

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 811

**USO DE MEDIÇÕES FASORIAIS NA DETERMINAÇÃO DE  
EQUIVALENTES PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO  
DOS SISTEMAS ELÉTRICOS**

**Marina Moreira Silveira Andrade**

DATA DA DEFESA: 26/02/2014

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**USO DE MEDIÇÕES FASORIAIS NA DETERMINAÇÃO  
DE EQUIVALENTES PARA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TENSÃO  
DOS SISTEMAS ELÉTRICOS**

Marina Moreira Silveira Andrade

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

Fevereiro de 2014

**"Uso de Medições Fasoriais na Determinação de Equivalentes  
Para Avaliação da Estabilidade de Tensão dos Sistemas  
Elétricos"**

**Marina Moreira Silveira Andrade**

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 26 de fevereiro de 2014.

Por:

*Maria Helena Murta Vale*

---

**Profa. Dra. Maria Helena Murta Vale  
DEE (UFMG) - Orientadora**

*Marco Aurélio de Souza Birchall*

---

**Prof. Dr. Marco Aurélio de Souza Birchall  
DELT (UFMG)**

*Fabrizio Silveira Chaves*

---

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

---

Dedico este trabalho a meus pais, Dagmar e Messias, e a minha orientadora, Maria Helena.

---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, luz em minha vida.

Aos meus pais, Dagmar e Messias, pelo amor e apoio incondicionais em todas as etapas de minha vida.

Aos meus irmãos, Ulisses e Adriana, pela amizade, momentos felizes e por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço e expresso minha profunda admiração, de modo especial, a minha professora e orientadora Maria Helena, pelos ensinamentos, compreensão, dedicação e confiança.

Aos professores do LRC/UFMG pelos ensinamentos e disciplinas ministradas ao longo da realização deste trabalho.

Aos bons colegas do LRC/UFMG, pelo compartilhamento de conhecimentos e momentos de descontração. Em especial, a Alyson, Ósis, Sandro, Afrânio, Rafael, Miguel, Listz, Ronaldo e Thiago.

A todos meus familiares e amigos de Florestal pelo incentivo, conversas e por tornarem meus momentos de descanso mais felizes.

Às amigas, Talita e Marília, pelos momentos felizes e inesquecíveis de nossa convivência.

Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

---

## RESUMO

A presente dissertação de mestrado propõe uma metodologia para análise da estabilidade de tensão na operação em tempo real dos sistemas elétricos de potência. A filosofia básica da metodologia consiste na construção de equivalentes, a partir de medições fasoriais das tensões e correntes, e no cálculo de um índice previsor para avaliação dinâmica da estabilidade de tensão.

A construção em tempo real de um equivalente de rede visto pelo barramento de interesse constitui o cerne da metodologia. Dentre as características inovadoras deste trabalho, destacam-se o processo de aceleração e as técnicas de amortecimento propostos para determinação dos parâmetros que caracterizam o equivalente da rede.

O trabalho apresenta os estudos realizados sobre a determinação do equivalente da rede e os resultados práticos da aplicação da metodologia proposta para um barramento do Sistema Interligado Nacional, verificando sua consistência em monitorar o comportamento dinâmico dos sistemas elétricos.

---

## **ABSTRACT**

*This master thesis addresses the use of a methodology for the analysis of power system voltage stability in real time operation. The basic philosophy of the methodology consists on the determination of network equivalents, based on phasor measurements of voltages and currents values, and on the calculation of a predictor index for voltage stability evaluation.*

*The determination of a real time network equivalent is the core of the proposal. Among its innovative characteristics, it can be mentioned the acceleration process and the development of specific damping techniques for adjusting equivalent parameters.*

*This work presents the studies related to network equivalent calculation. It includes practical results of applying the proposed methodology to a bus of the Brazilian Interconnected National System, checking for consistency in monitoring the performance of the electrical system.*

---

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Estabilidade de Tensão em Tempo Real – Conceitos Básicos .....	6
2.1	Considerações Iniciais.....	6
2.2	Conceitos Básicos Sobre Estabilidade de Tensão .....	6
2.2.1	Teorema da Máxima Transferência de Potência.....	7
2.3	Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada .....	14
2.3.1	Unidade de Medição Fasorial - PMU .....	15
2.3.2	<i>Global Positioning System</i> (GPS) .....	16
2.3.3	Concentrador de Dados Fasoriais (PDC) .....	16
2.4	Equivalentes de Rede.....	17
2.5	Estimador de Estados – Método dos Mínimos Quadrados .....	19
2.6	Considerações Finais .....	21
3	Equivalentes de Rede e Índices Previsores de Instabilidade – Revisão Bibliográfica e Contextualização do Tema.....	22
3.1	Considerações Iniciais.....	22
3.2	Revisão Bibliográfica .....	22
3.3	Contextualização do Tema – Pesquisas Anteriores .....	27
3.4	Considerações Finais .....	31
4	Metodologia para Análise da Estabilidade de Tensão em Tempo Real – Proposta .	32
4.1	Considerações Iniciais.....	32
4.2	Metodologia Original – Processo de Decisão .....	32
4.3	Análise da Metodologia Original.....	34
4.3.1	Aquisição de Fasores.....	34
4.3.2	Cálculo da Corrente de Carga Equivalente – $I_{km1}$ e $I_{km2}$ .....	37
4.3.3	Cálculo do Equivalente de Rede.....	41
4.3.4	Cálculo do Índice Previsor de Instabilidade – PIT .....	54
4.4	Nova Metodologia Proposta .....	58



---

4.4.1	Solução do Equivalente dos Mínimos Quadrados – Inclusão do Processo de Aceleração .....	59
4.4.2	Aplicação do Método para Amortecimento da Resposta do Equivalente	60
4.5	Considerações Finais .....	64
5	Aplicação da Metodologia Proposta .....	65
5.1	Considerações Iniciais .....	65
5.2	Aplicação da Metodologia Utilizando Dados de SMFS .....	65
5.3	Aplicação da Metodologia Utilizando Dados da Solução do Fluxo de Potência .....	73
5.4	Considerações Finais .....	76
6	Conclusões e Propostas de Continuidade.....	78
	Referências Bibliográficas.....	80

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema elétrico de duas barras .....	7
Figura 2.2 – Comportamento das relações $V/E$ , $I/I_{cc}$ e $P/P_{max}$ em função da variação $Z_L/Z_C$ .....	10
Figura 2.3 – Comportamento de $P/P_{max}$ para diferentes fatores de potência da carga... ..	11
Figura 2.4 – Curva PV, MET e MST .....	12
Figura 2.5 – Configuração básica de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada	15
Figura 2.6 – Estrutura básica de uma PMU .....	16
Figura 2.7 – Equivalente de Thévenin .....	18
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia original (Leal 2013).....	33
Figura 4.2 – Módulo das tensões originais e ajustadas de SMFS .....	35
Figura 4.3 – Avaliação do pré-processamento de dados para $Z_{TH}$ (a) e $E_{TH}$ (b) .....	36
Figura 4.4 – Fluxo de potência da barra k .....	37
Figura 4.5 – Potência crítica de cada ramo incidente referente a linhas de transmissão (a) e transformadores (b) .....	40
Figura 4.6 – Potência crítica do barramento e dos ramos incidentes .....	41
Figura 4.7 – Análise de sensibilidade em relação ao tamanho da janela de dados.....	42
Figura 4.8 – Período de estabilização para janela de dados de tamanhos 120 (a) e 5 (b).....	44
Figura 4.9 – Localização do ângulo $\theta_{TH}$ para cargas indutivas (a) e capacitivas (b) ...	47
Figura 4.10 – Potência crítica com e sem correção de $Z_{TH}$ .....	48
Figura 4.11 – Região das ponderações para tensão e corrente.....	52
Figura 4.12 – Impedância de Thévenin com e sem ponderação .....	53
Figura 4.13 – Índices baseados nas relações de impedâncias ( $PIT_Z$ ) e potências ( $PIT_P$ ) .....	57

---

Figura 4.14 – Fluxograma da nova metodologia proposta.....	58
Figura 4.15 – Período de estabilização com aplicação do processo de aceleração....	60
Figura 4.16 – Diagrama esquemático das técnicas de amortecimento: Média da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados (a), Média Ponderada da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados (b) e Média do Estimador dos Mínimos Quadrados (c).....	63
Figura 5.1 – Diagrama esquemático do barramento de Taquaril.....	66
Figura 5.2 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média EMQ.....	67
Figura 5.3 – Propostas dos índices PIT – Média EMQ .....	68
Figura 5.4 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média Ponderada Linear EMQ.....	69
Figura 5.5 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média Ponderada Exponencial EMQ.....	69
Figura 5.6 – Propostas do índice PIT – Média Ponderada Exponencial EMQ .....	70
Figura 5.7 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média EMQ com.....	71
Figura 5.8 – Propostas do índice PIT – Média EMQ com Ponderação da Última Medição .....	72
Figura 5.9 – Índice $PIT_P$ correspondente às técnicas de amortecimento.....	72
Figura 5.10 – Topologia do sistema IEEE 30 barras.....	74
Figura 5.11 – Impedâncias de Thévenin e da carga .....	75
Figura 5.12 – Propostas do índice PIT – Simulações de fluxo de potência.....	76

---

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABB</b>	<i>Asea Brown Boveri</i>
<b>AEP</b>	<i>America Electric Power</i>
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>CEMIG</b>	Companhia Energética de Minas Gerais
<b>EMQ</b>	Estimador dos Mínimos Quadrados
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>LRC</b>	<i>Lightning Research Center</i>
<b>MET</b>	Margem de Estabilidade de Tensão
<b>MST</b>	Margem de Segurança de Tensão
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema
<b>PDC</b>	<i>Phasor Data Concentrator</i>
<b>PIT</b>	Índice Previsor de Instabilidade
<b>PMU</b>	<i>Phasor Measurement Units</i>
<b>PPGEE</b>	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
<b>PPS</b>	Pulso por Segundo
<b>SEP</b>	Sistema Elétrico de Potência
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional
<b>SMFS</b>	Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Minas Gerais
<b>VIP</b>	<i>Voltage Instability Prediction</i>
<b>VSI</b>	<i>Voltage Instability Index</i>
<b>VSLBI</b>	<i>Voltage Stability Load Bus Index</i>
<b>VSM</b>	<i>Voltage Stability Margin</i>
<b>WAMS</b>	<i>Wide Area Measuring Systems</i>
<b>WAVI</b>	<i>Wide Area Voltage Stability Index</i>

# 1

## INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) constituem sistemas de energia de grande porte e devem ser capazes de fornecer energia elétrica às cargas de maneira contínua, com confiabilidade e de forma econômica. A demanda do sistema elétrico vem apresentando significativo crescimento, nem sempre acompanhado pela expansão necessária. Devido a esse gradativo aumento de carga, aliado às restrições impostas (sociais, ambientais, elétricas, dentre outras) cada vez mais rígidas, as condições de operação do sistema em tempo real têm sido caracterizadas pela proximidade aos limites toleráveis. Trata-se de um fator preocupante para as empresas fornecedoras de energia elétrica, o que estimula a busca pela melhoria do desempenho dos SEPs, evitando impactos negativos na qualidade do fornecimento de energia. Diante desse cenário, torna-se importante avaliar o comportamento dos sistemas em tempo real. No contexto desta dissertação, tal avaliação é feita no que diz respeito aos limites que representam risco de perda de Estabilidade de Tensão.

Conforme definido pela força tarefa (IEEE/CIGRE 2004), a estabilidade de tensão refere-se à habilidade do sistema de potência de manter as tensões nos seus barramentos, após ser submetido a um distúrbio, a partir de uma condição de operação inicial.

Nas situações em que os sistemas não conseguem manter a estabilidade de tensão, ocorre o fenômeno denominado Instabilidade de Tensão. Segundo o (IEEE 1990), a Instabilidade de Tensão é caracterizada como sendo “o estado de operação do sistema onde a tensão permanece decaindo de forma brusca ou lenta, e as ações automáticas de controle ou dos operadores não evitam tal decaimento”.

A ocorrência desse fenômeno torna-se a cada dia mais frequente, trazendo consequências extremamente negativas para o setor elétrico, tanto para as concessionárias quanto para os consumidores. Portanto, condições de instabilidade de tensão devem ser evitadas, tornando-se fundamental a avaliação do risco de sua ocorrência em todas as atividades relacionadas aos SEPs, da Expansão (aquisição de

novos recursos para ampliação e reforços do sistema) à Operação (gerenciamento dos recursos já disponíveis).

Nas etapas de *Planejamento da Expansão* e da *Operação*, a análise de estabilidade de tensão é realizada por meio de métodos estáticos baseados em cálculos de fluxo de potência, considerando estimativas da carga futura. Como resultado dessas análises, tem-se a elaboração de planos que visam o atendimento da demanda futura prevista, respeitando as restrições impostas aos SEPs.

Apesar dos estudos preparados nas etapas de planejamento serem fundamentais para o desempenho dos SEPs, seus resultados apresentam certo grau de incerteza inerente à elaboração de planos futuros (erro de previsão de carga, atraso de obras previstas, dentre outras). Sendo assim, torna-se fundamental o monitoramento do comportamento do sistema em relação à estabilidade de tensão na etapa da *Operação em Tempo Real*. O conhecimento da condição operativa do SEP possibilita que ações preventivas possam ser realizadas, para se evitarem situações críticas de emergência.

O sistema de geração e transmissão de energia elétrica da Rede Básica do Brasil é, em quase sua totalidade, interligado, caracterizando o Sistema Interligado Nacional (SIN). Na instabilidade, o decaimento de tensão pode desencadear processos em cascata resultando em desligamentos severos no SIN. Portanto, verifica-se a importância da monitoração contínua de pontos estratégicos do sistema em relação à estabilidade de tensão, para evitar que sistema entre em colapso, provocando desligamentos na rede elétrica.

A avaliação da estabilidade de tensão de SEPs em tempo real pode ser realizada por meio do uso de medições fasoriais sincronizadas, as quais constituem uma recente tecnologia para aprimoramento da operação e supervisão dos sistemas elétricos. A partir dessas medições, obtêm-se equivalentes de redes que, associados a conceitos relacionados à estabilidade de tensão, permitem uma avaliação da proximidade do risco da instabilidade. A proposta do uso de equivalentes de rede com essa finalidade não é uma técnica recente. Entretanto, conforme registrado na revisão bibliográfica descrita posteriormente neste texto, são raras as publicações que tratam da sua construção em tempo real.

A complexidade envolvida na determinação dos equivalentes em tempo real está relacionada a diversos fatores. Dentre eles, destacam-se as incertezas inerentes ao processo de medição e a própria dinâmica das grandezas elétricas. Tais incertezas podem levar a aplicação dos modelos matemáticos adotados na determinação de equivalentes em ambiente simulado (via programa de fluxo potência, por exemplo) a resultados inconsistentes com o comportamento do SEP.

No contexto do SIN, o desenvolvimento de uma metodologia para avaliar a margem de estabilidade de tensão em tempo real, por meio de medições fasoriais, apresenta total sintonia com o projeto ESTAL/ONS (Kema 2006). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou esse projeto que tem como objetivo principal *“conduzir estudos e desenvolvimento, no futuro próximo, de medições fasoriais em tempo real no Sistema Elétrico Brasileiro, para aumentar o nível sistêmico de segurança operacional, seja através da mitigação de grandes perturbações ou através do alívio de uma variada gama de restrições operacionais”*.

Do exposto acima, verifica-se a **relevância** da metodologia apresentada nesta dissertação, seu grau de aplicabilidade, bem como seu caráter inovador, com expectativa de real contribuição para o avanço do processo de operação dos SEPs.

Vale ressaltar que a equipe de pesquisadores do LRC<sup>1</sup>/PPGEE/UFMG tem atuado em uma linha de pesquisa direcionada ao tema Estabilidade de Tensão e Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS). As investigações têm gerado um conjunto de trabalhos de natureza acadêmica e prática registrados por meio de várias dissertações<sup>2</sup>, de inúmeros artigos publicados<sup>3</sup> e da implementação de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em um trabalho conjunto empresa-universidade<sup>4</sup>.

A presente dissertação se insere no contexto desses desenvolvimentos, constituindo uma continuação dos trabalhos, tendo como foco central a determinação do risco de perda de estabilidade de tensão em tempo real.

---

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

<sup>2</sup> (Lobato 1998), (Cortez 2001), (Andrade 2008), (Júnior 2008), (Silva 2010a), (Ribeiro 2011), (Leal 2013) e (Condega 2013).

<sup>3</sup> (Silva 2010b), (Vale 2011), (Vale 2012), (Vale 2013) e (Andrade 2013).

<sup>4</sup> (Cemig 2010).

A evolução das pesquisas está registrada no Capítulo 3. A última dissertação concluída no tema, (Leal 2013), atingiu um nível de aprimoramento bastante elevado com relação ao cálculo de equivalentes em tempo real. A metodologia desenvolvida apresentou resultados muito consistentes, tendo sido validada com dados de sistemas elétricos reais. Os valores das medições utilizadas, para a concepção da metodologia, foram provenientes dos bancos de dados de um centro de operação (amostragens típicas de 1 minuto).

Posteriormente, tornaram-se disponíveis medições provenientes dos SMFS, com taxa de amostragem (10 medições por segundo) bem superior à dos centros de operação. Esta peculiaridade dos dados fasoriais trouxe impacto significativo nos resultados dos equivalentes, exigindo a revisão de toda a metodologia até então desenvolvida, bem como a solução para as novas questões que se apresentaram.

Diante disso, pode-se verificar a importância de se dar continuidade às pesquisas relacionadas à determinação da margem de tensão em tempo real. A não consideração das questões levantadas poderia inviabilizar o uso dos equivalentes de redes na prevenção do risco de instabilidade. A dissertação aqui apresentada visa contribuir nesta direção.

Do exposto acima, pode-se identificar o **objetivo** básico deste trabalho: *desenvolvimento de uma metodologia para avaliação do comportamento dos SEPs em relação à estabilidade de tensão, na operação em tempo real, a partir de medições das grandezas elétricas obtidas de SMFS*. De forma mais específica, a dissertação objetiva *propor uma metodologia que incorpore as particularidades das medições provenientes dos SMFS*. Tal metodologia possibilitará determinar e avaliar a margem de estabilidade em tempo real de forma mais exata, permitindo a realização de ações preventivas, minimizando o risco de instabilidade.

A relevância do tema sob investigação para a operação dos sistemas de potência, o ambiente favorável ao desenvolvimento das pesquisas, a possibilidade de dar continuidade aos estudos elaborados no LRC/UFMG e o acesso a dados reais de medições fasoriais constituem as principais **motivações** para a realização desta dissertação. Além disso, vale ressaltar a chance de desenvolvimento de um trabalho de alto nível técnico e a possibilidade de contribuição ao setor elétrico.



Para cumprir seu objetivo, o presente trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo este introdutório.

O Capítulo 2 aborda os principais conceitos e definições referentes aos temas Estabilidade de Tensão, Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, Equivalentes de Rede e Estimador de Estados.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o uso de equivalentes de rede e índices previsores da instabilidade de tensão. As principais publicações acerca dos assuntos são abordadas. Além disso, é feita uma contextualização da dissertação nas pesquisas que têm sido desenvolvidas no LRC/UFMG.

No Capítulo 4, é realizada uma análise da metodologia até então desenvolvida no LRC/UFMG, considerando a utilização de dados provenientes de SMFS. A partir das análises, são propostas alterações e adaptações que objetivam incorporar as características desse tipo de medição, visando a uma representação mais fiel ao comportamento dos SEPs.

No Capítulo 5, a metodologia proposta é aplicada, utilizando medições provenientes de um barramento do SIN e, também, medições obtidas do cálculo de fluxo de potência para um sistema de 30 barras do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e propostas de continuidade deste trabalho.

Ao final do texto são incluídas as Referências Bibliográficas.

## 2

# ESTABILIDADE DE TENSÃO EM TEMPO REAL – CONCEITOS BÁSICOS

### 2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos relacionados à análise de estabilidade de tensão em tempo real, com o objetivo de facilitar o entendimento dos estudos realizados na dissertação.

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

Conforme já introduzido anteriormente, no ambiente de tempo real, a avaliação do risco de instabilidade de tensão pode ser realizada com base em medições dos fasores de tensão e corrente em barras de interesse do sistema. Para a determinação de um índice que caracterize a situação de risco, é necessária a obtenção de um sistema equivalente que represente a condição atual do sistema elétrico, a partir da barra onde são efetuadas as medições. No sentido de introduzir os principais conceitos relacionados a tais temas, neste capítulo são apresentados os conceitos de *Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada*, *Equivalentes de Rede* e *Estimador de Estados*.

### 2.2 Conceitos Básicos Sobre Estabilidade de Tensão

Na literatura técnica são utilizados vários termos e definições relacionados à estabilidade de tensão, conforme discutido em (Cortez 2001). Nesta dissertação, os conceitos são apresentados de acordo com a visão dos principais autores que se destacam nas publicações referentes ao tema, sendo aqui citados apenas aqueles necessários ao entendimento da metodologia proposta neste trabalho.

Conforme já introduzido no Capítulo 1, são muito utilizadas as definições do IEEE/CIGRE:

Para a estabilidade de tensão, à definição citada anteriormente, pode ser acrescentada aquela utilizada em (IEEE 1990): capacidade do sistema de manter as suas tensões, de tal forma que, quando a admitância da carga é aumentada, a potência consumida por ela também aumenta, e, assim, tanto a demanda quanto as tensões são controláveis.

A instabilidade de tensão é um 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. A instabilidade de tensão pode ser provocada por uma perturbação, por um aumento de carga, ou devido à mudança do ponto de operação do sistema (IEEE 1990).

### 2.2.1 Teorema da Máxima Transferência de Potência

O fenômeno Estabilidade de Tensão está relacionado ao Ponto de Máxima Transferência de Potência ou Ponto de Máximo Carregamento de um sistema elétrico. Para o melhor entendimento desse conceito, a literatura técnica tem considerado, tradicionalmente, um sistema elétrico de duas barras simplificado, conforme ilustrado na Figura 2.1 (Kundur 1994).

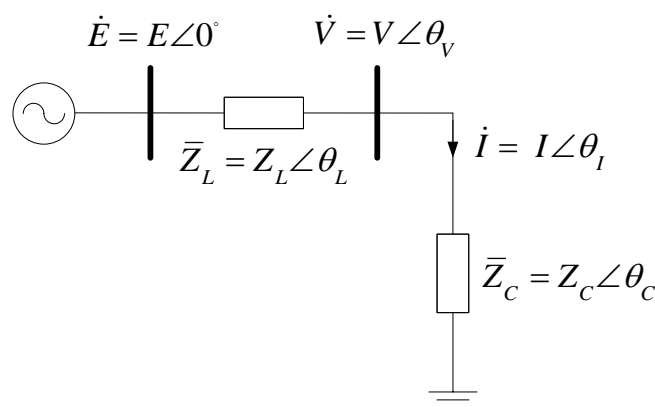


Figura 2.1 – Sistema elétrico de duas barras

O sistema elétrico da figura possui uma fonte de tensão ideal representada por  $E \angle 0^\circ$ , uma linha de transmissão de impedância  $Z_L \angle \theta_L$  e uma carga com impedância  $Z_C \angle \theta_C$ .

A fonte de tensão é tomada como referência angular. Para este sistema, tem-se a seguinte relação para a corrente:

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

onde,

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

Assim, o módulo da corrente é dado por:

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

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

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

O módulo da corrente do sistema pode ser determinado em relação à corrente de curto-circuito de acordo com a seguinte expressão:

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

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

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

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

$$P = V_c I \cos \theta_c = \frac{Z_c I_{cc}^2 \cos \theta_c}{1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_c}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c)} \quad (2.7)$$

Derivando a equação (2.7) em relação ao módulo da impedância da carga, tem-se:

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

$$\frac{dP}{dZ_c} = \frac{I_{cc}^2 \cos \theta_c \left[ 1 - \left(\frac{Z_c}{Z_L}\right)^2 \right]}{\left[ 1 + \left(\frac{Z_c}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_c}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_c) \right]^2} \quad (2.8)$$

A máxima transferência de potência é obtida igualando-se a equação da derivada da potência em relação à impedância da carga a zero:

$$\frac{dP}{dZ_c} = 0 \Rightarrow Z_c = Z_L \quad (2.9)$$

De acordo com a equação (2.9), a máxima transferência de potência ocorre para a condição em que o módulo da impedância da carga se iguala ao módulo da impedância da linha de transmissão.

