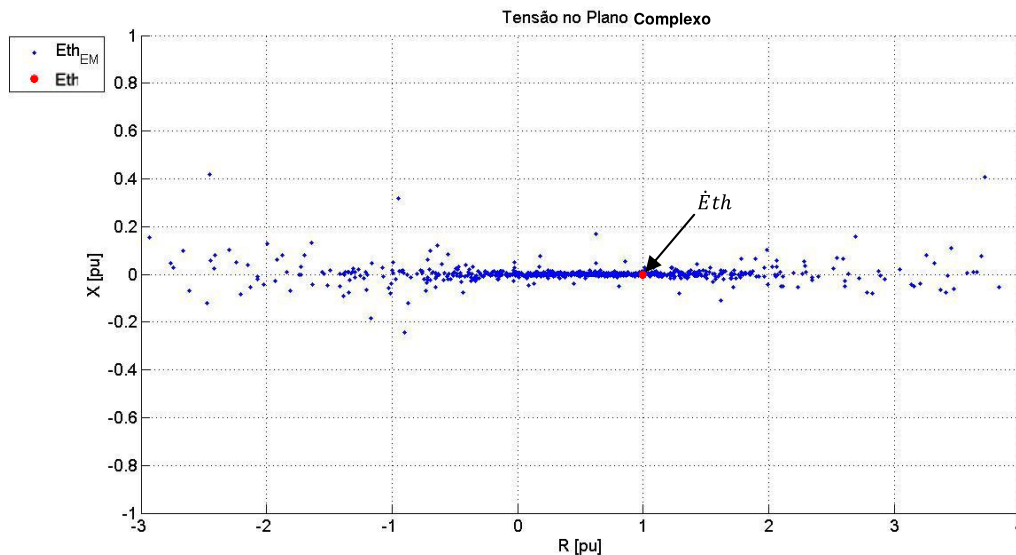


Figura 3.23 – Tensões no plano complexo para o caso 3.1.

Já no que se refere ao comportamento da impedância, nota-se, pela Figura 3.24, que a resposta do EM em módulo se distribui de forma muito dispersa, assim como observado na tensão. O ângulo possui distribuição predominantemente em duas regiões: uma próxima aos ângulos de \bar{Z}_c e de $\bar{Z}th$ e outra próxima ao negativo do suplementar do ângulo de \bar{Z}_c ($-125,0^\circ$), como observado anteriormente no caso 1.1.

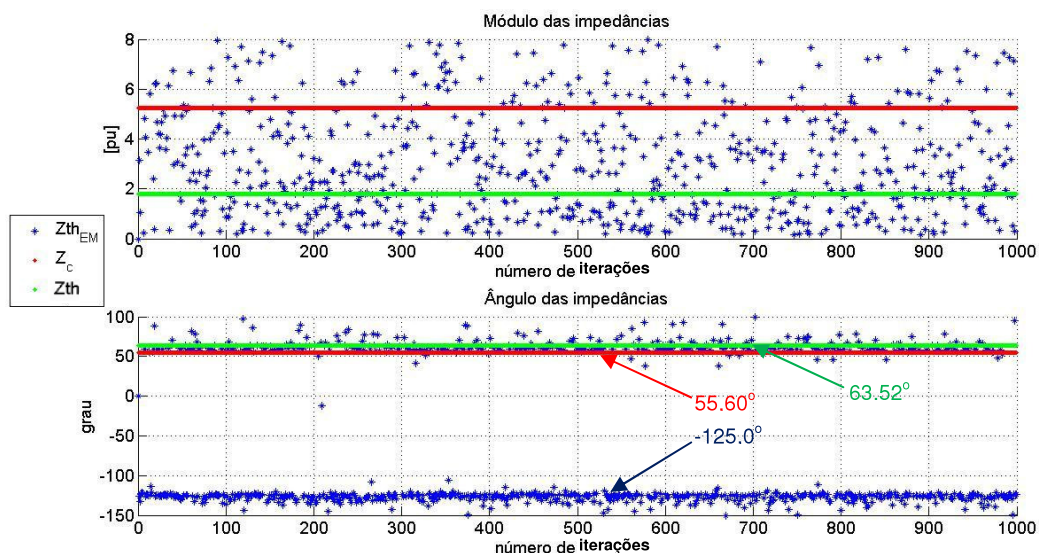


Figura 3.24 – Evolução da $\bar{Z}th_{EM}$, da $\bar{Z}th$ e da \bar{Z}_c para o caso 3.1.

No plano RX, ilustrado pela Figura 3.25, a resposta em impedância $\bar{Z}th_{EM}$ também apresenta distribuição em uma região que pode ser representada por uma reta, que possui como coordenada $\bar{Z}th$.

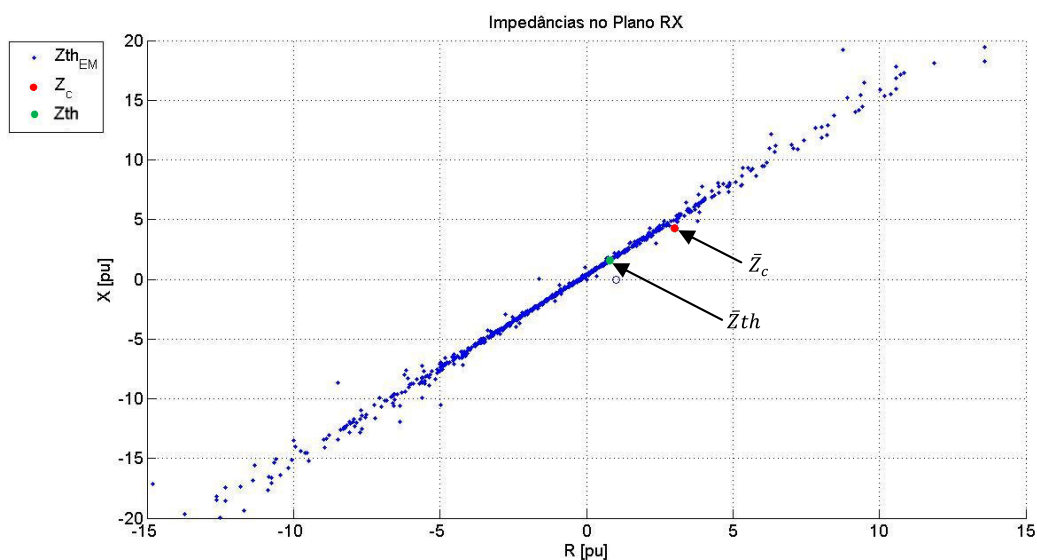


Figura 3.25 – Impedâncias no plano RX para o caso 3.1.

Um fato de destaque está na divergência na distribuição dos parâmetros do EM para o caso 3.1 que, mesmo podendo ser representado por uma reta, tanto para tensão quando para impedância no plano RX, possui variações consideráveis em relação ao ponto pretendido. Cabe lembrar que neste caso as variações sistêmicas são mais expressivas que as variações na carga.

Prosseguindo nas análises, o caso 3.2 consiste em aplicar uma variação de $\pm 0,2\%$ na carga e de $\pm 0,1 \cdot 10^{-2}\%$ na impedância de Thévenin, como no caso 2.3. Lembra-se que suas respectivas resistências oscilam entre $\pm 0,2 \cdot 10^{-2}\%$ e $\pm 0,1 \cdot 10^{-4}\%$ em

relação às suas parcelas reativas. Nota-se ainda que, neste caso, diferentemente do caso 3.1, as variações na carga são mais expressivas que as aplicadas ao sistema.

A Figura 3.26 ilustra o comportamento das tensões. Nota-se que a região de maior incidência da $\dot{E}th_{EM}$ é próxima de $\dot{E}th$. O intervalo com maior concentração da $\dot{E}th$ em módulo encontra-se entre 0,95 e 1,05 pu, com ângulo compreendido entre $\pm 0,02^\circ$, podendo ser reduzido em função do número de soluções nas proximidades do valor pretendido.

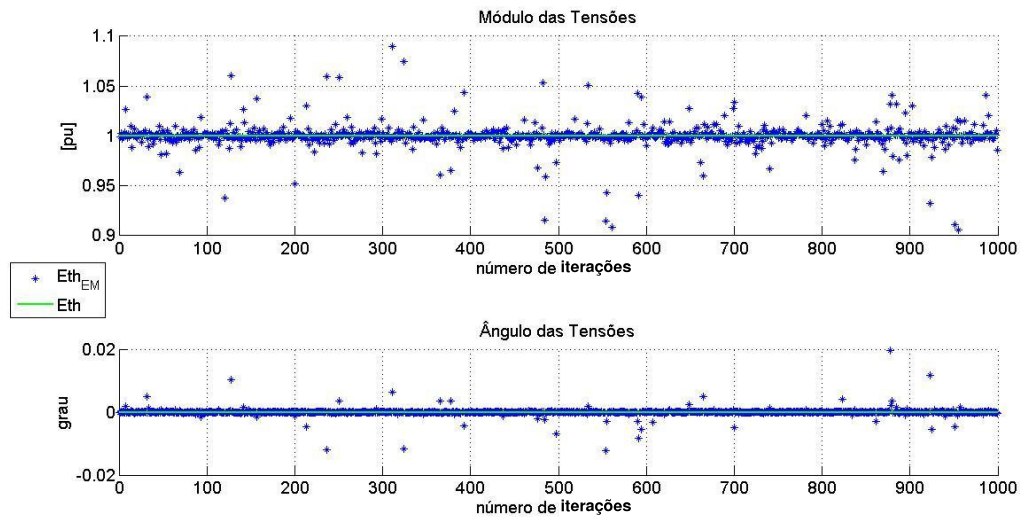


Figura 3.26 – Evolução da $\dot{E}th_{EM}$ e da $\dot{E}th$ para o caso 3.2.

Facilitando a visualização do foco da resposta em tensão do EM, a Figura 3.27 ilustra seu comportamento no plano complexo. Observa-se que as oscilações predominantes da mesma são muito próximas de $\dot{E}th$, visto que a ordem de grandeza do eixo X da figura é de 10^{-3} .

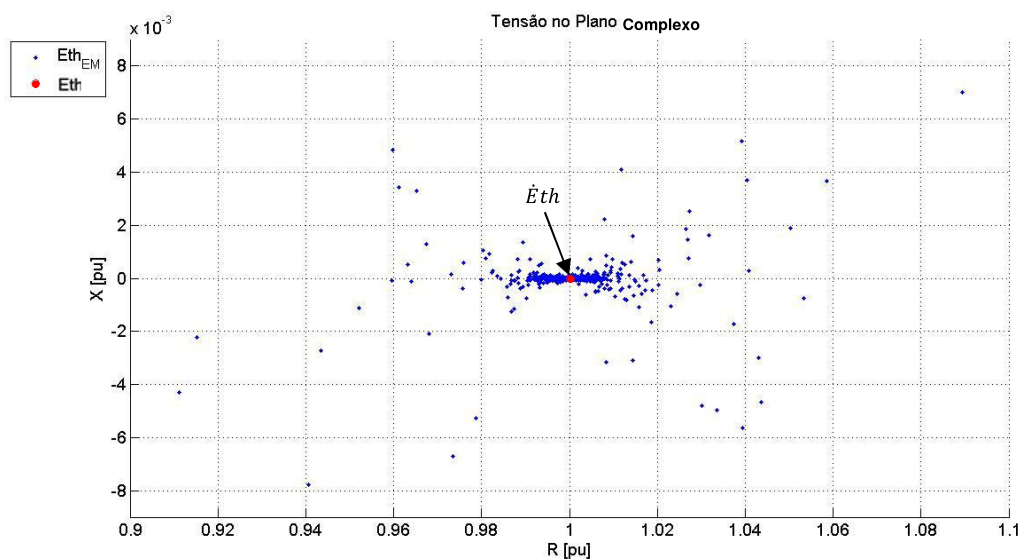


Figura 3.27 – Tensões no plano complexo para o caso 3.2.

Na Figura 3.28 é apresentada a evolução das impedâncias envolvidas. Verifica-se que a resposta do EM consiste em uma boa aproximação de \bar{Z}_{th} , somente em alguns casos isolados houve uma discrepância maior. Esta observação aplica-se ao módulo e ao ângulo de $\bar{Z}_{th_{EM}}$.

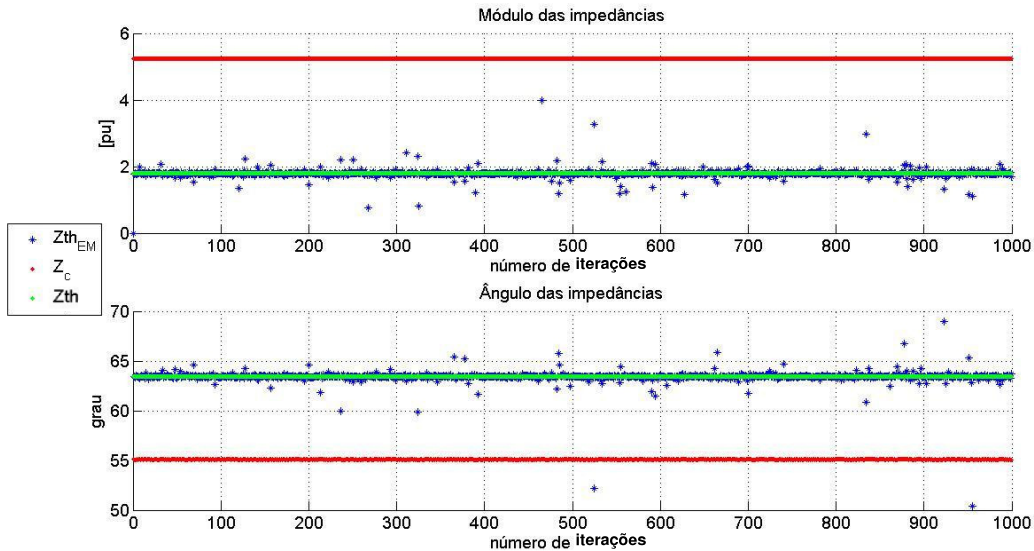


Figura 3.28 – Evolução da $\bar{Z}_{th_{EM}}$, da \bar{Z}_{th} e da \bar{Z}_c para o caso 3.2.

Na Figura 3.29 é apresentado o comportamento de $\bar{Z}_{th_{EM}}$ no plano RX, visando facilitar a visualização da região de concentração das soluções. Nesta figura é possível verificar que esta região pode ser representada, assim como no caso 3.1, através de uma reta.

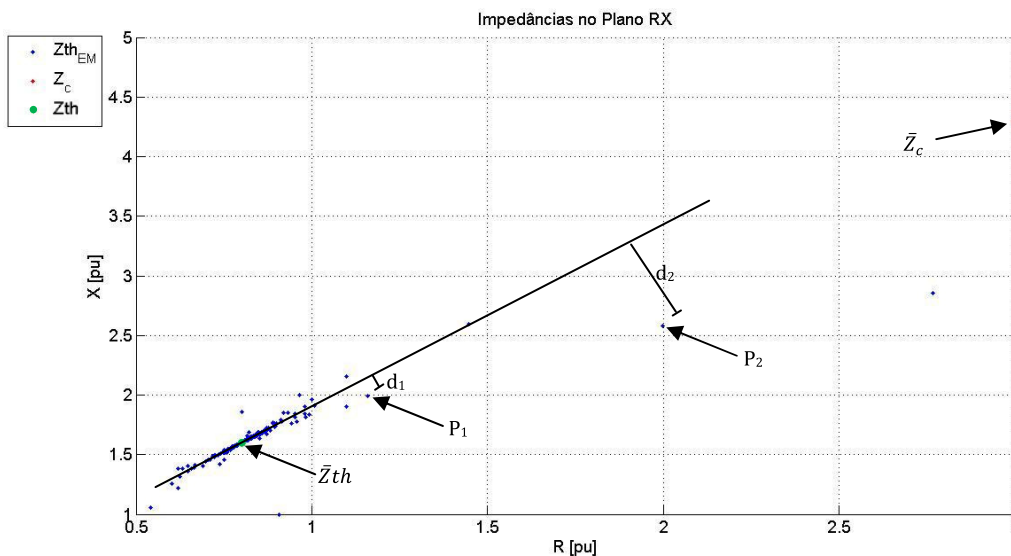


Figura 3.29 – Impedâncias no plano RX para o caso 3.2.

Outro fato interessante é o aumento na distância entre a reta imaginária e a resposta, quando a mesma afasta-se da impedância pretendida. Tomando os pontos denominados P_1 e P_2 como exemplo, verifica-se que d_2 é maior que d_1 , pois P_1 encontra-se mais próximo de \bar{Z}_{th} quando comparado a P_2 , confirmando a afirmação.

3.6. Observações e Conclusões Sobre a Análise de Sensibilidade

A explicação para o comportamento da resposta do EM nos diferentes casos simulados pode ser fundamentada na teoria de sistemas lineares. Para encontrar os parâmetros do equivalente, é adotado um sistema linear matricial quadridimensional, onde a solução é o ponto de encontro das retas formadas por suas equações.

Relembrando o cenário criado para a análise dos casos 1.1, 1.2 e 1.3, tem-se que a impedância da carga, \bar{Z}_c , é mantida com pequenas variações, já a impedância do sistema, \bar{Z}_{th} , é mantida em maiores proporções. Como a solução do sistema linear se estabelece em termos de impedância e tensão, $\bar{Z}_{th_{EM}}$ e $\dot{E}_{th_{EM}}$, o ponto comum entre as iterações destas simulações é próximo da carga, explicando o porquê do módulo da impedância do equivalente oscilar próximo do módulo da carga.

Já para explicar as diferenças angulares, faz-se necessária uma análise do circuito da Figura 3.30 (similar ao da Figura 3.1). O sentido da corrente proveniente da barra é oposto à região onde se encontram os parâmetros a serem calculados (\bar{Z}_{th} e \dot{E}_{th}). Assim, o uso do EM implica considerar que a impedância a ser encontrada situa-se no lado oposto ao da carga ou ao sentido da corrente. Então neste cenário o ponto comum do sistema é o negativo do vetor carga.

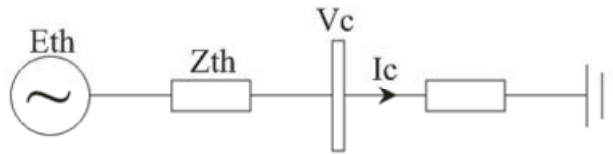


Figura 3.30 – Circuito equivalente de Thévenin.

A Figura 3.31 representa vetorialmente a carga e a região de oscilação da solução, onde α é o ângulo da carga, $\theta = 180^\circ + \alpha$ e $|x^1|$, $|y^1|$ são as coordenadas dos vetores \bar{Z}_c e $\bar{Z}_{th_{EM}}$, facilitando a visualização da região de resposta do EM.

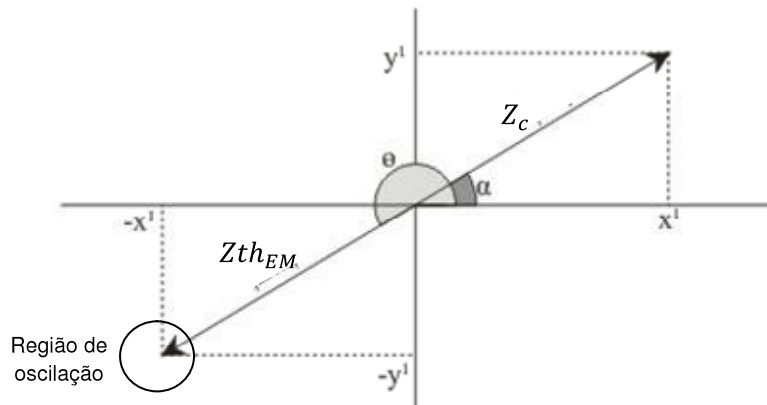


Figura 3.31 – \bar{Z}_c e $\bar{Z}_{th_{EM}}$ na forma vetorial.

Para compreender os valores de tensão encontrados, uma análise numérica da equação de tensão do equivalente, descrita em (3.14), pode ser utilizada.

$$\dot{E}th = \dot{I}_c(\bar{Z}_c + \bar{Z}th) \quad (3.14)$$

Substituindo os valores de $\bar{Z}th$ e \bar{Z}_c , conforme Figura 3.31 em (3.14), tem-se (3.15).

$$\dot{E}th = \dot{I}_c(x^1 + y^1i - x^1 - y^1i) \quad (3.15)$$

Como $(x^1 + y^1i - x^1 - y^1i)$ sempre será igual a zero, então, conforme (3.15) tem-se (3.16).

$$\dot{E}th = \dot{I}_c(0) = 0 \quad (3.16)$$

Sendo assim, para qualquer valor de corrente do circuito, a tensão do equivalente será próxima ou até mesmo zero.

Quanto aos casos 2.1, 2.2 e 2.3, a diferença básica destes, com relação aos casos 1.1, 1.2 e 1.3, está na impedância que detém a maior oscilação. Para os casos descritos em 2, esta impedância é a da carga e, para os descritos em 1, é a do sistema. Logo, para estes casos, a região com menor variação é a dos parâmetros do equivalente de Thévenin pretendida, justificando a proximidade da solução do sistema linear a esta região.

As análises dos casos 1.1, 1.2 e 1.3 informam que, nas variações sistêmicas superiores às variações da carga, a solução matemática do EM leva a uma solução inconsistente com o comportamento esperado do sistema elétrico.

Já para os casos 2.1, 2.2 e 2.3, nota-se que, quando as variações sistêmicas são inferiores às observadas na carga, a solução matemática do EM leva a uma boa aproximação dos parâmetros do equivalente.

Um modo de detectar a inconsistência matemática citada é observar a tensão do equivalente que, partindo de um sistema em regime de operação normal, o menor valor que poderia ser observado para tal grandeza, em módulo, é a tensão na carga, tratando-se de um sistema com características indutivas. Sendo assim, medições que possuem como resposta uma tensão do equivalente menor que a tensão na barra de carga deveriam ser desconsideradas ou tratadas para não contaminarem os resultados.

Outro modo de detectar inconsistência dos resultados é analisando o comportamento da relação corrente/tensão. Para sistemas com característica de carga indutiva, um aumento de corrente deveria ser acompanhado de uma diminuição da tensão e, para uma diminuição da corrente, haveria um aumento da tensão.

Conforme observado na evolução dos casos de 1.1 ao 2.3, na resposta do EM, verifica-se uma mudança no foco de convergência quando as maiores variações alternam-se entre a carga e o sistema. Logo, duas conclusões podem definir o comportamento do EM: **(i) quando as variações sistêmicas superam as variações na**

carga, a solução do equivalente converge para o negativo da impedância da carga e sua tensão a zero; (ii) quando a carga é detentora das maiores variações, os parâmetros do equivalente convergem para os parâmetros do equivalente pretendido do sistema.

3.7. Aplicação do Equivalente Usando Dados Provenientes de Medições

Neste item são apresentados os resultados da aplicação do equivalente EM quando são utilizados dados provenientes de medição.

As medições utilizadas se referem à subestação Montes Claros 2 (MCLAR2), de 345 kV, cedidas pela CEMIG. A Figura 3.32 mostra suas conexões: duas linhas de transmissão, conectando-a à subestação de Várzea da Palma 1 (MCLAR2-VPAL1) e à Irapé (MCLAR2-IRAPE) e três transformadores de 345 / 138 kV (MCLAR2-T003P, MCLAR2-T004P e MCLAR2-T005P).

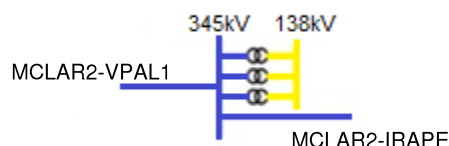


Figura 3.32 – Diagrama unifilar da barra da MCLAR2.