O ponto de máxima transferência corresponde ao ponto onde o sistema atinge seu limite na transferência de potência à carga, ou seja, indica o valor máximo de potência ativa que pode ser transferida da fonte para a carga. Para cargas modeladas como potência constante, a partir desse ponto, a tentativa de se aumentar a carga leva o sistema à instabilidade de tensão.

A partir do desenvolvimento apresentado até aqui, podem ser determinadas três relações importantes, as quais permitem descrever o comportamento das grandezas tensão, corrente e potência, em função do carregamento do sistema:

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

$$\frac{I}{I_{cc}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.11)$$

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{2\frac{Z_C}{Z_L}[1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]}{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (2.12)$$

Essas relações podem ser melhor entendidas se visualizadas por meio das curvas ilustradas na Figura 2.2. Para obtenção dessas curvas, a carga do sistema elétrico representado na Figura 2.1 foi aumentada até determinado valor, mantendo-se seu fator de potência constante a cada iteração.

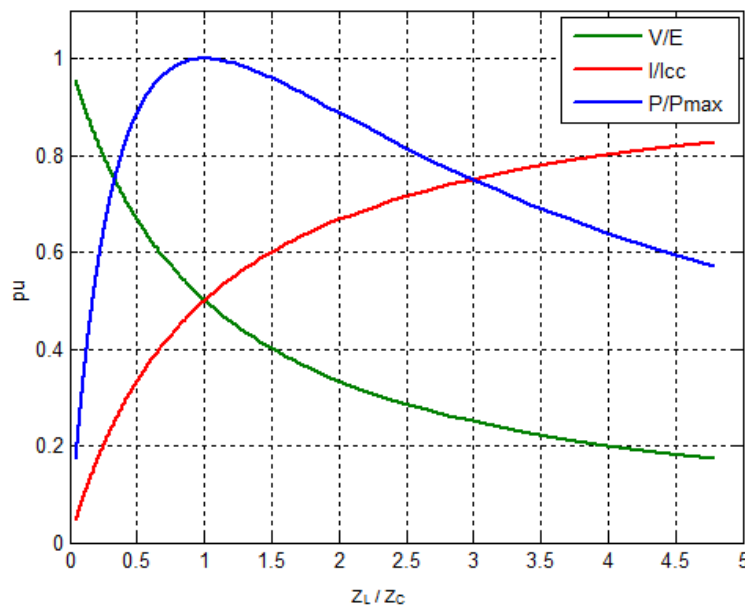


Figura 2.2 – Comportamento das relações  $V/E$ ,  $I/I_{cc}$  e  $P/P_{max}$  em função da variação  $Z_L/Z_C$

A análise das curvas ilustradas na Figura 2.2 permite tecer algumas considerações importantes, conforme descrito em (Kundur 1994). Em condições onde  $Z_C \gg Z_L$ , ou seja, em situações de carga leve, a corrente que circula pelo sistema é pequena e a tensão na barra de carga pode apresentar valores próximos à tensão da fonte. À medida que a carga é aumentada (redução de  $Z_C$ ), a corrente do sistema também aumenta, provocando uma queda de tensão mais acentuada na linha de transmissão. Conseqüentemente, tem-se uma diminuição dos valores de tensão na barra de carga. Observa-se que, mesmo com a redução da tensão na barra de carga, a potência ativa transferida para a mesma aumenta. Isso se deve ao fato de que o aumento da

corrente, nessas condições, foi mais significativo que a redução da tensão. Esse comportamento é observado até o momento em que a relação  $Z_L/Z_C$  torna-se unitária, ou seja, o módulo da impedância da carga se iguala ao módulo da impedância da linha. De acordo com o teorema da máxima transferência de potência, nesse ponto o sistema transfere potência máxima à carga. Essa condição é visível na curva que representa a relação  $P/P_{max}$ , onde o pico é atingido. A partir deste ponto, mesmo com o aumento da carga, a potência transferida pelo sistema diminui. Nessa situação, a redução da tensão na barra de carga supera o aumento da corrente.

Vale ressaltar que a potência ativa máxima transferida à carga depende do seu fator de potência. Quanto mais capacitiva a carga, maior a potência que o sistema pode transferir a ela. Em contrapartida, quanto mais indutiva a carga menor o valor da potência que pode ser entregue. O gráfico mostrado na Figura 2.3, retirada de (Silva 2010a), ilustra essas situações. Para o mesmo módulo da impedância da carga, variou-se o fator de potência resultando em cargas ora capacitivas, ora indutivas. Observa-se que, para cargas mais capacitivas, o ponto de máximo carregamento ocorre para maiores valores de potência.

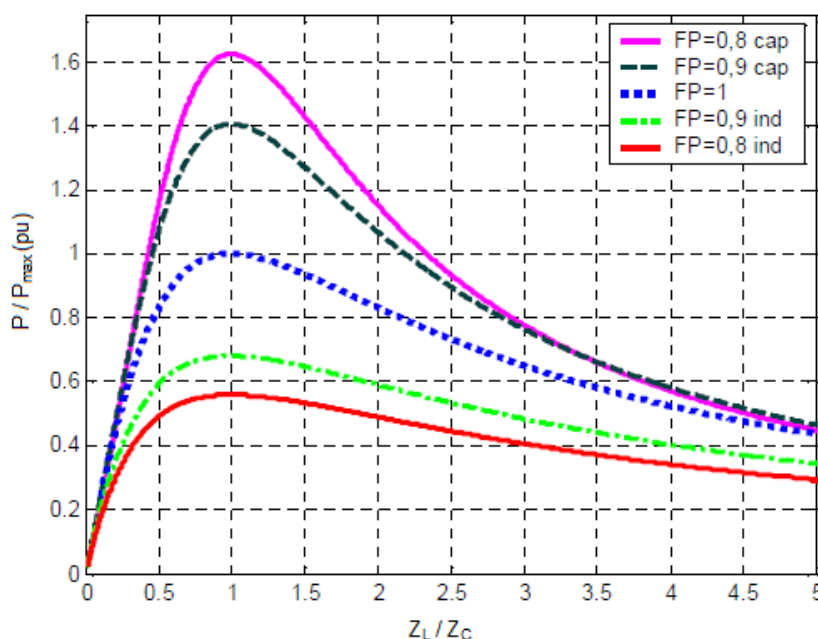


Figura 2.3 – Comportamento de  $P/P_{max}$  para diferentes fatores de potência da carga

O ponto de máxima transferência de potência pode ser determinado através da geração da curva PV para uma barra de carga. A curva PV é uma das representações mais utilizadas nos estudos de estabilidade de tensão no contexto da análise estática.

A curva PV, referente a uma determinada barra do sistema, é construída por meio da mesma simulação utilizada na construção das curvas da Figura 2.2. Monitoram-se os valores da tensão e da potência ativa na barra de carga, ao se promover o aumento da carga conectada a ela a partir de um ponto inicial. Com esses valores obtém-se a curva PV, conforme ilustrado na Figura 2.4. O “nariz” da curva PV refere-se ao ponto de máxima transferência de potência e caracteriza o limite entre as regiões estável e instável referentes ao sistema elétrico, para cargas modeladas como potência constante.

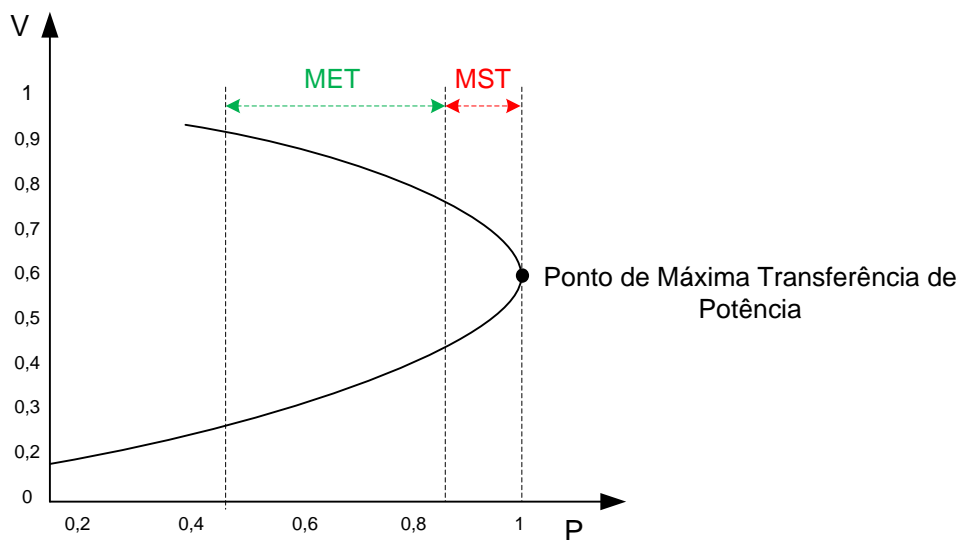


Figura 2.4 – Curva PV, MET e MST

A curva PV mostrada na Figura 2.4 permite definir dois conceitos importantes na análise da estabilidade de tensão: Margem de Segurança de Tensão (MST) e Margem de Estabilidade de Tensão (MET). A MST indica a distância mínima do ponto de operação do sistema para o ponto de máxima transferência de potência, definindo a região de operação insegura. No Brasil, tal margem é definida de acordo com as diretrizes do Operador Nacional do Sistema (ONS) e, atualmente, é fixada em 4% para operação em tempo real (ONS 2012). Já a MET é definida, no contexto deste trabalho, como a distância do ponto de operação ao ponto limite de segurança, ditado pela MST.

Na realidade, para um sistema de duas barras, não é necessária a construção da curva PV para se obterem os valores da potência e tensão do ponto de máximo carregamento. Considerando a equação (2.7), que relaciona a potência transferida à



carga com a corrente de curto-circuito e as impedâncias da linha de transmissão e da carga, substituindo as relações (2.4) e (2.9), que representam a corrente de curto-circuito e a condição característica do ponto de máximo carregamento, e multiplicando o numerador e o denominador por  $Z_L^2$ , obtém-se a expressão da máxima potência que pode ser transferida pelo sistema:

$$P_{max} = \frac{E^2 \cos \theta_C}{2Z_L [1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]} \quad (2.13)$$

O ponto de máximo carregamento é caracterizado por uma potência e uma tensão de operação. A tensão no ponto de máximo carregamento pode ser calculada por meio da equação (2.6), considerando, novamente, a substituição do valor de  $I_{CC}$  e a condição característica do ponto de máximo carregamento:

$$V_{crit} = \frac{E}{\sqrt{2 + 2\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.14)$$

De acordo com as equações (2.13) e (2.14), a tensão e potência características do ponto de máximo carregamento podem ser obtidas conhecendo-se apenas os parâmetros da fonte, da linha e da carga no ponto atual de operação.

Estas relações são desenvolvidas para o sistema de duas barras da Figura 2.1. Entretanto, para sistemas de maior porte, a construção da curva PV requer a solução sucessiva de cálculos de fluxo de potência. Este tipo de construção torna-se inviável na análise da estabilidade de tensão em tempo real, devido à dinâmica característica desse ambiente. Nesse caso, exige-se rapidez e agilidade na obtenção das informações do estado do sistema.

Para que as formulações desenvolvidas para o sistema de duas barras possam ser aplicadas a sistemas de grande porte é necessário o uso de equivalentes de rede, o que requer técnicas mais apropriadas, sendo um dos pontos motivadores na elaboração deste trabalho.

### 2.3 Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada

Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada são caracterizados como uma recente tecnologia para aprimoramento da operação e supervisão dos sistemas elétricos. Tal tecnologia viabiliza a medição de grandezas fasoriais em instalações geograficamente distantes sob uma mesma referência de tempo e com precisão angular. Essas características atendem às necessidades tecnológicas atuais e potencializam o uso desse tipo de medição para supervisão e controle de sistemas de potência em tempo real. Diferentemente do processo de estimação de estados dos centros de controle, nos SMFS as medições são realizadas em um mesmo instante de tempo, a partir de uma fonte de sincronização, o que possibilita o conhecimento da magnitude e ângulo das grandezas elétricas e a representação do estado do sistema de forma mais exata.

O SMFS é composto basicamente de três equipamentos principais: unidades de medição fasorial (*Phasor Measurement Units – PMU*), concentradores de dados fasoriais (*Phasor Data Concentrator – PDC*) e fonte de sincronização fornecida pelo sistema *Global Positioning System (GPS)*.

A Figura 2.5 ilustra a estrutura básica do SMFS. Os dados do sistema elétrico são coletados pelas PMUs de acordo com o sinal de pulso por segundo (PPS) emitido pelo sistema GPS. Esse sinal permite que o processo de aquisição de dados seja executado de modo sincronizado em diferentes locais de medição. O cálculo das grandezas complexas de sequência positiva é realizado utilizando técnicas matemáticas aplicadas à janela dos dados amostrados. Os dados fasoriais são enviados aos PDCs através de *links* de comunicação, e são disponibilizados aos diversos aplicativos conectados aos mesmos.

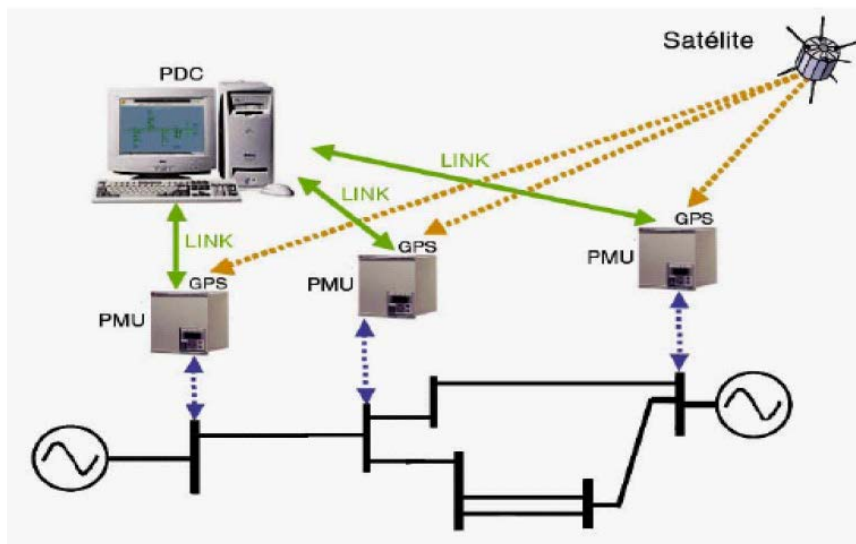


Figura 2.5 – Configuração básica de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada  
 Fonte: (Andrade 2008)

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

### 2.3.1 Unidade de Medição Fasorial - PMU

A unidade de medição fasorial é o principal elemento de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada. A Figura 2.6 ilustra a estrutura básica de uma PMU. Basicamente, esse equipamento é composto por um receptor de sinal GPS, um sistema de aquisição de dados e um microprocessador. O receptor de sinal de GPS é responsável por receber o sinal de pulso a cada segundo. O sistema de aquisição é composto por um filtro *anti-aliasing*, destinado a minimizar os ruídos provenientes da medição analógica, e por um conversor A/D capaz de converter o sinal analógico em digital. O sinal digital é enviado ao microprocessador que realiza os cálculos matemáticos para obtenção dos fasores. Atualmente, a Transformada Discreta de Fourier é a ferramenta mais utilizada no tratamento das amostras das grandezas do sistema (Phadke 1993).

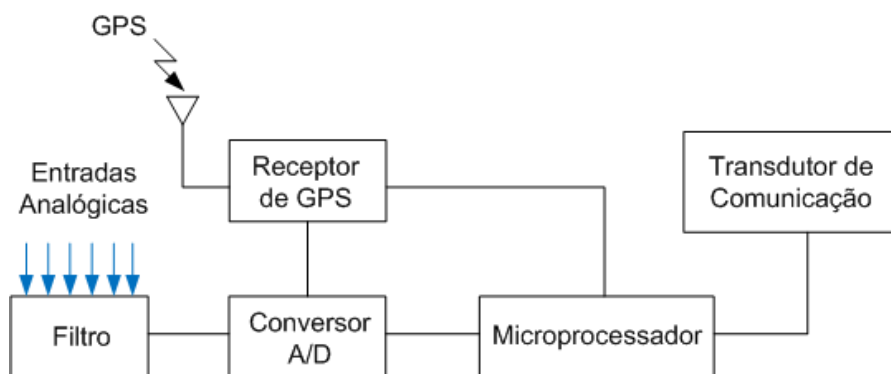


Figura 2.6 – Estrutura básica de uma PMU

Fonte: (Andrade 2008)

### 2.3.2 Global Positioning System (GPS)

A fonte de sincronização é necessária para que o processo de aquisição de dados seja executado de modo sincronizado nas diferentes estações remotas. No processo de medição fasorial sincronizada o GPS é o sistema utilizado para esse fim.

O sistema GPS envia para as estações receptoras um sinal de pulso por segundo, que é a base de tempo para sincronização das medidas obtidas. Esse sinal é enviado e recebido pelas subestações com precisão maior que  $1\mu\text{s}$ . Vale ressaltar que o erro no pulso de sincronização é bastante reduzido e satisfaz aos requisitos de precisão exigidos por qualquer aplicação para um sistema de medição sincronizada (Phadke 1993). A sincronização de tempo é feita através de relógios GPS internos ou externos às PMUs.

### 2.3.3 Concentrador de Dados Fasoriais (PDC)

O concentrador de dados é o elemento do sistema de medição fasorial cujas funções principais são receber, organizar, armazenar e disponibilizar as medidas fasoriais.

Os dados coletados pelas PMUs são enviados ao PDC, onde são organizados utilizando-se etiquetas de tempo, ou seja, são ordenados na forma de um conjunto de medições fasoriais referentes ao mesmo instante de tempo. Posteriormente, esses dados são armazenados e disponibilizados de acordo com as aplicações solicitadas.

Devido ao papel fundamental desempenhado pelo PDC no sistema de medição fasorial sincronizada, esse dispositivo deve apresentar continuidade de operação em tempo real, eficiência para o armazenamento de dados, confiabilidade e disponibilidade, capacidade de comunicação eficiente, atendimento aos diversos tipos de aplicação e fácil integração. Portanto, o PDC deve apresentar um alto desempenho computacional (Andrade 2008).

Descritos os principais elementos que compõem o SMFS, é importante mencionar sobre a rede de comunicação que possibilita a transmissão dos dados. Sua função básica é interligar as PMUs aos PDCs e os PDCs entre si. Atualmente, os meios de comunicação mais utilizados são a *internet* e as redes privadas das empresas, que atuam com velocidade superior à dinâmica do sistema, não comprometendo a avaliação em tempo real. Os principais requisitos para os sistemas de comunicação são definidos pelo padrão (IEEE 2006).

Nesta seção foi apresentada uma discussão sucinta acerca de SMFS. Há vários trabalhos técnicos que contemplam de forma mais detalhada o tema. Em (Phadke 2008) é detalhado o funcionamento da tecnologia e são citadas algumas de suas aplicações. Além disso, há várias publicações importantes do autor anteriores a essa, que são consideradas bases para estudos recentes. A referência (IEEE 2008) faz uma revisão detalhada sobre os diversos aspectos dos SMFS. A dissertação (Andrade 2008) apresenta um texto estruturado que caracteriza os SMFS e investiga suas aplicações na monitoração e controle dos sistemas elétricos.

## **2.4 Equivalentes de Rede**

O objetivo principal deste trabalho é a análise de estabilidade de tensão em tempo real, utilizando equivalentes calculados para barramentos dos SEPs, a partir de dados provenientes dos SMFS. O equivalente adotado visa à redução do sistema elétrico complexo em um sistema simples de duas barras, denominado Equivalente de Thévenin, conforme ilustrado na Figura 2.7. Desta forma, os conceitos discutidos anteriormente, para o sistema de duas barras, podem ser aplicados.

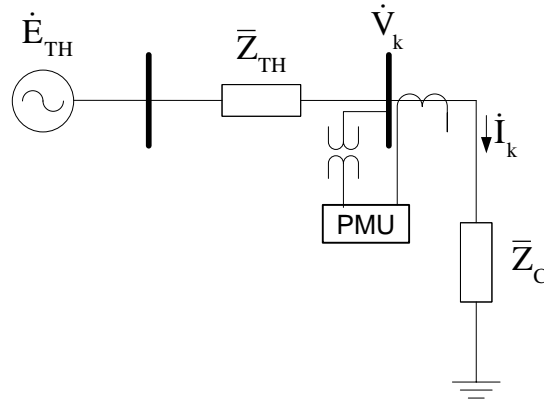


Figura 2.7 – Equivalente de Thévenin

A revisão bibliográfica registrada no Capítulo 3 mostra que a literatura apresenta várias técnicas para a determinação dos parâmetros do equivalente, com base em medições fasoriais de tensão e corrente na barra de interesse. Nesta dissertação, a técnica utilizada é a proposta em (Vu 1999a), descrita a seguir.

Dado o sistema elétrico ilustrado na Figura 2.7 e considerando-se conhecidas as medições fasoriais de tensão ( $\dot{V}_k$ ) e corrente ( $\dot{I}_k$ ) na barra de carga, a impedância da carga é dada por:

$$\bar{Z}_C = \frac{\dot{V}_k}{\dot{I}_k} \quad (2.15)$$

Com respeito ao equivalente é necessário estimar os parâmetros: tensão e impedância de Thévenin.

A tensão de Thévenin é dada por:

$$\dot{E}_{TH} = \dot{V}_k + \bar{Z}_{TH}\dot{I}_k \quad (2.16)$$

Substituindo os fasores da equação (2.16) pela sua forma retangular e separando as partes real (subíndices  $r$ ) e imaginária (subíndices  $m$ ) obtém-se:

$$E_{THr} + jE_{THm} = V_{kr} + jV_{km} + (R_{TH} + jX_{TH})(I_{kr} + jI_{km}) \quad (2.17)$$

$$E_{THr} - R_{TH}I_{kr} + X_{TH}I_{km} = V_{kr} \quad (2.18)$$

$$E_{THm} - R_{TH}I_{km} - X_{TH}I_{kr} = V_{km} \quad (2.19)$$

As equações (2.18) e (2.19) representam as partes real e imaginária, respectivamente, do fasor  $\dot{V}_k$ . Os parâmetros do equivalente de Thévenin ( $E_{THr}$ ,  $E_{THm}$ ,  $R_{TH}$  e  $X_{TH}$ ) são as incógnitas dessas equações. Entretanto, há quatro incógnitas e apenas duas equações e o sistema não pode ser diretamente solucionado. Assim, é necessário outro conjunto de equações semelhantes para determinação dos parâmetros.

Segundo o método proposto em (Vu 1999a), o novo conjunto de equações necessário pode ser obtido considerando-se medições fasoriais de tensão e corrente em um instante de operação diferente. Portanto, bastariam duas medições consecutivas para obtenção dos parâmetros de Thévenin. Ao utilizar esse método, assume-se que tais parâmetros não sofrem alteração no intervalo em que as duas medições são registradas. Nessas condições, a equação (2.17) pode ser reescrita na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{kr1} & I_{km1} \\ 0 & 1 & -I_{km1} & -I_{kr1} \\ 1 & 0 & -I_{kr2} & I_{km2} \\ 0 & 1 & -I_{km2} & -I_{kr2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{THr} \\ E_{THm} \\ R_{TH} \\ X_{TH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{kr1} \\ V_{km1} \\ V_{kr2} \\ V_{km2} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

onde os subíndices 1 e 2 referem-se às duas medições consideradas.

A solução do sistema descrito em (2.20) corresponde aos parâmetros do equivalente de Thévenin.

## 2.5 Estimador de Estados – Método dos Mínimos Quadrados

Os dados obtidos de medição, geralmente, são caracterizados pela presença de diferentes tipos de erros, como grosseiros, na configuração e ruído. Esse último, sempre presente nos valores medidos, está relacionado à incerteza inerente aos dispositivos usados na medição. Um método muito eficaz e bastante utilizado para tratamento desse tipo de erro é o Estimador de Estado. O uso dessa técnica permite a obtenção de um modelo mais exato e com maior confiabilidade para análise de sistemas de energia elétrica.

O método dos Mínimos Quadrados é um dos mais conhecidos e utilizados nos estimadores. A filosofia básica do estimador dos Mínimos Quadrados, técnica empregada neste trabalho, é descrita a seguir.

Considera-se o seguinte sistema a ser solucionado (Aguirre 2007):

$$b = Ax \tag{2.21}$$

onde a matriz  $A$  é denominada matriz de regressores (ordem  $N \times M$ ), o vetor  $B$  corresponde ao vetor de amostras conhecidas ( $N$  amostras) e  $x$  é o vetor de coeficientes desejados ( $M$  coeficientes), ou vetor solução.

O método consiste, basicamente, em considerar a presença de um erro associado à solução do sistema e minimizar tal erro. Admitindo-se a presença do erro ( $\zeta$ ) na solução do sistema, a equação (2.21) pode ser reescrita como:

$$b = Ax - \zeta \tag{2.22}$$

O objetivo é encontrar o vetor solução  $x$ , onde o erro  $\zeta^2$  seja o menor possível. Para obtenção dessa solução, a matriz de regressores  $A$  e o vetor  $b$  são sobredimensionados. Tomando como base o equivalente proposto em (Vu 1999a), por exemplo, o sobredimensionamento é feito utilizando-se várias medições consecutivas no preenchimento da matriz e no vetor que contém os valores de corrente e tensão medidos, respectivamente.

A consequência de sobredimensionar a matriz  $A$  é o fato de que ela torna-se retangular e, portanto, não se consegue obter sua inversa diretamente. Neste caso, a solução do sistema pode ser obtida, calculando-se a pseudo-inversa da matriz  $A$ , que é dada por:

$$A_{pseudo-inversa} = [A^T A]^{-1} A^T \tag{2.23}$$

De posse da matriz pseudo-inversa, a solução do sistema linear pode ser determinada:

$$x = A_{pseudo-inversa} b \tag{2.24}$$



A solução do sistema apresentado em (2.24) corresponde à saída do estimador de estados. A minimização do erro  $\zeta^2$ , obtida na solução da equação (2.23), garante a obtenção de um modelo exato e confiável.

## 2.6 Considerações Finais

Conforme visto neste capítulo, o tema estabilidade de tensão abrange diversos conceitos, destacando-se o limite representado pelo ponto de máximo carregamento.

A avaliação da margem de estabilidade de tensão é relevante nas diversas atividades relacionadas aos SEPs (da Expansão à Operação), para garantir continuidade e segurança na operação do sistema elétrico. Nas etapas de estudo, a análise pode ser realizada por meio de métodos estáticos, como construção da curva PV ou verificação da matriz Jacobiana, característica da solução do fluxo de potência. Já na operação em tempo real, é necessário ter agilidade e rapidez na obtenção de parâmetros que qualificam a condição de estabilidade do sistema. Nessas circunstâncias, o uso de equivalentes de redes produz resultados bastante satisfatórios e tem sido adotado em publicações importantes acerca do tema. Neste trabalho, optou-se pela utilização do equivalente de Thévenin, o qual pode ser determinado a partir de medições fasoriais de tensão e corrente, conforme proposto em (Vu 1999a), em conjunto com os estimadores de Mínimos Quadrados.

A análise da estabilidade em tempo real é um assunto que tem despertado o interesse de pesquisadores nos últimos anos. No próximo capítulo, são apresentados os principais trabalhos publicados sobre o tema, além de uma contextualização desta dissertação nas pesquisas do LRC/UFMG.

## 3

# EQUIVALENTES DE REDE E ÍNDICES PREVISORES DE INSTABILIDADE – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

### 3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo possui dois objetivos principais. O primeiro é apresentar a revisão bibliográfica realizada no trabalho, citando os principais autores e suas contribuições, indicando aquelas que serviram de base para a elaboração da dissertação. O segundo é contextualizar os desenvolvimentos realizados no mestrado no âmbito das pesquisas que vêm sendo elaboradas no LRC/UFMG.

Os primeiros trabalhos que tratam da avaliação da estabilidade em tempo real surgiram no final do século XX. A partir daí, as pesquisas evoluíram e diversas técnicas foram elaboradas com o propósito de determinar a margem de estabilidade de tensão em tempo real.

A maior parte das metodologias propostas se baseia em estudos realizados a partir de cenários simulados gerados por programas de fluxo de potência. Raras são as publicações que apresentam equivalentes calculados considerando dados provenientes de medição, para aplicações em tempo real.

Essa condição, aliada à possibilidade de obtenção de dados do SMFS desenvolvido no projeto (Cemig 2010), motivou o desenvolvimento de estudos referentes ao tema pelo grupo de pesquisa do LRC/UFMG. Como esta dissertação integra tais estudos, torna-se importante contextualizá-la com clareza, para denotar a sua contribuição.

### 3.2 Revisão Bibliográfica

Um dos primeiros trabalhos sobre o uso de equivalentes de rede na operação em tempo real foi publicado em 1997 por Vu (Vu 1997) e um grupo formado pelas equipes

da *Asea Brown Boveri* (ABB) e *America Electric Power* (AEP). No trabalho é apresentada uma metodologia relacionada ao princípio de funcionamento de relés de proteção. À medida que a carga de determinada barra varia, sua impedância equivalente também se altera, definindo uma trajetória. O sistema elétrico visto pela barra de carga é representado por uma fonte de tensão e uma impedância que são determinadas pelo uso de equivalentes de rede, utilizando-se das medições de tensão e corrente. A impedância do equivalente determina um círculo limite e, com o aumento da carga, a trajetória definida pela mesma aproxima-se desse limite. O ponto de interseção entre as curvas das impedâncias corresponde ao ponto crítico de instabilidade de tensão. Com base nesse raciocínio é definido o método denominado *Preditor de Instabilidade de Tensão* (*Voltage Instability Prediction – VIP*). Nessa publicação, os princípios que determinam a metodologia são apresentados, porém de forma pouco detalhada.

Em 1999, um novo trabalho desse autor é publicado, (Vu 1999a), onde a metodologia proposta anteriormente é detalhada. A fundamentação teórica matemática para determinação do equivalente corresponde àquela apresentada no item 2.4, que se baseia na utilização de duas medições consecutivas de tensão e corrente. A partir dos fundamentos do teorema da máxima transferência de potência e do uso do equivalente, a distância entre o ponto atual de operação e o ponto de instabilidade é estimada. A metodologia proposta é aplicada para um sistema de 39 barras – IEEE 39 *bus*.

Ainda em 1999, outro trabalho é publicado, (Vu 1999b), onde são apresentados resultados da aplicação da metodologia proposta para um sistema de 7000 barras. Foram analisados três diferentes cenários na fase de planejamento da AEP: sistema radial, sistema não radial e sistema em contingência. A metodologia é aplicada considerando simulações baseadas no cálculo de fluxo de potência, por meio de incrementos de carga.

Dando continuidade às pesquisas, Vu publicou o trabalho (Vu 2000) em que se avalia a eficácia do método VIP em condições de aumento da transferência de potência, usando simulações de fluxo de potência, para examinar as condições de instabilidade. Além disso, é avaliado o efeito da dinâmica de equipamentos, como a excitação de geradores, e a relação de dependência da tensão e frequência com a carga. Em um primeiro instante, o colapso de tensão foi simulado em um sistema elétrico da AEP

com múltiplas contingências, incluindo perda de geração e perda de linhas de transmissão. Adicionalmente, a metodologia foi aplicada considerando medições de um sistema da AEP, com o objetivo de avaliar a robustez do algoritmo na presença de erros tipo ruído na transmissão dos sinais.

É importante citar que, ao longo do desenvolvimento de seus trabalhos, Vu comenta sobre a contribuição positiva que a utilização do método dos Mínimos Quadrados pode trazer para a resposta do algoritmo proposto. Entretanto, nas suas publicações, não indica o uso dessa técnica e não especifica o número de medições a serem utilizadas na solução do equivalente.

O método proposto por Vu tem sido amplamente utilizado como uma base sólida para avaliação da estabilidade de tensão em tempo real. Publicações mais recentes modificam ou incrementam o método original de acordo com a dinâmica do sistema elétrico em análise, e principalmente, com base nas características das medições de tensão e corrente do sistema.

A referência (Haque 2003) destaca o método proposto em (Vu 1999a) para análise de estabilidade em tempo real. A técnica apresentada segue a mesma linha de (Vu 1999a). Uma diferença é que no trabalho (Haque 2003) os parâmetros de Thévenin são obtidos da amplitude da tensão medida na barra de carga e seus componentes de potência ativa e reativa. Tais grandezas podem ser medidas para qualquer barra. Outra diferença se dá pelo fato de que no trabalho é apresentado um círculo para representar a admitância de Thévenin. Na referência (Vu 1999a), considera-se o valor da impedância na determinação do círculo. No trabalho (Haque 2003), o índice proposto para avaliar a estabilidade de tensão é denominado *Voltage Stability Margin* (VSM). Tal índice pode ser calculado em função das admitâncias de Thévenin e da carga ou em função das potências de máximo carregamento e da carga. Vale ressaltar que no trabalho é introduzida a necessidade de se considerar mais de duas medições consecutivas para estimar com maior exatidão os parâmetros de Thévenin.

O trabalho de (Milosevic 2003) se baseia no método proposto em (Vu 1999a) para determinação do equivalente de rede visto pelas barras de carga que compõem o sistema. De posse deste, calcula-se um índice para cada barra de carga dado pela razão entre a tensão na barra em cada instante e a queda de tensão através da impedância na linha de transmissão, denominado *Voltage Stability Load Bus Index*

(VSLBI<sub>k</sub>). Segundo o autor, à medida que o índice se aproxima do valor unitário, o risco da instabilidade de tensão torna-se mais evidente. Quando o índice atinge o valor 1, a transferência de potência através da linha torna-se instável. Esse índice é calculado para cada barra de carga e um conjunto de pontos de instabilidade é determinado. O índice de estabilidade de tensão para todo o sistema, denominado *Voltage Instability Index* (VSI) é determinado pelo valor mínimo do conjunto.

O trabalho (Smon 2006) propõe um índice de estabilidade calculado a partir do teorema de Tellegen e do conceito de redes adjuntas. O teorema de circuitos de Tellegen depende apenas das leis de Kirchhoff e da configuração da rede, e, segundo os autores, pode ser aplicado a qualquer sistema elétrico. A abordagem apresentada permite determinar o circuito equivalente de Thévenin do sistema a partir de duas medições fasoriais consecutivas. A impedância de Thévenin é calculada com base nos incrementos de tensão e corrente medidas após o caso base ser submetido a um conjunto de perturbações no sistema. O índice utiliza a relação entre as impedâncias da carga e de Thévenin para avaliar a estabilidade de tensão.

Em (Parniani 2006) é apresentada uma abordagem para análise da estabilidade de tensão utilizando dados de medição fasorial sincronizada. São propostos dois métodos para determinação de modelos equivalentes simples do sistema interconectado em conjunto com a carga. O primeiro método constitui um equivalente de Thévenin com uma única fonte de tensão alimentando uma carga através de uma linha de extra-alta tensão, onde se pode desprezar o valor da resistência da linha, ou seja,  $R_L = 0$ . O segundo método é composto pela associação de dois equivalentes de Thévenin, vistos de cada lado da barra de referência. Os dois modelos equivalentes gerados são utilizados para se gerar curvas PV e prever o limite de estabilidade de tensão.

Em 2007, é publicado o trabalho (Corsi 2007), cujo destaque consiste no método proposto para obtenção dos parâmetros de Thévenin. Considera-se uma estimativa inicial dos parâmetros que, ao longo de iterações, converge para valores esperados de tensão e impedância. Na metodologia proposta, a parte resistiva do parâmetro de Thévenin é considerada igual a zero, para estimativa inicial dos parâmetros. Entretanto, essa consideração é aceitável apenas para redes de extra-alta tensão, em que  $X_{th} \gg R_{th}$ .

Na metodologia apresentada nesse trabalho, (Corsi 2007), não há necessidade de solucionar o sistema matricial proposto por (Vu 1999a), já que os parâmetros do equivalente são calculados com base em uma estimativa inicial. A cada iteração, tais parâmetros são incrementados de acordo com o comportamento da variação da impedância da carga. Os autores consideram esta a principal vantagem do método proposto, devido às dificuldades numéricas em relação à singularidade da equação matricial proposta em (Vu 1999a). Verifica-se, ainda, uma aceleração na obtenção dos parâmetros do equivalente.

Tal metodologia é abordada em dois trabalhos posteriores. Em (Corsi 2008a) é avaliado o comportamento dos parâmetros do equivalente ao se variar a taxa de amostragem dos dados e o fator de incremento. Em (Corsi 2008b) são propostos sete índices previsores da instabilidade de tensão, baseados na reatância de Thévenin, tensão de Thévenin ou tensão medida na barra de carga analisada.

No trabalho (Li 2009) é apresentado um modelo analítico para redução de uma rede elétrica em uma rede equivalente, considerando medições locais de tensão e corrente. A técnica proposta é baseada na metodologia desenvolvida em (Gong 2006) em que as barras do sistema são divididas em três categorias: geração, passagem e carga. A partir das equações que caracterizam tal metodologia, (Li 2009), propõe um equivalente desacoplado e, posteriormente, um equivalente de Thévenin aproximado. A técnica proposta foi aplicada a alguns sistemas elétricos, a fim de determinar o máximo carregamento do sistema.

Na referência (Su 2009) é proposto um algoritmo para avaliação da estabilidade de tensão com base em medições *Wide Area Measuring Systems* (WAMS), para barras com mais de uma linha ou equipamentos conectados. No trabalho são utilizadas múltiplas medições fasoriais sincronizadas para representar todo o sistema em um equivalente de Thévenin. O diferencial desse trabalho é a utilização dos parâmetros dos ramos conectados à barra em análise para determinação do equivalente. Os parâmetros dos ramos são calculados a partir das medições de tensão e corrente. O índice proposto no trabalho é bem parecido com o proposto em (Haque 2003). A diferença se dá apenas pelo fato do primeiro utilizar a relação das impedâncias de Thévenin e da carga, e o segundo optar pelos valores das admitâncias.

Em (Han 2010) são apresentados resultados obtidos do monitoramento da estabilidade de tensão que utiliza dados de medições de PMUs instaladas no sistema elétrico da Coréia do Sul. O índice proposto no trabalho é denominado *Wide Area Voltage Stability Index (WAVI)*. O algoritmo desenvolvido é uma mistura de cálculo dos parâmetros do VIP e do monitoramento de corredores de transmissão. Este último é apresentado em (Larsson 2003), onde são realizadas medições de tensão e corrente em ambos os terminais dos corredores de transmissão. A desvantagem desse método é a necessidade de um grande número de PMUs para se obterem resultados robustos.

A referência (Corsi 2012) apresenta um índice predictor de instabilidade de tensão em tempo real, calculado por meio de medições fasoriais locais com taxa de amostragem elevada. O equivalente de Thévenin é obtido por meio da metodologia proposta em um trabalho anterior dos autores (Corsi 2007). O autor considera que a obtenção dos parâmetros de Thévenin a partir do método dos Mínimos Quadrados necessita de uma janela de medições grande para convergir, o que requer maior tempo de cálculo. Dessa forma, apresenta um algoritmo para obter a previsão de instabilidade de maneira mais rápida. A metodologia proposta é aplicada considerando medições fasoriais locais de uma barra de carga da rede elétrica de Baggio, na Itália.

Vale citar que outras técnicas foram sugeridas por autores para determinação do equivalente e apresentaram resultados consistentes. Entretanto, são raros os trabalhos que aplicam suas propostas com dados de medição. Mesmo aqueles que utilizam tais dados não apresentam resultados plenamente satisfatórios. Este fato reflete a dificuldade de obtenção de equivalentes de tempo real, fato que tem motivado as pesquisas na área.

### **3.3 Contextualização do Tema – Pesquisas Anteriores**

Conforme já comentado, o presente trabalho integra uma série de pesquisas que vêm sendo desenvolvidas no LRC/UFMG nos temas Estabilidade de Tensão e Aplicação de Medição Fasorial para Análise da Estabilidade em Tempo Real.

Os estudos referentes à estabilidade de tensão tiveram início em 1996, resultando na dissertação de mestrado (Lobato 1998). Nesse trabalho é feita uma ampla avaliação da estabilidade de tensão sob o ponto de vista da análise estática. Os principais

conceitos relacionados ao tema são apresentados a fim de proporcionar uma referência básica e consistente para as pesquisas.

Posteriormente, as pesquisas avançaram e um segundo trabalho foi desenvolvido por (Cortez 2001). Neste, a estabilidade de tensão é analisada sob o ponto de vista físico e matemático, abordando-se o conceito de estabilidade estrutural, alguns teoremas matemáticos e tipos de bifurcações características de sistemas dinâmicos. O resultado final do trabalho é a proposta de critério e procedimentos para avaliação da margem de estabilidade de tensão no âmbito da etapa de planejamento da expansão dos SEPs.

Como continuidade das pesquisas, o trabalho de mestrado (Júnior 2008) foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o impacto da compensação reativa *shunt* capacitiva na estabilidade de tensão de sistemas elétricos. O procedimento proposto no trabalho também se enquadra nas atividades de planejamento da expansão dos SEPs.

O primeiro trabalho referente a aplicações de medições fasoriais sincronizadas na operação de sistemas elétricos corresponde à dissertação de mestrado (Andrade 2008), que aborda os principais conceitos desta tecnologia. No trabalho, o cenário de SMFS é apresentado e é realizada uma investigação a respeito de sua utilização no monitoramento e controle dos SEPs. O tema estabilidade de tensão é citado como uma das funcionalidades da aplicação de medições fasoriais.

Após a elaboração desse último trabalho, o grupo de pesquisas do LRC/UFMG formou uma base sólida sobre as duas linhas de pesquisa: estabilidade de tensão e aplicação de medições fasoriais na operação de sistemas elétricos. Diante desse cenário, iniciaram-se as pesquisas referentes à análise de estabilidade de tensão em tempo real, considerando dados de SMFS.

Em 2010, foi elaborada a dissertação de mestrado (Silva 2010a) que aborda o uso de equivalentes de redes na análise de estabilidade de tensão em tempo real, utilizando medições fasoriais sincronizadas de tensão e corrente. Esse foi o primeiro de uma série de trabalhos desenvolvidos pela equipe do LRC/UFMG acerca desse assunto. No trabalho, introduziu-se o método proposto em (Vu 1999a) para determinação do equivalente. O equivalente de Thévenin é determinado para a representação de um



sistema elétrico de grande porte a partir de duas medições de grandezas de tensão e corrente. De posse do equivalente e dos conceitos relacionados à estabilidade de tensão propôs-se um Índice Previsor de Instabilidade, denominado PIT. Embora a metodologia tenha sido desenvolvida visando à aplicação das medições obtidas de SMFS, a mesma foi aplicada considerando dados obtidos de programas de fluxo de potência. Nas simulações de fluxo de potência, a carga do sistema é conhecida, e, conseqüentemente, a corrente de carga é bem definida.

Com a continuidade das pesquisas, verificou-se a necessidade da ampliação do conceito de carga para o equivalente de Thévenin. Em casos de medições de tensão e correntes em um barramento, a corrente vista pela barra de carga possui uma característica dinâmica e não é bem definida. Nesses casos, as correntes incidentes caracterizam cargas e fontes devido ao sentido do fluxo de corrente dos ramos conectados ao barramento em análise. Diante desse impasse, em 2011 foi elaborada a dissertação de mestrado (Ribeiro 2011) que apresenta duas metodologias para definição de uma corrente equivalente vista pela barra de carga do equivalente. A referência ainda aborda algumas limitações do uso de equivalentes e propõe técnicas para solução dos problemas detectados. No trabalho foram considerados dados obtidos de programas de fluxo de potência para apresentação dos resultados.

O primeiro trabalho caracterizado pela aplicação de dados provenientes de medição na determinação do equivalente foi a monografia (Martins 2012). Esta, portanto, representou a transição do ambiente de simulação para o ambiente de medição. Considerando a presença de erros do tipo ruído (associado às incertezas dos dispositivos de medição), a monografia propôs o uso de Estimadores de Estado, para filtrá-los, visando à obtenção de um equivalente mais confiável. No trabalho foram avaliados três métodos: Estimador dos Mínimos Quadrados, Estimador Estendido dos Mínimos Quadrados e Estimador dos Mínimos Quadrados Totais. Conclui-se que o Estimador dos Mínimos Quadrados seria o mais adequado, visto ser facilmente implementado, produzir resultados satisfatórios na determinação dos parâmetros de Thévenin e exigir um baixo esforço computacional. Os resultados obtidos pela metodologia desenvolvida neste trabalho foram muito significativos. Entretanto, como esta foi concebida considerando medições com amostragens da ordem de 15 minutos, seu uso com dados de SMFS requereu a continuidade das investigações.

Paralelamente aos últimos trabalhos citados, em 2010, iniciou-se um projeto de pesquisa de parceria entre LRC/UFMG, Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e a empresa Concert Technologies. O objetivo do projeto intitulado “Desenvolvimento de Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada” era o desenvolvimento do SMFS próprio da CEMIG. A função principal da equipe do LRC/UFMG foi a elaboração de uma metodologia capaz de avaliar a proximidade do ponto de operação atual do sistema elétrico ao ponto de risco de instabilidade, com base na aplicação do SMFS da empresa.

As atividades elaboradas ao longo desse projeto de pesquisa originaram o trabalho de dissertação de mestrado (Leal 2013), que constitui a continuidade e o aprimoramento dos trabalhos anteriores. Um dos seus objetivos foi aferir o cálculo do equivalente para gerar resultados mais próximos do esperado, que melhor representassem o comportamento do sistema elétrico. Foram consideradas medições de tensão e corrente numa taxa de amostragem de 1 medição por minuto, bem superior às utilizadas em (Martins 2012). As variações de tensão ( $\Delta V$ ) e corrente ( $\Delta I$ ) entre duas medidas consecutivas, diretamente relacionadas à taxa de amostragem dos dados, provocaram impacto significativo na determinação do equivalente. A partir de investigações detalhadas diante do novo cenário, foi proposto um método inovador para a elaboração do equivalente, o Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados. O estimador dos Mínimos Quadrados objetiva o tratamento do erro tipo ruído, conforme sugerido em (Martins 2012). Já a ponderação visa ao tratamento do efeito das alterações sistêmicas no equivalente, tendo em vista o comportamento das grandezas medidas, com base nas variações  $\Delta V$  e  $\Delta I$ . A forma final da metodologia permite identificar uma tendência do comportamento do equivalente de Thévenin.

Ao final do desenvolvimento do trabalho (Leal 2013), foram disponibilizados pela empresa dados de medição fasorial sincronizada cuja taxa de amostragem é bastante elevada (10 amostragens por segundo). Visto que a taxa de amostragem dos dados produz impacto significativo nos resultados do equivalente, mostrou-se vital a revisão da metodologia, para adequá-la ao novo cenário.

Do exposto acima, verifica-se a importância de se dar continuidade às pesquisas referentes à determinação da margem de estabilidade de tensão em tempo real. A não consideração de questões relacionadas às características de medições fasoriais pode inviabilizar o uso dos equivalentes de redes na prevenção do risco de instabilidade. A

dissertação aqui apresentada se enquadra neste contexto da pesquisa, com o objetivo de propor uma metodologia que incorpore as particularidades das medições provenientes dos SMFS e possibilite determinar e avaliar a margem de estabilidade em tempo real de forma mais exata.

### **3.4 Considerações Finais**

A avaliação da estabilidade de tensão em tempo real é alvo de pesquisas de muitos estudiosos devido a sua importância para o setor elétrico. Essa análise, na grande maioria das vezes, é feita pela obtenção de um equivalente de rede que permite o cálculo de índices que caracterizam a proximidade ao ponto de instabilidade de tensão.

O equivalente clássico de Thévenin, proposto em (Vu 1999a), é referência para vários pesquisadores que tratam da análise de estabilidade de tensão em tempo real. Ao longo das pesquisas, essa técnica foi sendo aprimorada de modo a se ajustar às condições em que é empregada. Uma alteração importante, que produz impactos positivos relevantes, é o uso do Estimador de Estados cujos objetivos são o tratamento de erros que contaminam as medidas e a aproximação dos parâmetros calculados do equivalente aos valores esperados.