Nota-se que a barra relativa a Montes Claros 2 não possui carga definida, fazendo-se necessária a utilização das metodologias propostas em [Ribeiro, 2011], reescritas no item 3.4.

A Figura 3.33 apresenta as medições de um dia utilizadas para as análises do EM. Cabe salientar que estas medições ainda não são provenientes do SMFS, mas sim do centro operacional da concessionária responsável pela operação da subestação MCLAR2. A taxa de amostragem é de um fasor por minuto, onde o ângulo deste fasor é calculado pelo estimador de estados, ou seja, as medições contêm módulo medido e ângulo estimado.

Na análise da Figura 3.33 identificam-se pequenas variações de tensão entre medições consecutivas que ao longo do dia mantêm-se entre 335 e 355 kV, e, portanto, dentro da faixa operativa (0,90 a 1,10 pu).

No que diz respeito às correntes do barramento observa-se que: as corrente que fluem pelos três trafos possuem comportamentos muito similares, principalmente o T005P e o T004P que possuem correntes praticamente iguais. Já as correntes das linhas para VPAL1 e IRAPE distinguem-se das correntes dos transformadores. Além disto, próximo aos 600 minutos há uma grande variação em ambas as correntes destas linhas, onde a linha MCLAR2-IRAPE passa a possuir módulo superior a todas as demais correntes na barra e a linha MCLAR2-VAL1 mantêm-se em níveis muito próximo aos das correntes dos transformadores.

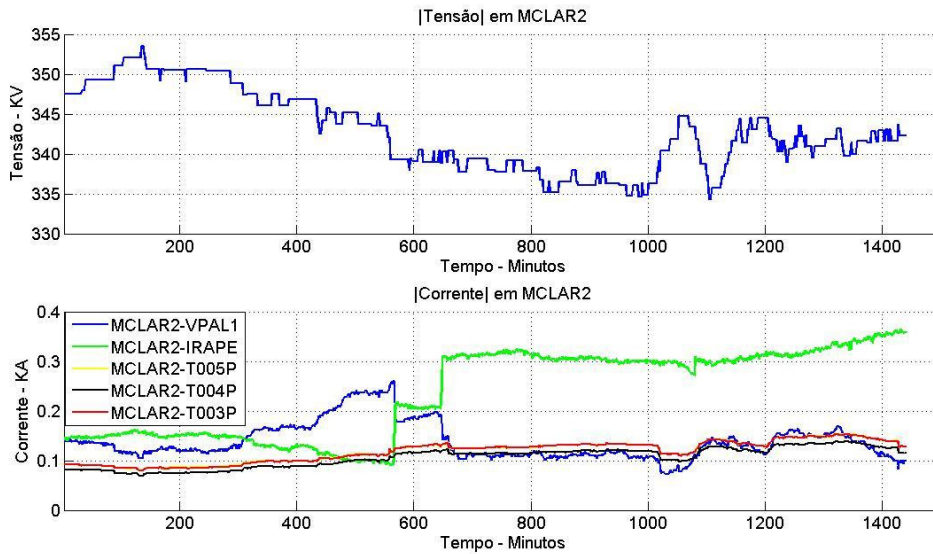


Figura 3.33 – Evolução da tensão e da corrente em cada ramo da barra.

A Figura 3.34 ilustra o módulo e o ângulo de $\dot{E}th_{EM}$ para as duas metodologias de identificação de carga (M1 e M2) para a subestação de MCLAR2. Observa-se que há uma grande divergência na resposta para ambos os métodos, tanto em módulo quanto em ângulo, em virtude da diferença nos cálculos para identificação da potência de carga dos mesmos.

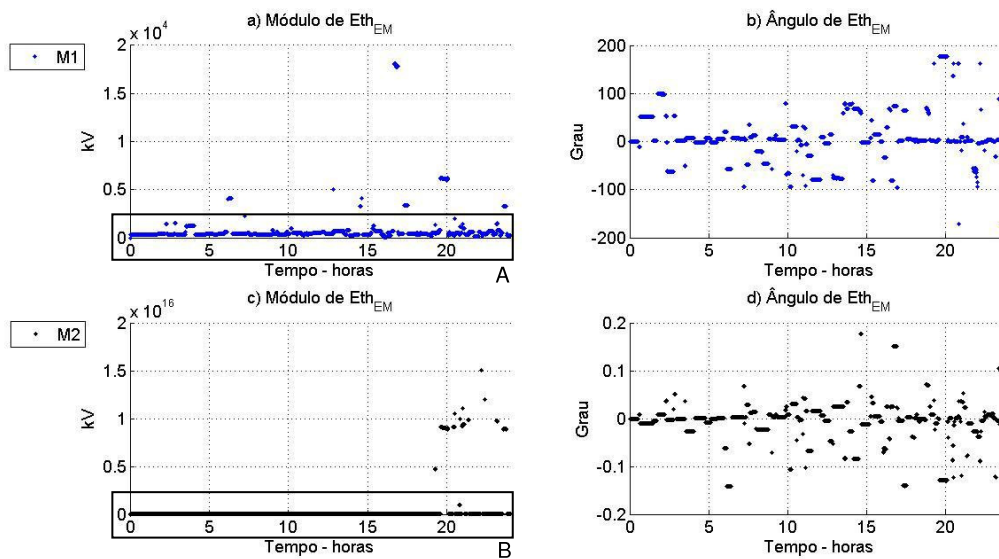


Figura 3.34 – Evolução da $\dot{E}th_{EM}$ para M1 e M2 no tempo.

Ainda em análise da Figura 3.34, nota-se que, próximo das 20h em (c) a resposta do EM utilizando M2 é dada na ordem de 10^{16} kV e em (a) entre 15h e 20h encontram-se tensões na ordem de 10^4 kV para M1, ou seja, valores totalmente inconsistentes com o observado no SEP, levando-se em consideração a tensão nominal e os limites operacionais permitidos para a geração.

Apesar das afirmações a região de maior incidência de soluções para M1 e M2, ilustrada na Figura 3.34, está respectivamente compreendida nas regiões “A” e “B”.

Ampliando estas regiões, conforme ilustrado na Figura 3.35, considerando somente o intervalo de tensão que representa os limites operacionais típicos das fontes geradoras (0,90 a 1,10 pu), onde a tensão base é a tensão nominal, nota-se que não existe uma continuidade na resposta do EM tanto para M1 quanto para M2, sendo que para M2 o intervalo de 10h às 20h é o mais crítico.

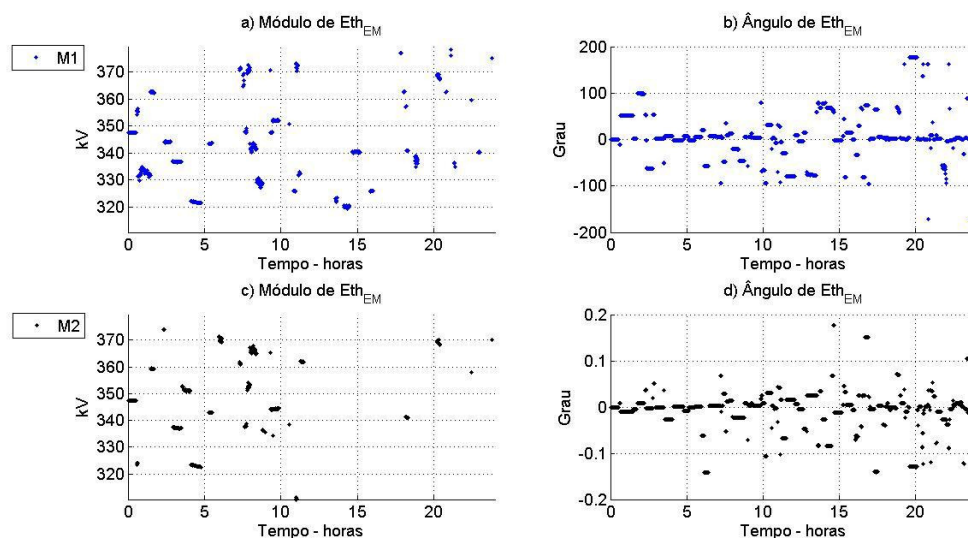


Figura 3.35 – Evolução da $\dot{E}th_{EM}$ para M1 e M2 no tempo. Ampliação de “A” e “B” da Figura 3.34.

Como o comportamento do sistema observado nas medições de corrente e tensão ilustrado na Figura 3.33 caracteriza uma situação de operação normal sem grandes alterações durante o intervalo de tempo em questão, as discontinuidades apresentadas em $\dot{E}th_{EM}$ para M1 e M2 não correspondem ao comportamento elétrico do SEP.

Convém observar que o fato dos resultados se apresentarem tão diferentes daqueles obtidos em ambientes simulados por fluxo de potência, aliado à investigação para identificar suas causas e possíveis soluções, foi fundamental para a elaboração da proposta desta dissertação.

Ainda em relação à Figura 3.35, é possível identificar que o ângulo de $\dot{E}th_{EM}$ para M1 (b) possui oscilações entre $\pm 200^\circ$, denotando maiores variações quando comparadas às de M2 (d) que estão compreendidas entre $\pm 0,1^\circ$. Porém, em ambos os métodos pode-se considerar que a região de maior concentração de soluções está compreendida nas proximidades de 0° .

Na Figura 3.36, são ilustradas $\dot{E}th_{EM}$ no plano complexo, mostrando a diferença nas respostas para M1 e M2. Como existem valores muito elevados para M2, conforme constatado na Figura 3.35, não é possível visualizar os pontos pertencentes a M1.

Ampliando a área “A” destacada na Figura 3.36 e representada na Figura 3.37, torna-se visível a diferença entre as tensões para os dois métodos.

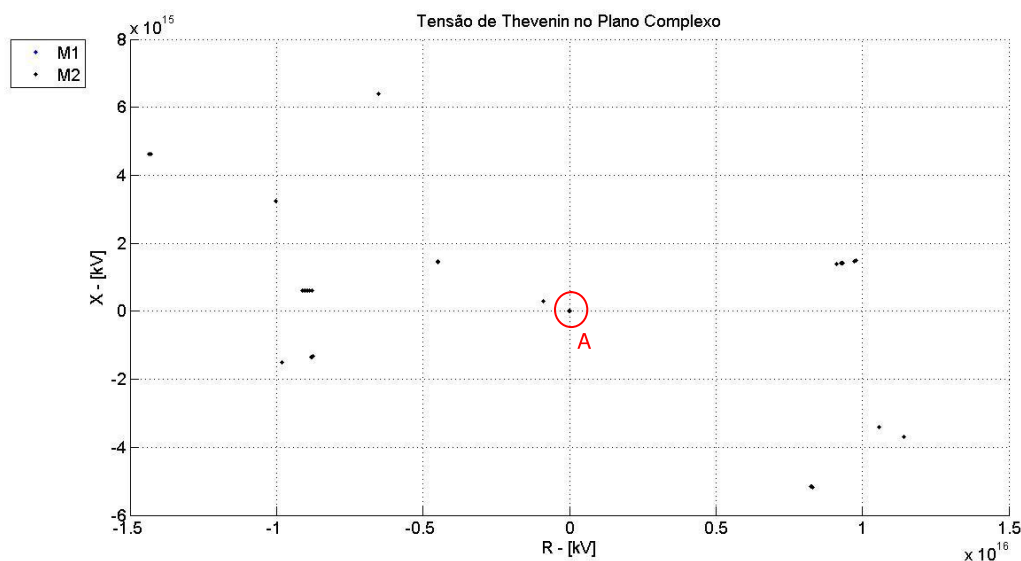


Figura 3.36 – $\hat{E}th_{EM}$ para M1 e M2 no plano complexo.

Pela Figura 3.37, percebe-se que a distribuição dos pontos para M1 e M2 possui predominantemente soluções compreendidas pela região “B”. Nota-se que os pontos determinados nas zonas R1 e R2 lembram uma distribuição linear, assim como observado no caso teste 3, indicando variações reativas de maior proporção nas impedâncias do sistema e da carga.

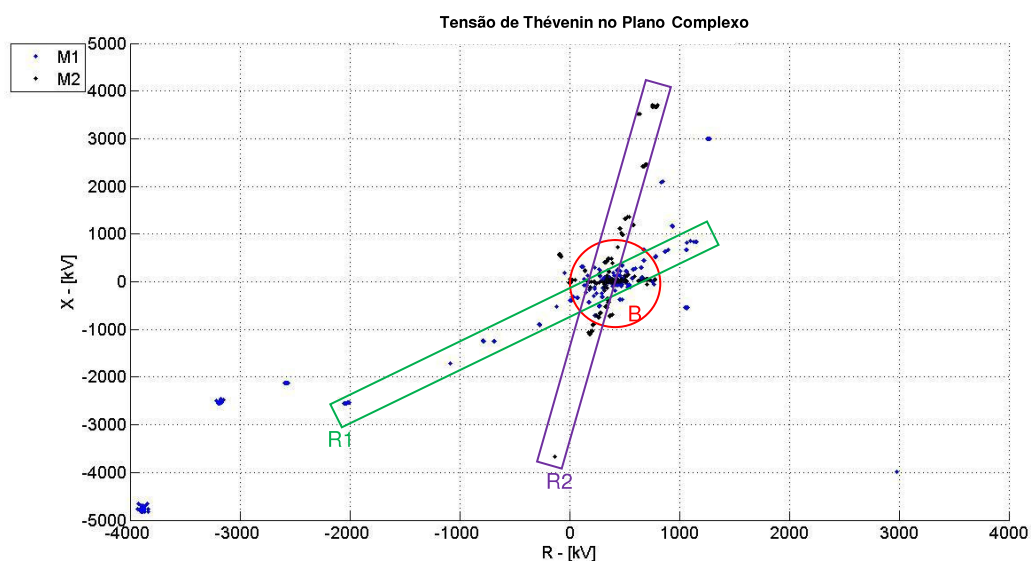


Figura 3.37 – $\hat{E}th_{EM}$ para M1 e M2 no plano complexo.
Ampliação de “A” da Figura 3.36.

Ainda em análise da Figura 3.37 os níveis de tensão apresentam-se muito superiores à tensão nominal do circuito. Buscando a resposta do EM dentro das faixas operativas aceitáveis, a Figura 3.38 apresenta uma ampliação da região “B”. Nesta figura também está destacada a região operativa delimitada pelos níveis de tensão aceitáveis para uma geração do SEP, onde a tensão máxima seria de 379,5 kV e a mínima de 310,5 kV (0,90 a 1,10 pu).

Outro fato importante que pode ser observado é a distribuição da resposta do EM que, diferente do visto na Figura 3.37, apresenta-se desordenada no espaço, como no caso teste 2, onde consideram-se variações no fator de potência.

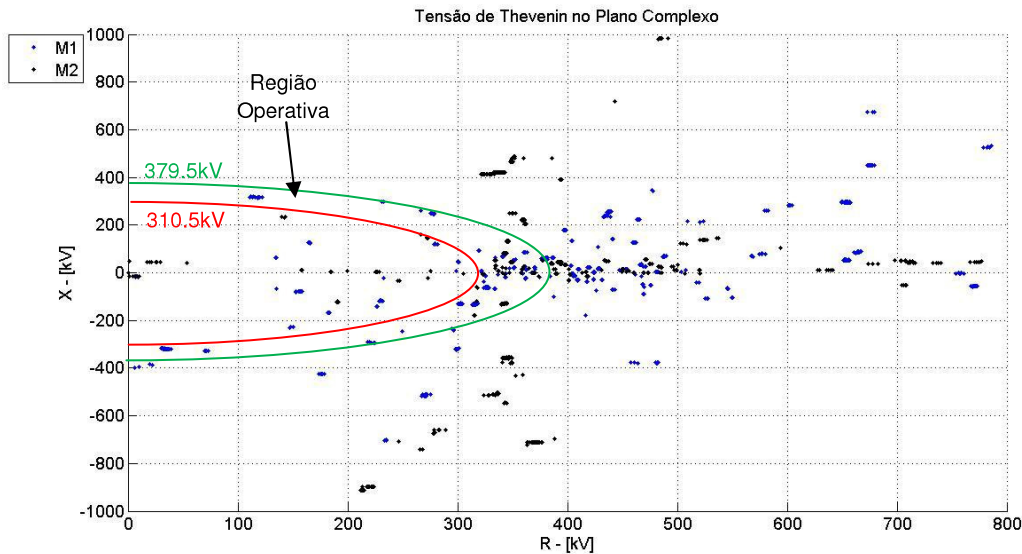


Figura 3.38 – $\dot{E}th_{EM}$ para M1 e M2 no plano complexo. Ampliação de “B” da Figura 3.37.

Nota-se que, conforme identificado nos casos testes, quando há variações sistêmicas, os parâmetros calculados pelo EM, para alguns conjuntos de medições, não refletem o comportamento elétrico do SEP, ou seja, a solução matemática não corresponde ao esperado. Sendo assim, a distribuição da solução no plano denota a existência de regiões de convergências que variam conforme a “qualidade” da medição.

O termo “qualidade” aqui refere-se ao comportamento da tensão em relação à corrente. Medições com boa qualidade são aquelas que refletem situações de alterações de carga, ou seja, quando a corrente da carga indutiva aumenta, a tensão diminui ou quando a corrente da carga indutiva diminui a tensão aumenta.

A Figura 3.39 ilustra a evolução de $\bar{Z}th_{EM}$ no tempo. Observa-se mais uma vez uma descontinuidade em módulo e ângulo para M1 e M2, assim como na tensão. Seus valores em módulo ((a) e (c)) são da ordem de 10^4 para M1 e de 10^{16} para M2. Já as oscilações presentes em seus respectivos ângulos ((b) e (d)) estão compreendidas entre o mesmo intervalo de $\pm 200^\circ$ e possuem características similares. Cabe salientar que as impedâncias com ângulos fora do intervalo de $\pm 90^\circ$ apresentam resistência negativa.

Assim como em $\dot{E}th_{EM}$, os instantes de tempo crítico para M2 encontram-se nas proximidades das 20h.

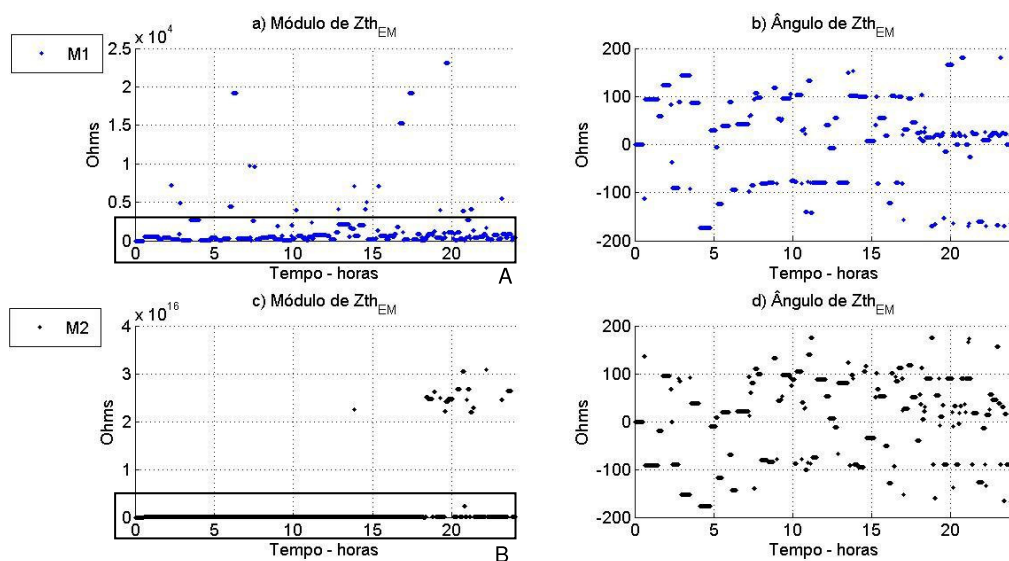


Figura 3.39 – Evolução da $\bar{Z}th_{EM}$ para M1 e M2 no tempo.

Para uma melhor análise do comportamento de $\bar{Z}th_{EM}$ nas regiões de maior concentração de soluções (“A” e “B” da Figura 3.39), é apresentada a Figura 3.40 que ilustra uma ampliação de tais regiões. Todos os valores estão compreendidos entre 0 e 1 k Ω , mas mesmo com a alteração da escala, nota-se uma grande variação em $\bar{Z}th_{EM}$ como observado em $\dot{E}th_{EM}$. E, mais uma vez, a resposta do EM para M1 e M2 não condiz com a característica do comportamento da barra observada nas medições.

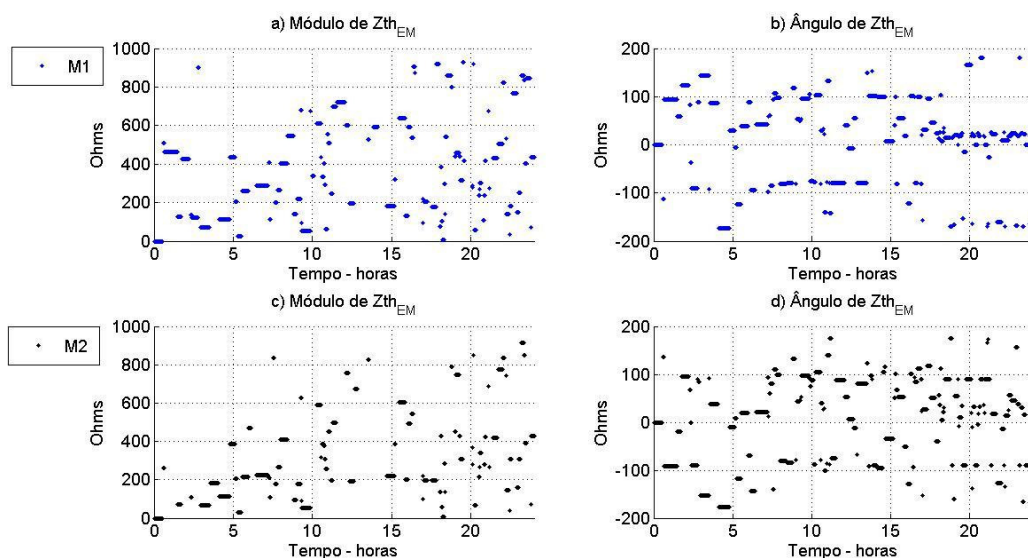


Figura 3.40 – Evolução da $\bar{Z}th_{EM}$ para M1 e M2 no tempo.
Ampliação de “A” e “B” da Figura 3.39.

A Figura 3.41 ilustra $\bar{Z}th_{EM}$ sob outra visão, e, mais uma vez, os valores calculados com o EM são elevados para M2, impossibilitando a visualização da região de maior convergência (região “A”), e até mesmo todas as impedâncias calculadas com M1.

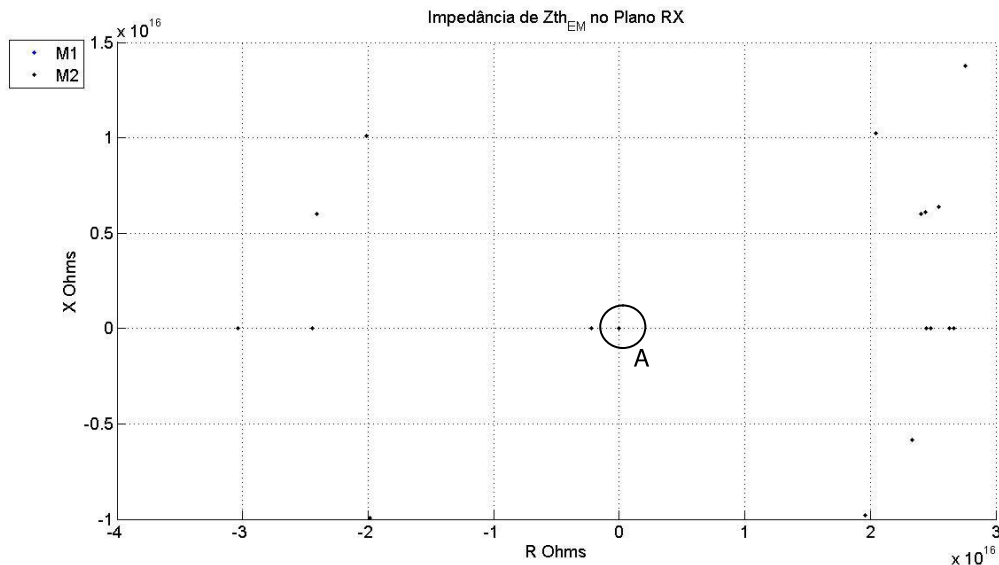


Figura 3.41 – $\bar{Z}th_{EM}$ para M1 e M2 no plano RX.