No que concerne aos desenvolvimentos do LRC/UFMG, nota-se sua evolução consistente, com passos na direção de desenvolver equivalentes adequados para melhor acompanhar o comportamento dinâmico dos SEPs. Quanto à presente dissertação, no próximo capítulo são detalhadas as suas propostas.

## 4

# **METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM TEMPO REAL – PROPOSTA**

### **4.1 Considerações Iniciais**

Neste capítulo é proposta uma metodologia para o cálculo de equivalente de rede em tempo real utilizando dados fasoriais de tensão e de corrente com taxa de amostragem típica dos SMFS. O equivalente é utilizado para a determinação de um índice previsor do risco de instabilidade de tensão.

Uma vez que esta dissertação se configura como continuidade de pesquisas anteriores, optou-se por apresentar a proposta seguindo a seguinte metodologia: inicialmente, são apresentados os passos básicos da versão anterior mais recente, denominada neste texto por “metodologia original” (Leal 2013); posteriormente são discutidos seus passos, indicando os aspectos que merecem maior atenção no que diz respeito à utilização de dados de SMFS; finalmente é detalhada a “nova metodologia”.

### **4.2 Metodologia Original – Processo de Decisão**

O fluxograma mostrado na Figura 4.1 ilustra os passos da metodologia apresentada em (Leal 2013), os quais são descritos a seguir.

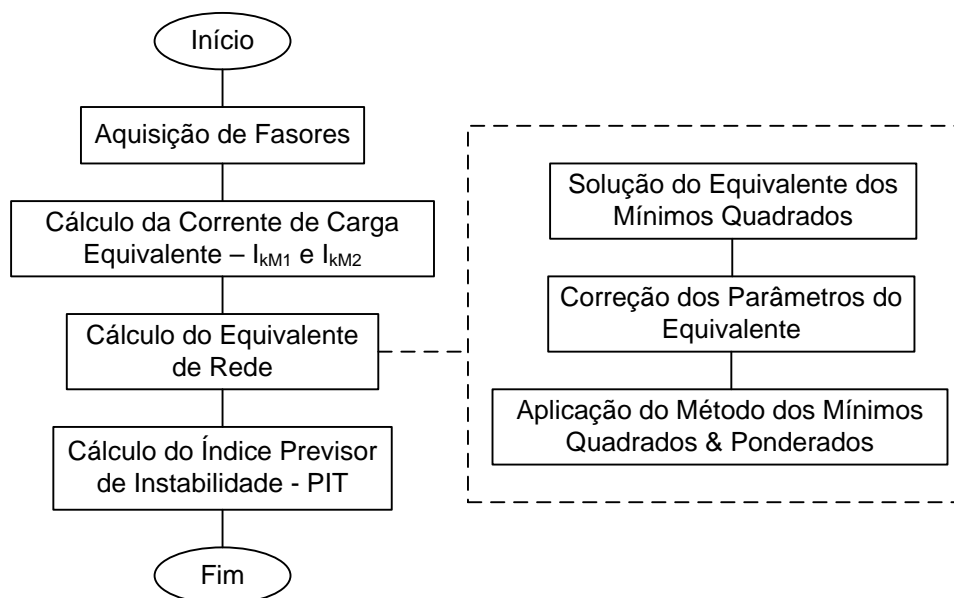


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia original (Leal 2013)

Aquisição de Fasores: Para determinada barra de interesse, são coletados os fasores sincronizados de tensão e de corrente. Cada amostragem corresponde ao fasor de tensão do barramento e aos fasores de corrente referentes a cada ramo nele incidentes.

Cálculo da Corrente de Carga Equivalente –  $I_{KM1}$  e  $I_{KM2}$ : A partir do fasor de tensão e dos fasores de corrente medidos, é determinada a corrente de carga equivalente, de acordo com as duas metodologias propostas em (Ribeiro 2011).

Cálculo do Equivalente de Rede: Os parâmetros do equivalente de rede são calculados, para a barra de interesse. Esse passo é dividido em três etapas principais: o equivalente inicial é obtido pela aplicação do estimador dos Mínimos Quadrados; posteriormente, os parâmetros são corrigidos, quando necessário, a fim de aproximá-los das condições do sistema elétrico; o equivalente final é calculado, considerando ponderações baseadas nas variações de tensão e corrente da carga.

Cálculo do Índice Previsor de Instabilidade – PIT: Nesse passo, é determinado o Índice Previsor de Instabilidade (PIT), que avalia o risco de perda de estabilidade de tensão em tempo real, conforme a formulação proposta em (Silva 2010a).

### **4.3 Análise da Metodologia Original**

Neste item são tratados em detalhes todos os passos que constituem a metodologia original. As análises são realizadas utilizando dados de medições fasoriais de tensão e corrente referentes a uma subestação real de tensão nominal 345 kV, denominada Taquaril, sob responsabilidade da CEMIG. As informações a respeito deste barramento estão detalhadas no Capítulo 5.

#### **4.3.1 Aquisição de Fasores**

O primeiro passo do fluxograma da Figura 4.1 refere-se à aquisição dos dados de medição de módulo e ângulo de tensão e corrente.

Os sistemas elétricos são caracterizados por alimentarem cargas predominantemente indutivas. A maioria das cargas das unidades consumidoras consome energia reativa indutiva, como motores, transformadores, lâmpadas de descarga, fornos de indução, entre outras.

Do ponto de vista da solução do equivalente de  $V_u$ , considerando que o sistema elétrico alimenta uma carga do tipo indutiva, um aumento da corrente consumida resulta na redução da tensão na barra de carga e vice-versa. Essa condição assegura que os parâmetros obtidos do equivalente correspondam ao comportamento esperado do sistema elétrico. Entretanto, essa condição de desempenho das grandezas de tensão e corrente nem sempre é verificada nas medições fasoriais. Em alguns casos, tem-se aumento ou diminuição simultâneos de tensão e corrente.

Devido a essa característica das medições, surgiu a ideia de se verificar o impacto da inclusão de uma etapa de pré-processamento de dados na determinação dos parâmetros do equivalente. Caso o pré-processamento resultasse em um impacto significativo e positivo na resposta do equivalente, um novo passo deveria ser inserido no fluxograma da Figura 4.1, entre a aquisição dos fasores e a determinação da corrente de carga equivalente.

Para avaliar a necessidade ou não do pré-processamento de dados foram realizados alguns testes considerando pequenos ajustes dos dados de medição. O comportamento das grandezas medidas é avaliado durante toda a faixa de medição e

uma pequena alteração no módulo da tensão é realizada, quando necessário. Nos instantes em que tensão e corrente aumentarem ou diminuïrem simultaneamente, um ajuste mínimo é realizado no valor do módulo da tensão medida a fim de caracterizar o comportamento esperado da carga, do ponto de vista da solução do equivalente. É importante frisar que a alteração efetuada para o módulo da tensão é mínima, para não descaracterizar o comportamento do sistema, conforme ilustrado na Figura 4.2.

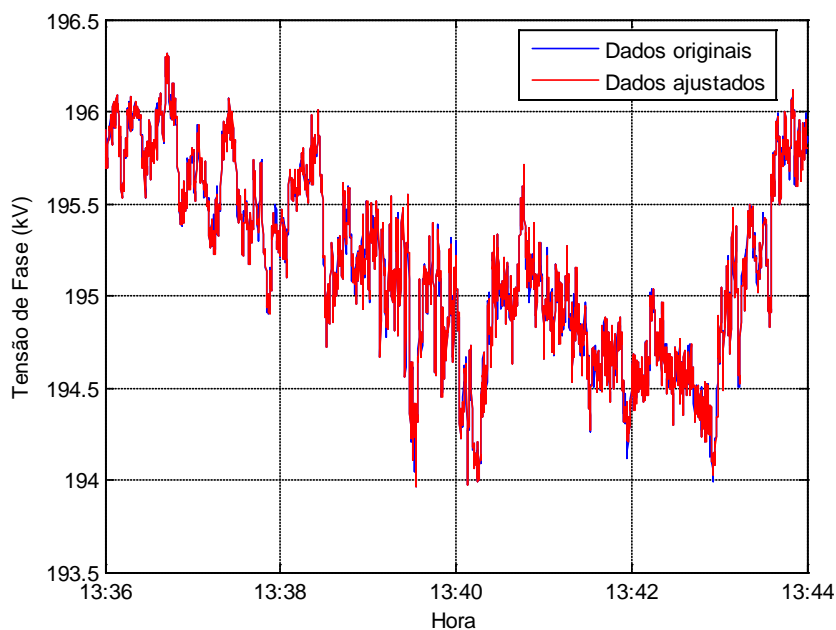
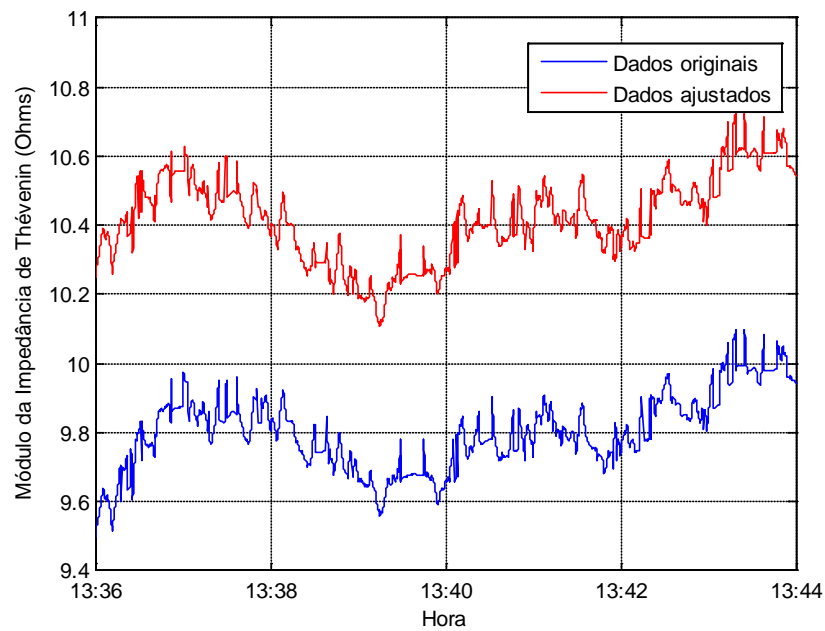
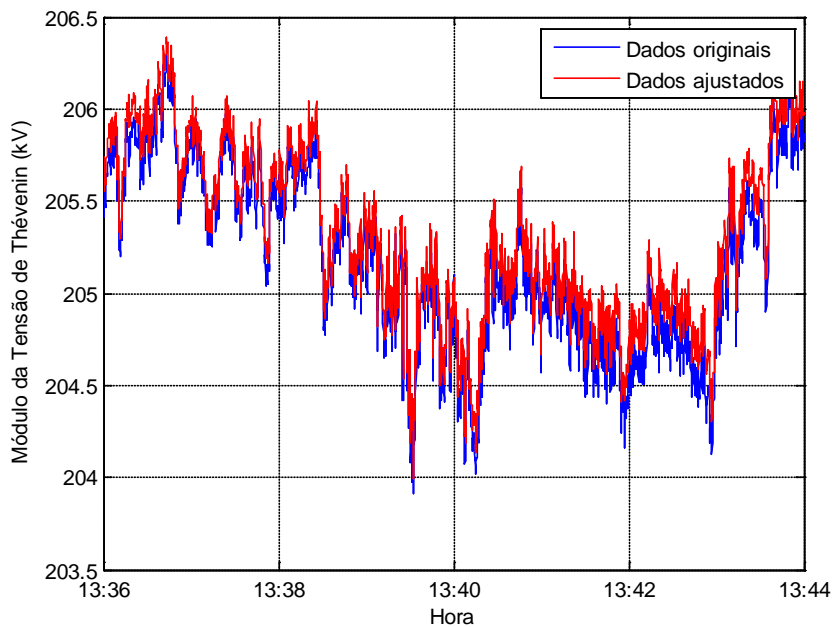


Figura 4.2 – Módulo das tensões originais e ajustadas de SMFS

Após a alteração dos valores de tensão, os parâmetros de Thévenin são calculados e comparados com aqueles obtidos para as medições originais, conforme ilustrado na Figura 4.3.



(a)



(b)

Figura 4.3 – Avaliação do pré-processamento de dados para  $Z_{TH}$  (a) e  $E_{TH}$  (b)

Pela análise da Figura 4.3 verifica-se que o ajuste das medições de tensão, cujo objetivo é caracterizar a condição do comportamento da carga para obtenção de parâmetros consistentes do equivalente, provocou um impacto muito pequeno na resposta do sistema. Para a impedância de Thévenin, a diferença fica em torno de 0,7



$\Omega$ , enquanto a tensão varia aproximadamente 0,1 kV. Esse resultado deve-se ao fato de que na solução do equivalente considera-se um número de medições relativamente elevado, conforme detalhado mais adiante, e a alteração de algumas dessas medições não provoca uma modificação significativa no resultado.

*Diante do exposto, conclui-se que não há necessidade de um pré-processamento dos dados para determinação dos parâmetros.*

#### 4.3.2 Cálculo da Corrente de Carga Equivalente – $I_{kM1}$ e $I_{kM2}$

No ambiente de medição fasorial sincronizada de um barramento, geralmente tem-se medições de tensão e corrente para cada ramo conectado ao mesmo. Entretanto, na formulação da determinação do equivalente de Thévenin utilizam-se os fasores de tensão e de corrente referentes à carga do sistema em análise. Assim, é necessário definir a carga característica do barramento, a partir das medições obtidas de cada ramo que nele incide.

Na metodologia original, em relação à tensão, é considerada uma das medições dos ramos que incidem na barra. Quanto à corrente, a carga é definida a partir do cálculo da corrente de carga equivalente, conforme proposta apresentada em (Ribeiro 2011). Na realidade, são adotadas duas metodologias. Estas se baseiam no sentido dos fluxos de potência dos ramos incidentes na barra. Para simplificar o entendimento destas, considera-se o exemplo retirado de (Ribeiro 2011), onde são apresentados os sentidos dos fluxos de potências para a barra  $k$ , ilustrada na Figura 4.4. O sinal positivo significa fluxo saindo da barra e sinal negativo entrando na mesma.

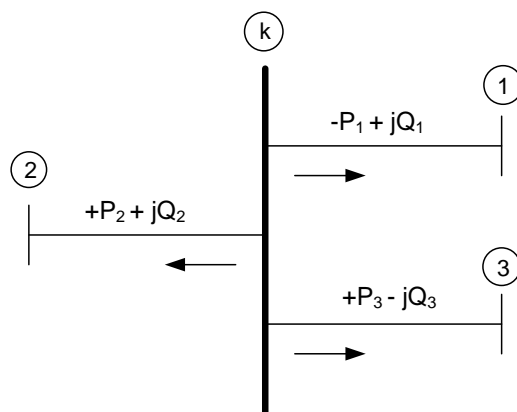


Figura 4.4 – Fluxo de potência da barra  $k$

Fonte: (Ribeiro 2011)

A metodologia 1 foi proposta com base no fato de que a grande maioria das cargas existentes no sistema elétrico brasileiro tem característica indutiva, ou seja, consomem uma potência elétrica com parcelas ativa e reativa positivas. Nesse caso, a potência aparente da carga referente à barra  $k$  é constituída pelas potências ativa e reativa de sinais positivos, independente do ramo  $a$  que pertencem. De acordo com essa definição, a carga é caracterizada por consumo de potência ativa e de caráter indutivo. No exemplo considerado, a potência aparente da carga é dada por  $P_2 + P_3 + j(Q_1 + Q_2)$ .

Nos SEPs, a carga pode ser definida como consumidores de potência ativa. A metodologia 2 foi desenvolvida baseada nessa afirmação. Considerando que a potência ativa flui dos geradores em direção à carga, essa metodologia caracteriza a carga com base nas potências ativas positivas que saem do barramento monitorado. Portanto, a carga é determinada pelo consumo de potência ativa, independente do sinal da potência reativa associada. A potência aparente é constituída pelas potências ativas de sinais positivos e suas respectivas parcelas reativas. Para o barramento ilustrado na Figura 4.4, a potência aparente da carga é dada por  $P_2 + P_3 + j(Q_2 - Q_3)$ .

No trabalho (Ribeiro 2011), as metodologias 1 e 2 foram aplicadas e avaliadas considerando simulações de fluxo de potência. Em ambos os casos, obtiveram-se resultados satisfatórios condizentes com os resultados esperados.

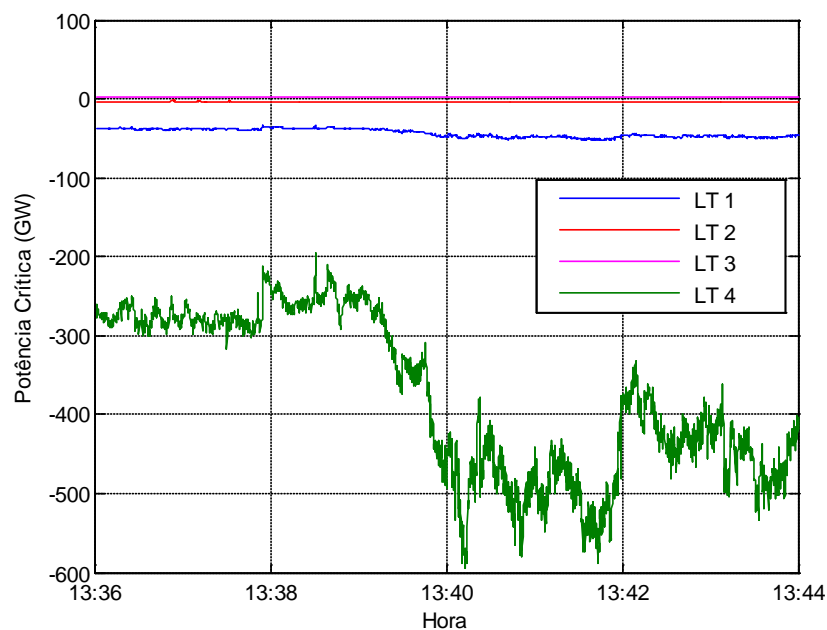
Com o objetivo de obter uma melhor avaliação das metodologias propostas, nesta dissertação, realizou-se um estudo importante, considerando dados reais de SMFS, conforme descrito a seguir.

Em um primeiro instante, o equivalente de Thévenin foi calculado com base nas medições de tensão e corrente de todos os ramos que incidem na barra, considerando as metodologias propostas em (Ribeiro 2011). A potência do ponto de máximo carregamento do barramento é calculada de acordo com a equação (2.13), utilizando o conceito de corrente de carga equivalente.

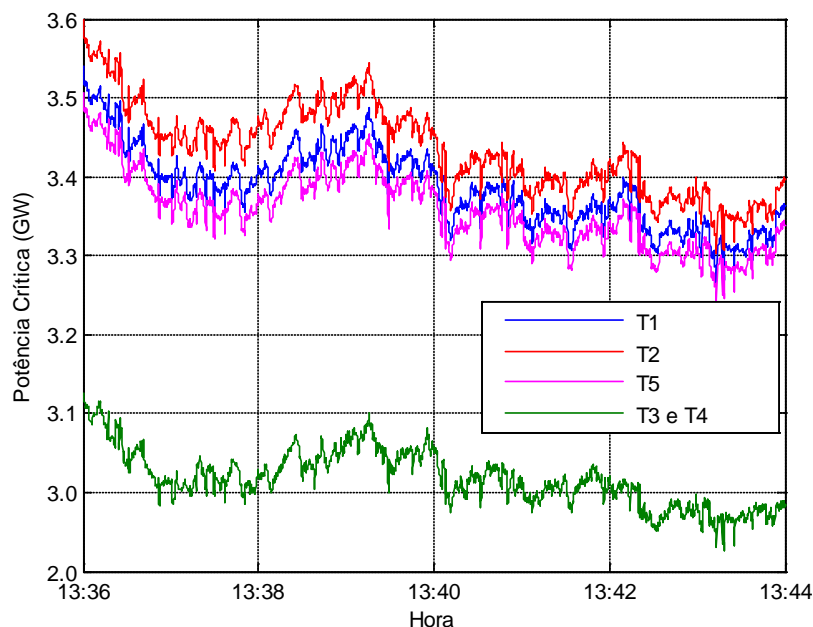
É importante ressaltar que são calculadas duas potências críticas, segundo as metodologias 1 e 2. O menor valor calculado é escolhido para caracterizar a potência do ponto de máximo carregamento da barra. Essa escolha é de caráter conservador e garante mais segurança na análise da estabilidade de tensão.

Posteriormente, a potência crítica é calculada para cada ramo separadamente, considerando o equivalente calculado no instante inicial. Para o cálculo das potências individuais, utilizam-se as medições características de cada ramo na determinação da carga do mesmo e não há necessidade de aplicação das metodologias 1 ou 2.

A Figura 4.5 ilustra a potência crítica calculada para cada ramo correspondente às linhas de transmissão e aos transformadores da subestação real. Neste último caso, as medições referentes aos transformadores T3 e T4 foram condensadas em apenas um ramo, de acordo com os arquivos disponibilizados pelo concentrador de dados.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Potência crítica de cada ramo incidente referente a linhas de transmissão (a) e transformadores (b)

Pela análise da Figura 4.5, pode-se observar que a potência referente ao ponto de máximo carregamento apresenta valor negativo para as linhas de transmissão 1, 2 e 4, indicando que se trata de ramos que estão fornecendo potência ativa ao barramento. Os demais ramos, cujos valores de potência são positivos, são considerados ramos de carga, ou seja, o sentido do fluxo indica que consomem potência ativa, segundo as metodologias propostas.

Na Figura 4.6 é realizada uma análise comparativa entre a potência crítica referente ao barramento obtida com a aplicação das metodologias 1 ou 2 e a soma das potências críticas individuais de cada ramo. Nesse caso, espera-se que a potência crítica referente ao barramento seja inferior à soma das potências individuais, visto que nas metodologias faz-se o cálculo de uma potência equivalente, considerando os fluxos de potência de todos os ramos simultaneamente. Os resultados permitem constatar que a potência crítica do barramento é cerca de 13 GW menor que a soma das potências críticas dos ramos.

*Pela análise dos resultados, verifica-se que o comportamento das potências atende às expectativas, reforçando a eficácia e a*

*aplicabilidade das propostas de (Ribeiro 2011) utilizadas na metodologia original, que, assim, continuam sendo adotadas neste trabalho.*

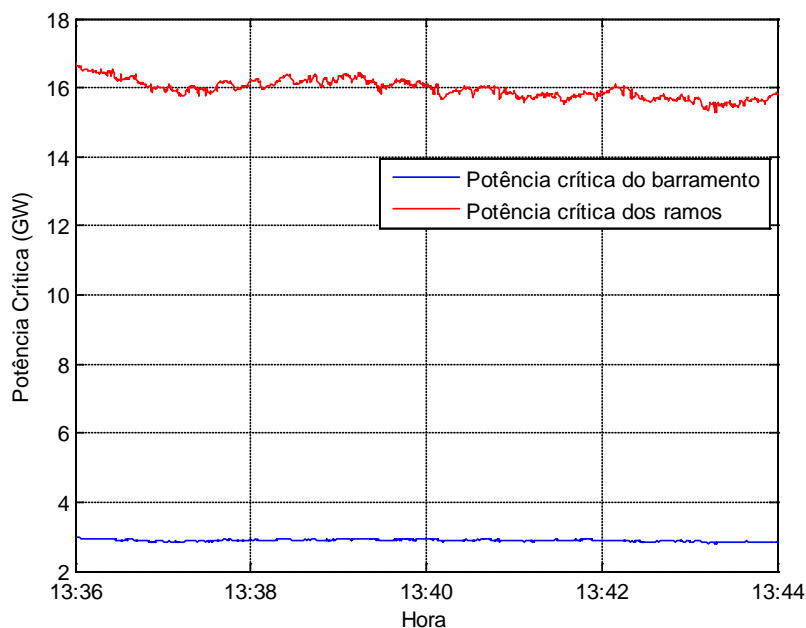


Figura 4.6 – Potência crítica do barramento e dos ramos incidentes

### 4.3.3 Cálculo do Equivalente de Rede

Conforme pode ser observado no fluxograma da Figura 4.1, o cálculo do equivalente da metodologia original é dividido em três etapas: Solução do Equivalente dos Mínimos Quadrados, Correção dos Parâmetros do Equivalente, Aplicação do Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados. Cada uma destas etapas foram avaliadas, considerando a utilização de dados reais provenientes de SMFS.

#### a) Solução do Equivalente dos Mínimos Quadrados

A primeira etapa da determinação dos parâmetros do equivalente é o cálculo inicial dos mesmos pelo estimador dos Mínimos Quadrados. Esse método, conforme detalhado no Capítulo 2, é caracterizado como uma técnica de estimação, para tratamento de erros do tipo ruído, sempre presentes nas medições.

Um fator muito importante na aplicação do estimador dos Mínimos Quadrados é o número de medições que são consideradas para solução do equivalente. Tal número

depende das características das medições do sistema elétrico em análise e determina o conjunto de equivalentes produzidos pelo estimador. A partir desse conjunto, é gerada uma janela de dados, cujo tamanho influencia diretamente o comportamento dos parâmetros calculados.

Na metodologia original, com base em (Leal 2013), foram consideradas 120 medições na solução do estimador dos Mínimos Quadrados. Esse valor foi adotado em uma análise de sensibilidade, considerando os dados de medição obtidos do centro de operação da empresa CEMIG, como forma a aproximar os valores calculados dos parâmetros ao comportamento esperado do sistema. Durante todo o processo de estimação, o tamanho da janela de dados é fixado nesse valor.

Nesta dissertação, foi realizada a análise de sensibilidade do tamanho da janela de dados utilizando medições características de SMFS. Os parâmetros do equivalente são calculados para um mesmo conjunto de dados de medições fasoriais, considerando diversos tamanhos da janela na solução do sistema. Os resultados obtidos para o módulo da impedância de Thévenin estão ilustrados na Figura 4.7.

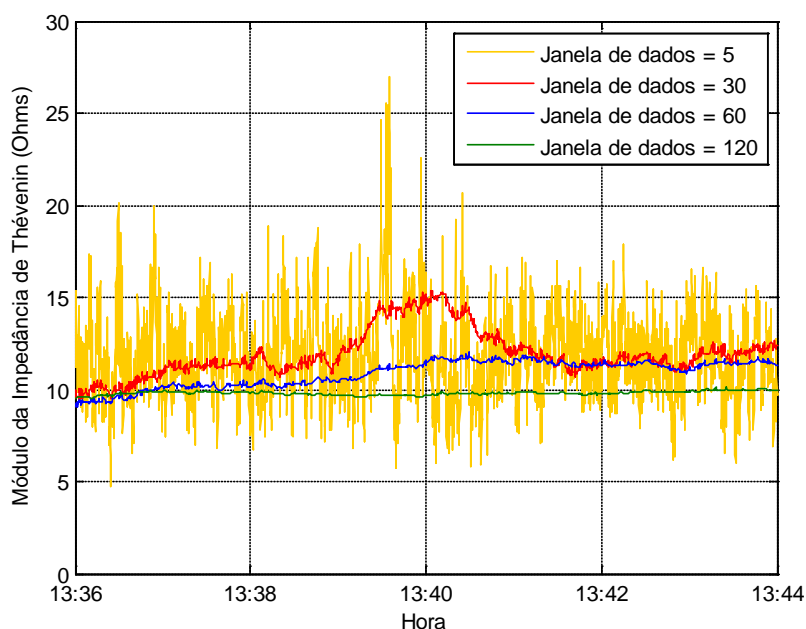


Figura 4.7 – Análise de sensibilidade em relação ao tamanho da janela de dados

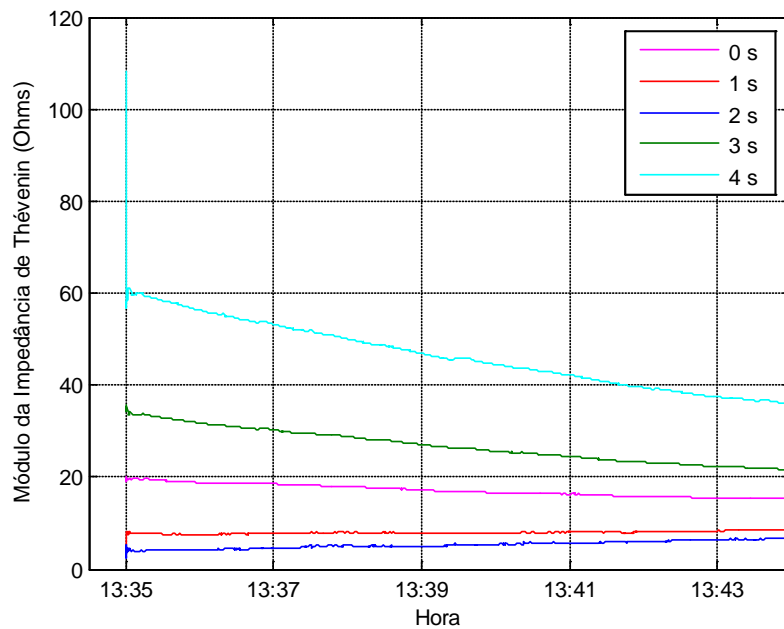
Pela análise da Figura 4.7, verifica-se que o módulo de  $\hat{Z}_{TH}$  apresenta maiores variações para valores reduzidos do tamanho da janela de dados. À medida que se aumenta esse valor, a resposta do sistema torna-se mais amortecida. Isso pode ser

explicado pelo fato de que quanto maior o tamanho da janela de dados, maior o intervalo de tempo em que se considera os parâmetros do sistema constantes. Ao se utilizar uma janela de dados com 120 grandezas na solução do equivalente, por exemplo, admite-se que o sistema não sofre alteração em 12 segundos de medição, já que para os dados aqui utilizados a taxa de amostragem é de 10 fasores por segundo. Considerando uma janela cujo tamanho é igual a 5, assume-se que os parâmetros permanecem constantes no período de 0,5 segundos.

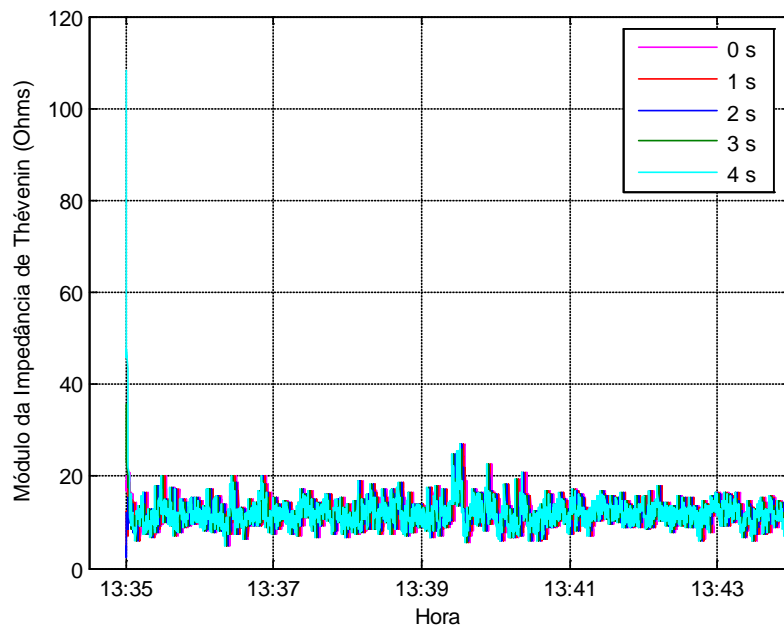
A definição do tamanho da janela de dados é um parâmetro de ajuste muito importante na metodologia analisada neste trabalho. Nos SEPs, o sistema não sofre uma alteração significativa em um curto intervalo de tempo e, portanto, os parâmetros do equivalente não podem apresentar uma variação expressiva nesse intervalo. O ajuste da janela de dados permite aproximar os valores calculados do equivalente ao comportamento esperado das grandezas do sistema.

Outro aspecto importante que deve ser avaliado em relação ao tamanho da janela de dados refere-se ao período de estabilização quando se inicia o cálculo do equivalente, para um determinado conjunto de dados. As primeiras medições utilizadas na determinação do equivalente influenciam diretamente nos resultados obtidos, visto que a janela de dados ainda não está preenchida nessa condição. Para um dado conjunto de medições, ao se iniciar o cálculo do equivalente em pontos distintos obtêm-se valores diferentes para os parâmetros nos instantes iniciais. Em alguns casos, essa diferença pode ser bastante significativa. Entretanto, à medida que o número de medições disponíveis aumenta, os parâmetros calculados tendem a convergir para determinados valores.

O tempo gasto para a resposta convergir para o valor esperado depende diretamente do tamanho da janela de dados considerada na solução do equivalente. Para ilustrar essa relação, o equivalente de Thévenin foi calculado a partir de diferentes pontos de partida de um mesmo conjunto de dados, considerando dois valores para o tamanho da janela de dados: 120 e 5. Os resultados obtidos para o parâmetro  $Z_{TH}$  estão ilustrados na Figura 4.8.



(a)



(b)

Figura 4.8 – Período de estabilização para janela de dados de tamanhos 120 (a) e 5 (b)

É possível verificar que em ambos os casos a resposta do sistema tende a convergir para um valor específico, independente do ponto de partida considerado no conjunto de medições. Entretanto, nota-se que, para a janela de dados de tamanho igual a 5, o tempo gasto para convergir é muito menor, ou seja, é necessário um número reduzido de medições para que a resposta aproxime do valor esperado. Para a janela de dados



de tamanho igual a 120, o intervalo de tempo para convergir é bem maior, podendo chegar à ordem de minutos. Para os dois casos avaliados, o parâmetro  $Z_{TH}$  se estabiliza em torno de  $15 \Omega$ .

O tamanho da janela de dados foi analisado sob dois aspectos diferentes: oscilações da resposta do equivalente e tempo gasto em convergir para o valor estável. Para avaliar a estabilidade de tensão de sistemas elétricos é necessário que a resposta do equivalente não apresente grandes oscilações. Além disso, a rapidez na estabilização dos parâmetros do equivalente é essencial.

*Diante desses aspectos e de acordo com as análises apresentadas, é proposto neste trabalho o conceito e a aplicação do **processo de aceleração**. A implementação da inclusão desta etapa está descrita no tópico relativo à nova metodologia proposta (item 4.4.1).*

#### **b) Correção dos Parâmetros do Equivalente**

Os parâmetros estimados pelo método dos Mínimos Quadrados podem apresentar características que não condizem com as condições do sistema elétrico. Apesar de serem grandezas calculadas matematicamente, seus valores devem ser coerentes com os “valores eletricamente esperados”. Na metodologia original, com base em (Leal 2013), são utilizadas duas correções para os parâmetros quando estes apresentarem valores que não condizem com o comportamento do sistema elétrico.

A primeira correção refere-se à impedância de Thévenin e é proposta com base no fato de que a resistência desse parâmetro deve ser sempre positiva. A segunda correção afeta a tensão de Thévenin e se baseia nos limites do perfil de tensão.

A impedância de Thévenin representa o sistema visto da barra de onde foram obtidas as medições de tensão e corrente. Nos SEPs, essa impedância é caracterizada por apresentar valor de resistência positiva. A impedância obtida da solução do estimador dos Mínimos Quadrados nem sempre possui essa característica e uma correção é proposta a fim de ajustar seu valor.

A correção é feita apenas para o ângulo da impedância e seu módulo não sofre qualquer alteração. Para garantir que a resistência de Thévenin apresente valor

positivo, a primeira condição é que o ângulo da impedância ( $\theta_{TH}$ ) deve estar definido entre os limites  $-90^\circ$  e  $+90^\circ$ . Essa faixa pode ser ainda mais reduzida, considerando que a carga está bem definida de acordo com as metodologias 1 ou 2, e pode ser delimitada com base no valor da corrente de carga,  $I_C$ , conforme descrito a seguir.

De acordo com o sistema equivalente de Thévenin, a corrente de carga pode ser definida como:

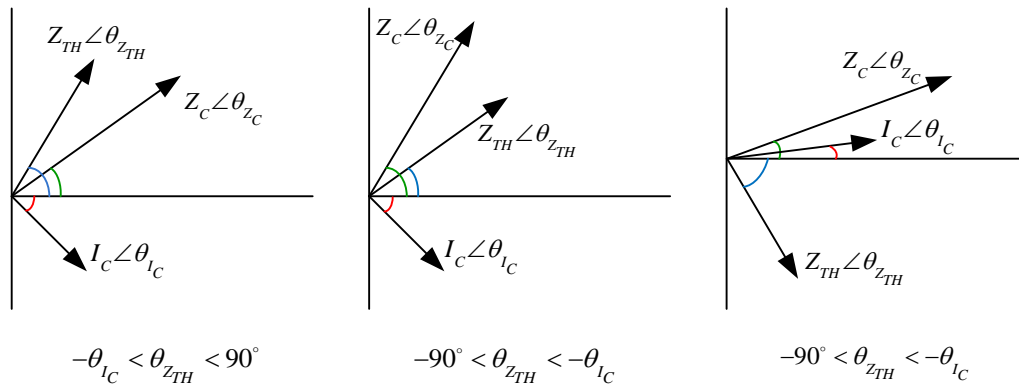
$$i_C = \frac{E_{TH}}{Z_{TH} + Z_C} (\theta_{E_{TH}} - \text{ângulo}(\bar{Z}_{TH} + \bar{Z}_C)) \quad (4.1)$$

Na metodologia original, assume-se que o ângulo da tensão de Thévenin é igual a zero. Assim, o ângulo da corrente é calculado diretamente pela soma vetorial de  $\bar{Z}_{TH}$  e  $\bar{Z}_C$ , e é dado por:

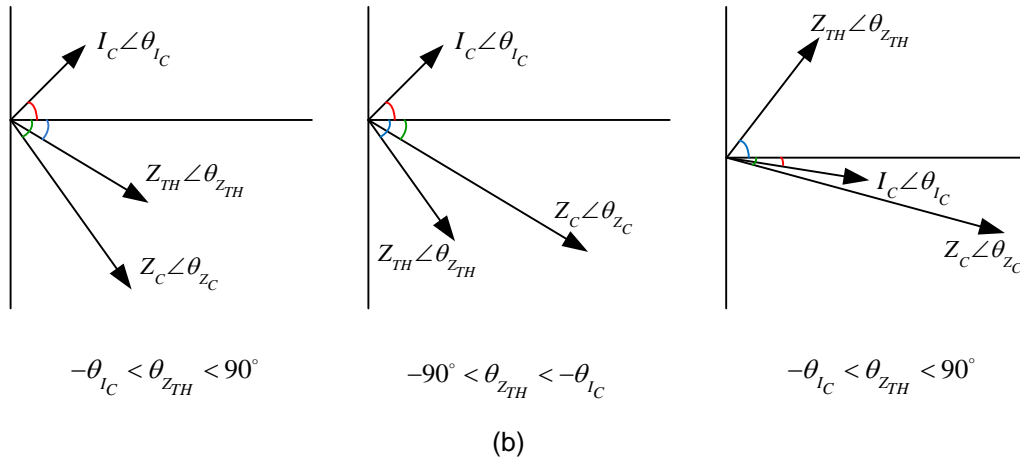
$$\theta_{I_C} = -\text{ângulo}(\bar{Z}_{TH} + \bar{Z}_C) \quad (4.2)$$

De acordo com a soma vetorial, o vetor  $-\dot{I}_C$  estará sempre compreendido entre os vetores  $\bar{Z}_{TH}$  e  $\bar{Z}_C$ . Portanto, o ângulo  $-\theta_{I_C}$  situa-se entre os ângulos correspondentes a  $\bar{Z}_{TH}$  e  $\bar{Z}_C$ , caracterizando a segunda condição para correção do parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$ .

A Figura 4.9 ilustra a faixa de localização do ângulo  $\theta_{Z_{TH}}$  para cargas indutivas e capacitivas, respectivamente, com base nas duas condições apresentadas anteriormente. Em ambos os casos, há três configurações possíveis do sistema, de acordo com a relação entre os ângulos das impedâncias de Thévenin e da carga.



(a)


 Figura 4.9 – Localização do ângulo  $\theta_{TH}$  para cargas indutivas (a) e capacitivas (b)

Para definir a correção para o ângulo da impedância de Thévenin, consideram-se os módulos de  $\bar{Z}_{TH}$  e  $\bar{Z}_C$  iguais. Nesse caso, o ângulo de  $\theta_{IC}$  é dado pela média entre os ângulos das impedâncias de Thévenin e da carga:

$$\theta_{IC} = -\frac{\theta_{Z_{TH}} + \theta_{Z_C}}{2} \quad (4.3)$$

Isolando-se  $\theta_{Z_{TH}}$  na equação acima, obtém-se a equação para correção do parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$ :

$$\theta_{Z_{TH}} = -(2\theta_{IC} + \theta_{Z_C}) \quad (4.4)$$

A correção do parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$  mostrou-se necessária no trabalho (Leal 2013), considerando os dados obtidos do centro de operação do sistema. Entretanto, é importante avaliar sua aplicabilidade para dados de SMFS. Para isso, dados fasoriais da subestação real foram utilizados na determinação dos parâmetros de Thévenin, segundo a proposta de (Leal 2013), com e sem a aplicação da correção do ângulo da impedância de Thévenin. A Figura 4.10 ilustra os resultados obtidos para a potência do ponto de máximo carregamento, calculada de acordo com a equação (2.13). Observa-se uma diferença de aproximadamente 0,3 GW para os casos avaliados. Em termos percentuais, em relação ao valor máximo da potência crítica, tal diferença corresponde a 8,5%. Essa variação de potência produz um impacto pouco significativo no cálculo do índice predictor de instabilidade.

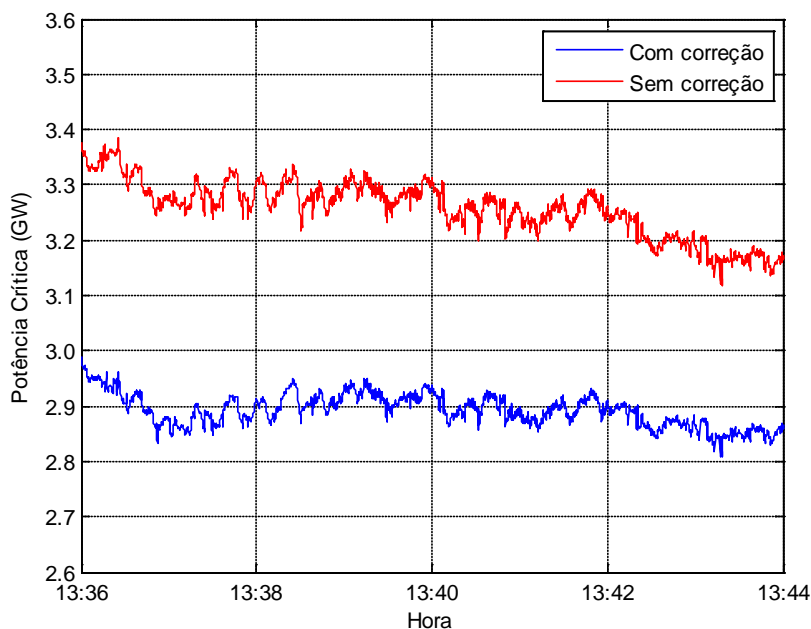


Figura 4.10 – Potência crítica com e sem correção de  $\bar{Z}_{TH}$

*Avaliando os resultados obtidos para a potência do ponto de máximo carregamento, verifica-se que a correção para o parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$  resulta em uma alteração no seu valor. Entretanto, essa variação produz um impacto pequeno no cálculo do índice predictor de instabilidade, ou seja, este se mostra pouco sensível à correção, tendo em vista o uso de dados de SMFS. Isso se deve ao fato de que na determinação final dos parâmetros de Thévenin considera-se uma janela de dados contendo um número de grandezas relativamente alto, e a modificação de algumas das variáveis que compõem essa janela não resulta em uma alteração significativa na solução final. Assim, a correção para o parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$  torna-se dispensável na proposta da nova metodologia.*

A segunda correção adotada na metodologia original é baseada nos limites mínimo e máximo de operação do perfil de tensão. Tais limites são definidos pelo ONS e variam de acordo com o nível de tensão de operação. No trabalho, consideram-se os limites mínimo e máximo como 0,9 e 1,1 pu para qualquer nível de tensão. Na metodologia original, após a solução do método dos Mínimos Quadrados, é verificado se o módulo da tensão de Thévenin encontra-se dentro da faixa operativa citada. Caso tal condição não seja satisfeita, esse parâmetro é sujeito à correção, conforme descrito a seguir.

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

$$V_C < E_{TH} < 1,1V_{nom} \quad (4.5)$$

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

$$0,90V_{nominal} < E_{TH} < 1,1V_{nom} \quad (4.6)$$

A segunda correção define que, nos instantes de operação, onde as condições definidas nas inequações (4.5) ou (4.6) forem violadas, considera-se o valor calculado de  $\dot{E}_{TH}$  na iteração anterior como atual, conforme equação (4.7). O parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$  é ajustado de acordo com o novo valor assumido de  $\dot{E}_{TH}$ .

$$E_{TH}(t) = E_{TH}(t - 1) \quad (4.7)$$

*Essa última correção citada continua sendo empregada no trabalho atual, por estar relacionada aos limites de operação dos SEPs. É importante mencionar que tal correção não altera os parâmetros calculados, apenas desconsidera aqueles que não atendem aos limites elétricos e considera os valores calculados na iteração anterior.*

### **c) Aplicação do Método dos Mínimos Quadrados & Ponderados**

Na última etapa da determinação dos parâmetros do equivalente, adotada pela metodologia original, é realizada uma média ponderada para ajuste do parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$ . Tal ponderação é um passo posterior à solução do método dos Mínimos Quadrados e originou o método dos Mínimos Quadrados & Ponderados. O método dos Mínimos Quadrados é responsável pelo tratamento do erro do tipo ruído presente nas medições, enquanto a ponderação visa à qualificação das medições baseada em variações do sistema e da carga.

A tensão é uma grandeza controlada do sistema de potência, e seus valores devem permanecer dentro dos limites impostos pelo ONS. As variações de tensão de um sistema são provenientes da ação de transformadores de tap variável, reguladores automáticos de tensão, bancos de capacitores e indutores, entre outros. A ação destes dispositivos caracterizam variações do sistema. Desta maneira, considera-se que as variações bruscas de tensão na barra de carga são provenientes do sistema que a alimenta.

A variação da carga de uma determinada barra provoca uma alteração mais significativa na corrente que flui por ela, devido ao fato da tensão ser uma grandeza controlada. Assim, variações bruscas de corrente na barra são provenientes de variações na carga.

Em resultados apresentados em (Leal 2013), constata-se que, quando as variações do sistema são mais significativas que as variações da carga, a solução do equivalente converge para o negativo da impedância da carga e tensão nula. Por outro lado, quando a variação da carga supera a variação do sistema, a solução converge para os parâmetros do equivalente do sistema. Com base nessas considerações, é utilizada uma ponderação das medições de tensão e corrente para determinação dos parâmetros do equivalente.

As variações de tensão são ponderadas inversamente proporcionais ao seu aumento, enquanto as variações de corrente são ponderadas diretamente proporcionais ao seu aumento.

As equações adotadas para ponderação das medições de tensão e corrente são, respectivamente:

$$p_{v(t)} = 90^{-(|v(t)-v(t-1)|)} \quad (4.8)$$

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

Nas equações acima,  $v(t)$  e  $i(t)$  referem-se aos valores da tensão e corrente no instante atual, e  $v(t - 1)$  e  $i(t - 1)$  aos valores de tensão e corrente no instante de tempo imediatamente anterior.

O peso total de cada medição é dado pela soma dos pesos relacionados à tensão e à corrente:

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

De posse do fator de ponderação determinado de acordo com a formulação (4.10), a impedância de Thévenin é recalculada através da média ponderada dos valores que compõem a janela de dados, de acordo com a equação (4.11). A equação que determina a tensão de Thévenin é apresentada na equação (4.12).

$$\bar{Z}_{THMQ\&P}(t) = \frac{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)\bar{Z}_{THMQ}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)} \quad (4.11)$$

$$\dot{E}_{THMQ\&P}(t) = \dot{I}_C(t) \left( \bar{Z}_{THMQ\&P}(t) + \bar{Z}_C(t) \right) \quad (4.12)$$

Nas equações anteriores,  $t$  refere-se ao instante de tempo,  $j$  ao tamanho da janela de dados,  $n$  ao índice de deslocamento na janela,  $p$  ao peso calculado de acordo com a equação (4.10) e  $\bar{Z}_{THMQ}$  a um dos parâmetros de saída do estimador dos Mínimos Quadrados.