É apresentada na Figura 3.42 a ampliação da região “A”, tornando assim, visível a região de interesse. Pode-se dividir esta figura em duas regiões, sendo que a primeira compreende os valores resistivos menores que zero e a segunda, os valores resistivos maiores ou iguais a zero.

Levando-se em conta que o sentido da corrente fonte/carga é estabelecido de maneira adequada por M1 e/ou M2, a primeira região da figura não compreende soluções aceitáveis para impedância, pois apresentam resistências menores que zero. Sendo assim, somente a segunda região abrange soluções satisfatórias para o sistema elétrico.

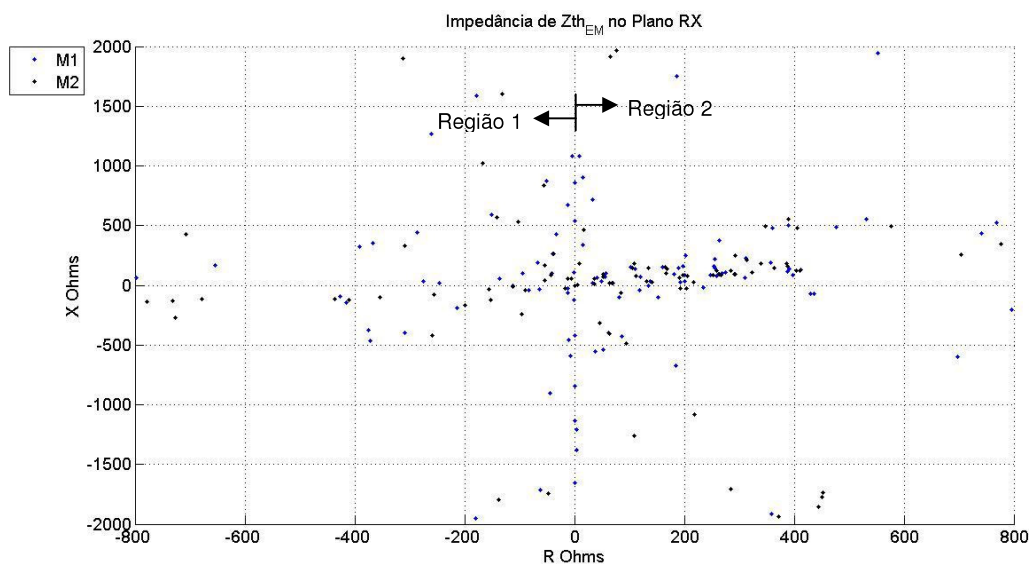


Figura 3.42 – $\bar{Z}th_{EM}$ para M1 e M2 no plano RX.
Ampliação de “A” da Figura 3.41.

Tudo indica que as variações verificadas nestas simulações são provocadas pela sensibilidade do EM às medições, que trazem consigo variações sistêmicas e, também, podem estar contaminadas por erros, uma vez que não foi desenvolvido para

trabalhar com estes fatores presentes em medições. Nos trabalhos anteriores, [Silva, 2010] e [Ribeiro, 2011], onde os dados de entrada do equivalente foram obtidos com simulações de fluxo de potência, ou seja, sem a presença de erros nas medições, não se observam tais oscilações numéricas no EM.

3.8. Seleção do Método para Estimação dos Parâmetros de Thévenin na Presença de Ruídos nas Medições

Os dados provenientes de medições podem estar contaminados por diferentes tipos de erros. Dentre eles encontra-se o erro do tipo ruído, relacionado à incerteza dos valores provenientes de medição. Ele está sempre presente nos valores medidos e é, normalmente, filtrado por técnicas de estimação.

Na determinação do equivalente da rede em tempo real, este erro, mesmo não sendo muito elevado, pode causar resultados inconsistentes e precisa ser tratado, conforme já identificado em [Martins, 2012].

Os estimadores constituem um método para tratamento de dados muito utilizado nas pesquisas e desenvolvimento em diversas áreas da ciência e tecnologia. [Aguirre, 2007] constitui uma boa referência para o aprofundamento no conhecimento do uso de estimadores. É importante salientar que, dentre os vários métodos, o mais difundido é conhecido como Estimador de Mínimos Quadrados (MQ), e suas derivações como o Estimador Estendido de Mínimos Quadrados (EMQ) e o Estimador de Mínimos Quadrados Totais (MQT). No anexo A é realizada uma breve descrição destes três estimadores.

A diferença básica entre estes três estimadores está no tipo de ruído que objetiva-se tratar em cada um deles. O MQ tem como objetivo principal o tratamento do ruído presente na saída do estimador; o EMQ visa o tratamento do ruído presente na saída e do ruído correlacionado à saída; o MQT visa o tratamento do ruído na entrada e na saída do estimador.

No contexto desta dissertação, a modelagem destes estimadores de MQ consiste em uma evolução do equacionamento proposto em [Vu, 1999a], visando o tratamento do erro do tipo ruído.

Segundo [Martins, 2012], os resultados da aplicação dos filtros em medições trazem grandes ganhos para a confiabilidade da resposta do equivalente. As diferenças nas respostas do MQ, EMQ e MQT em medições do SEP denotam a presença predominantemente de ruídos na saída do sistema de equações, visto que as curvas descritas pelos estimadores possuem características semelhantes em todo o instante de tempo, conforme observado na Figura 3.43.

Na Figura 3.43, é apresentada a evolução das impedâncias calculadas pelos estimadores quando são utilizadas as medições de Montes Claros 2. Em [Martins, 2012] são apresentados resultados de simulação em outros sistemas, com conjuntos diferentes de medições.

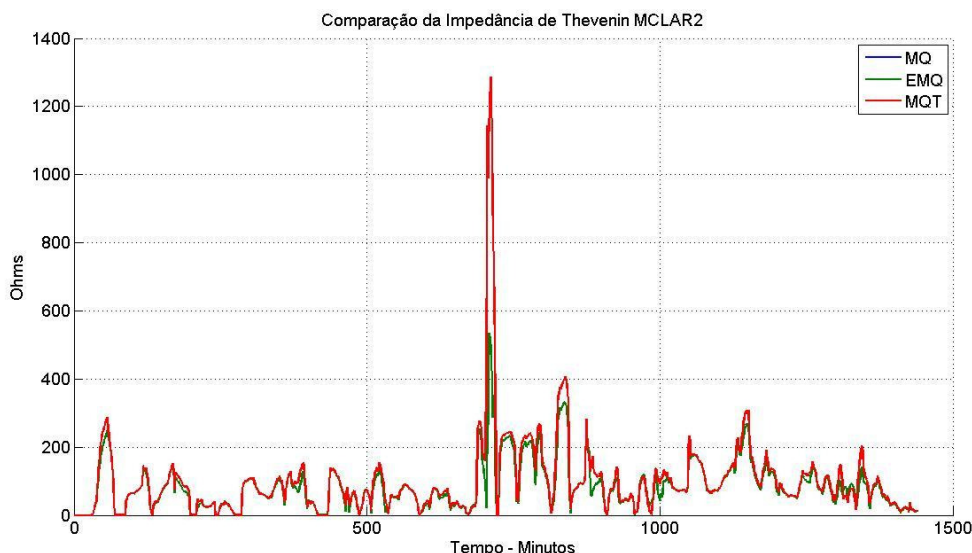


Figura 3.43 – Evolução de \bar{Z}_{th} para MQ, EMQ e MQT no tempo.
Fonte: [Relatório, 2012].

Torna-se injustificável a utilização de estimadores mais “s sofisticados”, como é o caso do MQT, tendo em vista o esforço computacional para a implementação de tal algoritmo. Como o MQ possui o algoritmo mais simples e, conseqüentemente, exige o menor esforço computacional, proporcionando ganhos tão satisfatórios quanto os demais estimadores, este foi selecionado para ser utilizado na determinação do equivalente da rede. Logo, a questão levantada anteriormente, referente aos ruídos presentes em medições, fica tratada.

Nota-se, contudo, que, mesmo com o drástico amortecimento da resposta proporcionada pelo MQ observada pela análise conjunta das Figuras 3.39 e 3.43, as variações abruptas presentes em $\bar{Z}_{th_{MQ}}^5$, como visto na Figura 3.43 para MCLAR2, ainda não podem ser justificadas através da análise do comportamento do SEP expresso pelas medições.

Portanto, faz-se necessário o tratamento da sensibilidade do método com respeito às outras questões levantadas anteriormente: tratamento frente a pequenas variações de tensão e corrente devidas à proximidade no intervalo de tempo entre as medições; tratamento na “qualidade” da resposta frente ao comportamento da relação tensão/corrente.

3.9. Considerações Finais

Os estudos apresentados neste capítulo mostram as respostas do algoritmo proposto por Vu, em situações operativas onde sua premissa básica – parâmetros do equivalente ($\dot{E}_{th_{EM}}$ e $\bar{Z}_{th_{EM}}$) constantes entre medições consecutivas – não é verificada. Esta análise de sensibilidade é importante, pois, mesmo com uma coleta de dados em estampas de tempo muito pequenas como as do SMFS, a mudança de estado do sistema pode ser significativa entre as medições.

⁵ Neste texto o subscrito “MQ” representa as grandezas calculadas utilizando o MQ

Os resultados mostraram que, considerando o ambiente de medição, novas questões se apresentam e precisam ser tratadas, para que os equivalentes possam representar a rede na previsão de instabilidade de tensão do SEP.

As questões que trazem impactos diretos na qualidade e confiabilidade nos resultados do equivalente podem ser assim identificadas:

- (i) Tratamento do erro do tipo ruído presente nas medições;
- (ii) Tratamento do efeito das alterações sistêmicas no equivalente;
- (iii) Tratamento da “qualidade” das medições referente ao comportamento tensão/corrente na barra de carga.

Com relação à questão (i), esta é tratada por meio do uso do Estimador dos Mínimos Quadrados. Já a consideração das outras questões na construção do equivalente não se mostrou uma tarefa trivial, constituindo assim o principal desafio desta dissertação na composição da metodologia proposta no próximo capítulo, o **Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados**.

4. Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados – *Proposta de Equivalente para Aplicação em Tempo Real*

4.1. Considerações Iniciais

O objetivo principal deste capítulo é descrever as metodologias desenvolvidas no decorrer do trabalho, com o intuito de melhorar a estimação dos parâmetros de Thévenin para operação em tempo real do SEP utilizando como filosofia básica o trabalho apresentado em [Vu, 1999a], e apresentar o Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados.

Os desenvolvimentos buscam tratar os ruídos e a sensibilidade presente no método de obtenção do equivalente proposto por Vu. Nesta direção, desenvolveram-se seis metodologias, que representam cronologicamente a evolução das pesquisas realizadas e o volume de conhecimento adquirido com o aprofundamento dos estudos. As metodologias vão evoluindo no tempo, justificando a forte ligação entre elas.

As metodologias desenvolvidas são denominadas:

1. Aproximação Polinomial das Medições – APM;
2. Aproximação Polinomial da Impedância – APZ;
3. Equivalente Ponderado – E&P;
4. Mínimos Quadrados e Ponderados – MQ&P₀;
5. MQ&P₀ com Correção no Ângulo da Impedância Equivalente – MQ&P₁;
6. MQ&P₁ com Correção no Módulo da Tensão Equivalente – MQ&P₂.

Podem-se classificar em dois grupos distintos as metodologias. O primeiro grupo representa o início dos estudos. Nesta etapa, busca-se o acompanhamento da tendência do sistema através das medições ou até mesmo da impedância de Thévenin com métodos de aproximação. Neste grupo se inserem as metodologias um e dois.

Já as metodologias de três a seis inserem-se no grupo que surge com o aprofundamento no conhecimento do comportamento do EM, visando o desenvolvimento de filosofias que tratem de forma peculiar as influências dos diversos

momentos de operação dos SEP no EM. Estes desenvolvimentos foram se somando ao longo da pesquisa culminando na metodologia seis, a mais refinada.

Nos itens que se seguem, cada metodologia é descrita e analisada.

4.2. Aproximação Polinomial das Medições – APM

O equivalente pelo método de Aproximação Polinomial das Medições (APM) consiste em adicionar ao EM mais uma etapa, denominada aproximação, onde é realizada uma interpolação polinomial de grau um, através de uma aproximação de mínimos quadrados⁶ utilizando a matriz de Vandermonde, no módulo e no ângulo da tensão e corrente equivalente, a fim de amenizar os efeitos dos ruídos presentes nestas grandezas.

Na Figura 4.1, tem-se ilustrado o fluxograma representativo do processo de obtenção dos parâmetros do equivalente, \bar{Z}_{APM} e \bar{E}_{APM} , respectivamente a impedância e a tensão equivalentes da APM, pelo método proposto.

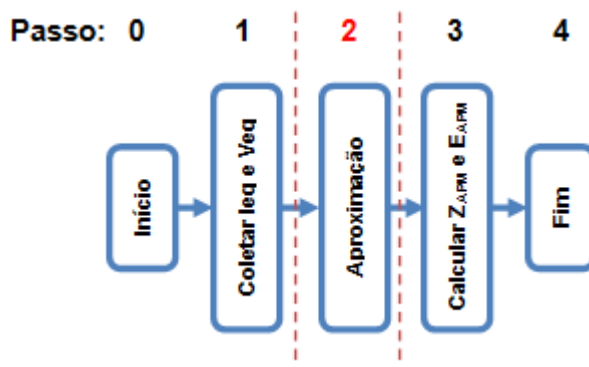


Figura 4.1 – Fluxograma para metodologia APM.

Nota-se que a diferença entre as metodologias APM e EM se estabelece no passo 2. Para a APM é realizada a aproximação polinomial das grandezas e , posteriormente, utilizando a mesma equação matricial do EM, calculam-se os parâmetros do equivalente proposto.

Para facilitar o entendimento, tem-se a equação (4.1) que representa a equação geral do polinômio, onde M representa a tensão e t o instante de tempo. Observa-se que a interpolação é feita através de um polinômio de primeiro grau.

$$M = at + b \quad (4.1)$$

Assim, considerando 20 medições consecutivas, os vetores M e t são descritos como em (4.2). O conjunto de medições consecutivas caracteriza uma Janela de Dados que é atualizada dinamicamente. Quando uma nova medição é inserida na janela, retira-se aquela mais antiga. Configura-se, assim, uma janela de dados “deslizante” no tempo.

⁶ A referência [Anton, 2006] aborda, de maneira detalhada, o método de interpolação polinomial pela aproximação de mínimos quadrados da matriz de Vandermonde.

$$M = \begin{bmatrix} V_{c,0} \\ \vdots \\ V_{c,19} \end{bmatrix} \quad t = \begin{bmatrix} t_0 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ t_{19} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A equação (4.2) pode ser escrita em sua forma matricial conforme (4.3).

$$M = t \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Como as matrizes M e t são superdimensionadas, a solução é obtida pelo cálculo da pseudo-inversa de t (t_p), conforme teorema de mínimos quadrados descrito no anexo A.

São interpolados o módulo e o ângulo da tensão isoladamente, ou seja, considerando M_a como o vetor de ângulos e M_m o vetor de módulos do vetor M , o cálculo é realizado conforme (4.4) e (4.5), respectivamente para o módulo e para o ângulo da tensão.

$$\begin{bmatrix} a_a \\ b_a \end{bmatrix} = t_p M_a \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} a_m \\ b_m \end{bmatrix} = t_p M_m \quad (4.5)$$

Por fim, recalcula-se a nova tensão para este instante de tempo como descrito em (4.6).

$$\dot{V}_{c,19} = (a_m t_{19} + b_m) e^{i(a_a t_{19} + b_a)} \quad (4.6)$$

Nota-se que, para o vetor M , somente a posição atual é carregada com valores provenientes das medições do SEP. O mesmo procedimento é realizado para a corrente, substituindo em M as tensões por correntes.

No passo 3 são calculados os parâmetros da APM, conforme matriz utilizada no EM, com a tensão e a corrente interpoladas.

4.3. Aproximação Polinomial da Impedância – APZ

O equivalente pelo método de Aproximação Polinomial da impedância (APZ) surge da mesma ideia do equivalente de APM, porém ao invés de realizar uma aproximação linear na corrente e na tensão, é considerada como grandeza de entrada a impedância do EM, considerando várias medições consecutivas (filosofia do MQ). Ou seja, a matriz M é composta de impedâncias e não mais de tensões e/ou correntes.

Na Figura 4.2, tem-se ilustrado o fluxograma representativo do processo de obtenção dos parâmetros do equivalente, \bar{Z}_{APZ} e \dot{E}_{APZ} , respectivamente a impedância e a tensão equivalentes da APZ, pelo método proposto. Neste fluxograma, a \dot{E}_{APZ} é recalculada no passo 3, após a interpolação da impedância, pela equação $\dot{E}_{APZ} = \dot{I}_{eq} * (\bar{Z}_c + \bar{Z}_{APZ})$, considerado $\bar{Z}_c = \dot{V}_{eq} / \dot{I}_{eq}$ (\dot{V}_{eq} e \dot{I}_{eq} são respectivamente tensão do barramento e corrente equivalente de carga calculada por M1 ou por M2).

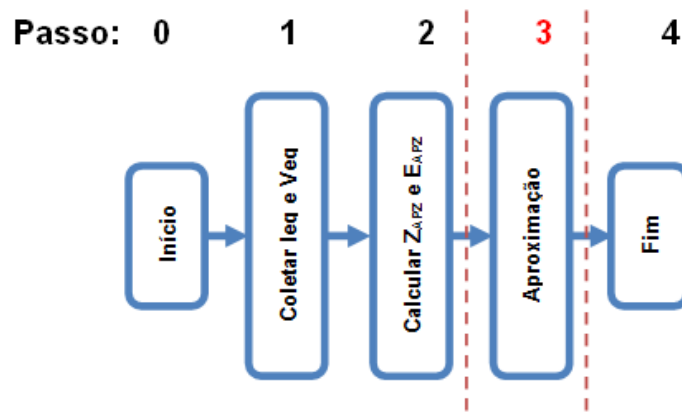


Figura 4.2 – Fluxograma para metodologia APZ.

Nota-se que a diferença entre as metodologias APZ e APM, além daquela estabelecida na matriz M , já citada, refere-se ao fato do passo onde é realizada a interpolação se deslocar de dois para três.

4.4. Equivalente Ponderado – E&P

O Equivalente Ponderado (E&P) consiste em adicionar ao EM mais uma etapa, denominada Ponderação. Na Figura 4.6, tem-se ilustrado o fluxograma representativo do processo de obtenção dos parâmetros do equivalente: $\bar{Z}_{E\&P}$, impedância equivalente do E&P, e $\dot{E}_{E\&P}$, tensão equivalente do E&P, pelo método proposto.

Observa-se que a diferença entre as metodologias E&P e EM é a inserção do passo 3 no E&P. Nesta etapa do processo é realizada uma média ponderada entre as duas últimas impedâncias calculadas. Posteriormente, recalcula-se a $\dot{E}_{E\&P}$, pela equação $\dot{E}_{E\&P} = \dot{I}_{eq} * (\bar{Z}_C + \bar{Z}_{E\&P})$. Para isto, faz-se necessária a definição das equações que ponderem as impedâncias, baseadas no comportamento do EM descrito no capítulo 3, em “consonância” com o comportamento elétrico do SEP. Nesta direção, duas propostas foram desenvolvidas e analisadas: (i) a equação peso 1 (p_m) e (ii) a equação peso 2 (p).

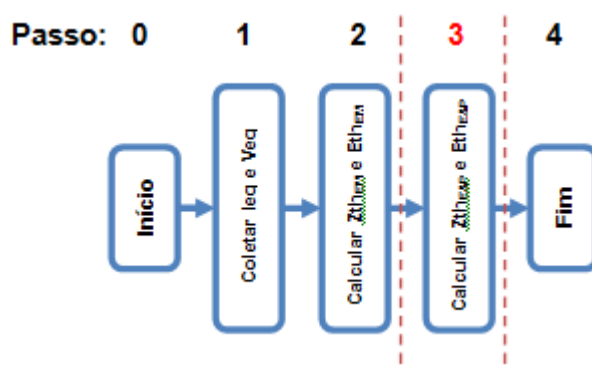


Figura 4.3 – Fluxograma para metodologia E&P.

4.4.1. Obtenção da Equação Peso 1

Considerando que as variações sistêmicas apresentam-se mais expressivas nas variações da tensão (devido à ação dos reguladores automáticos de tensão, dos transformadores de tap variável e dos bancos *shunts*, dentre outros), pode-se concluir que, as variações bruscas de tensão na barra de carga são provenientes de alterações no sistema que a alimenta.

Como a tensão é uma grandeza muito bem controlada, controle este que visa manter a tensão dentro de limites aceitáveis, as variações de carga em uma determinada barra interferem de forma mais significativa na corrente que flui para a mesma. Sendo assim, as variações na carga serão consideradas expressivas no comportamento da corrente. Portanto, considera-se que as variações bruscas de corrente na barra são provenientes de alterações na carga.

Um aspecto que sempre deve ser observado é o fato de que, se a tensão e a corrente em cada ramo da barra apresentam pequenas variações no tempo, o sistema em análise sofreu pouca alteração, seja alteração na carga ou de outro componente do sistema que possa influenciar no comportamento das grandezas tensão e corrente.

Cabe salientar que alterações na tensão (devido à operação de um banco *shunt*, por exemplo) influenciam diretamente no comportamento da corrente e que variações de corrente influenciam o comportamento da tensão. Visando estabelecer regras para o cálculo dos parâmetros do equivalente ($\vec{Z}_{E\&P}$ e $\vec{E}_{E\&P}$) e possibilitar a elaboração de um método para tal fim, faz-se uso das seguintes premissas:

1. As variações bruscas de tensão na barra são provenientes de alterações no sistema;
2. As variações bruscas de corrente na carga equivalente são provenientes de alterações na carga e;
3. Pequenas variações de corrente e tensão indicam que o SEP sofreu pequena alteração.

Logo, torna-se necessária a identificação da relação entre a resposta do EM com o comportamento das variáveis monitoradas, em conformidade com as premissas acima estabelecidas. Esta interconexão é feita através dos estudos em relação ao EM realizados no capítulo 3 onde se observou que: (i) quando as variações sistêmicas superam as variações na carga, a solução do EM converge para o negativo da impedância da carga e sua tensão a zero, (ii) quando a carga é detentora das maiores variações, os parâmetros do EM convergem para os parâmetros do equivalente do sistema.

Do exposto, conclui-se que: as variações de tensão, conforme observação (i) e premissa 1, devem ser ponderadas inversamente proporcionais ao seu aumento, pois tais variações conduzem à resposta do EM para valores próximos ao da impedância da carga; as variações de corrente, conforme observação (ii) e a premissa 2, devem ser ponderadas proporcionalmente ao seu aumento; as pequenas variações de corrente e de tensão devem ser ponderadas com menor peso em relação às grandes variações.