No trabalho (Leal 2013) a equação (4.11) foi obtida e aplicada considerando dados de medição com taxa de amostragem de 1 medição por minuto. Como esta taxa é relativamente pequena se comparada à taxa de amostragem de dados obtidos de SMFS, torna-se necessário avaliar o desempenho da equação peso (4.10).

Considerando a taxa dos dados dos SMFS, as variações máximas das grandezas elétricas são bastante reduzidas. Para os dados utilizados neste trabalho, por exemplo, as variações de tensão e corrente são da ordem de  $10^{-3}$  e  $10^{-1}$  pu, respectivamente. Para variações reduzidas como estas, verifica-se que a equação peso utilizada torna-se inócua. Para ilustrar essa questão, considera-se o gráfico apresentado na Figura 4.11, que caracteriza as curvas referentes às equações peso da tensão (4.8) e corrente (4.9).

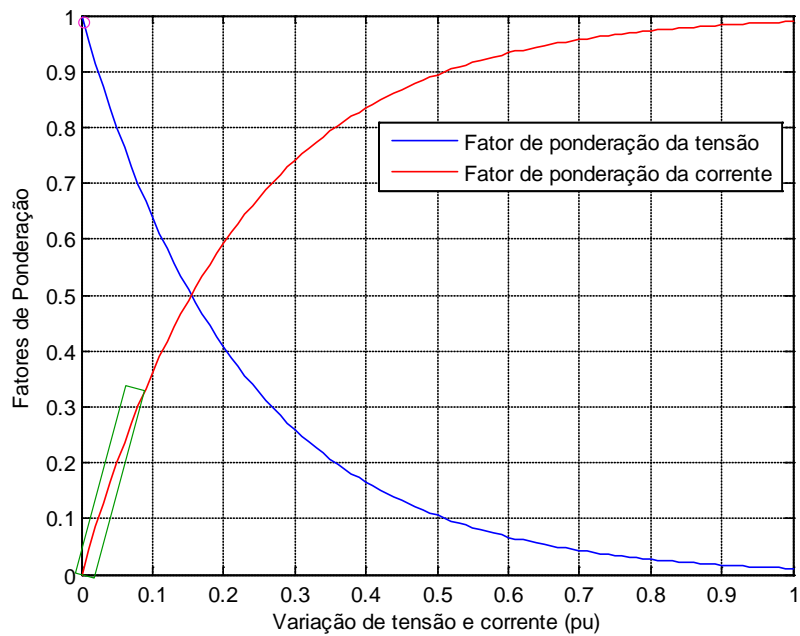


Figura 4.11 – Região das ponderações para tensão e corrente

A região destacada pela circunferência indica a faixa de valores do fator de ponderação referente às variações de tensão, enquanto a região destacada pelo retângulo retrata a faixa de valores do fator de ponderação referente às variações de corrente, para os dados de medição fasoriais da subestação real. Observa-se que o fator de ponderação varia entre 0,97 e 1 para a tensão, e 0,1 e 0,35 para a corrente. Assim, o peso total da ponderação das medições varia entre 1,07 e 1,35, aproximadamente. Trata-se de uma variação que produz um impacto pouco significativo na determinação dos parâmetros do equivalente. A Figura 4.12 apresenta uma comparação dos módulos da impedância de Thévenin obtidos com e sem a ponderação adotada na metodologia original. Observa-se que a variação é mínima e que uma curva praticamente sobrepõe a outra.



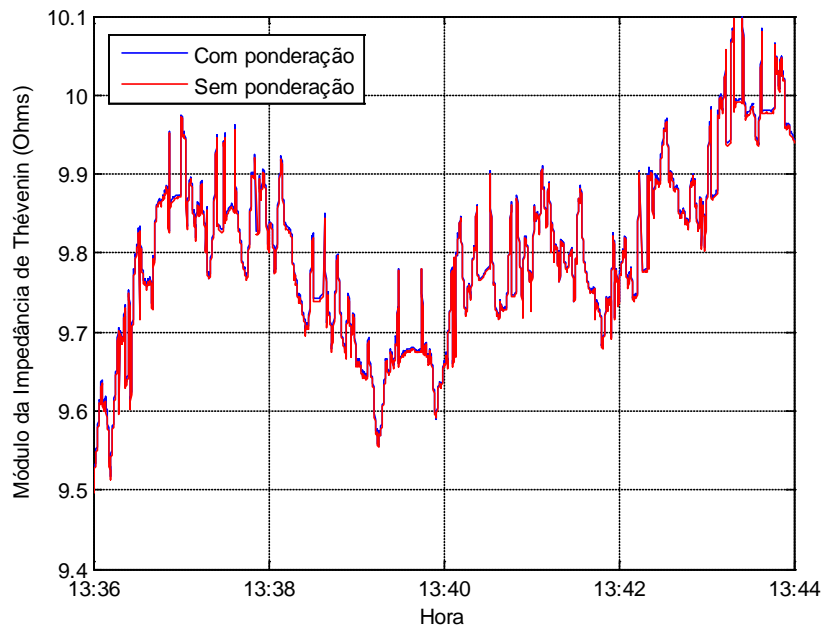


Figura 4.12 – Impedância de Thévenin com e sem ponderação

*Pela análise dos gráficos apresentados anteriormente, verifica-se que a alteração dos parâmetros do equivalente resultante do uso da ponderação é pouco significativa para dados de medição fasorial, tornando-se, portanto, dispensável na nova proposta da metodologia.*

Além da ponderação discutida acima, outro aspecto referente à equação (4.11) merece destaque. O parâmetro  $\bar{Z}_{THMQ\&P(t)}$  associado ao instante de tempo  $t$  é definido considerando uma média ponderada da solução do método dos Mínimos Quadrados do instante atual e das impedâncias calculadas anteriormente que compõem a janela de dados. Essa técnica foi usada a fim de caracterizar a tendência do comportamento do SEP, amortecendo as variáveis de saída do estimador. Normalmente, é necessária uma janela de dados de ordem elevada para tratar os ruídos das medições, o que torna o numerador da equação citada bastante representativo. Assim, a contribuição das medições de tensão e corrente referentes ao instante de tempo atual torna-se muito pequena para o cálculo desse parâmetro, resultando em uma resposta muito amortecida e tendenciosa.

*Tendo em vista essa questão e o fato de que a ponderação não possui aplicabilidade ao se utilizarem dados de SMFS, foi necessária a implementação de novas técnicas para determinação dos*

*parâmetros do equivalente em sua forma final. Tal implementação está descrita no tópico relativo à metodologia proposta (item 4.4.2).*

#### 4.3.4 Cálculo do Índice Previsor de Instabilidade – PIT

A última etapa da metodologia original corresponde ao cálculo do índice previsor de instabilidade de tensão, o PIT. Os valores assumidos por esse índice indicam ao operador do sistema a proximidade ao ponto limite de segurança de tensão da barra monitorada, definido pela Margem de Segurança de Tensão.

A determinação do índice é baseada na equivalência das impedâncias da carga e do sistema, que caracteriza o ponto de máximo carregamento. É importante frisar que, de acordo com a definição do equivalente, a impedância do sistema corresponde à impedância de Thévenin.

Na metodologia original, com base em (Silva 2010a), o índice PIT é definido de acordo com a razão entre os módulos das impedâncias do equivalente e da carga, no ponto de operação atual e no ponto em que se verifica risco à estabilidade de tensão.

No ponto de operação, a razão dos módulos das impedâncias de Thévenin e da carga define a razão de operação:

$$R_{op} = \frac{Z_{TH}}{Z_C} \quad (4.13)$$

O índice caracteriza a margem de estabilidade de tensão em relação ao limite de segurança definido de acordo com a MST. Portanto, torna-se necessário encontrar uma relação entre a impedância de Thévenin e a impedância característica desse ponto. Entretanto, esse último parâmetro não é obtido de forma trivial.

Para determinação da impedância característica do ponto limite de segurança, onde há risco de instabilidade de tensão, a equação que define a potência correspondente ao ponto de máximo carregamento é reescrita aqui:

$$P_{kmax} = \frac{E^2 \cos \theta_C}{2Z_L [1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]} \quad (4.14)$$

A potência no ponto que define o limite de segurança do sistema elétrico é dada por:

$$P_{lim} = \alpha P_{kmax} \quad (4.15)$$

onde  $\alpha = 100\% - MST$ .

A margem de segurança atualmente definida pelo ONS é de 4% (ONS 2012), conforme já citado.

De posse da potência no ponto limite de segurança, determina-se sua impedância característica. Para isso, devem ser adotadas duas premissas: (i) os parâmetros de Thévenin não sofrem alterações entre duas medições consecutivas; (ii) o fator de potência da carga também permanece inalterado. Essas considerações são bastante plausíveis, considerando dados obtidos de medição fasorial sincronizada.

Ao se adotarem tais premissas, obtém-se a equação que correlaciona  $P_{lim}$  com o módulo da impedância da carga nesse ponto limite,  $Z_{lim}$ :

$$Z_{lim}^2 P_{lim} + Z_{lim} [2Z_{TH} P_k \cos(\theta_{TH} - \theta_C) - E_{TH}^2 \cos \theta_C] + Z_{TH}^2 P_{lim} = 0 \quad (4.16)$$

onde,  $\theta_{TH}$  e  $\theta_C$  correspondem aos ângulos da impedância de Thévenin e da carga, respectivamente.

A equação acima retorna duas soluções, por se tratar de uma equação de 2º grau. Uma solução corresponde à região estável e outra à região instável da curva PV. Como ambas as soluções apresentam a mesma potência e a tensão referente à solução da região estável é maior, conclui-se que a raiz de maior módulo representa a região estável de operação.

Definida a impedância que caracteriza o ponto limite de segurança, pode-se determinar a razão limite de operação, com base nos valores de impedância.

$$R_{lim} = \frac{Z_{TH}}{Z_{lim}} \quad (4.17)$$

O índice proposto em (Silva 2010a) é dado pela relação entre as razões de operação e limite apresentadas anteriormente, de acordo com a equação:

$$PIT_Z = \left( \frac{R_{lim} - R_{op}}{R_{lim}} \right) \cdot 100 \quad (4.18)$$

O índice é dado em valor percentual, sendo que para situações de carga leve seu valor é elevado, próximo a 100%, já que nesse caso  $R_{op} \ll R_{lim}$ . Para situações de carregamento mais elevado, o índice apresenta valores menores, e tende a zero, à medida que o ponto de operação se aproxima do ponto limite de segurança. No instante em que esses pontos se igualam, o índice apresenta valor nulo. Quando o ponto de operação alcança a região insegura (acima da potência limite da MST), o índice apresenta valores negativos.

O índice apresentado anteriormente é baseado na relação das impedâncias que caracterizam os pontos de operação e limite do sistema. O trabalho (Silva 2010a) afirma que a vantagem em se considerar a relação de impedâncias está no fato de que no ponto de máxima transferência de potência esse valor é conhecido e fixo, apesar da potência associada a este ponto variar constantemente. Além disso, para as simulações realizadas no trabalho, utilizando programas que calculam fluxo de potência, verificou-se que os índices baseados em impedâncias favorecem a percepção sobre o risco da perda da estabilidade de tensão. Entretanto, na literatura existem índices previsores de instabilidade baseados na relação de potências.

O índice adotado em (Silva 2010a), bem como um índice baseado na relação das potências, não foram empregados utilizando dados de medições fasoriais sincronizadas, que é o foco desta dissertação. Desse modo, torna-se necessário avaliar o impacto em se considerar ambos os índices na determinação da proximidade da instabilidade de tensão.

A equação (4.19) apresenta a formulação para o índice predictor de instabilidade com base na relação de potências, proposto nesta dissertação. Tal índice relaciona a potência do ponto de operação ( $P_{op}$ ) e a potência referente ao ponto limite de segurança ( $P_{lim}$ ), já que caracteriza a proximidade a esse ponto.

$$PIT_P = \left( \frac{P_{lim} - P_{op}}{P_{lim}} \right) \cdot 100 \quad (4.19)$$

Analogamente ao índice baseado na relação de impedâncias, à medida que a potência do ponto de operação aproxima-se da potência do ponto limite de segurança, o valor do índice diminui. Quando os valores de potência se igualam, o índice atinge o valor zero. Caso a potência do ponto de operação seja superior à potência limite, o índice assume valores negativos, indicando que o sistema ultrapassou o limite de segurança da estabilidade de tensão, determinado pelo ONS.

A Figura 4.13 ilustra os valores dos índices previsores de instabilidade calculados com base nos valores de impedância e potência, utilizando os dados obtidos de SMFS. O índice baseado na relação de impedâncias apresenta valores superiores e uma menor sensibilidade em relação às variações de carga, comparado ao índice que considera os valores de potência. Apesar disso, verifica-se que as curvas correspondentes às duas formulações apresentam comportamentos semelhantes.

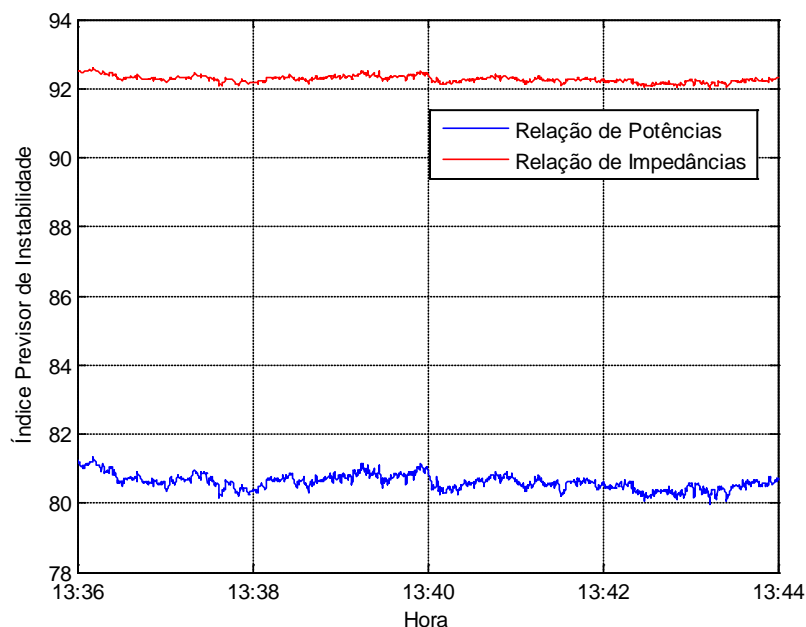


Figura 4.13 – Índices baseados nas relações de impedâncias ( $PIT_Z$ ) e potências ( $PIT_P$ )

O limite da margem de segurança proposta pelo ONS refere-se ao valor de potência. Em razão disso e pelos resultados satisfatórios apresentados anteriormente, pode-se afirmar que o índice previsor de instabilidade de tensão baseado nos valores das potências fornece uma análise mais direta acerca da estabilidade de tensão.

Entretanto, verifica-se que o uso da relação de impedâncias no cálculo do índice também produz resultados concisos e pode ser utilizada, sem qualquer restrição.

*Avaliando os resultados obtidos para o índice predictor de instabilidade PIT, verifica-se que ambas as formulações produzem resultados satisfatórios para determinação da proximidade do risco da instabilidade de tensão. Este trabalho emprega as duas formulações na determinação dos índices  $PIT_z$  e  $PIT_p$ .*

#### 4.4 Nova Metodologia Proposta

A análise dos passos que compõem a metodologia original, a partir do uso de medições fasoriais, permitiu verificar a necessidade de ajustes e complementações, visando à obtenção de resultados de forma mais adaptada ao ambiente de tempo real. Estes avanços aos procedimentos anteriores representam uma evolução significativa no uso de equivalentes de redes para a avaliação da estabilidade de tensão.

O fluxograma ilustrado na Figura 4.14 indica os passos da nova metodologia proposta. Tais passos contemplam as alterações necessárias e destacadas anteriormente, tendo em vista a utilização de dados de SMFS.

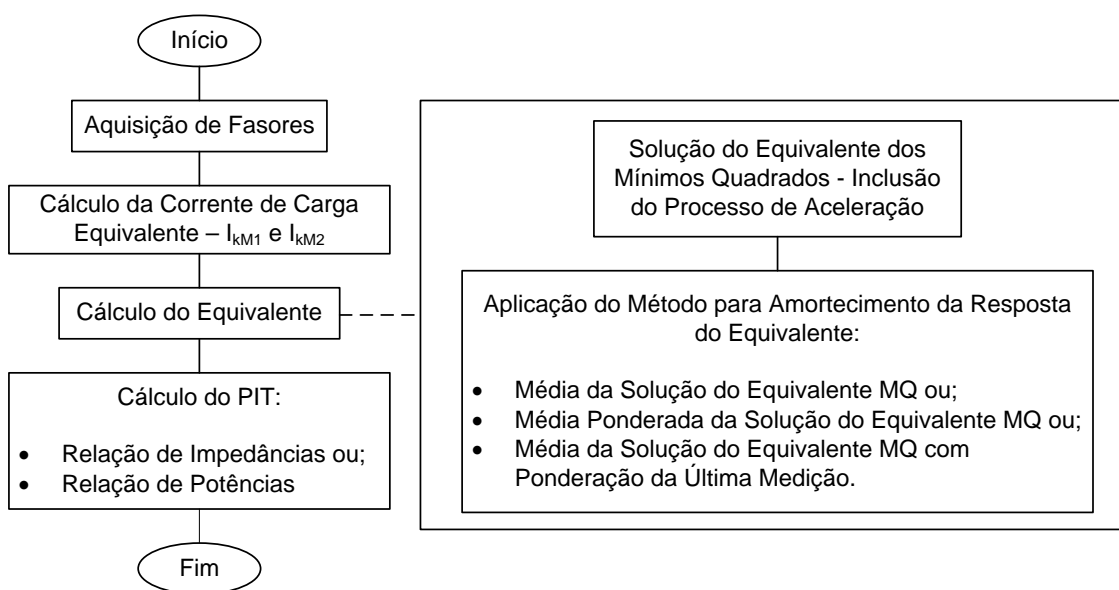


Figura 4.14 – Fluxograma da nova metodologia proposta

Os passos *Aquisição de Fasores*, *Cálculo da Corrente de Carga Equivalente* –  $I_{KM1}$  e  $I_{KM2}$  e *Cálculo do PIT*, correspondem, basicamente, àqueles da metodologia original. As considerações relevantes a respeito destes foram apresentadas no item 4.3.

A inclusão do processo de aceleração e as técnicas de amortecimento constituem as alterações mais significativas, realizadas na metodologia original, decorrentes da sua implementação prática utilizando dados do SMFS. A descrição e avaliação dessas alterações são descritas a seguir.

#### **4.4.1 Solução do Equivalente dos Mínimos Quadrados – Inclusão do Processo de Aceleração**

Neste passo os parâmetros do equivalente de Thévenin são calculados com base na técnica proposta em (Vu 1999a) e na aplicação do estimador dos Mínimos Quadrados.

Conforme já verificado, o tamanho da janela de dados utilizada na determinação do equivalente influencia diretamente no tempo de estabilização e na variação da resposta. Ao se considerar um tamanho menor da janela, a resposta do equivalente tende a convergir rapidamente para o valor esperado, entretanto, apresenta variações muito acentuadas. Tais variações são reduzidas com o aumento do tamanho da janela de dados. Diante disso, surge a ideia da inclusão do *processo de aceleração*.

A ideia consiste em se considerar uma janela de dados de tamanho menor nos instantes iniciais do cálculo do equivalente, e posteriormente, aumentar seu tamanho. Dessa maneira, a resposta do equivalente converge rapidamente para o valor estável e a partir daí sofre o amortecimento, devido ao aumento do conjunto de dados utilizados na determinação do equivalente.

A Figura 4.15 ilustra o módulo da impedância de Thévenin determinada empregando-se o conceito do processo de aceleração. Conforme se pode observar, a resposta do sistema converge rapidamente para o valor estável. Após a fase de estabilização, tem-se o amortecimento da resposta do sistema, de forma a representar de maneira mais exata o comportamento esperado das grandezas elétricas.

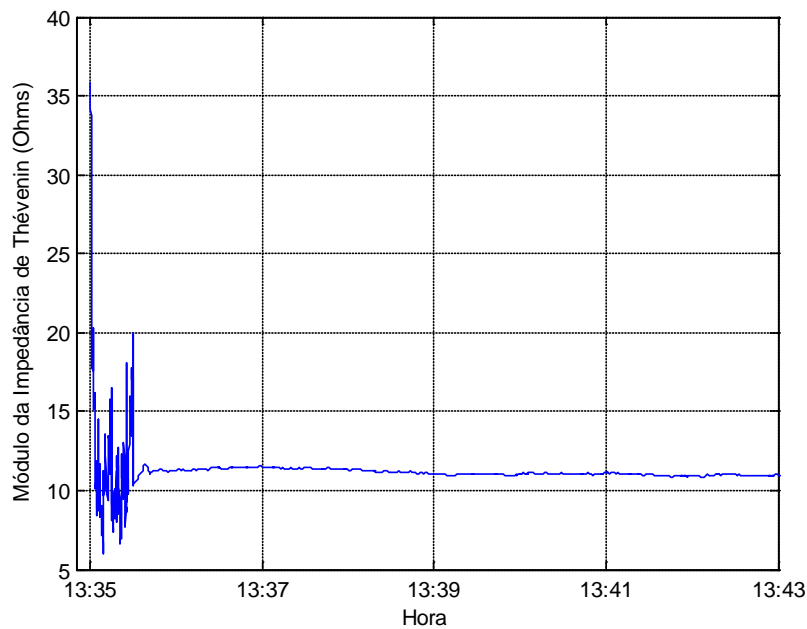


Figura 4.15 – Período de estabilização com aplicação do processo de aceleração

#### 4.4.2 Aplicação do Método para Amortecimento da Resposta do Equivalente

Quando em operação normal, as grandezas dos SEPs não apresentam grandes variações em um curto intervalo de tempo. Os parâmetros obtidos da solução direta do método dos Mínimos Quadrados não representam de forma fiel o desempenho esperado dos sistemas elétricos, já que são caracterizados por apresentarem um comportamento relativamente “nervoso”. Assim, com o objetivo de aproximar tais parâmetros ao ambiente real de SEPs, algumas técnicas são sugeridas como um passo posterior à solução do método dos Mínimos Quadrados.

Os métodos propostos são apresentados a seguir e, basicamente, referem-se a uma equação para cálculo da impedância de Thévenin para cada instante de tempo. A tensão de Thévenin é calculada com base no valor da impedância, de acordo com a equação:

$$\dot{E}_{TH}(t) = \dot{I}_C(t)(\bar{Z}_{TH}(t) + \bar{Z}_C(t)) \quad (4.20)$$



### a) Média da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados

O primeiro método proposto consiste na obtenção de uma média das impedâncias obtidas da solução direta do estimador dos Mínimos Quadrados e que compõem a janela de dados. Na determinação da média, considera-se o parâmetro calculado para a medição atual, e os correspondentes às medições de tempo anteriores. O número de parâmetros considerados na média equivale ao número de medições utilizadas na solução do equivalente, ou seja, refere-se ao tamanho da janela de dados.

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

$$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{\sum_{n=0}^{j-1} \bar{Z}_{THMQ}(t-n)}{j} \quad (4.21)$$

onde,  $t$  corresponde ao instante de tempo atual,  $j$  ao tamanho da janela de dados,  $n$  ao índice de deslocamento na janela e  $\bar{Z}_{THMQ}$  à impedância calculada pelo estimador dos Mínimos Quadrados.

### b) Média Ponderada da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados

Para o tratamento do erro do tipo ruído nas medições, considera-se um número maior destas na solução do equivalente. O sistema que caracteriza o estimador dos Mínimos Quadrados é solucionado para cada nova medição, considerando um determinado número de medições anteriores. Na formulação original do método dos Mínimos Quadrados, cada grandeza que compõe a janela de dados exerce a mesma influência na resposta do equivalente. Para que essa resposta represente de maneira mais exata o comportamento do sistema, as medições mais recentes devem exercer maior influência em relação às medições mais antigas, no cálculo dos parâmetros de Thévenin. Para caracterizar tal situação, propõe-se que a impedância do equivalente referente à iteração atual seja calculada com base na solução do método dos Mínimos Quadrados referente ao instante atual e uma média ponderada das impedâncias calculadas anteriormente, que compõem a janela de dados. A ponderação deve ser feita de modo que os parâmetros correspondentes aos instantes mais recentes tenham maior peso. Neste caso, a impedância de Thévenin deve ser calculada da seguinte maneira:

$$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{p(t)\bar{Z}_{THMQ}(t) + \sum_{n=1}^{j-1} p(t-n)\bar{Z}_{TH}(t-n)}{\sum_{n=0}^{j-1} p(t-n)} \quad (4.22)$$

onde,  $t$  corresponde ao instante de tempo atual,  $j$  ao tamanho da janela de dados,  $n$  ao índice de deslocamento na janela,  $\bar{Z}_{THMQ}$  à impedância calculada pelo estimador dos Mínimos Quadrados e  $p$  ao fator de ponderação.

Neste trabalho são avaliadas duas ponderações para os parâmetros que compõem a janela de dados: linear e exponencial. Os fatores de ponderação linear e exponencial são calculados de acordo com as equações (4.23) e (4.24), respectivamente. Em ambos os casos, considera-se um fator máximo de ponderação ( $f_{max}$ ) que caracteriza o parâmetro referente ao instante de tempo atual.

$$p_{lin}(t-n) = f_{max} - (n) \frac{f_{max}}{j} \quad (4.23)$$

$$p_{exp}(t-n) = e^{\left(f_{max} - (n) \frac{f_{max}}{j}\right)} - 1 \quad (4.24)$$

Nas equações acima,  $n$  varia de 0 até  $j - 1$ .

### c) Média do Estimador dos Mínimos Quadrados com Ponderação da Medição Atual

O último método proposto também tem como objetivo enfatizar os valores estimados pelo método dos Mínimos Quadrados referentes ao instante de tempo atual. Consiste, basicamente, em se calcular a média dos parâmetros obtidos nos instantes de tempo anteriores que compõem a janela de dados e adicionar a esse valor a parcela referente à solução do método dos Mínimos Quadrados para a iteração atual. Tal parcela é calculada pela diferença entre a solução dos Mínimos Quadrados e a média de parâmetros já calculados, dividida por um fator de ponderação. Quanto menor esse fator, maior a influência das medições referentes ao instante de tempo atual.

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

$$\bar{Z}_{TH}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{TH}(t-n)}{j-1} + \frac{\bar{Z}_{THMQ}(t) - \frac{\sum_{n=1}^{j-1} \bar{Z}_{TH}(t-n)}{j-1}}{f} \quad (4.25)$$

onde,  $t$  corresponde ao instante de tempo atual,  $j$  ao tamanho da janela de dados,  $n$  ao índice de deslocamento na janela,  $\bar{Z}_{THMQ}$  à impedância calculada pelo estimador dos Mínimos Quadrados e  $f$  ao fator de ponderação.

As técnicas propostas neste trabalho são baseadas em manipulações dos parâmetros que compõem a janela de dados, obtidos pelo estimador dos Mínimos Quadrados. O objetivo do emprego dessas técnicas é aproximar o equivalente final gerado ao comportamento esperado do sistema elétrico. A Figura 4.16 apresenta um diagrama esquemático que ilustra tais manipulações, para o melhor entendimento das técnicas.

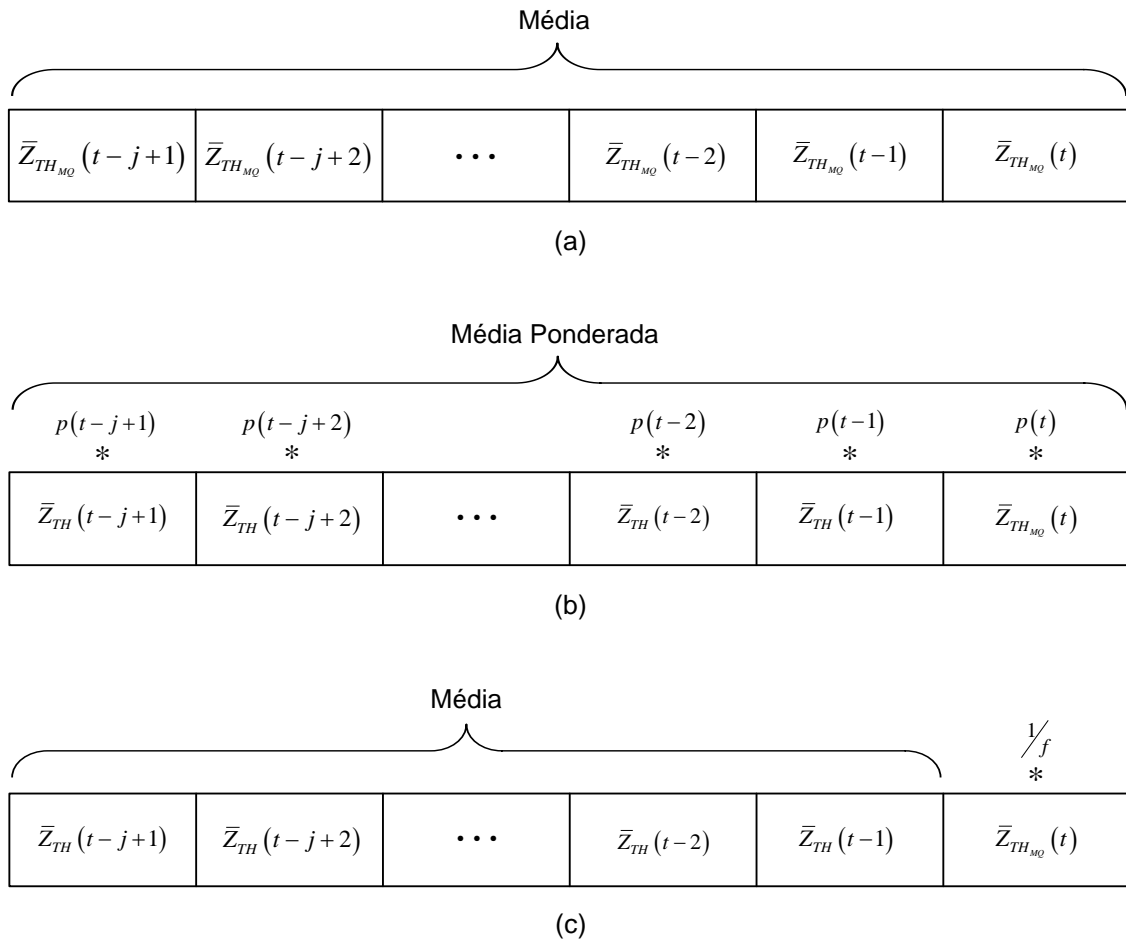


Figura 4.16 – Diagrama esquemático das técnicas de amortecimento: Média da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados (a), Média Ponderada da Solução do Estimador dos Mínimos Quadrados (b) e Média do Estimador dos Mínimos Quadrados com Ponderação da Última Medição (c)

No Capítulo 5, as técnicas propostas anteriormente são empregadas e avaliadas, tendo em vista a utilização de dados de SMFS.

#### **4.5 Considerações Finais**

Neste capítulo é apresentada uma análise crítica da metodologia original, que faz parte de uma série de pesquisas realizadas no LRC/UFMG. Cada etapa que compõe a metodologia foi avaliada considerando a aplicação de dados de medição fasorial de tensão e corrente, gerando algumas ressalvas em relação à mesma.

Ao se considerar esse tipo de medição, verificou-se a necessidade de modificações em alguns pontos da metodologia original, a fim de obter respostas que representem melhor a condição de operação em que o sistema se encontra. É importante destacar que as alterações são consequentes das características peculiares das medições fasoriais sincronizadas. Observa-se que a metodologia original apresenta resultados bastante satisfatórios, considerando dados de medição obtidos de centro de operação, e representam um importante avanço na análise de estabilidade de tensão em tempo real.

Dentre os avanços mais significativos da nova metodologia proposta, destacam-se o processo de aceleração e as metodologias inovadoras para o amortecimento da resposta do equivalente, considerando manipulações dos parâmetros que compõem a janela de dados.

## 5

# APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

### 5.1 Considerações Iniciais

O objetivo principal deste capítulo é aplicar os métodos desenvolvidos ao longo deste trabalho de pesquisa, projetados para melhorar a estimação dos parâmetros do equivalente de Thévenin na avaliação da estabilidade de tensão de sistemas elétricos em tempo real, utilizando dados provenientes de SMFS.

Primeiramente, a metodologia é aplicada considerando medições fasoriais reais referentes a uma subestação da rede básica da CEMIG. Tal barramento é caracterizado por apresentar uma carga bem comportada, sem grandes variações. Portanto, os dados utilizados nas simulações correspondem a condições normais de operação do sistema.

Para avaliar o comportamento do índice predictor de instabilidade próximo à região do máximo carregamento, a metodologia é aplicada, em um segundo momento, considerando dados de tensão e corrente obtidos da solução do fluxo de potência de um sistema de 30 barras do IEEE (UW 2013).

### 5.2 Aplicação da Metodologia Utilizando Dados de SMFS

Os dados de medição fasorial sincronizada utilizados para apresentação dos resultados correspondem a uma subestação da rede básica do SIN brasileiro, sob responsabilidade da CEMIG. O barramento é denominado Taquaril e possui tensão nominal de 345 kV. Um diagrama esquemático desse barramento é ilustrado na Figura 5.1. Observa-se que há nove ramos que incidem no barramento, sendo quatro referentes a linhas de transmissão e cinco correspondentes a transformadores de potência.

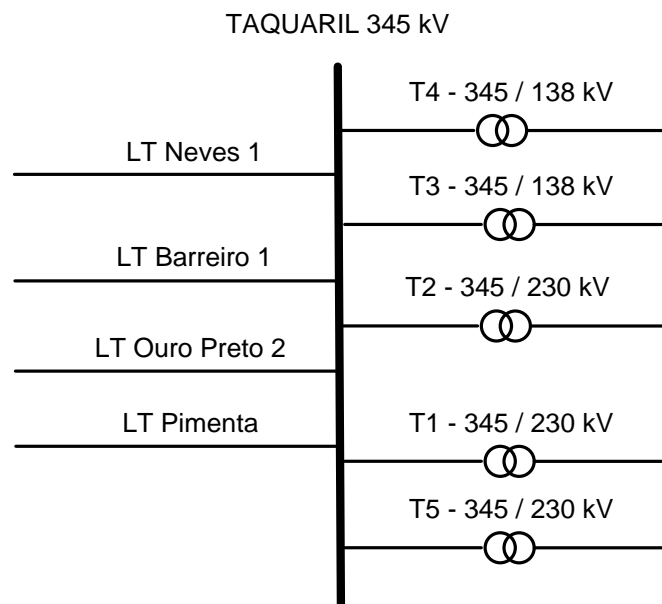


Figura 5.1 – Diagrama esquemático do barramento de Taquaril

Para o barramento Taquaril, há nove medições de corrente, uma associada a cada ramo, e a carga não é definida. Portanto, verifica-se a aplicabilidade das metodologias 1 ou 2 propostas em (Ribeiro 2011) para determinação de uma corrente de carga equivalente.

A taxa de amostragem das grandezas de tensão e corrente do barramento é de 10 medições por segundo. Os dados utilizados correspondem ao período de 1 hora de medição, de 9h às 10h. Entretanto, considerou-se um intervalo de tempo menor na apresentação dos resultados, a fim de proporcionar uma melhor visualização do comportamento dos parâmetros obtidos.

Para se avaliar a metodologia proposta, optou-se por ilustrar o módulo da impedância de Thévenin,  $Z_{TH}$ , e o índice predictor de instabilidade, PIT. A análise do primeiro parâmetro permite avaliar as técnicas para o amortecimento da saída do estimador dos Mínimos Quadrados. Já o índice predictor de instabilidade, corresponde ao produto final da metodologia, e é avaliado nas duas formas de cálculo sugeridas, baseadas nas relações de impedâncias e potências.

A Figura 5.2 ilustra as curvas das impedâncias de Thévenin referentes à solução direta do estimador dos Mínimos Quadrados e ajustada de acordo com o primeiro método de amortecimento proposto no item 4.4.2 deste trabalho, que considera uma **média da**

**solução direta do método dos Mínimos Quadrados.** Para solução do equivalente final, foi considerada uma janela de dados de tamanho igual a 120. Esse valor é utilizado na obtenção da maioria dos resultados apresentados neste capítulo. Entretanto, o tamanho da janela de dados é um parâmetro que deve ser ajustado de acordo com as características das medições do sistema em análise, conforme já ressaltado.

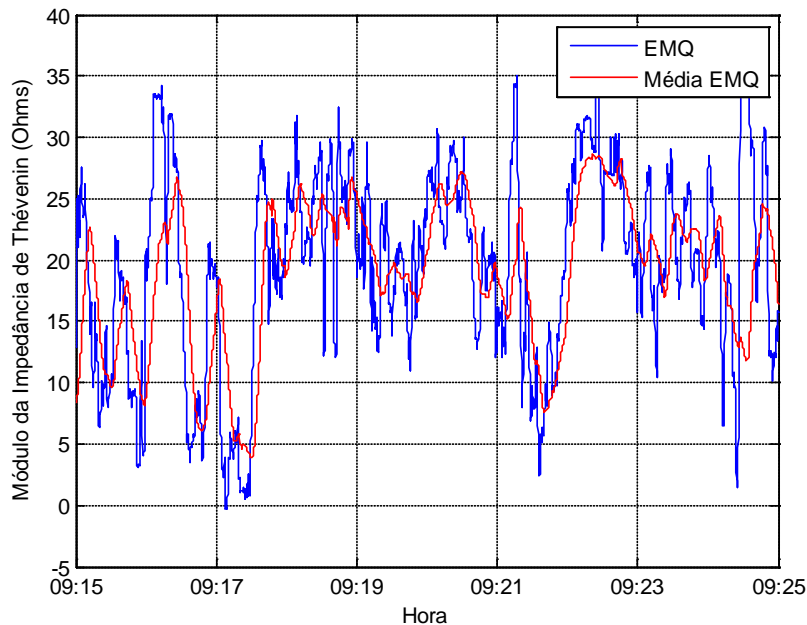


Figura 5.2 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média EMQ

Pela análise da Figura 5.2, verifica-se que o parâmetro obtido da solução direta do estimador de Mínimos Quadrados apresenta uma variação acentuada, situando-se na faixa de 0 a 35  $\Omega$  em um período de 10 minutos. Já a resposta referente ao método proposto tem um comportamento mais amortecido, variando de 5 a 30  $\Omega$ , aproximadamente. Ainda assim, para este curto intervalo de tempo, o parâmetro de Thévenin, em sua forma final, apresenta uma variação significativa que pode não corresponder fielmente ao comportamento esperado do sistema elétrico. Os dados de medição utilizados nas análises referem-se a condições normais de operação. Nessas circunstâncias, o sistema elétrico não apresenta grande variação entre medições consecutivas.

A Figura 5.3 ilustra os índices previsores de instabilidade calculados com base nas relações de impedâncias e potências. Observa-se que o comportamento dos índices é

semelhante em ambos os casos, diferindo-se especialmente em relação à magnitude dos valores e à taxa de variação.

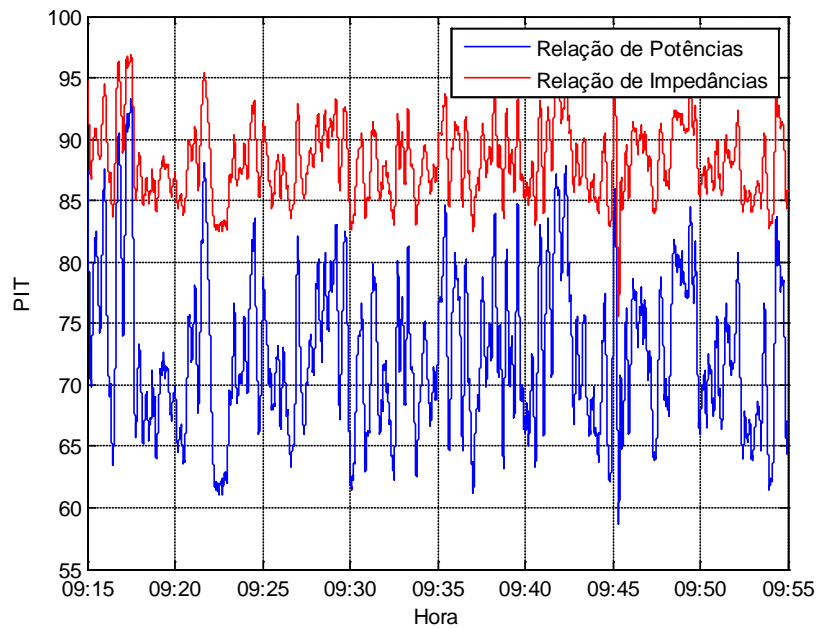


Figura 5.3 – Propostas dos índices PIT – Média EMQ

A Figura 5.4 apresenta as curvas dos módulos das impedâncias de Thévenin referentes à solução direta do método dos Mínimos Quadrados e ajustada de acordo com o segundo método de amortecimento proposto no item 4.4.2, que caracteriza uma **média ponderada da solução direta do estimador dos Mínimos Quadrados**. Os resultados são referentes à ponderação linear, com  $f_{max} = 5$ . Observa-se que a aplicação da técnica de amortecimento resulta na redução da variação do parâmetro  $Z_{TH}$  para uma faixa de 12 a 20  $\Omega$ , aproximadamente.



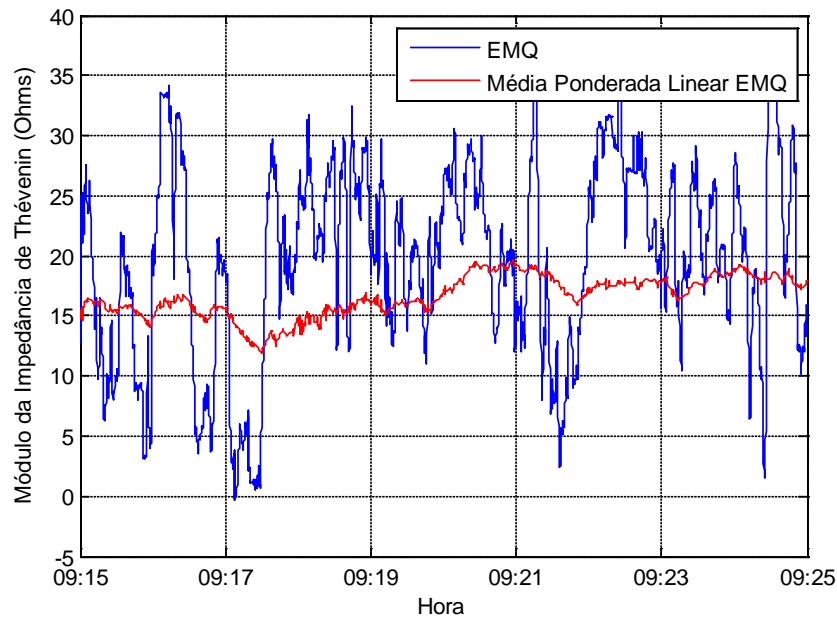


Figura 5.4 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média Ponderada Linear EMQ

Já os resultados associados à ponderação exponencial são apresentados na Figura 5.5, em que se considerou  $f_{max} = 3$ . Nota-se que o parâmetro  $Z_{TH}$  varia em uma faixa de 13 a 21  $\Omega$ , aproximadamente. Vale ressaltar que em ambos os casos, ponderações linear e exponencial, considerou-se o tamanho da janela de dados igual a 60. Este valor e os fatores máximos de ponderação ( $f_{max}$ ) foram escolhidos com base em uma análise de sensibilidade.

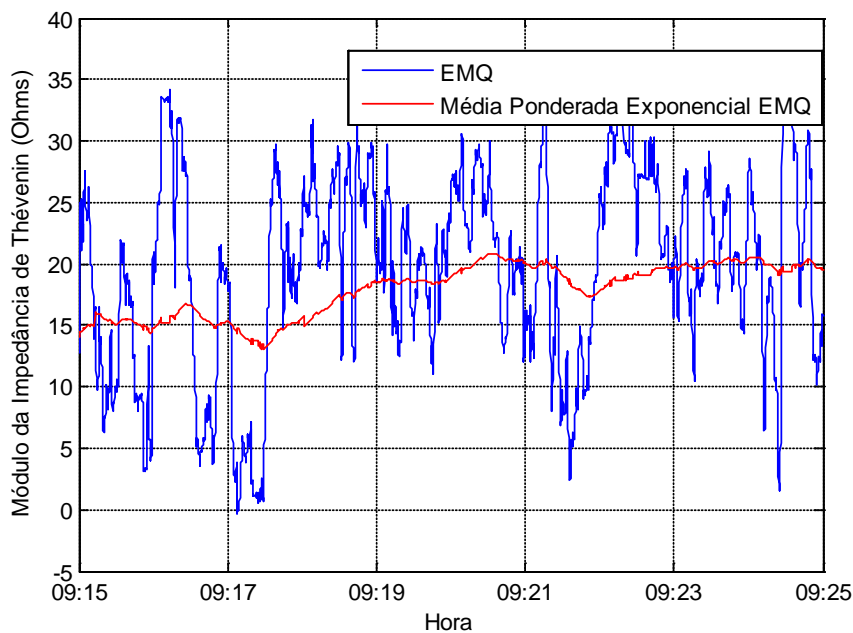


Figura 5.5 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média Ponderada Exponencial EMQ

Pela análise dos gráficos ilustrados na Figura 5.4 e Figura 5.5, verifica-se que o uso da média ponderada para cálculo do parâmetro  $\bar{Z}_{TH}$  provoca um amortecimento na resposta do equivalente. As ponderações linear e exponencial apresentam desempenhos satisfatórios, sendo a primeira um pouco mais sensível às variações de carga. Em ambos os casos, a resposta amortecida acompanha o comportamento do parâmetro inicial obtido pela solução direta do método dos Mínimos Quadrados.

A Figura 5.6 ilustra os índices previsores de instabilidade calculados com base nas relações de impedâncias e potências, considerando o método da média ponderada exponencial para determinação do equivalente final.

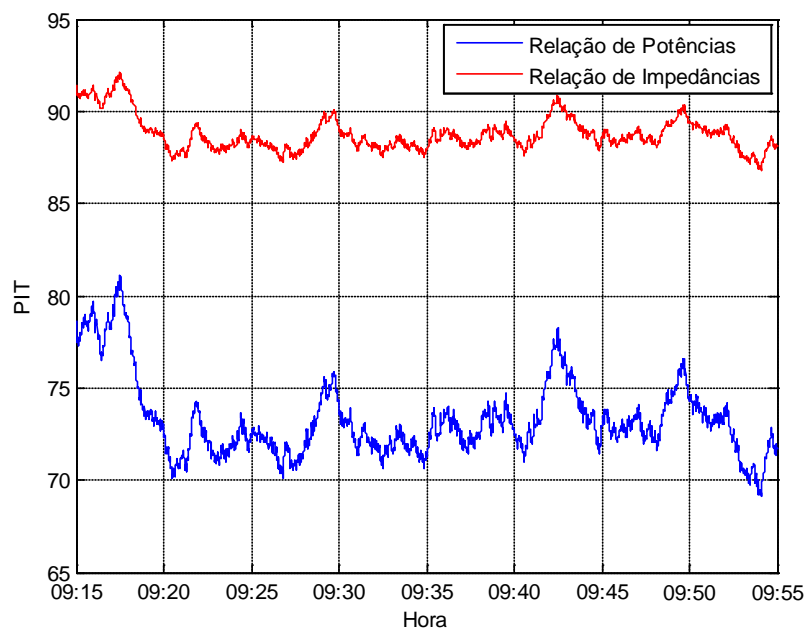


Figura 5.6 – Propostas do índice PIT – Média Ponderada Exponencial EMQ

A Figura 5.7 ilustra as curvas das impedâncias de Thévenin referentes à solução direta do método dos Mínimos Quadrados e ajustada de acordo com o terceiro método de amortecimento proposto, descrito no item 4.4.2 deste trabalho, que considera uma **ponderação para as grandezas referentes ao instante atual**. Para as análises apresentadas a seguir foram considerados três fatores de ponderação (2, 6 e 10) e uma janela de dados de tamanho igual a 120.