Nesta direção, tomando a equação (4.7) como “equação piloto” para as análises, onde “ g ” representa a base da função exponencial e “ x ” a variável, o próximo passo é a construção e a análise de sua resposta com relação ao módulo de “ x ”.

$$f(x) = g^{-x} \quad (4.7)$$

A Figura 4.4 representa a resposta da equação (4.7), considerando $g = 2$, com a evolução de “ x ”. Nota-se que, com o aumento das variações, $f(x)$ diminui. Assim, considerando “ x ” o módulo das variações de corrente, esta equação contraria a premissa 2, inutilizando a mesma para avaliar o comportamento de tal grandeza. Entretanto, tomando “ x ” como o módulo das variações de tensão, a equação (4.7) transcreve de forma matemática a premissa 1. Sendo assim, a equação pode ser utilizada como forma de ponderar as variações de tensão.

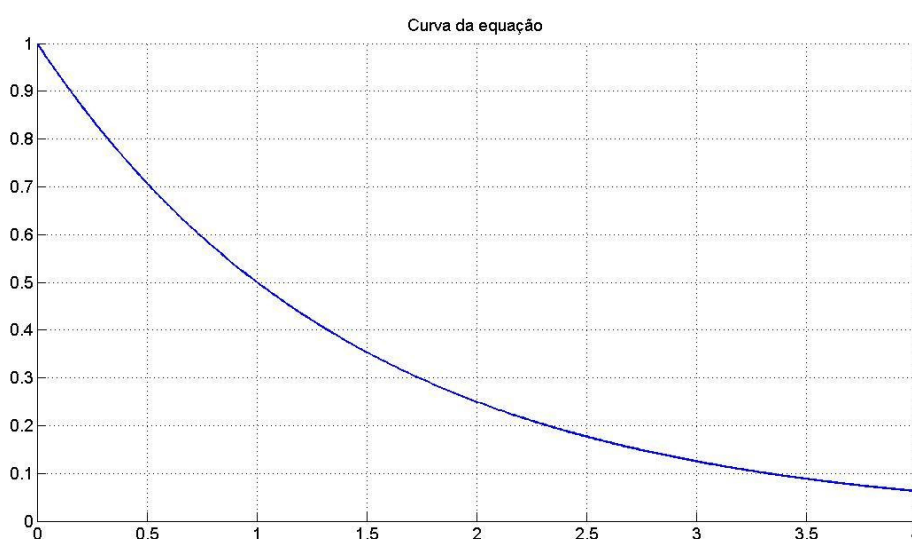


Figura 4.4 – Resposta da equação (4.7) com a evolução de “ x ” para $g = 2$.

Em busca de uma equação para avaliar o comportamento da corrente modifica-se a equação (4.7) para a expressão (4.8).

$$f(x) = 1 - g^{-x} \quad (4.8)$$

Realizando o mesmo procedimento com a evolução de “ x ” tem-se a resposta da função ilustrada na Figura 4.5. Observa-se que, com o aumento do módulo de “ x ”, há um aumento de $f(x)$, ou seja, considerando “ x ” como sendo o módulo das variações de corrente, a equação (4.8) transcreve de forma consistente a premissa 2. Sendo assim, esta equação pode ser utilizada para ponderar o comportamento das variações de corrente.

As expressões (4.7) e (4.8) são denominadas “equações de peso” para tensão e corrente respectivamente. De posse do formato das mesmas, torna-se indispensável a avaliação do parâmetro “ g ”. É importante salientar também que as variações são consideradas em módulo, justificando os valores positivos para a resposta $f(x)$ em ambas as expressões.

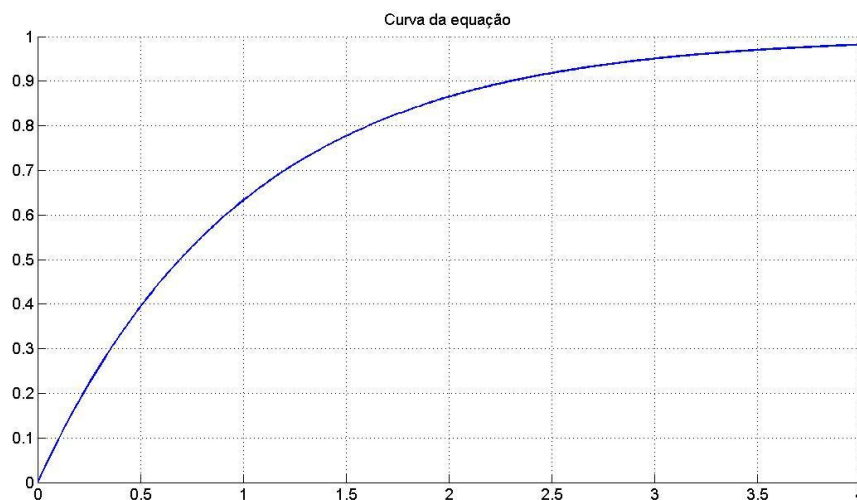


Figura 4.5 – Resposta da equação (4.8) com a evolução de “x” para $g = 2$.

A Figura 4.6 representa as curvas obtidas para cinco diferentes valores de “g”, onde “e” ($e \approx 2,710$) é a constante de Euler. Observa-se que, elevando-se os valores de “g” ocorre o aumento na inclinação da curva de peso. Com isto o parâmetro “g” é considerado como sendo a sensibilidade das equações peso. Valores elevados de “g” proporcionam equações mais sensíveis às variações da grandeza “x”.

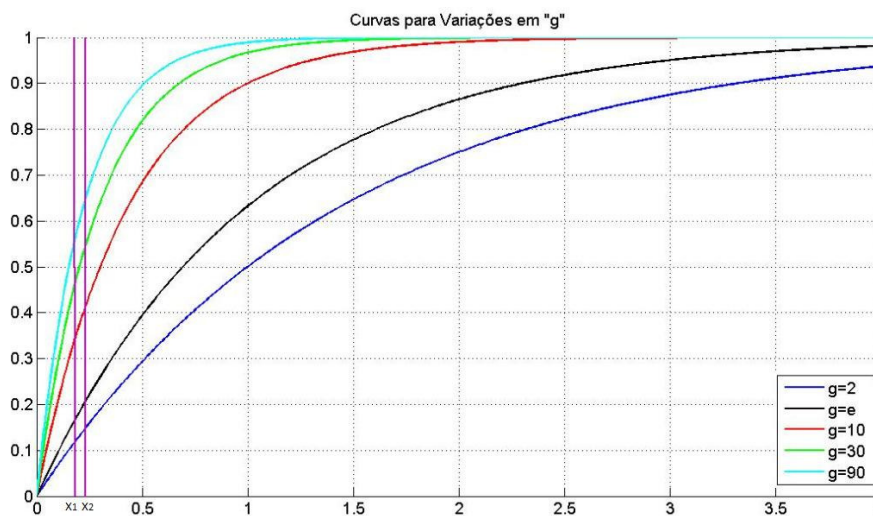


Figura 4.6 – Resposta da equação (4.8) para diferentes valores de “g”.

Para facilitar o entendimento, são apresentados como exemplo, na Tabela 4.1, valores calculados de peso para duas situações (P_{x1} com $x1 = 0,181$ e P_{x2} com $x2 = 0,231$). Além disto, é mostrada a diferença entre os pesos ($P_{x1} - P_{x2}$) para os cinco valores de “g”.

Nota-se que, com o aumento nos valores de “g”, as diferenças entre os pesos aumentam, porém o ganho de sensibilidade, ou seja, o aumento da diferença $P_{x2} - P_{x1}$ fica cada vez menor em relação ao anterior. Por exemplo, a diferença entre os pesos de $x1$ e $x2$ para $g = 30$ é de 0,0845 e para $g = 90$ é de 0,0893, Nota-se que não houve grandes ganhos de sensibilidade entre 30 e 90, mas, quando são comparadas a

primeira ($g = 90$) e a última ($g = 2$) linhas da tabela, o ganho em sensibilidade é de aproximadamente 196%.

Tabela 4.1 – Valores de peso para diferentes valores de “ g ”.

g	P_{x1}	P_{x2}	$P_{x2} - P_{x1}$
90	0,5571	0,6464	0,0893
30	0,4597	0,5442	0,0845
10	0,3408	0,4125	0,0717
e	0,1656	0,2063	0,0407
2	0,1179	0,1480	0,0301

Uma observação interessante está relacionada com o valor adotado para “ g ” e o número de variações que estão compreendidas entre os pesos máximo e mínimo da função. Nota-se que, para valores elevados de “ g ”, diminui o número de variações presentes entre o peso máximo (1) e o peso mínimo (0), visto que, a inclinação da curva é diretamente proporcional a “ g ”. Um exemplo deste fato pode ser visto ainda na Figura 4.6, onde, para $g = 90$, a curva atinge o máximo em $x = 1,5$ e, para $g = 10$ o mesmo é atingido em $x = 2,5$.

O método considerado para analisar o impacto do valor de “ g ” na impedância de Thévenin é MQ&P₀, descrito em detalhes no próximo item. Quando se aplica a metodologia, utilizando corrente e tensão provenientes de programa de fluxo de potência, o ganho pode não se tornar muito visível, como mostrado no exemplo da Figura 4.7, onde o método obteve respostas muito próximas para os cinco valores de “ g ”.

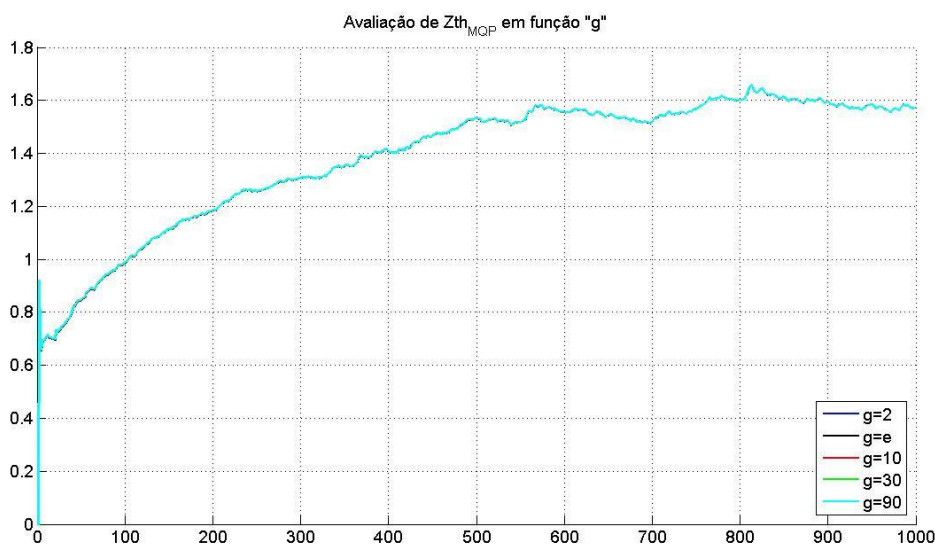


Figura 4.7 – Aplicação do MQ&P₀ para diferentes valores de “ g ”.

O método MQ&P₀ utiliza uma janela de dados para construir o equivalente. No início do processo, enquanto tal janela não estiver completamente preenchida, ocorrem as bruscas oscilações do valor da impedância no início do processo.

A Figura 4.8 mostra uma ampliação da Figura 4.7, com o objetivo de visualizar a diferença entre os cálculos. Observa-se que o comportamento das curvas possui a

mesma característica, porém com uma leve aceleração na convergência para valores mais elevados de “ g ” no início do processo de estimação.

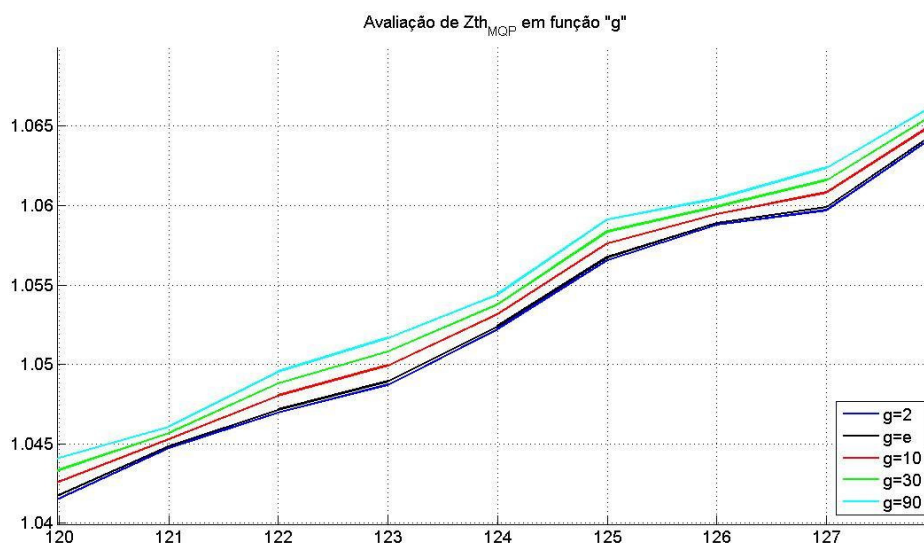


Figura 4.8 – Aplicação do MQ&P₀ para diferentes valores de “ g ”.
Ampliação da Figura 4.7.

É importante salientar que, para a obtenção das curvas expostas nas Figura 4.7 e Figura 4.8, é considerado um sistema de duas barras (como o ilustrado na Figura 3.1), onde se variou a impedância da linha em $\pm 1\%$ e da carga em $\pm 5\%$, em torno de seus valores iniciais, de forma aleatória. Seus valores iniciais são respectivamente $0,8 + 1,6i$ e $3 + 4,3i$, conforme o procedimento adotado nos teste 1 e 2.

A Figura 4.9 e a Figura 4.10 ilustram, respectivamente, as variações de corrente e tensão e o número de ocorrências para cada variação, considerando um fator σ de agrupamento na forma de histograma, encontradas com o procedimento descrito para o cálculo da Figura 4.7 e da Figura 4.8.

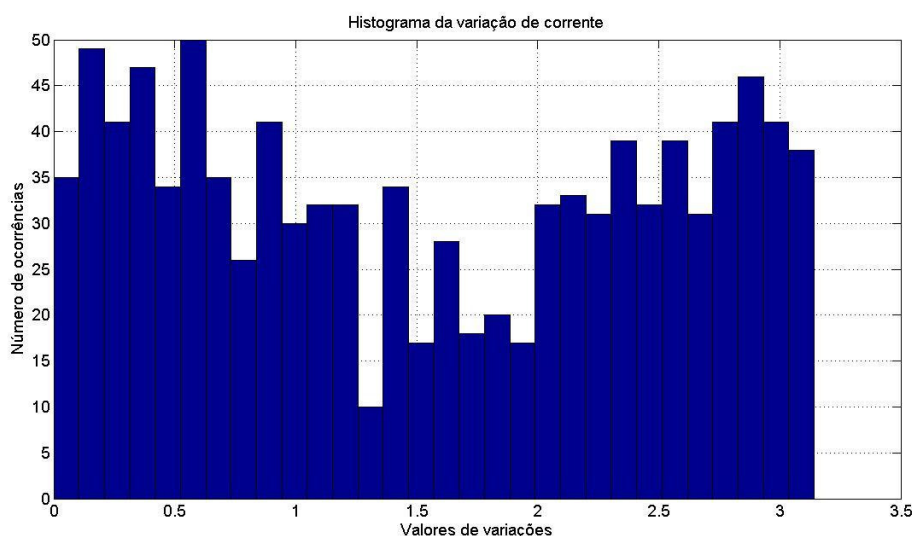


Figura 4.9 – Histograma da variação de corrente.

Observa-se que diversos valores de variações de corrente atingiram o peso máximo para “g” igual a 10, 30 e 90. Para tais valores de “g”, a equação (4.8) possui limite de 2,5 (Figura 4.6).

Como as variações de corrente não são maiores que 3,5, nenhuma delas obteve peso máximo para as equações com “g” igual a 2 ou “e”, pois a saturação da expressão (4.8) para tais valores de parâmetro de sensibilidade ocorre para variações superiores a 4 (final da escala do eixo X na Figura 4.6).

Em seguida são ilustradas, na Figura 4.10, as variações de tensão medidas na barra de carga. Neste caso é possível identificar que nenhum valor de variação atingiu valor máximo em peso para as equações testadas, visto que são todos inferiores a 0,05.

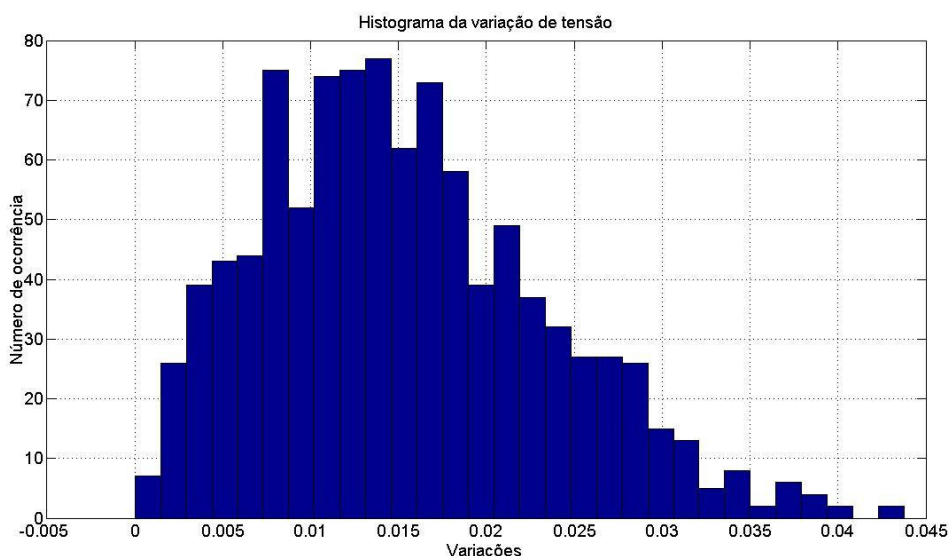


Figura 4.10 – Histograma da variação de tensão.

Para facilitar o entendimento, na Tabela 4.2 são apresentados os valores das variações de tensão ($|\Delta v|$) e de corrente ($|\Delta i|$) com seus respectivos números de ocorrência (N. O.), utilizados para a construção dos histogramas das Figura 4.9 e Figura 4.10.

Tabela 4.2 – Número de ocorrências versus variações

N. O.	$ \Delta i $	N. O.	$ \Delta v $	N. O.	$ \Delta i $	N. O.	$ \Delta v $
35	0,0524	7	0,0007	28	1,6232	37	0,0226
49	0,1571	26	0,0022	18	1,7279	32	0,0241
41	0,2618	39	0,0036	20	1,8326	27	0,0255
47	0,3665	43	0,0051	17	1,9373	27	0,0270
34	0,4712	44	0,0066	32	2,0420	26	0,0284
50	0,5760	75	0,0080	33	2,1467	15	0,0299
35	0,6807	52	0,0095	31	2,2515	13	0,0314
26	0,7854	74	0,0109	39	2,3562	5	0,0328
41	0,8901	75	0,0124	32	2,4609	8	0,0343
30	0,9948	77	0,0139	39	2,5656	2	0,0357
32	1,0996	62	0,0153	31	2,6703	6	0,0372

32	1,2043	73	0,0168	41	2,7751	4	0,0387
10	1,3090	58	0,0182	46	2,8798	2	0,0401
34	1,4137	39	0,0197	41	2,9845	0	0,0416
17	1,5184	49	0,0212	38	3,0892	2	0,0430

Neste trabalho, a seleção do valor de “ g ” baseia-se no parâmetro sensibilidade imposto à equação peso, visto que o intervalo de tempo entre duas medições consecutivas do SMFS é muito pequeno. Em virtude de sua alta taxa de amostragem, as variações são muito pequenas, tanto para tensão quanto para corrente. Assim, o valor adotado para “ g ” é 90.

Fazendo “ g ” igual a 90, as equações de peso adotadas para a corrente e a tensão ficam descritas pelas expressões (4.9) e (4.10), respectivamente. O peso total da medição é considerado a somatória destes pesos, conforme equação (4.11).

$$p_{v(t)} = 90^{-(|v(t)-v(t-1)|)} \quad (4.9)$$

$$p_{i(t)} = 1 - 90^{-(|i(t)-i(t-1)|)} \quad (4.10)$$

$$p_{m(t)} = p_{i(t)} + p_{v(t)} \quad (4.11)$$

Substituindo (4.9) e (4.10) em (4.11) e considerando $dv = v(t) - v(t - 1)$ e $di = i(t) - i(t - 1)$, tem-se:

$$p_{m(t)} = 1 + 90^{-|dv|} - 90^{-|di|} \quad (4.12)$$

Visando facilitar o entendimento sobre o comportamento da equação peso, adota-se dv e di variando de 0 a 1 com passo de 0,01 a cada iteração, tornando possível a visualização do comportamento da função para esta faixa de variações de tensão/corrente. Nesta direção, é apresentada a Figura 4.11 que ilustra a resposta da expressão (4.12) nesta situação.

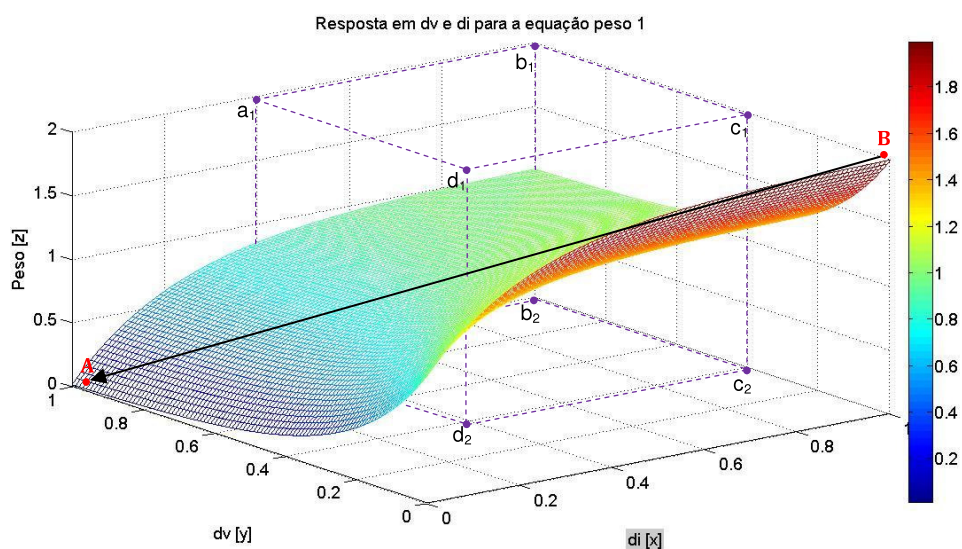


Figura 4.11 – Evolução do peso 1ª equação 3D.

Adotando as variações de tensão/corrente de forma a obter acréscimos em dv e simultaneamente decréscimo em di , ou seja, percorrendo o caminho \overline{BA} destacado na Figura 4.11, nota-se que o peso do conjunto de “medição” (tensão/corrente) diminui convergindo para zero. Porém, adotando o caminho inverso \overline{AB} (acréscimos em di e decréscimo em dv), o peso do conjunto aumenta convergindo para dois (peso máximo para a função).

Um ponto interessante é o comportamento da expressão (4.12) na região $a_1b_1c_1d_1a_2b_2c_2d_2$, que compreende os conjuntos de “medições” que possuem evoluções em dv/di que se “completam”, tornando o peso igual a um, havendo então, a ocorrência de efeitos particulares em dv e di que se anulam, como, por exemplo, no momento em que há uma expressiva variação em dv e di simultaneamente.

Em outra perspectiva é apresentada, na Figura 4.12, a resposta da expressão (4.12), que difere da Figura 4.11 somente no número de dimensões. Para facilitar as análises dividiu-se esta figura em 5 regiões (“A, B, C, D e E”).

As regiões “A” e “E”, ilustradas na Figura 4.12, são muito semelhantes em termos de dv e di . Na região “A”, os pequenos valores de di somados aos altos valores de dv , descrevendo para o EM o pior cenário, fazem com que a equação peso pondere tais momentos com valores abaixo de 0,6. Já na região “E”, o comportamento é inverso. Há pequenos valores de dv e altos valores de di , constituindo o melhor cenário para o EM; nesta situação, a equação peso retorna valores elevados de ponderação, acima de 1,4.

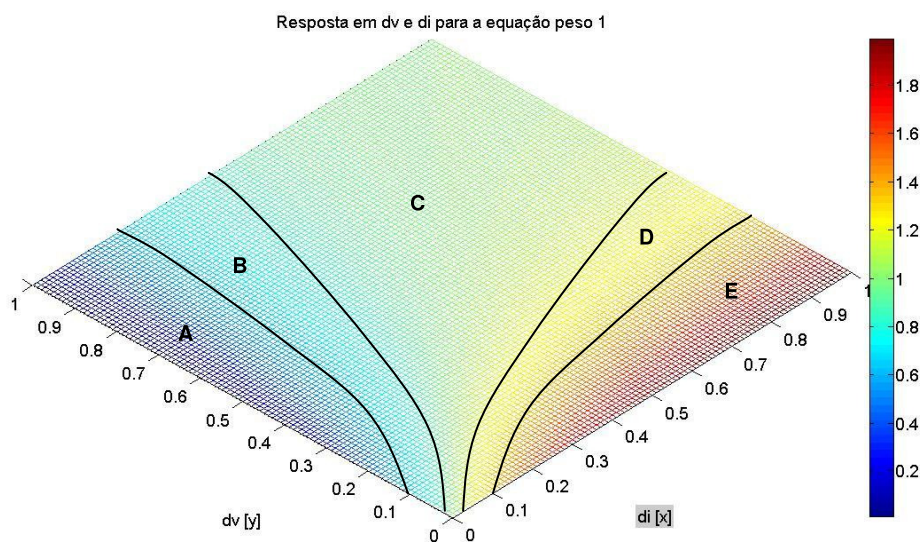


Figura 4.12 – Evolução da resposta de $p_{m(t)}$ em 2D.

Com relação às regiões “B” e “D”, o comportamento é semelhante às regiões “A” e “E” respectivamente, alterando somente em ordem de grandeza os valores de dv e di , justificando a ponderação em “B” maior que em “A” e em “D” menor que “E”. Neste caso, os efeitos de di para a região “B” aumentaram sua influência na ponderação, quando comparados àqueles da região “A”, em “D”, são os efeitos de dv que alteram sua influência com relação a “E”.

Ainda em análise da Figura 4.12, nota-se que a região “C” é intermediária aos extremos da função (peso máximo e mínimo). É em “C” que as relações dv e di se tornam complementares, ou seja, um ponto com alto valor em dv é precedido por um baixo di . Sendo assim, o alto peso em virtude de dv é complementado pelo baixo peso em di , mantendo o peso nas proximidades de um.

Do exposto, conclui-se que a equação peso (4.11) descreve matematicamente de forma satisfatória as afirmações e premissas consideradas neste item.

4.4.2. Obtenção da Equação Peso 2

Para entender o surgimento da equação peso 2, é realizada uma análise sucinta de um sistema de duas barras, conforme Figura 3.1, modelando a carga como impedância constante.

Utilizando as equações (4.13) e (4.14), para cálculo da corrente e da tensão na barra B_k , e considerando que entre dois instantes houve redução de $\bar{Z}th$, e que \bar{Z}_c não se alterou, pela equação (4.13), tem-se uma redução no denominador ($\bar{Z}th + \bar{Z}_c$) e, conseqüentemente, um aumento em \dot{I}_k , provocando, pela equação (4.14), um aumento em \dot{V}_k .

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{E}th}{\bar{Z}th + \bar{Z}_c} \quad (4.13)$$

$$\dot{V}_k = \bar{Z}_c \dot{I}_k \quad (4.14)$$

Nota-se que, neste caso, houve aumento da corrente e da tensão na barra, fato este que não representa um comportamento comum do SEP. Em alterações normais de carga (considerada com característica indutiva), o aumento de \dot{I}_k causa um decréscimo em \dot{V}_k , diferente do ocorrido.

Fato semelhante é observado quando há um aumento em $\bar{Z}th$, com \bar{Z}_c constante. Neste caso, ocorre um decréscimo de corrente e de tensão na barra e, mais uma vez, um comportamento incomum para o SEP (considerando carga do tipo indutivo).

Na Figura 4.13 estão ilustradas, em função de dv e di , as regiões onde o comportamento de \dot{V}_k em relação \dot{I}_k configuram alterações de carga ou sistema. Nesta figura, no primeiro e no terceiro quadrantes, a relação \dot{V}_k/\dot{I}_k corresponde a variações no sistema. No segundo e no quarto quadrantes, esta relação representa as variações de carga.

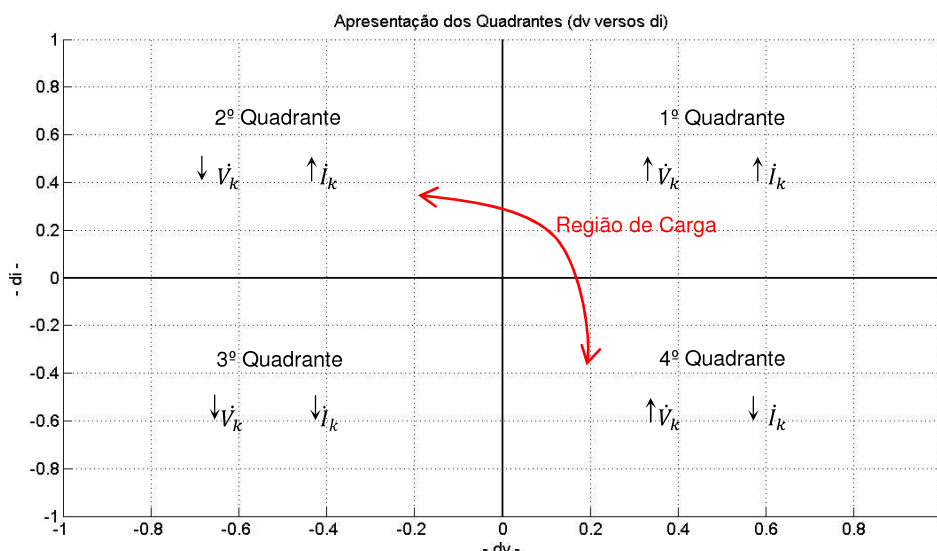


Figura 4.13 – Divisão em quadrantes de dv/di .

Relacionando as conclusões do item 3.6 (definem o comportamento do EM) com a variação ocorrida na tensão e corrente entre dois instantes consecutivos, e podendo-a em virtude de sua qualidade (diretamente ligada ao quadrante da Figura 4.13 onde se encontram dv e di), desenvolveu-se a equação (4.15). Esta equação realiza a ponderação em relação ao comportamento de dv e di relacionado a esta qualidade da medição. Esta equação leva em conta, além do quadrante ocupado na Figura 4.13, a magnitude das variações, ou seja, variações em maiores proporções são ponderadas diferentemente daquelas de pequenas proporções.

$$p = (g^{-dv} - g^{dv}) * (g^{di} - g^{-di}) * k1 + k2 \quad (4.15)$$

Os parâmetros $k1$ e $k2$ da equação (4.15) são denominados parâmetros de calibração, onde $k1$ é calculado em consonância com a ordem de grandeza de dv e di ; por exemplo, considerando $dv = di = 10^{-4}$ um bom ajuste em $k1$ é de 10^3 . O parâmetro $k2$ é responsável por deslocar a curva no sentido positivo de p , objetivando tornar os pesos negativos dos pontos dos quadrantes 3 e 4 em pesos positivos.

A equação (4.15) visa tratar a sensibilidade do EM para pequenas variações de corrente e tensão e também em relação ao comportamento do sistema/carga discutido no item 3.6.

Adotando o mesmo raciocínio utilizado para a definição do parâmetro de sensibilidade “ g ” da equação (4.12), onde o mesmo é igual a 90, pode-se reescrever a equação (4.15) como (4.16).

$$p = (90^{-dv} - 90^{dv}) * (90^{di} - 90^{-di}) * k1 + k2 \quad (4.16)$$

A fim de facilitar a visualização do comportamento da equação (4.16) é apresentada a Figura 4.14 onde, para sua construção, considerou-se dv e di variando de $-0,004$ a $0,004$ pu com passo de $0,25 \times 10^{-3}$, adotando $k1$ e $k2$ respectivamente iguais a 10^3 e 1.

Nota-se, pela Figura 4.14, que, nos quadrantes que representam regiões em que o comportamento da corrente em relação à tensão na barra descreve variações de carga (segundo e quarto quadrantes), a equação (4.16) obtém pesos mais elevados; já para as regiões de variações de sistema (primeiro e terceiro quadrantes) os pesos são abaixo de 1 e, em alguns instantes, chegam até mesmo a valores negativos, como por exemplo, quando $dv = di = -0,0035$, tem-se $p = 0,007705$ (para $k_1 = 10^3$ e $k_2 = 1$).

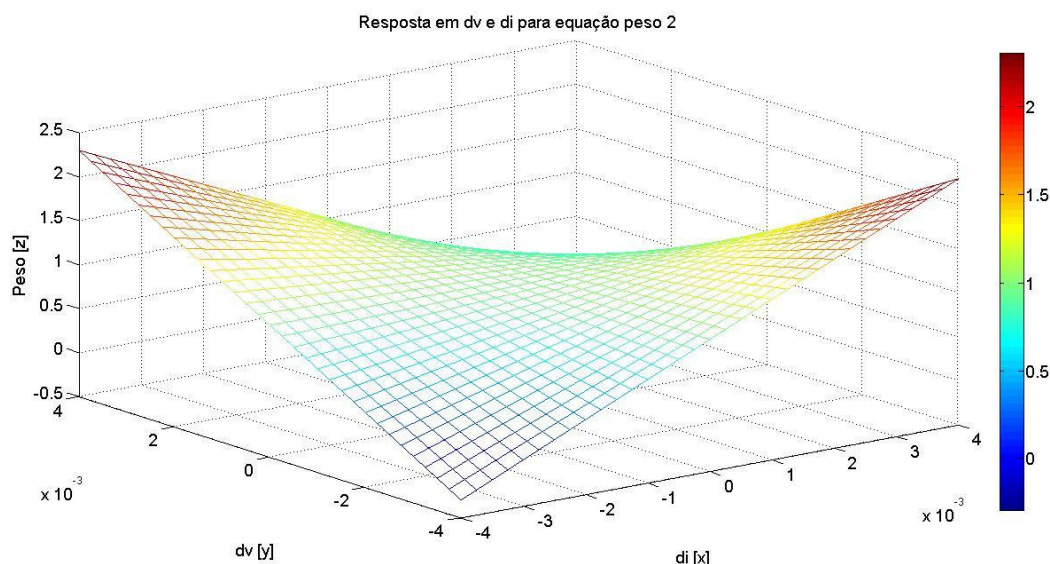


Figura 4.14 – Evolução da resposta de p em 3D.

Em outra perspectiva é apresentada a Figura 4.15 que complementa as informações presentes na Figura 4.14. Adotando uma evolução no sistema onde há um aumento em \dot{V}_k e \dot{I}_k , com o intuito de percorrer o caminho que vai de A para D (\overline{AD}), observa-se que a equação (4.16) adota pesos progressivos decrescentes e, como este comportamento denota uma situação ruim para o equivalente, o peso decrescente é justificado.

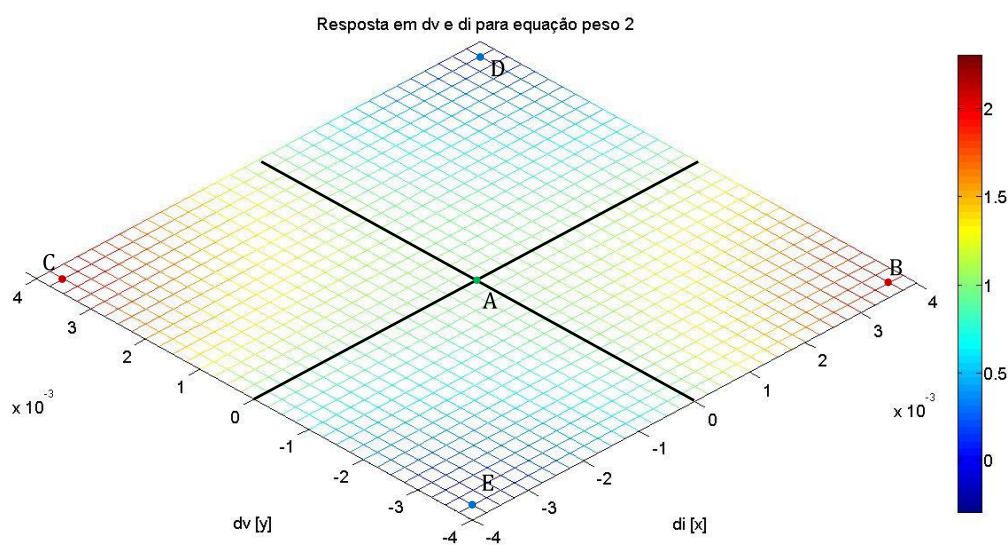


Figura 4.15 – Evolução da resposta de p em 2D.

Esta mesma análise pode ser facilmente realizada para situações em que há decréscimo em \dot{V}_k e \dot{I}_k , percorrendo assim o caminho \overrightarrow{AE} . A grande diferença para este caminho em relação ao \overrightarrow{AD} são os sinais resultantes para dv e di .

Em situações normais de carga o percurso a ser percorrido é descrito pelos caminhos \overrightarrow{AB} ou \overrightarrow{AC} , onde a diferença entre este caminho dá-se mais uma vez somente no sinal resultante em dv e di . Os pesos são maiores que os adotados para os caminhos \overrightarrow{AD} e \overrightarrow{AE} e com aumentos progressivos em consonância com a magnitude de dv e di . Resposta mais uma vez justificada nas análises do EM, visto que estas situações conduzem à resposta do mesmo para regiões mais confiáveis.

São observados dois pontos que devem ser tratados no uso desta equação. O primeiro são as ponderações negativas que causam subtração na média ponderada, fato este que interfere e muito no resultado final. Sendo assim, pesos menores que zero não representam resultados satisfatórios. O segundo trata-se da não observância de limites para o peso, ou seja, a equação (4.16) não contém peso máximo e mínimo como observado na equação (4.12). Este fato pode conduzir a resposta para um ponto isolado, como, por exemplo, um momento de operação onde houve uma variação de tensão e corrente transitória, fazendo com que sua herança “genética” permaneça nos resultados por várias iterações.

Para criar limites na equação (4.16) é adotado o seguinte critério:

$$\text{Se } p > k2 + 1$$

$$p = k2 + 1$$

$$\text{Senão se } p < 0$$

$$p = 0$$

Nestas condições, seguindo o mesmo procedimento adotado para a construção da curva presente na Figura 4.14, é apresentada a Figura 4.16 que ilustra o peso adotado para o mesmo cenário.

Com a inserção dos limites superior e inferior considerando $k2 = 1$, observa-se que os cálculos envolvendo situações do primeiro e terceiro quadrantes possuem pesos menores quando comparados com os pesos obtidos nos cálculos envolvendo situações do segundo e quarto quadrantes. Suas escalas são respectivamente de 0 a 1 e 1 a 2, ou seja, a segunda situação possui um intervalo com pesos mais elevados do que o observado na primeira.

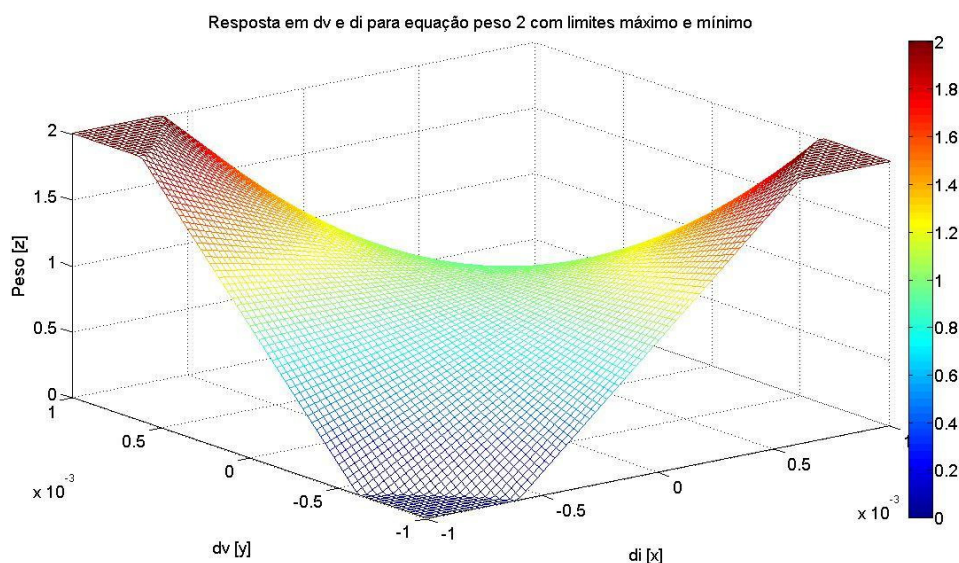


Figura 4.16 – Evolução da resposta de p com limites em 3D.

4.5. Mínimos Quadrados e Ponderados – MQ&P₀

O método proposto busca, além de filtrar os ruídos nas medições, o tratamento da sensibilidade das variações de tensão e de corrente presentes no cálculo do equivalente de Thévenin utilizando o EM. O procedimento básico deste filtro consiste no cálculo de x_{MQ} através da expressão (A.5) do anexo A e, adicionalmente, na realização de uma média ponderada. Tais características justificam a denominação do método como MQ&P₀ onde: **MQ** identifica o estimador utilizado e **P** o uso de ponderações.

Como o objetivo principal é tratar os ruídos e a sensibilidade do método de obtenção do equivalente, o mesmo é realizado em duas etapas: (i) a utilização do mínimo quadrado convencional é responsável por amenizar os efeitos dos erros provenientes dos ruídos presentes nas medições (passo 2 da Figura 4.17 – Fluxograma para metodologia MQ&P Figura 4.17), (ii) o cálculo da média ponderada dos valores de impedâncias reduz a sensibilidade com respeito às variações e ao comportamento da corrente e da tensão medidas (passo 3 da Figura 4.17 – Fluxograma para metodologia MQ&P Figura 4.17). Na Figura 4.17 tem-se ilustrado o fluxograma do MQ&P₀.

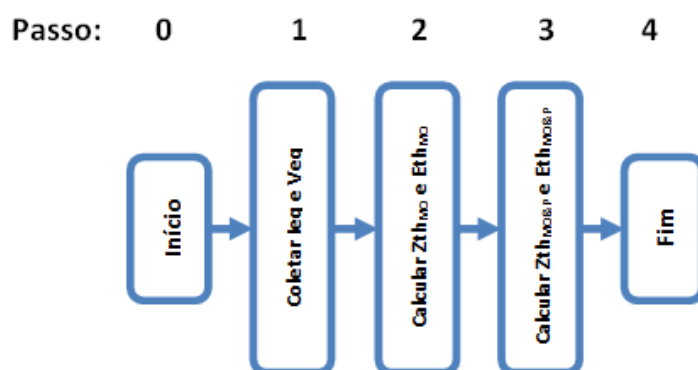


Figura 4.17 – Fluxograma para metodologia MQ&P₀

É importante destacar que as mesmas equações utilizadas como forma de ponderar a impedância pelo E&P foram adotadas para o MQ&P₀.

Após a definição da equação de peso, no passo 3 da Figura 4.17, é realizado o cálculo da impedância do equivalente através da média ponderada dos valores de $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ presentes na janela de dados. É importante salientar que a mesma análise de sensibilidade em função da janela de dados, para os mínimos quadrados, pode ser estabelecida para todo o método.

A equação (4.17) descreve o cálculo da impedância de Thévenin para o circuito, onde t representa o instante de tempo, j o tamanho da janela de dados considerada e p_g representa o peso calculado por p ou p_m . Em seguida, é calculado um novo valor para a tensão de Thévenin pela equação (4.18), ainda no passo 3.

$$\bar{Z}th_{MQ\&P(t)} = \frac{\sum_{n=0}^{j-1} p_{g(t-n)} \bar{Z}th_{MQ(t-n)}}{\sum_{n=0}^{j-1} p_{g(t-n)}} \quad (4.17)$$

$$\hat{E}th_{MQ\&P(t)} = \hat{I}c(\bar{Z}th_{MQ\&P(t)} + \bar{Z}_c) \quad (4.18)$$

4.6. MQ&P₀ com Correção no Ângulo da Impedância Equivalente – MQ&P₁

O método de Mínimos Quadrados e Ponderados com Correção no Ângulo da Impedância Equivalente (MQ&P₁) traz nova dimensão ao MQ&P₀ principalmente no que diz respeito à estimação da $\bar{Z}th$ do sistema. Além de tratar a sensibilidade do EM, característica herdada do MQ&P₀, é inserida neste método uma correção no ângulo da impedância através da localização vetorial da corrente e da carga.

Para facilitar a compreensão dos fundamentos do MQ&P₁ é apresentada a Figura 4.18 que ilustra quatro possíveis situações vetoriais de operação do sistema em relação à impedância da carga \bar{Z}_c . É importante destacar que para a construção da figura não se levou em consideração o módulo dos vetores, pois o objetivo é a análise da relação angular das impedâncias.

Considerando, mais uma vez, que a carga está bem definida por uma das metodologias descritas no capítulo 3 (M1 e M2), pode-se afirmar que a resistência da $\bar{Z}th$ deve ser maior que zero, ou seja, está sempre dentro da região 2 da Figura 3.42. Sendo assim, o ângulo de tal impedância ($\theta_{Z_{th}}$), em qualquer momento de operação do sistema, está compreendido entre $\pm 90^\circ$.

É possível definir regiões ainda menores para a região de valores de $\theta_{Z_{th}}$, levando em conta os ângulos de \bar{Z}_c e do negativo de \hat{I}_k (respectivamente θ_c e $-\theta_{Ik}$). Para isto, faz-se necessária uma análise da Figura 4.18.

Fazendo $\dot{I}_k = \frac{Eth}{Z_{th} + Z_c} \angle(\theta_{E_{th}} - \text{ângulo}(\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_c))$, e assumindo que o ângulo da tensão \dot{E} ($\theta_{E_{th}}$) é igual à zero, o ângulo de \dot{I}_k (θ_{I_k}), é calculado diretamente pela soma vetorial de $\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_c$. Com isto, pode-se dizer que $-\theta_{I_k} = \text{ângulo}(\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_c)$. Tratando-se de soma vetorial, o vetor resultante sempre estará compreendido entre os vetores somados (marcação em vermelho na figura) e, portanto, o ângulo $-\theta_{I_k}$ situa-se entre os ângulos dos vetores de \bar{Z}_{th} e \bar{Z}_c .

Nesta direção, na Figura 4.18, são ilustradas quatro possíveis configurações do SEP. Na situação descrita na Figura 4.18 (a) o sistema e a carga são predominantemente indutivos e $\theta_{Z_{th}} > \theta_c$. Como $-\theta_{I_k}$ é conhecido e está descrito entre \bar{Z}_{th} e \bar{Z}_c e como para que a parte resistiva de \bar{Z}_{th} seja positiva $\theta_{Z_{th}} > 90^\circ$, pode-se concluir que, nesta figura, $90^\circ > \theta_{Z_{th}} > -\theta_{I_k}$.