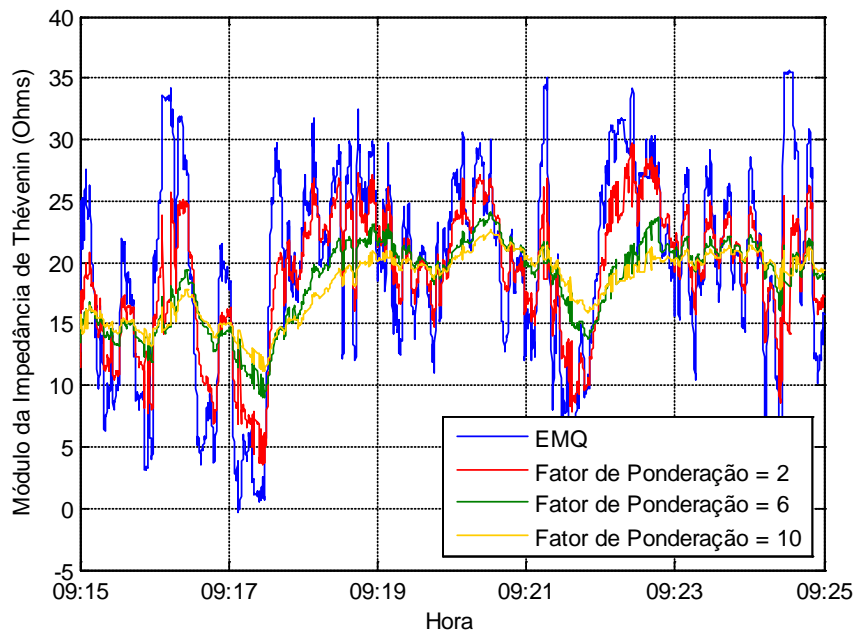


Figura 5.7 – Módulo da impedância de Thévenin – EMQ e Média EMQ com Ponderação da Última Medição

Pela análise da Figura 5.7, verifica-se que, ao se considerar o fator de ponderação igual a 2, a resposta do sistema apresenta uma oscilação relevante, embora menos significativa que a correspondente à solução direta do equivalente dos Mínimos Quadrados. Ao aumentar o fator de ponderação para 6, observa-se um amortecimento mais acentuado na curva correspondente ao parâmetro  $Z_{TH}$ . Para o fator de ponderação igual a 10, nota-se que a resposta do sistema torna-se bastante amortecida. Neste caso, o parâmetro  $Z_{TH}$  varia em uma faixa de 11 a 23  $\Omega$ , aproximadamente. Tais análises permitem concluir que valores mais elevados do fator de ponderação resultam em um amortecimento mais acentuado da resposta do equivalente.

É importante destacar que, para todos os fatores de ponderação considerados, as curvas que representam o parâmetro  $Z_{TH}$  acompanham o comportamento do equivalente inicial obtido da solução direta do método dos Mínimos Quadrados. Verifica-se apenas um amortecimento na resposta do sistema.

A Figura 5.8 ilustra os índices previsores de instabilidade calculados com base nas relações de impedâncias e potências, considerando um fator de ponderação igual a 10 para a última medição na determinação dos parâmetros do equivalente.

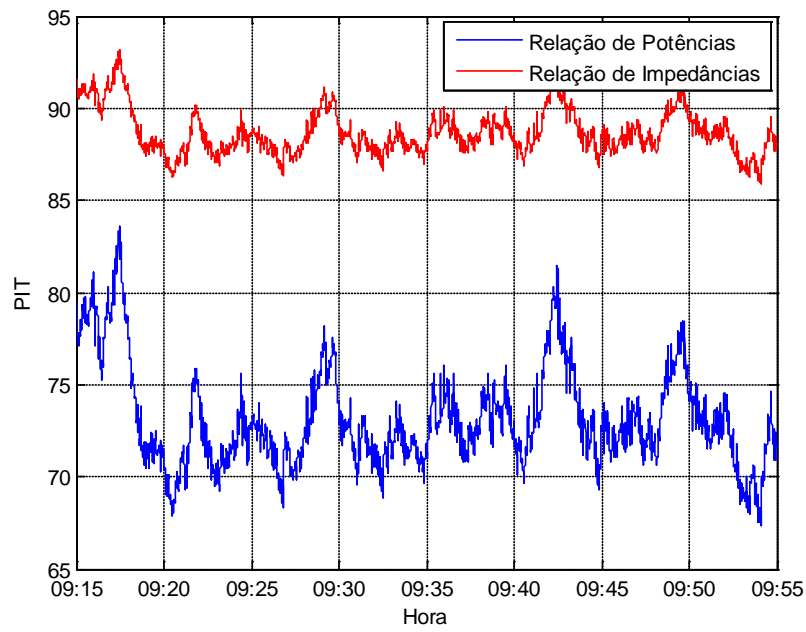


Figura 5.8 – Propostas do índice PIT – Média EMQ com Ponderação da Última Medição

Para melhor visualização da aplicação das três técnicas de amortecimento propostas, a Figura 5.9 mostra o índice  $PIT_p$  obtido de suas aplicações.

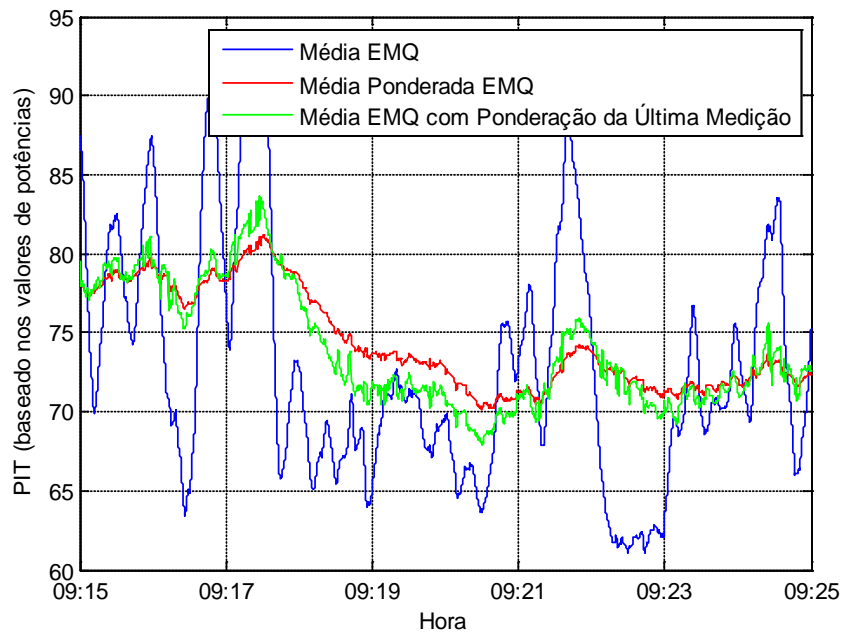


Figura 5.9 – Índice  $PIT_p$  correspondente às técnicas de amortecimento

O índice PIT não pode apresentar uma variação significativa em um intervalo de tempo muito reduzido, visto que as grandezas do sistema elétrico são controladas e a carga não apresenta uma variação acentuada nessas condições.

Pela análise dos resultados apresentados anteriormente, em que se empregam as técnicas de amortecimento da resposta do equivalente, verifica-se que todas as propostas produzem resultados consistentes. Entretanto, as duas últimas técnicas implementadas apresentam uma característica de amortecimento mais acentuada e representam de maneira mais fiel o comportamento esperado dos SEPs. A decisão de qual técnica utilizar na determinação do índice predictor de instabilidade depende, principalmente, da dinâmica do sistema elétrico a ser avaliado.

Com relação ao índice predictor de instabilidade, em todos os casos analisados, o índice  $PIT_p$  apresenta menores magnitudes e maior sensibilidade à variação da carga, comparado ao índice  $PIT_z$ . Entretanto, ambas as formulações produzem resultados consistentes no que diz respeito à avaliação da perda de estabilidade de tensão.

### **5.3 Aplicação da Metodologia Utilizando Dados da Solução do Fluxo de Potência**

Os dados de SMFS de Taquaril são referentes a períodos de condições normais de operação, onde o sistema encontra-se bastante seguro em relação à instabilidade de tensão. Para avaliar o comportamento dos índices próximos à região de instabilidade, foram realizadas algumas simulações através de programas de cálculo de fluxo de potência, considerando o sistema IEEE 30 barras.

A Figura 5.10 ilustra a topologia do sistema IEEE 30 barras (UW 2013) utilizado nas simulações. Esse sistema foi escolhido por se tratar de uma referência em vários artigos e publicações de caráter nacional e internacional.



se igualam pelo fato de que, na solução do fluxo de potência, o ponto exato de máximo carregamento não é encontrado, já que próximo a esse ponto a matriz jacobiana torna-se mal condicionada e o sistema de Newton-Raphson deixa de convergir.

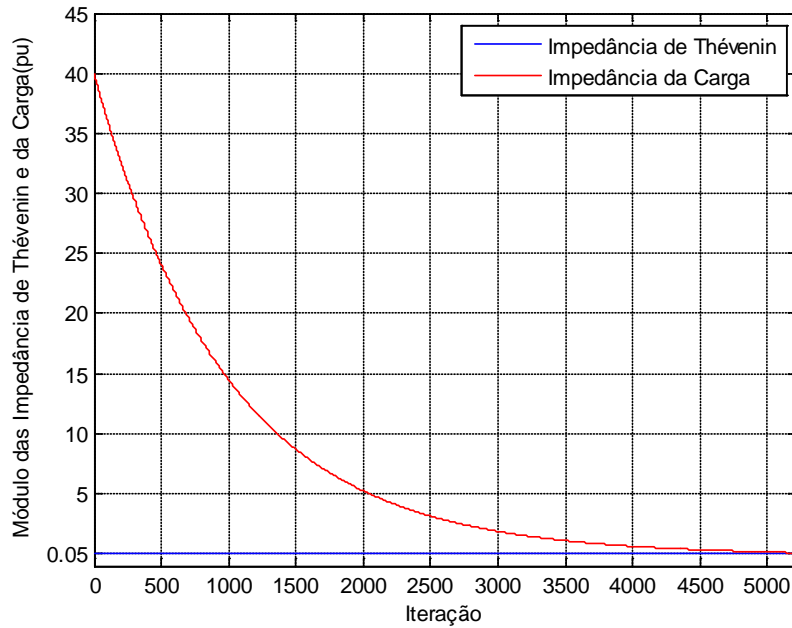


Figura 5.11 – Impedâncias de Thévenin e da carga

A Figura 5.12 ilustra os índices previsores de instabilidade de tensão baseados em valores de impedância e potência. O método de amortecimento considerado para determinação dos parâmetros do equivalente em sua forma final corresponde ao da ponderação da última medição, apresentado no item 4.4.2.

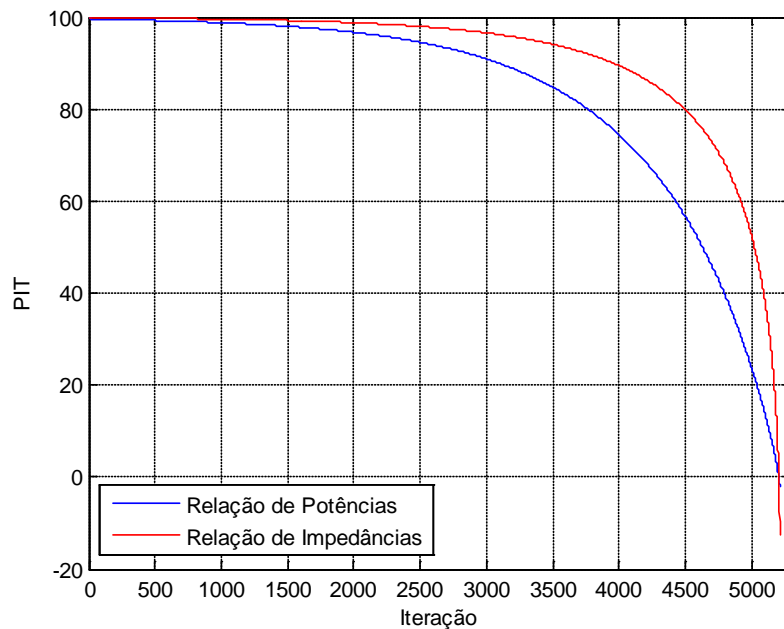


Figura 5.12 – Propostas do índice PIT – Simulações de fluxo de potência

Pela análise do gráfico da Figura 5.12 observa-se que em ambos os casos os índices reduzem seus valores à medida que a carga é aumentada. Verifica-se ainda que o índice baseado no valor da impedância apresenta valores mais elevados e uma variação mais brusca próximo ao ponto de máximo carregamento. Nesse caso, o uso do índice baseado na relação das potências mostra-se mais adequado para análise da estabilidade de tensão.

Embora as simulações tenham sido feitas considerando dados obtidos da solução do fluxo de potência, os resultados mostram que a metodologia apresentada neste trabalho apresenta resultados consistentes, indicando o risco da instabilidade de tensão.

#### 5.4 Considerações Finais

Neste capítulo, a metodologia proposta é aplicada e verifica-se a consistência dos resultados obtidos. Tal metodologia engloba as técnicas propostas no Capítulo 4, que mostraram-se bastante pertinentes, considerando a utilização de dados de medição fasorial sincronizada.



A etapa mais importante na avaliação da estabilidade de tensão em tempo real é a determinação do equivalente. O comportamento dos parâmetros deste equivalente influencia diretamente no desempenho do índice previsor de instabilidade. Portanto, estes devem caracterizar, da forma mais exata possível, as condições de operação do sistema elétrico. Nesse contexto, se enquadram as técnicas propostas neste trabalho.

Pela avaliação dos resultados, verificou-se que os métodos propostos para amortecimento dos parâmetros do equivalente apresentaram resultados consistentes, embora duas técnicas tenham se destacado. Em relação ao índice previsor de instabilidade, observou-se que as formulações baseadas em valores de impedâncias e potências apresentam resultados condizentes e há equivalência no desempenho de ambas. Assim, sugere-se que a definição das técnicas (de amortecimento e formulações do PIT) a serem utilizadas fique a critério do operador do sistema, de acordo com seu conhecimento acerca das características e dinâmica do sistema analisado.

## 6

### CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A instabilidade de tensão é um dos principais fenômenos responsáveis por desligamentos nos SEPs, o que acarreta danos e prejuízos às empresas fornecedoras de energia elétrica e aos consumidores. O aumento da demanda de carga, muitas vezes não acompanhado por correspondente expansão da capacidade de geração e transmissão de energia elétrica, conduz o sistema a operar cada vez mais próximo a seus limites de operação, em relação à estabilidade de tensão. Portanto, o monitoramento dos SEPs é essencial para garantir a segurança da operação e controle da estabilidade de tensão.

Neste contexto, esta dissertação propõe uma metodologia para avaliação da estabilidade de tensão na operação em tempo real. Tal metodologia é baseada no uso de medições de SMFS para determinação do equivalente de rede, a partir do qual é calculado o índice predictor de instabilidade de tensão.

O principal desafio do trabalho foi a identificação do equivalente em tempo real, por meio de medições de tensão e corrente obtidas de SMFS. As características desse tipo de medição devem ser tratadas a fim de se obter um equivalente que represente de forma consistente o comportamento esperado do sistema elétrico. Dentre essas características destacam-se a alta taxa de amostragem das medidas e o erro do tipo ruído presente nas medições. Além disso, o comportamento dinâmico dos SEPs se reflete nos valores das grandezas medidas.

A metodologia proposta permite o cálculo da proximidade do risco de instabilidade de tensão, de forma rápida e dinâmica, respeitando fatores essenciais no monitoramento de sistemas elétricos em tempo real. A aplicação da metodologia, considerando dados reais de medição, permitiu atestar sua consistência e aplicabilidade ao setor elétrico. Além disso, simulações de condições críticas dos SEPs conduziram o índice a valores que anunciam a iminência da instabilidade de tensão, garantindo a consistência do método proposto em situações de risco.

A aplicação da nova metodologia permite verificar que a taxa de amostragem das medições de tensão e corrente influenciam diretamente no comportamento do equivalente. Como uma proposta de continuidade deste trabalho, sugere-se a verificação da correlação existente entre esses parâmetros.

Como proposta de trabalho futuro, sugere-se, também, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que implemente a metodologia apresentada neste trabalho. Tal ferramenta viabilizaria a continuidade e aprofundamento de pesquisas na área.

Por fim, espera-se que esta dissertação possa contribuir para a operação de sistemas elétricos, de modo que o monitoramento contínuo da estabilidade de tensão dos SEPs possibilite a realização de ações preventivas, evitando situações de risco e garantindo a segurança do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (Aguirre 2007) L.A. Aguirre, *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, Editora UFMG, 2007.
- (Andrade 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, Junho de 2008.
- (Andrade 2013) S.R.C. Andrade, C.A.B. Costa, M.H.M. Vale, F.S. Chaves, M.M.S. Andrade, A.O.R. Vilela, *Potencialização de Ativos Existentes na Cemig para Automação, Controle e Proteção do Sistema Elétrico*, X SIMPASE, Belo Horizonte, Agosto de 2013.
- (Cemig 2010) CEMIG, LRC, CONCERT, *Desenvolvimento de Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada*, Projeto P&D GT 354 – CEMIG ANEEL, 2010.
- (Condega 2013) S.Y.C. Condega, *Metodologia para Determinação da Margem da Estabilidade de Tensão sob a Perspectiva da Expansão e da Operação de Sistemas de Potência*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Julho de 2013.
- (Corsi 2007) S. Corsi, G.N. Taranto, *Avaliação do Risco de Colapso de Tensão em Tempo Real Baseada em Medição Fasorial*, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, Outubro de 2007.
- (Corsi 2008a) S. Corsi, G.N. Taranto, *A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements*. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1271-1279, Agosto de 2008.
- (Corsi 2008b) S. Corsi, G.N. Taranto, L.N.A. Guerra, *New Real-Time Voltage Stability Indicators Based On Phasor Measurement Unit Data*, Cigré, Paris, 2008.
- (Corsi 2012) S. Corsi, G.N. Taranto, *Voltage Instability Alarm By Real-Time Predictive Indicators*, IEEE, 2012.
- (Cortez 2001) A.N. Cortez, *Proposta de Critério e Procedimentos para*

- Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Fevereiro de 2001.
- (Gong 2006) Y. Gong, N. Schulz, A. Guzmán, *Synchrophasor-Based Real-Time Voltage Stability Index*, IEEE, pp. 1029-1036, 2006.
- (Han 2010) S. Han, B. Lee, S. Kim, Y. Moon, B. Chang, J. Shin, *Voltage Stability Monitoring Using PMU Data in KEPCO System*, IEEE, 2010.
- (Haque 2003) M.H. Haque, *On-line Monitoring of Maximum Permissible Loading of a Power System Within Voltage Stability Limits*, IEE Proceedings, vol 150, no. 1, pp. 107-112, Janeiro de 2003.
- (IEEE 1990) IEEE Working Group on Voltage Stability, *Voltage Stability of Power Systems Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience*, IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR, Piscataway, New Jersey, 1990.
- (IEEE 2006) IEEE Power Engineering Society, *IEEE Standard for Synchrophasors for Power System*, C37.118, Março de 2006.
- (IEEE 2008) IEEE Working Group, *PMUs are the System of Choice*, IEEE Power&Energy, vol. 6, no. 5, Outubro de 2008.
- (IEEE/CIGRE 2004) IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, *Definition and Classification of Power System Stability*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, Maio de 2004.
- (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, Dezembro de 2008.
- (Kema 2006) Kema, *Projeto ESTAL: Utilização de Fasores no Sistema Interligado do ONS / Relatório 1: Avaliação dos Ganhos Econômicos com o Uso de Medições Fasoriais na Operação do Sistema*, Dezembro de 2006.
- (Kundur 1994) P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Electrical Engineering Series - EPRI Editors, Mc Graw-Hill, 1994.
- (Larsson 2003) M. Larsson, J. Bertsch, *Monitoring and Operation of Transmission Corridors*, Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna, vol. 3, no. 8, Junho de 2003.

- (Leal 2013) O.E.S Leal, *Metodologia para Indicação da Margem de Estabilidade de Tensão em Centros de Operação de Sistemas Elétricos de Potência*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica em Andamento – PPGEE/UFMG, Fevereiro de 2013.
- (Li 2009) W. Li, Y. Wang, T. Chen, *Investigation on the Thevenin Equivalent Parameters for Online Estimation of Maximum Power Transfer Limits*, IET Generation, Transmission & Distribution, vol 4, no. 10, pp. 1180-1187, Agosto de 2009.
- (Lobato 1998) M.V.C. Lobato, *Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Estudos do Fenômeno e de Métodos para Análise Estática*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFMG, Julho de 1998.
- (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, Junho de 2012.
- (Milosevic 2003) B. Milosevic, M. Begovic, *Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurements*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 1, pp. 121-127, Fevereiro de 2003.
- (ONS 2012) ONS – Operador Nacional do Sistema, *Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*, Janeiro de 2012.
- (Parniani 2006) M. Parniani, J.H. Chow, L. Vanfeetti, B. Bhargava, A. Salazar, *Voltage Stability Analysis of a Multiple-Infeed Load Center Using Phasor Measurement Data*, IEEE, pp. 1299-1305, 2006.
- (Phadke 1993) A.G. Phadke, *Recent Advances in Monitoring Protection and Control of Power Systems*, IEEE/NTUA, Power Tech Conference: “Planning, Operation and Control of Today’s Electric Power Systems”, Grécia, Setembro de 1993.
- (Phadke 2008) A.G. Phadke, J.S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and their Applications*, Springer Science + Business Media, LLC, 2008.
- (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, Agosto de 2011.
- (Silva 2010a) 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, Julho de 2010.
- (Silva 2010b) R.G.F. Silva, M.H.M. Vale, F.S. Chaves, R.G.F. Silva, S.R.C. Andrade, *Margem de Estabilidade de Tensão em Tempo Real Utilizando Dados dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada*, XI EDAO, Brasil, Novembro de 2010.
- (Smon 2006) I. Smon, G. Verbic, F. Gubina, *Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 3, pp. 1267-1275, Agosto de 2006.
- (Su 2009) Y. Su, X. Wang, *A Method for Voltage Stability Assessment Based on Wide Area Measurement System*, IEEE, 2009.
- (Vale 2011) M.H.M. Vale, G. Ribeiro, F.S. Chaves, R.G.F. Silva, S.R.C. Andrade, *Margem de Estabilidade de Tensão em Tempo Real Utilizando Dados dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada*, XIV ERIAC, Paraguai, Junho de 2011.
- (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 da Estabilidade de Tensão em Tempo Real Utilizando Dados Fasoriais*, XII EDAO, Brasil, Novembro de 2012.
- (Vale 2013) M.H.M. Vale, F.S. Chaves, O.E.S. Leal, S.R.C. Andrade, *Resultados Práticos da Aplicação do Previsor de Instabilidade de Tensão Desenvolvido para o Sistema de Medição Fasorial da Cemig*, XV ERIAC, Brasil, Maio de 2013.
- (Vu 1997) K.T. Vu, M.M. Begovic, D. Novosel, *Grids Get Smart Protection and Control*, IEEE Computer Applications in Power, pp. 40-44, Outubro de 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, vol. 14, no. 3, pp. 1029-1035, Agosto de 1999.
- (Vu 1999b) K. Vu et al., *Voltage Instability Predictor (VIP) and its Applications*, Power Systems Computation Conference, pp. 308-316, Junho de 1999.

- (Vu 2000) K. Vu et al., *Quantifying Proximity to Voltage Collapse Using the Voltage Instability Predictor (VIP)*, IEEE, 2000.
- (UW 2013) University of Washington – Electrical Engineering, Power System Test Archive, Disponível em: [www.ee.washington.edu/research/pstca](http://www.ee.washington.edu/research/pstca).