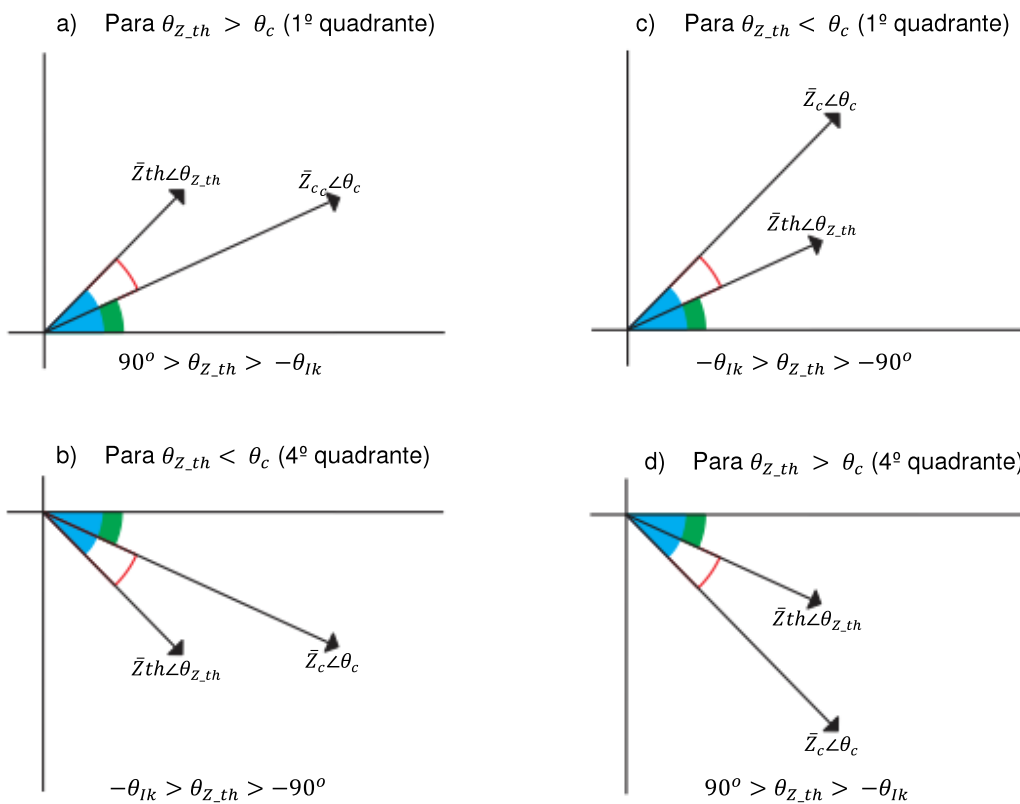


Figura 4.18 – Regiões de operação do SEP.

Para os demais casos descritos na Figura 4.18, a mesma análise da Figura 4.18 (a) é aplicada, porém com algumas particularidades de cada caso. Por exemplo, a Figura 4.18 (c) descreve uma situação onde a carga e o sistema são indutivos, sendo diferenciado de (a) na relação de seus ângulos onde $\theta_{Z_{th}} < \theta_c$. Mais uma vez, como $-\theta_{Z_{I_k}}$ está entre $\theta_{Z_{th}}$ e θ_c , conclui-se que $-\theta_{I_k} > \theta_{Z_{th}} > -90^\circ$. Ampliando estas análises para a Figura 4.18 (b) e (d), define-se respectivamente que $-\theta_{I_k} > \theta_{Z_{th}} > -90^\circ$ e $90^\circ > \theta_{Z_{th}} > -\theta_{I_k}$.

Para definir todas as possibilidades da relação carga/sistema surge a Figura 4.19 (a) e (b), complementando a Figura 4.18 em mais duas situações. Estas representam

extensões dos casos apresentados na Figura 4.18 (c) e (d), respectivamente, pois a relação angular de suas impedâncias são as mesmas.

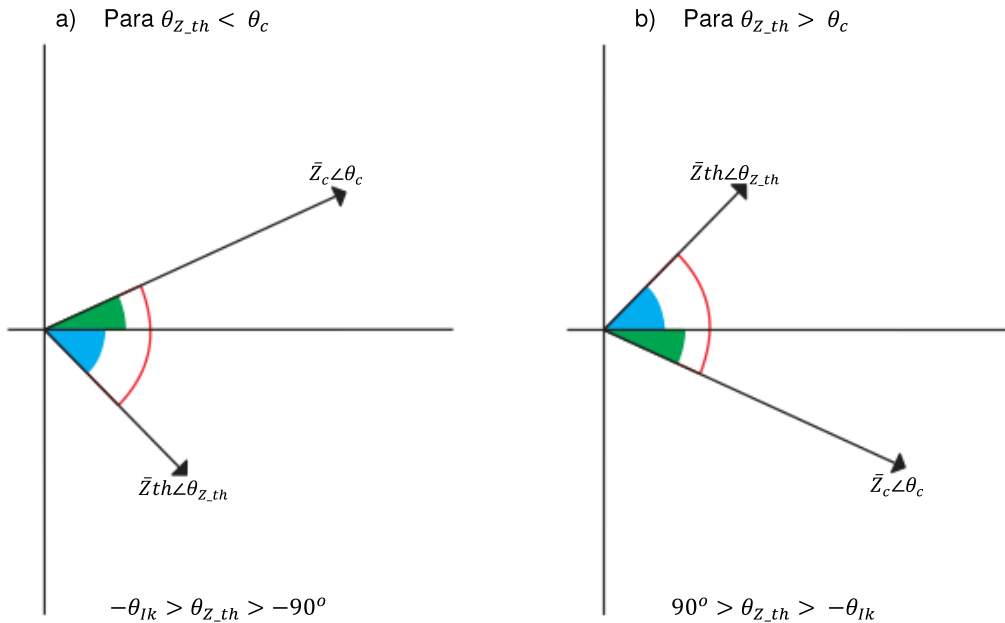


Figura 4.19 – Outras regiões de operação do SEP.

Para o MQ&P₁, após calcular impedâncias pelo MQ conforme descrito no MQ&P₀, é realizada a verificação dos ângulos de carga e corrente, a fim de identificar qual situação da Figura 4.18 o momento de operação se refere. Em seguida, $\theta_{Z_{th}}$ é comparado com $-\theta_{Ik}$ e $\pm 90^\circ$, nota-se que o sinal do ângulo de 90° é definido também com base na Figura 4.18 e por fim realiza-se a média ponderada também com no MQ&P₀.

Na verificação, quando $\theta_{Z_{th}}$ desrespeita a inequação que define a possível região de solução, o mesmo é corrigido seguindo a equação (4.19).

$$\theta_{Z_{th}} = -(2\theta_{Ik} + \theta_c) \quad (4.19)$$

Para explicar o surgimento da equação (4.19) considera-se que os módulos de \bar{Z}_{th} e \bar{Z}_c sejam iguais. Nesta condição, o ângulo $(-\theta_{Ik})$ do vetor resultante da soma $\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_c$ é igual à média entre $\theta_{Z_{th}}$ e θ_c , como descrito na equação (4.20).

$$-\theta_{Ik} = \frac{\theta_{Z_{th}} + \theta_c}{2} \quad (4.20)$$

Isolando $\theta_{Z_{th}}$ em (4.20), tem-se a equação (4.19).

4.7. MQ&P₁ com Correção no Módulo da Tensão Equivalente – MQ&P₂

O método de Mínimos Quadrados e Ponderados com Correção no Ângulo da Impedância e no Módulo da Tensão do Equivalente (MQ&P₂) surge na evolução da pesquisa realizada para o desenvolvimento deste trabalho. Este método traz consigo as características do MQ&P₁, ou seja, realiza o mesmo procedimento adotado neste e, além disto, acrescenta à estimação uma nova etapa que consiste na correção do módulo da tensão de Thévenin ($\dot{E}th_{MQ\&P2}$).

Os fundamentos que definem o MQ&P₂ são baseados em limites mínimo e máximo de operação das centrais geradoras⁷ e, neste trabalho, são considerados, respectivamente, 0,90 e 1,10 pu de sua capacidade nominal de operação. O MQ&P₂ verifica se o módulo de $\dot{E}th_{MQ\&P2}$ se encontra dentro desta faixa operativa.

Observa-se que esta é uma consideração bastante razoável, porém, como o método se baseia apenas nas medições de corrente e de tensão da barra monitorada, há incertezas quanto ao limite a ser adotado na geração.

É fato que, no “transporte” de energia da geração para a carga, existem perdas de potência e quedas de tensão. Sendo assim, em uma situação onde o sistema e a carga são predominantemente indutivos, a tensão na geração não pode ser inferior à tensão na barra de carga. Nestas condições, o MQ&P₂ verifica se $Eth_{MQ\&P2}$ obedece à inequação (4.21).

$$V_k < Eth_{MQ\&P2} < 1,1V_{nom} \quad (4.21)$$

Para carga e/ou sistema capacitivo, existe a possibilidade da tensão na barra ser maior que a tensão na fonte, devido à influência do fator de potência. Para esta situação, a inequação passa a ser descrita conforme (4.22).

$$0,90V_{nom} < Eth_{MQ\&P2} < 1,1V_{nom} \quad (4.22)$$

Nos instantes de operação, onde a condição estabelecida na equação (4.21) ou (4.22) for violada, considera-se o valor calculado imediatamente anterior de $\dot{E}th_{MQ\&P2}$ como atual e uma nova $\bar{Z}th_{MQ\&P2}$ deve ser calculada.

4.8. Equivalente para Aplicação em Tempo Real – Algoritmo Proposto – Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados

Metodologias para cálculo de equivalente, visando à monitoração da estabilidade de tensão em tempo real, devem apresentar características que podem ser sintetizadas por meio de quatro parâmetros de avaliação: grau de sofisticação do método,

⁷ Neste trabalho, são considerados como limites de tensão nas centrais geradoras, os valores de referência descritos em [ONS, 2009].

facilidade de implementação, velocidade de resposta e, principalmente, a qualidade dos resultados.

A evolução dos estudos relacionados aos equivalentes, descrita neste capítulo, considerando os parâmetros acima citados, levou à concepção do MQ&P₂. Vale comentar que este método tem apresentado resultados bastante consistentes quando utilizado na Metodologia PIT.

Uma última etapa para a completa composição do método MQ&P₂ consiste na definição da equação peso. Para tal, é apresentada a Figura 4.20 que ilustra a evolução do módulo e do ângulo da $Z_{th_{MQ\&P_2}}$, considerando as duas equações (4.12) e (4.16), para o barramento de Tucuruí, cujas características detalhadas estão descritas no capítulo 5. O valor de $Z_{th_{MQ\&P_{ceq1}}}$ é obtido com a utilização da equação p e $Z_{th_{MQ\&P_{ceq2}}}$ com a equação p_m .

Observa-se que, mesmo com o alto grau de refinamento adotado para a elaboração da equação p , sua utilização não traz grandes ganhos quando comparados com os resultados encontrados com a equação p_m . Em função da facilidade observada na implementação do p_m , esta é considerada nas aplicações que se seguem no capítulo 5.

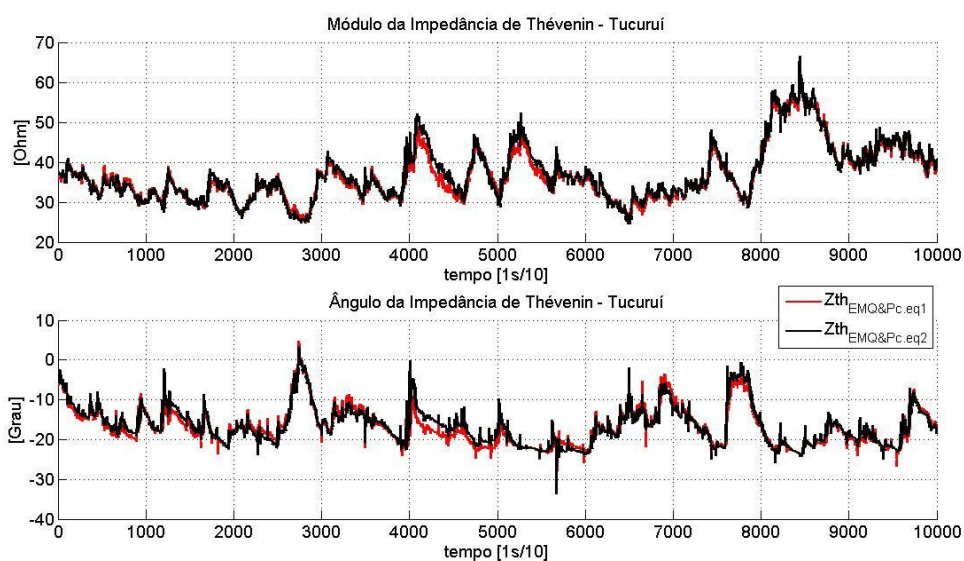


Figura 4.20 – Evolução $\bar{Z}_{th_{MQ\&P_{ceq1}}}$ versus $\bar{Z}_{th_{MQ\&P_{ceq2}}}$ no tempo.

A Figura 4.21 apresenta o fluxograma da Metodologia PIT ampliada pela inclusão do MQ&P₂, em substituição ao equivalente original (método EM). São evidenciados os passos 2.1, 2.2 e 2.3 relativos à implementação do método proposto nesta dissertação.

No passo 2.1, é realizado o cálculo inicial dos parâmetros do equivalente pelo método de Mínimos Quadrados ($\hat{E}_{th_{MQ}}$ e $\bar{Z}_{th_{MQ}}$). Posteriormente, no passo 2.2, são realizadas as correções, se necessárias, no ângulo de $\bar{Z}_{th_{MQ\&P_2}}$ e no módulo de $\hat{E}_{th_{MQ\&P_2}}$. Por fim, no passo 2.3 é feita a média ponderada para a definição do $\bar{Z}_{th_{MQ\&P_2}}$; ainda neste passo é recalculada a $\hat{E}_{th_{MQ\&P_2}}$.

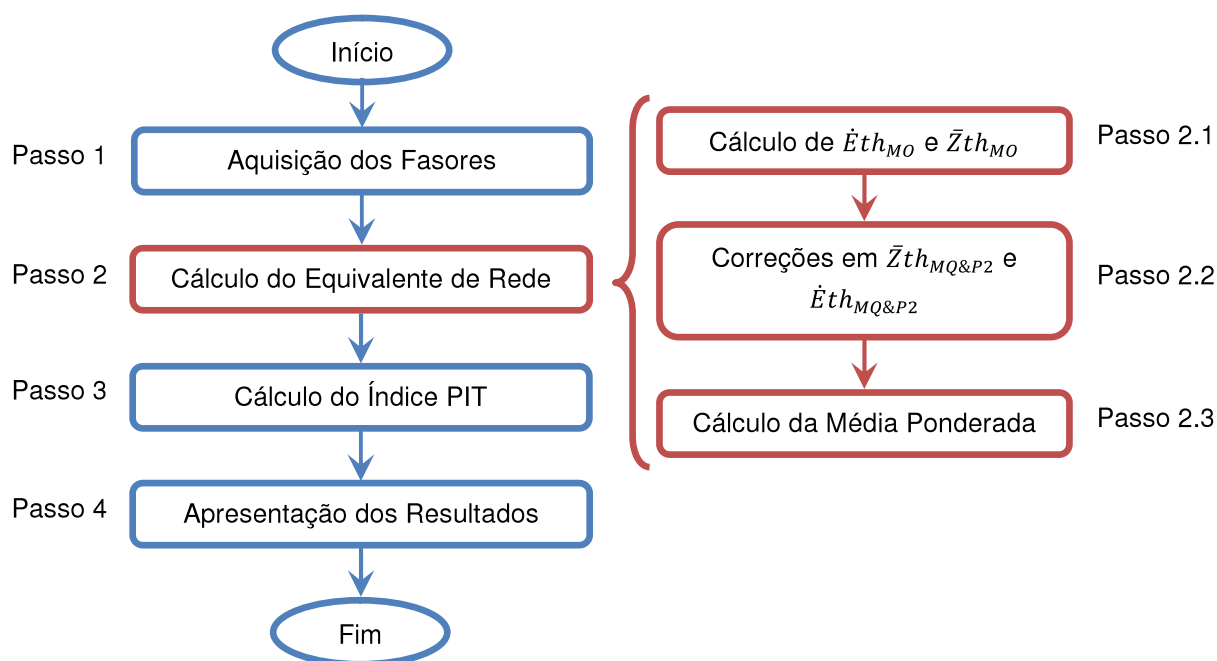


Figura 4.21 – Fluxograma da metodologia PIT com MQ&P₂.

O método MQ&P₂, tendo em vista a sua filosofia bem fundamentada, o refinamento no cálculo dos parâmetros e os resultados extremamente consistentes, consiste no método proposto nesta dissertação, denominado **Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados – MQ&P**.

4.9. Considerações Finais

Conforme discutido anteriormente, as metodologias propostas neste capítulo são divididas em dois grupos distintos. O primeiro grupo compreendendo as metodologias APM e APZ e o segundo as E&P, MQ&P₀, MQ&P₁ e MQ&P₂.

Nota-se que o grupo 1 foi desenvolvido seguindo uma “linha” distinta do segundo grupo e, através de vários testes realizados em simulações, verificou-se que os baixos ganhos na estimação dos parâmetros de Thévenin inviabilizam sua implementação devido ao alto custo computacional envolvido. Este fato motivou o surgimento das metodologias classificadas no grupo 2.

Como todas as metodologias do grupo 2 compreendem uma evolução da pesquisa, neste texto são apresentados somente os dados da aplicação do método intitulado como o mais refinado dentre todos desenvolvidos o MQ&P₂.

O método MQ&P₂ representa a filosofia do MQ&P, cumprindo o objetivo proposto nesta dissertação.

5. Aplicação do Método Proposto em Sistemas Elétricos Reais

5.1. Considerações Iniciais

Este capítulo visa apresentar e analisar os resultados obtidos com a aplicação do MQ&P na composição do equivalente utilizando medições do SEP.

A realização dos testes da metodologia proposta envolveu a elaboração de uma rotina utilizando o programa [Matlab®, 2009], que possui como função ler um arquivo em .xls com as medições e efetuar os cálculos conforme descrito no capítulo 4.

Para os testes foram utilizadas medições obtidas do centro de operação da CEMIG (coletadas em intervalos fixos de um minuto) e do sistema de medição fasorial da Eletrobras (coletadas em intervalos de um décimo de segundo).

Foram utilizados dados de três barras da rede básica do SIN brasileiro:

- Montes Claros 2, sob responsabilidade da CEMIG, com tensão nominal de 345 kV;
- Tucuruí e Altamira, sob responsabilidade da Eletrobras Eletronorte, com tensão nominal de 230 kV.

Observa-se que as medições da subestação de Montes Claros 2 foram utilizadas no capítulo 3, nas simulações do equivalente original de Vu. Neste capítulo, com a aplicação do MQ&P, podem ser observadas as diferenças dos resultados.

Como a barra de Montes Claros 2 já foi descrita anteriormente, faz-se necessário aqui somente descrever as demais. A Figura 5.1 apresenta um diagrama unifilar indicando as subestações de Altamira e Tucuruí.

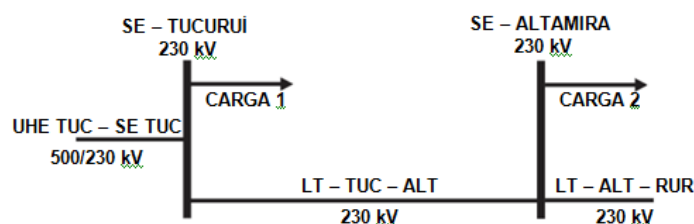


Figura 5.1 – Diagrama unifilar das subestações de Altamira e Tucuruí.
Fonte: [Vale, 2012].

Nota-se que ambas possuem três ramos sendo um ramo de carga muito bem definido e duas linhas de transmissão, onde uma delas faz a interligação das duas subestações. É considerado que o sentido do fluxo de potência neste sistema se dá quase sempre da esquerda para a direita (Tucuruí para Altamira), conforme comentado em [Vale, 2012]. Portanto, este é o sentido adotado neste trabalho e, para estas barras, é considerado somente o método de obtenção de carga M2.

5.2. Subestação Montes Claros 2 – MCLAR2

Antes de discutir os resultados deste estudo de caso é importante destacar a sua diferença em relação aos demais. Nota-se que o intervalo de medição para MCLAR2 é muito maior, visto que estas não são medições obtidas diretamente de PMU e sim do estimador de estado do centro de operação da CEMIG.

Por se tratar de medições do centro de operação, o conjunto de dados da subestação MCLAR2 obteve tratamento por parte do estimador de estado, então pode-se dizer que houve um tratamento nestes dados no que diz respeito aos ruídos presentes nas medições.

A Figura 5.2 mostra o comportamento do módulo e do ângulo da impedância de Thévenin, $\bar{Z}_{th_{MQ\&P}}$, calculada pelo método MQ&P, considerando a metodologia de identificação de carga M1.

Nota-se que, diferentemente do que ocorre com o EM, Figura 3.39, a evolução de $\bar{Z}_{th_{MQ\&P}}$ indica pequenas variações no SEP, com exceção do intervalo de 5h a 10h. Para explicar tal comportamento, faz-se necessário rever a Figura 3.33 descrita novamente na Figura 5.3, que ilustra a corrente nos ramos incidentes no barramento. Neste período de tempo, há um aumento e um decréscimo respectivamente da corrente das linhas MCLAR2-IRAPE e MCLAR2-VPAL1 e, além disto, próximo das 10h há duas grandes variações de corrente nestas linhas. Tais alterações justificam o comportamento de $\bar{Z}_{th_{MQ\&P}}$ no período mencionado.

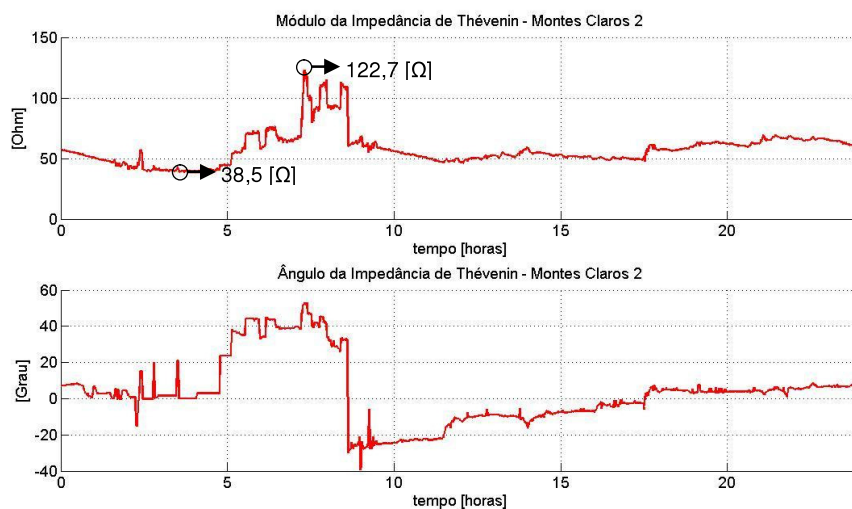


Figura 5.2 – Evolução da $\bar{Z}_{th_{MQ\&P}}$ para M1 no tempo.

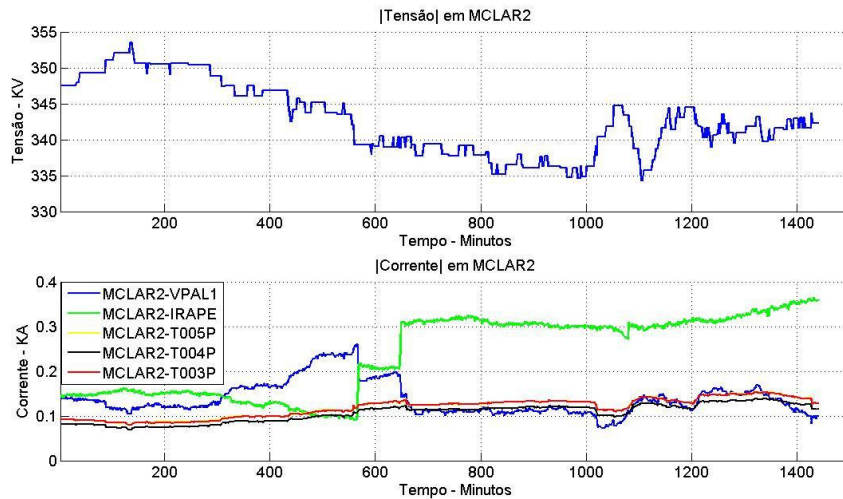


Figura 5.3 – Evolução da tensão e da corrente em cada ramo da barra.

Outro ponto relevante é a evolução do ângulo de $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ ($\theta_{Z_{MQ\&P}}$), que se mantém dentro dos limites para a impedância da carga ($-90 < \theta_{Z_{MQ\&P}} < 90$), devido à correção imposta pela metodologia de MQ&P em $\theta_{Z_{MQ\&P}}$.

Ainda com respeito à Figura 5.2, pode-se dizer que as alterações na barra entre 5h e 10h influenciam também o comportamento de $\theta_{Z_{MQ\&P}}$, pois neste período o mesmo possui grandes variações.

Já em relação à tensão do equivalente de MQ&P ($\dot{E}th_{MQ\&P}$), tem-se ilustrada a Figura 5.4 que descreve a evolução da mesma no tempo. Observa-se, mais uma vez, um grande amortecimento das oscilações, quando comparado ao EM (Figura 3.34), assim como para $\bar{Z}th_{MQ\&P}$.

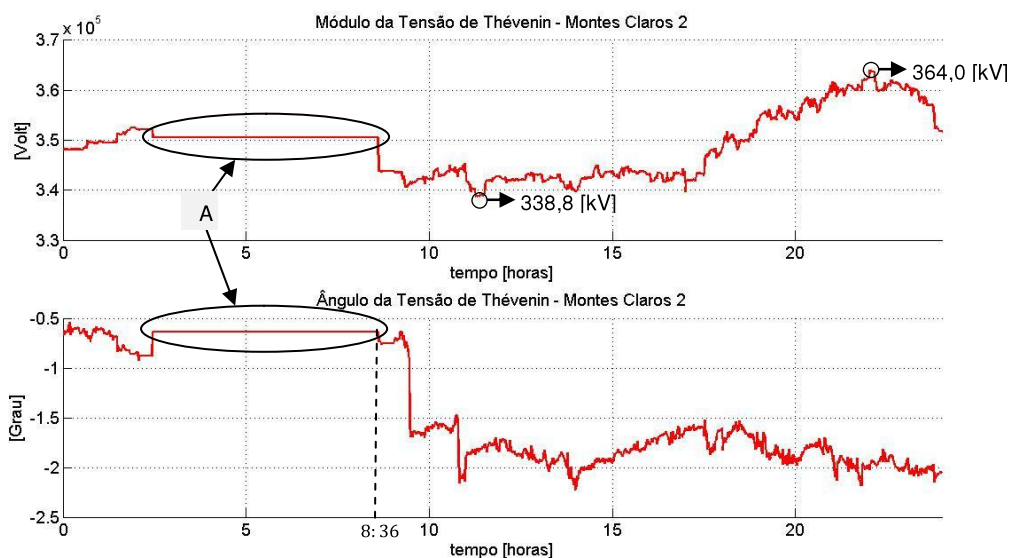


Figura 5.4 – Evolução da $\dot{E}th_{MQ\&P}$ para M1 no tempo.

Na Figura 5.4, as regiões denominadas “A” identificam o momento onde há a correção do módulo da tensão. Como neste momento a carga e o sistema são indutivos, a

$\dot{E}th_{MQ\&P}$ é corrigida, para o valor calculado no instante anterior, quando seu módulo superar $1,1xV_{nom}$ ou for menor que V_c . Cabe lembrar que, após a correção em $\dot{E}th_{MQ\&P}$, faz-se necessário recalculá-la $\bar{Z}th_{MQ\&P}$.

Em “A” o valor da $Eth_{MQ\&P}$ é corrigido para 350 kV, valor muito longe de $1,1xV_{nom}$. Logo, o motivo da atuação do bloco de correção de módulo é o baixo valor de $Eth_{MQ\&P}$ no intervalo, ou seja, $Eth_{MQ\&P} < V_c$.

Continuando as análises da Figura 5.4, verifica-se que às 8h36min o bloco de correção de módulo não é mais acionado devido ao baixo valor de V_c , que passa a ser menor que $Eth_{MQ\&P}$.

Utilizando agora o método de identificação de carga M2, em conjunto com o MQ&P, é apresentada a Figura 5.5 que ilustra a evolução de $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ no tempo. Mais uma vez o comportamento desta grandeza representa o SEP de forma consistente, visto que pequenas alterações de tensão/corrente provocam pequenas alterações em $\bar{Z}th_{MQ\&P}$. Além disto, as grandes variações de corrente nos ramos que incidem na barra também foram sentidas nos parâmetros do equivalente do MQ&P.

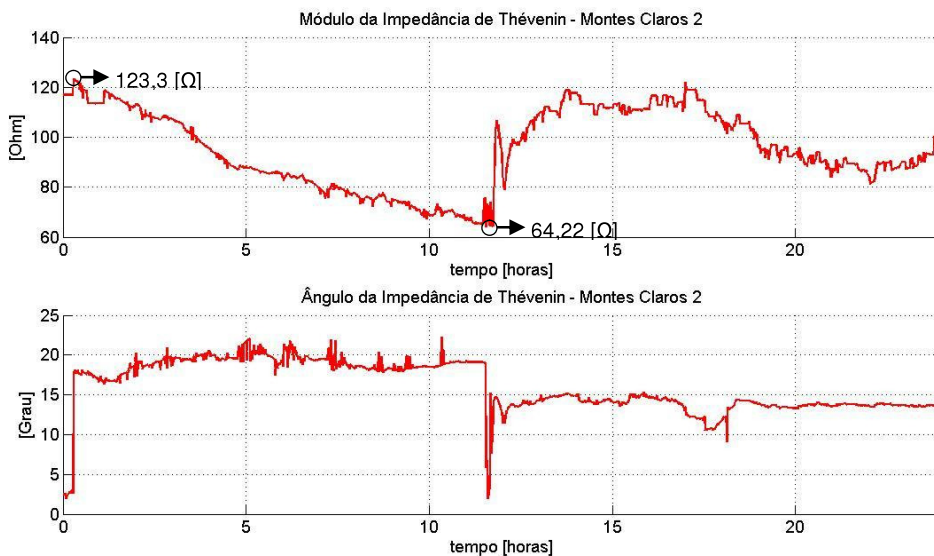


Figura 5.5 – Evolução da $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ para M2 no tempo.

Para o M2, somente as variações ocorridas nas proximidades das 10h provocaram alterações em $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ com maior intensidade. Nota-se que a herança “genética” das medições anteriores também influencia a estimação, causando um atraso do impacto de uma alteração ou distúrbio no SEP nos parâmetros de Thévenin. Isto ocorre em metodologias que utilizam, em seu cálculo, janela de dados anteriores como o MQ&P.

Quando comparados os resultados obtidos com M1 e M2, torna-se claro que a simples mudança no modelo de carga traz diferenças significativas na obtenção do equivalente, como muito bem discutido em [Ribeiro, 2011].

Duas diferenças básicas podem ser observadas na análise conjunta das Figura 5.2 e Figura 5.5. A primeira está na grande distinção no comportamento de $\bar{Z}th_{MQ\&P}$, tanto

em módulo quanto em ângulo, e a segunda é a característica capacitiva imputada ao equivalente (região onde $\theta_{Z_{MQ\&P}} < 0$) para M1 entre as 8h36min e 17h32min, não observada quando utilizada M2.

É importante destacar que não faz parte deste trabalho avaliar os métodos M1 e M2, e sim a metodologia proposta, mas é de suma importância caracterizar os impactos destes dois métodos na obtenção dos parâmetros de Thévenin.

Além das diferenças encontradas em $\bar{Z}th_{MQ\&P}$, há aquelas relacionadas à tensão $\dot{E}th_{MQ\&P}$. Para facilitar a visualização, é apresentada a Figura 5.6 que representa a evolução do módulo e do ângulo de $\dot{E}th_{MQ\&P}$ no tempo. Assim como na impedância, a tensão da fonte equivalente também possui comportamento muito diferente em módulo e ângulo quando comparado ao obtido com M1 (Figura 5.4).

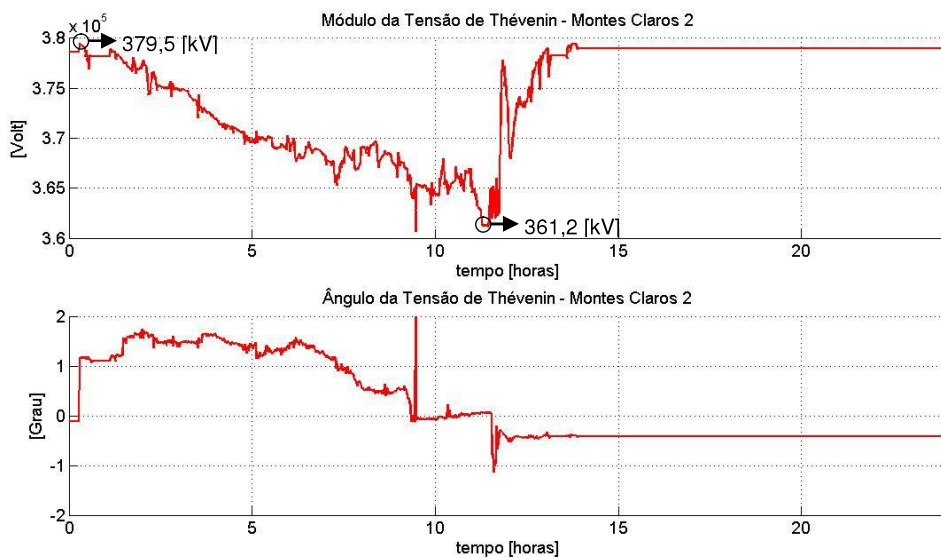


Figura 5.6 – Evolução da $\dot{E}th_{MQ\&P}$ para M2 no tempo.

Como o sistema que alimenta a carga em M2 é considerado indutivo, durante todo o período analisado, a inequação que ativa o bloco de correção de $Eth_{MQ\&P}$ é conforme descrito pela expressão (4.21). Após as 13h53min há uma violação nesta condição ativando este bloco, onde $Eth_{MQ\&P}$ violou o limite superior ($Eth_{MQ\&P} > 1,1V_{nom}$).

Em virtude das pequenas variações identificadas na tensão e nas correntes da barra de MCLAR2, os resultados obtidos com a aplicação do MQ&P, tratando-se dos parâmetros de Thévenin, apresentam-se mais próximos do esperado para o comportamento do SEP, quando comparados à aplicação do EM e até mesmo do MQ e suas derivações.

5.3. Medição Subestação Tucuruí

As medições aqui utilizadas, obtidas do Centro de Medição Fasorial Síncrona (CMFS) da Eletrobras, foram coletadas em 04/05/2012 a partir das 8h da manhã, com duração de aproximadamente 16 minutos e 40 segundos. Os dados são disponibilizados em

domínio público [CMFS, 2012]. Para maiores informações sobre o CMFS da Eletrobras, recomenda-se a referência [Martins, 2011].

Inicialmente, é feita uma análise das medições de tensão/corrente, a fim de identificar o comportamento do sistema no período amostrado. Posteriormente, é realizada uma análise conjunta deste comportamento com a resposta do MQ&P.

Nesta direção, é apresentada a Figura 5.7 que ilustra o perfil do módulo da tensão medida na barra Tucuruí (V_{mTUC}). Considerando os limites estabelecidos nos Procedimentos de Rede do ONS [ONS, 2010], nota-se que, mesmo com o V_{mTUC} sendo abaixo da nominal da barra, variando entre 225,5 e 227,5 kV, a mesma encontra-se dentro da faixa limite de operação (218 a 242 kV ou 0,95 a 1,05 pu).

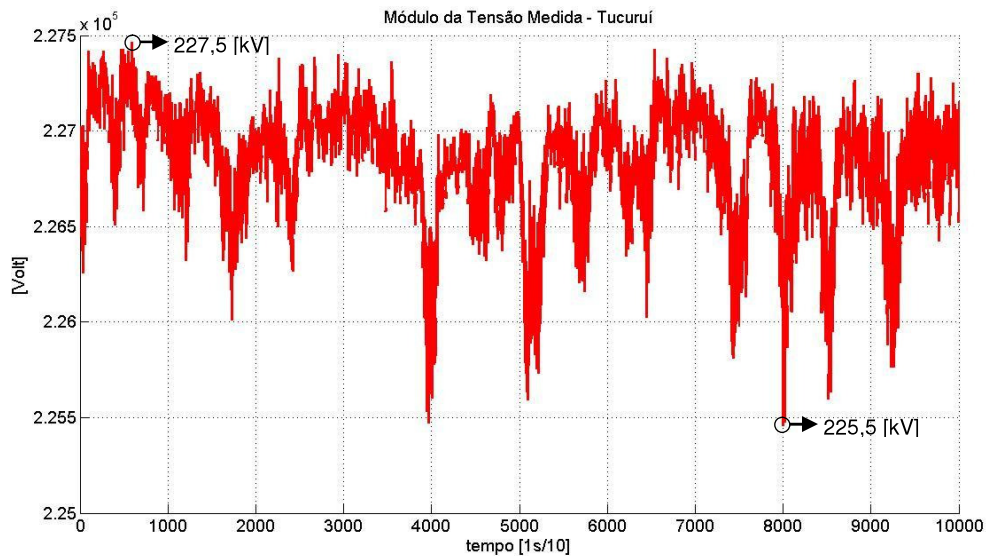


Figura 5.7 – Tensão medida na barra de Tucuruí.
Fonte: [Vale, 2012].

Além disto, pode-se dizer que as variações de V_{mTUC} no tempo não se apresentam elevadas entre medições consecutivas. A tensão apresenta comportamento de operação normal do SEP e tem-se um curto intervalo de tempo entre as medições proporcionado pelo CMFS, com o uso das PMU.

Nota-se que o mesmo fato é observado na corrente equivalente de carga (\hat{I}_{eqTUC}), porém, diferente de V_{mTUC} , a corrente possui momentos de grande variação, como ocorre nas proximidades de 2000 e 7500 (1s/10), conforme ilustra a Figura 5.8. Isto pode ser reflexo de uma alteração mais significativa da carga e geração do SEP, onde um aumento na corrente se mostra em \hat{I}_{eqTUC} que é calculada através da potência da carga.

Ainda analisando a Figura 5.8, identifica-se que I_{eqTUC} varia entre 294,6 e 312 A, com variações máximas na faixa de 11 A nos momentos de expressivas variações, como já citado. Outra questão importante é a análise do ângulo da corrente \hat{I}_{eqTUC} (θ_{eqTUC}) que se situa sempre no primeiro quadrante, ou seja, $90^\circ > \theta_{eqTUC} > 0$, descrevendo uma carga predominantemente capacitiva na barra, condição que aumenta a potência máxima que o sistema pode entregar à barra de Tucuruí.

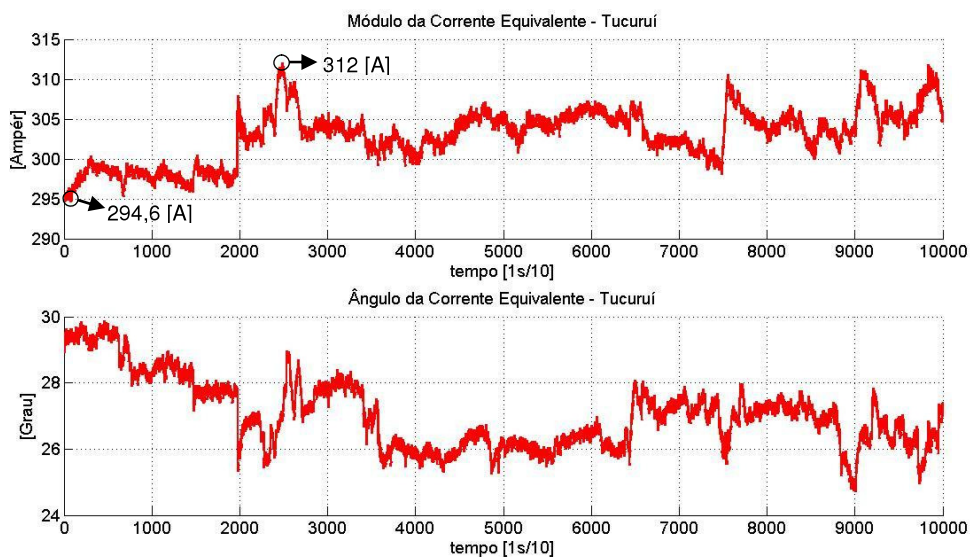


Figura 5.8 – Corrente equivalente de carga em Tucuruí.
Fonte: [Vale, 2012].

Aplicando o MQ&P, obtém-se a $\bar{Z}th_{MQ\&P}$, conforme ilustra a Figura 5.9, onde seu módulo encontra-se oscilando entre 25,4 e 63,9 Ω com pequenas variações ao longo do tempo. Torna-se visível que, assim como para as medições de MCLAR2, $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ possui pequenas variações ao longo do tempo.

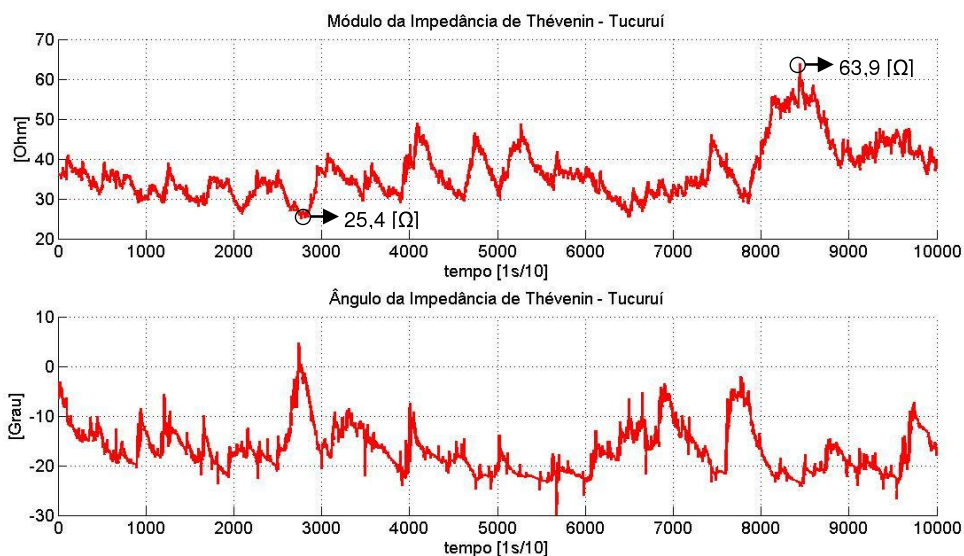


Figura 5.9 – Evolução de $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ para Tucuruí.

Além disto, o ângulo ($\theta_{Z_{MQ\&P}}$) da $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ encontra-se dentro de limites aceitáveis para a impedância ($-90^\circ < \theta_{Z_{MQ\&P}} < 90^\circ$) e é menor que zero durante todo o período.

Já em relação a $\dot{E}th_{MQ\&P}$ é apresentada a Figura 5.10, onde é possível notar que as alterações desta grandeza encontram-se em conformidade com as identificadas na corrente e tensão, pois não são observadas variações expressivas entre momentos consecutivos, tal como em $\bar{Z}th_{MQ\&P}$.

Também são destacados na, Figura 5.10, os valores máximo e mínimo de $E_{th_{MQ\&P}}$, a fim de facilitar a análise do intervalo de variação que está compreendido entre 233,8 e 245,5 kV, ou seja, variações entre o máximo e o mínimo de 11,8 kV cerca de 5,1% em relação a V_{nom} .

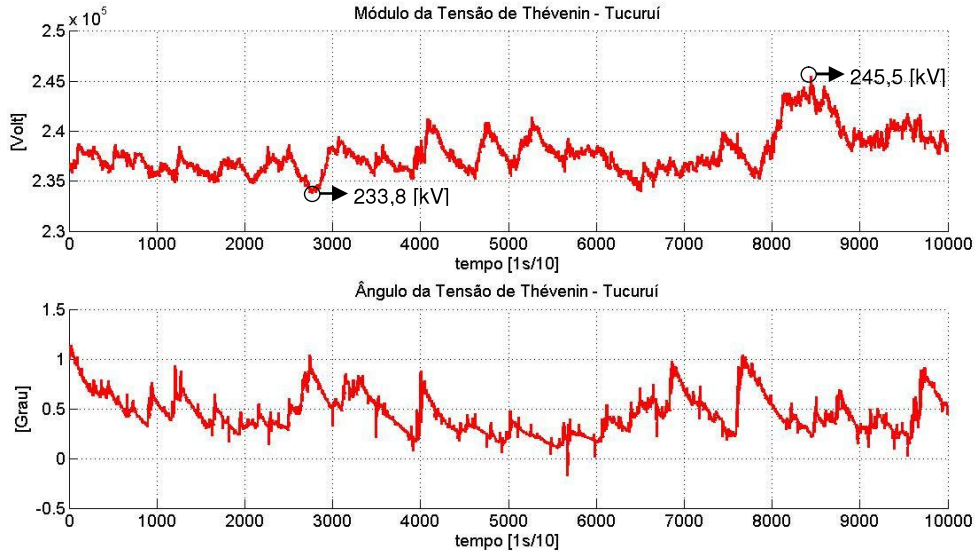


Figura 5.10 – Evolução de $E_{th_{MQ\&P}}$ para Tucuruí.

Além disto, como $E_{th_{MQ\&P}}$ não violou nenhum limite estabelecido, no que diz respeito à tensão nos geradores, não houve necessidade, neste caso, da correção do módulo de tal grandeza.

Com respeito ao ângulo de $E_{th_{MQ\&P}}$ ($\theta_{E_{MQ\&P}}$), nota-se que o mesmo é muito pequeno, variando entre 1,14 e $-0,17$ graus com pequenas variações entre medições consecutivas.

5.4. Medição Subestação Altamira

Assim como no item 5.3, neste item serão discutidos os resultados obtidos com medições retiradas de PMU instaladas na rede básica do sistema elétrico brasileiro. Mais especificamente na subestação de Altamira.

Neste sentido, é apresentada a Figura 5.11 que ilustra o comportamento da tensão medida na barra de Altamira. Nota-se que a mesma varia entre 232,7 e 235,7 kV sem apresentar grandes variações entre medições consecutivas, com exceção do instante 200 segundos (2000 (1s/10)). O motivo de tal ocorrência é explicado por meio da análise do comportamento da corrente descrito na Figura 5.12.

No mesmo instante em que houve as variações mais expressivas na tensão, ocorreu um aumento de corrente de aproximadamente 17 A, ou seja, um aumento de 15% no carregamento da barra. Tal aumento pode ter provocado a diminuição da tensão na barra que, após o evento, se estabiliza em torno de 234 kV por volta do instante 400 segundos (4000 (1s/10)).

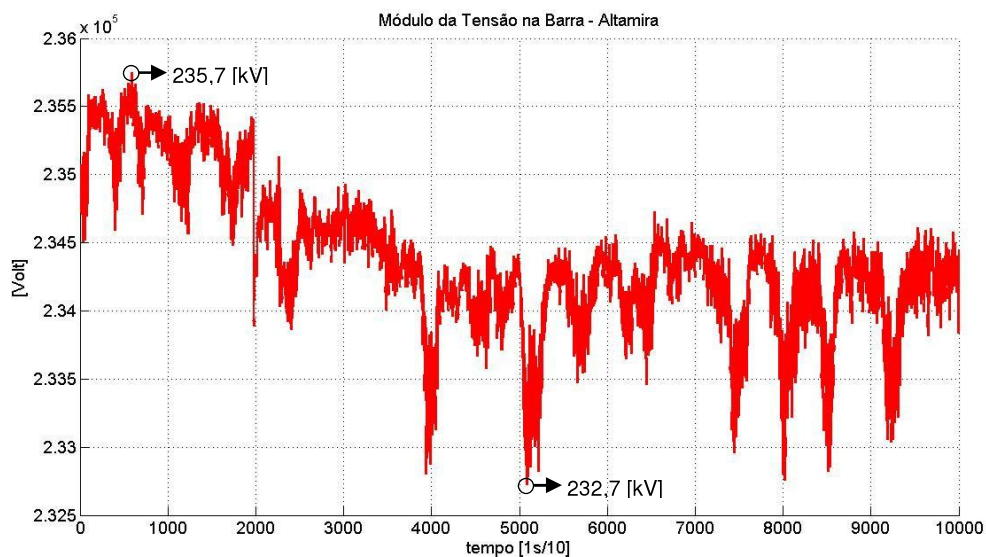


Figura 5.11 – Tensão medida na barra de Altamira.
Fonte: [Vale, 2012].

Ainda com respeito à Figura 5.12, pode-se analisá-la considerando três patamares de comportamento da corrente: o primeiro compreendendo os instantes de 0 a 200 segundos, onde a corrente mantém-se próxima a 110 A; um segundo, classificado como transitório, que ocorre entre 200 e 250 segundos, representando o momento onde a corrente aumenta de 110,1 para 127,4 A nos instantes iniciais e oscila entre 120 e 127 A, caracterizando um aumento de carga na barra, até estabilizar-se próxima a 122,5 A; um terceiro momento, compreendido no intervalo de 250 a 1000 segundos, onde a corrente mantém-se em torno de 122,5 A.

Nota-se ainda o mesmo fato no ângulo da corrente, porém sem grandes impactos, visto que o mesmo é muito pequeno durante todo o intervalo analisado.

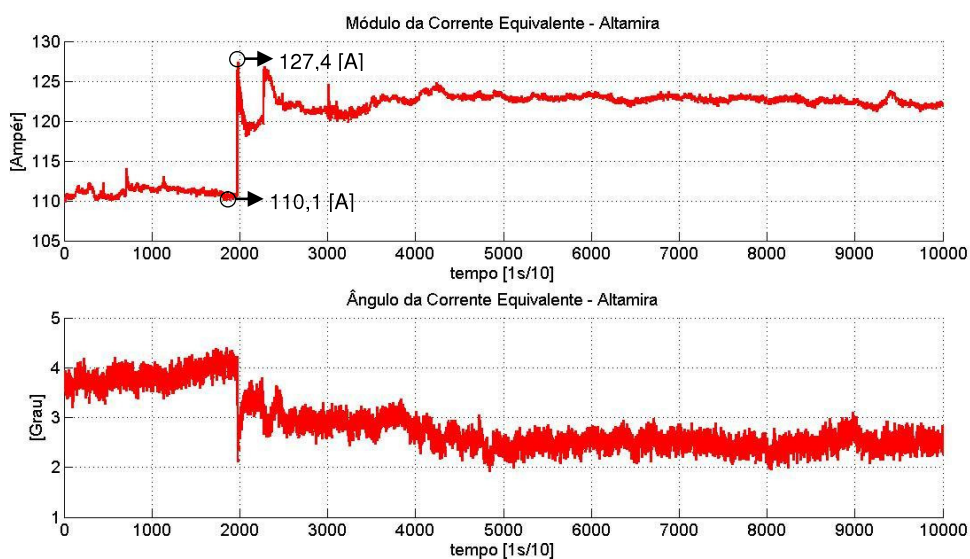


Figura 5.12 – Corrente equivalente de carga em Altamira.
Fonte: [Vale, 2012].

Já em relação à resposta do MQ&P, é apresentada a Figura 5.13 que descreve, para o intervalo em análise, o comportamento de $\bar{Z}th_{MQ\&P}$. Nota-se que seu módulo varia entre 54,57 e 148,8 Ω e que seu ângulo fica dentro dos limites para impedância ($-90^\circ < \theta_{Z_{MQ\&P}} < 90^\circ$). Além disto, o ângulo é predominantemente negativo (impedância equivalente do sistema é capacitiva) até próximo do instante 750 segundos (7500 (1s/10)) e de 900 a 1000 segundos.

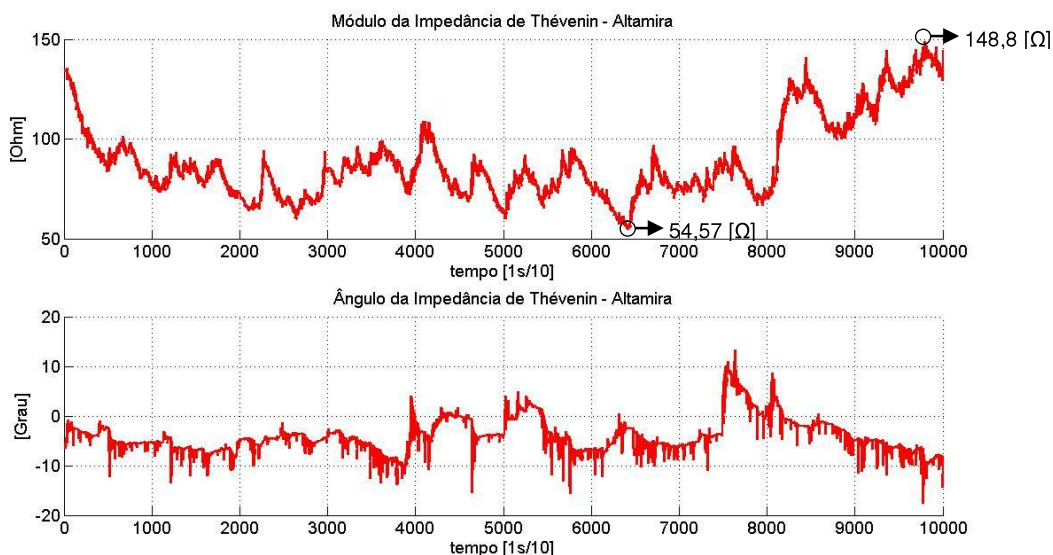


Figura 5.13 – Evolução de $\bar{Z}th_{MQ\&P}$ para Altamira.

No entanto, observa-se que, assim como para o barramento de Tucuruí, há pequenas variações entre instantes consecutivos para $\bar{Z}th_{MQ\&P}$, mas com alterações consideráveis ao longo de todo o período analisado, representando de forma satisfatória e consistente a dinâmica do SEP.

Já na Figura 5.14, tem-se ilustrada a evolução do módulo e do ângulo de $\bar{E}th_{MQ\&P}$ no tempo. O módulo varia entre 240,4 a 252,0 kV com pequenas variações entre intervalos consecutivos. Assim como em $\bar{Z}th_{MQ\&P}$, o $\bar{E}th_{MQ\&P}$ apresenta alterações consideráveis ao longo de todo o período amostrado.

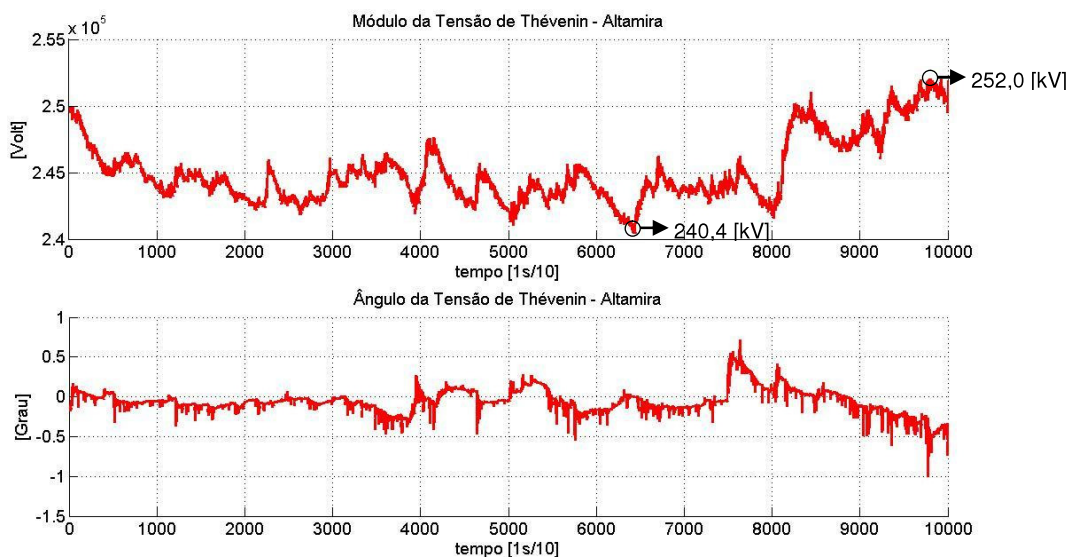


Figura 5.14 – Evolução de $\hat{E}th_{MQ\&P}$ para Altamira.

5.5. Considerações Finais

Os resultados da aplicação do método de MQ&P apresentados neste capítulo mostram a consistência da metodologia proposta.

O cálculo do equivalente, utilizando dados provenientes de medições coletadas em sistemas elétricos reais, constituiu uma etapa de testes bem rigorosa para o método, tendo em vista que submeteu a metodologia a situações presentes na operação em tempo real, nem sempre consideradas nos cenários de simulação por fluxo de potência.

Comparando-se o método desenvolvido por [Vu, 1999a] e o MQ&P, torna-se evidente a eficiência da metodologia desenvolvida, em especial no que diz respeito ao tratamento da sensibilidade a pequenas variações de carga e variações sistêmicas do EM.

Diante dos resultados obtidos, a estimação dos parâmetros do equivalente pelo MQ&P, caracterizado como *Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados*, passa a integrar a Metodologia PIT, mais especificamente no seu passo 2, conforme ilustrado na Figura 4.21.

6. Conclusões e Propostas de Continuidade

A dissertação de mestrado aqui apresentada propõe um método, denominado *Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados*, para construção de equivalentes de redes, em tempo real, utilizando dados provenientes dos SMFS.

A determinação dos parâmetros do equivalente a partir dos fasores de tensão e de corrente provenientes de medições, considerando a taxa de amostragem dos SMFS, envolve inúmeras questões que, se não consideradas, podem gerar resultados inconsistentes com o comportamento do SEP.

Provavelmente o desafio de se tratarem tais questões seja a causa da carência de trabalhos que possuam resultados de seus métodos com aplicações de medições retiradas do SEP. Fica claro que existem grandes diferenças entre o “mundo” das simulações e o “mundo” das medições, como discutido ao longo deste texto.

Dentre as questões que merecem destaque, encontram-se a própria dinâmica do SEP, refletida nos valores medidos, e os erros do tipo ruído presentes nas medições. O método proposto trata do ruído por meio do uso do estimador dos mínimos quadrados e associa as variações dos fasores de tensão e de corrente ao comportamento do sistema elétrico, fazendo uso de ponderações. Ainda no contexto de dar consistência aos parâmetros calculados, o método implementa correções de ângulo na impedância e de módulo na tensão do equivalente.

As simulações e testes realizados durante o desenvolvimento do método possibilitaram um maior conhecimento sobre a resposta do equivalente frente a diferentes condições de operação, mostrando sua consistência.

Em termos de contribuição deste trabalho, além do próprio método implementado, são relevantes as análises e estudos realizados no sentido de um maior conhecimento da resposta do equivalente descrito em [Vu, 1999a].

Como proposta de continuidade, sugere-se um maior aprofundamento do conhecimento na relação dos vetores de carga equivalente, a fim de melhorar as correções realizadas no ângulo da impedância do equivalente. Adicionalmente, recomenda-se o ajuste das metodologias para cálculo da corrente de carga, tendo em vista a atual disponibilidade de dados provenientes de medição e a possibilidade de aferição das mesmas que o *Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados* permite.

Por fim, espera-se que esta dissertação traga significativa contribuição para a operação do SEP em tempo real, permitindo sua monitoração quanto ao risco de

instabilidade de tensão, possibilitando que ações preventivas sejam realizadas, evitando situações críticas e aumentando sua segurança. Um indicativo nesta direção são os trabalhos já publicados [Leal, 2012] e [Vale, 2012].

Referências Bibliográficas

- [Aguirre, 2007] L.A. Aguirre, Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais, 2007.
- [Alexander, 2003] C.K. Alexander, M.N.O. Sadiku, Fundamentos de Circuitos Elétricos, 2003.
- [Anarede, 2012] Anarede Continuado, <http://www.anarede.cepel.br/>, 2012.
- [Andrade, 2008] S.R.C. Andrade, Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Aplicações para Melhoria da Operação de Sistemas Elétricos de Potência, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2008.
- [Anton, 2006] H. Anton, R.C. Busby, Álgebra Linear Contemporânea, Editora Bookman, 2006.
- [Cemig, 2010] CEMIG, LRC/UFMG, CONCERT, Desenvolvimento de Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, Projeto P&D GT 354 – CEMIG ANEEL, 2010.
- [Chaves, 2007] F.S. Chaves, Avaliação Técnica do Desempenho da Compensação Reativa Shunt Capacitiva Aplicada à Expansão de Sistemas Elétricos, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2007.
- [CMFS, 2012] CMFS – http://abil.eln.gov.br/doc/medicao_fasorial.
- [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, 2001.
- [Cutsem, 1998] T.V. Cutsem, C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [Han, 2009] S. Han, B. Lee, S. Kim, Y. Moon, Development of Voltage stability Index using synchro-phasor based data, IEEE T&D Asia, 2009.
- [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.), 1990.

- [IEEE, 2008] IEEE Working Group, PMU Are the System of Choice, IEEE Power&Energy, vol. 6 nº 5, 2008.
- [Júnior, 2008] L.M. Júnior, Procedimento para Avaliação do Impacto da Compensação Reativa Shunt Capacitiva na Estabilidade de Tensão, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2008.
- [Kundur, 1994] P. Kundur, Power System Stability and Control, Electrical Engineering Series – EPRI editors, 1994.
- [Larsson, 2003] M. Larsson, J. Bertsch, Monitoring and Operation of Transmission Corridors, Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna, Vol.3, No. 8 June 2003.
- [Leal, 2012] O.E.S. Leal, M.H.M. Vale, F.S. Chaves, D.S. Martins, S.R.C. Andrade, Tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada – Determinação da Margem de Estabilidade de Tensão nas Análises Integradas de Planejamento da Operação e de Tempo Real, XII SEPOPE, Rio de Janeiro – RJ, maio 2012.
- [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, 1998.
- [Martins, 2011] D. Martins, Centro de Medição Fasorial Síncrona, Relatório Técnico, março 2011, http://abil.eln.gov.br/doc/medicao_fasorial/centro_de_medicao_fasorial_sincrona.pdf.
- [Martins, 2012] D.S. Martins, Aplicação de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada na Previsão de Instabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência, Projeto Final de Curso em Engenharia de Controle e Automação, UFMG, 2012.
- [Matlab®, 2009] Matlab®, Version 7.9.0.529, <http://mathworks.com>, 2009.
- [Monticelli, 1983] J. Monticelli, Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica, Edgard Blacher, 1983.
- [ONS, 2009] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Procedimentos de Rede – Submódulo 3.6, Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica, 2009.
- [ONS, 2010] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3, Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, 2010.

- [Phadke, 2008] A.G. Phadke, J.S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and their Applications, 2008.
- [PowerWorld, 2012] Power World, Version 16 , <http://www.powerworld.com>, 2012.
- [Relatório, 2012] Relatório Técnico P8 – Identificação da Correlação entre as Medições em Tempo Real das PMUs e o Cálculo da Margem de Estabilidade, Projeto ANEEL P&D GT 354 – LRC/UFMG – CEMIG, 2012.
- [Ribeiro, 2011] G.L.S. 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, 2011.
- [Silva, 2010] R.G.F. Silva, Aplicação dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizado na Avaliação da Estabilidade de Tensão, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, 2010.
- [Su, 2009] Y. Su, X. W, A Method for Voltage Stability Assessment Based on Wide Area Measurement System, IEEE, 2009.
- [Taranto, 2007] G.N. Taranto, S. Corsi, Avaliação do Risco de Colapso de Tensão em Tempo Real Baseada em Medição Fasorial, Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro 2007.
- [Vale, 2012] M.H.M. Vale, F.S. Chaves, O.E.S. Leal, D.S. Martins, S.C. Condega, R.G.F, Silva, S.R.C. Andrade, Avaliação Avançada de Tensão em Tempo Real Utilizando Dados Fasoriais, XII EDAO, Brasília – DF, novembro 2012.
- [Vu, 1997] K.T. Vu, M.M. Begovic, D. Novosel, Grids Get Smart Protection and Control, IEEE Computer Applications in Power, pp. 40-44, 1997.
- [Vu, 1999a] 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, August, 1999.
- [Vu, 1999b] K. Vu et al., Voltage Instability Predictor (VIP) and Its Applications, PSCC 99 Conference Proceedings, June 1999.
- [Vu, 2000] K. Vu et al., Quantifying Proximity to Voltage Collapse Using the Voltage Instability Predictor (VIP), IEEE, 2000.

Anexo A – Descrição dos Estimadores de Mínimos Quadrados

Durante a elaboração deste trabalho foram estudados os estimadores que se mostram os mais relevantes para o tratamento de ruídos em medições. São eles: o Estimador de Mínimos Quadrados (MQ), o Estimador Estendido de Mínimos Quadrados (EMQ) e Estimador de Mínimos Quadrados Totais (MQT). Como já relatado estes são os estimadores mais difundidos no meio acadêmico e prático para o tratamento de dados.

A.1 Estimador de Mínimos Quadrados

Como descrito anteriormente o EM pode ser representado pela equação (A.1), onde a matriz A denominada matriz de regressores contém as medições de corrente, o vetor b contém as tensões medidas e x é o vetor solução.

$$b = Ax \quad (A.1)$$

Admitindo que exista um erro ζ na solução encontrada pode-se reescrever a equação (A.1) conforme apresentado na equação (A.2).

$$b = Ax - \zeta \quad (A.2)$$

O objetivo principal do MQ é encontrar o vetor x onde ζ^2 seja o menor possível. Esta solução é encontrada através do sobredimensionamento da matriz de regressores, onde se utilizam diversas medições para formar a nova matriz.

Para facilitar o entendimento é considerada uma matriz sobredimensionada com quatro medições. O sistema pode ser reescrito como exposto em (A.3).

$$\begin{bmatrix} V_{k1r} \\ V_{k1m} \\ V_{k2r} \\ V_{k2m} \\ V_{k3r} \\ V_{k3m} \\ V_{k4r} \\ V_{k4m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k1r} & I_{k1m} \\ 0 & 1 & -I_{k1m} & -I_{k1r} \\ 1 & 0 & -I_{k2r} & I_{k2m} \\ 0 & 1 & -I_{k2m} & -I_{k2r} \\ 1 & 0 & -I_{k3r} & I_{k3m} \\ 0 & 1 & -I_{k3m} & -I_{k3r} \\ 1 & 0 & -I_{k4r} & I_{k4m} \\ 0 & 1 & -I_{k4m} & -I_{k4r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{thr} \\ E_{thm} \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} - \zeta \quad (A.3)$$

Como pode ser visto, a matriz de regressores presente em (A.3) não é quadrada, e, para se obter a solução do sistema, é calculada a pseudo-inversa (A_p) conforme equação (A.4). A solução do sistema é obtida utilizando a equação (A.5).

$$A_p = [A^T A]^{-1} A^T \quad (A.4)$$

$$x_{MQ} = A_p b \quad (A.5)$$

È importante salientar que a minimização do quadrado de ζ é obtida na solução da equação (A.4).

A.2 Estimador Estendido de Mínimos Quadrados

O EMQ trata-se de uma evolução do MQ onde a diferença entre eles se dá exatamente na matriz de regressores. Para o EMQ ela é denominada matriz de regressores estendida (A^*) e, ainda considerando um intervalo com quatro medições, tem-se A^* conforme apresentado na equação (A.6).

$$A^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k1r} & I_{k1m} & \varepsilon_{1(k-1)} \\ 0 & 1 & -I_{k1m} & -I_{k1r} & \varepsilon_{2(k-1)} \\ 1 & 0 & -I_{k2r} & I_{k2m} & \varepsilon_{3(k-1)} \\ 0 & 1 & -I_{k2m} & -I_{k2r} & \varepsilon_{4(k-1)} \\ 1 & 0 & -I_{k3r} & I_{k3m} & \varepsilon_{5(k-1)} \\ 0 & 1 & -I_{k3m} & -I_{k3r} & \varepsilon_{6(k-1)} \\ 1 & 0 & -I_{k4r} & I_{k4m} & \varepsilon_{7(k-1)} \\ 0 & 1 & -I_{k4m} & -I_{k4r} & \varepsilon_{8(k-1)} \end{bmatrix} \quad (A.6)$$

A última coluna de A^* é chamada vetor de resíduos (ε). Assim, para iniciar-se o processo de solução é necessário, para o primeiro passo, calcular x_{MQ} , tornando possível encontrar o primeiro vetor de resíduo utilizando a equação (A.7).

$$\varepsilon_{(k)} = b - Ax_{MQ} \quad (A.7)$$

Posteriormente obtém-se x_{EMQ} através da solução da equação (A.8).

$$x_{EMQ} = [A^{*T}A^*]^{-1}A^{*T}b \quad (A.8)$$

Feito isto, é calculado um novo vetor ε , constituindo um método iterativo que em poucas iterações converge para resíduos mínimos.

A.3 Estimador de Mínimos Quadrados Totais

O MQT foi desenvolvido para sistemas onde os ruídos provocam a polarização na resposta, ou seja, quando os ruídos presentes nas medições interferem na entrada e na saída do estimador.

Conforme [Aguirre, 2007], “uma possível interpretação para a resposta do MQ (equação (A.5)) é considerar que o mesmo perturbe o vetor de observações b de uma quantidade mínima de ζ , de forma que $b = b - \zeta$ possa ser explicada pelos regressores, que geram as colunas de A . A consideração implícita nesse procedimento é que os regressores são conhecidos. Tal consideração falha quando os sinais de entrada e de saída possuem ruído”.

No MQT é introduzida em A mais uma coluna, onde os elementos desta coluna são ruídos. Portanto para o MQT têm-se ruídos em b e em A , fazendo com que haja a minimização do quadrado de ζ e também a minimização dos impactos do ruído presente na medição. A equação básica para o calculo do MQT pode ser descrita como em (A.9).

$$x_{MQT} = [A^T A - \sigma_{n_x+1}^2 I]^{-1} A^T b \quad (A.9)$$

Nesta equação, n_x é o número de colunas de x , $(n_x + 1)$ -ésimo valor singular obtido decompondo-se a matriz estendida $[A \ b]$ em valores singulares, σ_{n_x+1} matriz de covariância e I matriz identidade.