

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 695

**O USO DE EQUIVALENTES DE REDES NA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE  
TENSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**Gustavo Luiz Silva Ribeiro**

DATA DA DEFESA: 04/08/2011

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

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

**O USO DE EQUIVALENTES DE REDES NA ANÁLISE DA  
ESTABILIDADE DE TENSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE  
POTÊNCIA**

Gustavo Luiz Silva Ribeiro

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

Orientadora: Profa. Maria Helena Murta Vale

Belo Horizonte - MG

Agosto de 2011

**"O Uso de Equivalentes de Redes Na Análise da Estabilidade  
de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência"**

**Gustavo Luiz Silva Ribeiro**

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 04 de agosto de 2011.

Por:

*Maria Helena Murta Vale*

---

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

*Peterson de Resende*

---

**Prof. Dr. Peterson de Resende  
DELT (UFMG)**

*Fabício Silveira Chaves*

---

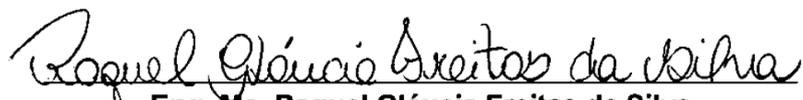
**Dr. Fabrício Silveira Chaves  
LRC (UFMG)**

**“O Uso de Equivalentes de Redes na Análise da Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência”**

**Gustavo Luiz Silva Ribeiro**

**Dissertação de Mestrado apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais em 04 de agosto de 2011.**

**Convidadas Especiais:**

  
**Eng. Ms. Raquel Gláucia Freitas da Silva**  
**(ELETROBRAS/DDAT)**

  
**Eng. Ms. Sônia Ribeiro Campos Andrade**  
**(CEMIG/GT)**

---

# Agradecimentos

*“Agradecer é compartilhar a felicidade e reconhecer que nunca caminhamos sós.”*

Primeiramente, gostaria de não apenas agradecer, mas, além disso, poder dividir os méritos de mais esta conquista em minha vida com meus pais José Hamilton e Marlene, pelo carinho e dedicação todos estes anos, e com meu irmão Marcelo, não só pelos inúmeros conselhos e ensinamentos, como também por sempre me apoiar em todas as minhas decisões.

Agradeço aos amigos conquistados durante os dois anos em que trabalhei no LRC/UFMG, principalmente ao Alyson, Henrique, Jéssica, Pedro e Danilo, pelos bons momentos de estudo e descontração que passamos no LPAD.

Um agradecimento, em especial, à minha orientadora Maria Helena, primeiro por me convidar a fazer o mestrado junto a sua equipe e, segundo, pelo vasto e rico aprendizado que me foi oferecido.

Deixo aqui um carinhoso agradecimento à minha namorada Nicole, que muito me apoiou na realização deste trabalho sempre me confortando nos momentos de fraqueza.

E, por último, mas não menos importante, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na elaboração desta dissertação.

Muito obrigado!

---

*"O único homem que está isento de erros, é aquele que não arrisca acertar."*

Albert Einstein.

---

# Resumo

A presente dissertação de mestrado aborda o uso de metodologias de equivalentes de redes na análise da estabilidade de tensão utilizando medições de tensão e corrente provenientes dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizado. Esta nova tecnologia de medição vem despertando grande interesse no desenvolvimento de aplicações que possibilite o aperfeiçoamento das atividades relacionadas tanto com a Expansão quanto com a Operação dos sistemas elétricos de potência, sobretudo àquelas relacionadas com o tempo real. Nas aplicações envolvendo o estudo da previsão da instabilidade de tensão, são utilizados equivalentes de Thévenin para transformar sistemas de grande complexidade em circuitos simples de duas barras. Com isso, é possível o uso de toda a teoria da Máxima Transferência de Potência como ferramenta para o cálculo do ponto de colapso de tensão. Visando contribuir nesta direção, este trabalho discute de forma bastante detalhada a aplicação da metodologia de equivalentes de redes, expondo suas limitações e propondo soluções para os problemas ocorridos com o seu uso.

**Palavras-Chaves: Estabilidade de Tensão, Equivalente de Thévenin, Operação em Tempo Real e Sistema de Medição Fasorial Sincronizado.**

---

# Abstract

*This master thesis addresses the use of networks equivalent methodologies in voltage stability analysis using voltage and current phasor measurements from Synchronized Phasor Measurement Systems. This new measurement technology has aroused great interest in developing applications that will enable the improvement of activities related both to the expansion and operation of electric power systems, especially those related to real time. In applications involving the study of prediction of voltage instability, Thevenin equivalent is used to transform systems of high complexity in simple circuits of two bus. This makes it possible to use the whole theory of maximum power transfer as a tool for calculating the point of voltage collapse. Aiming to contribute in this direction, this paper discusses in great detail the application of the methodology of equivalent networks, exposing their limitations and proposing solutions to the problems experienced with its use.*

**Keywords: Voltage Stability, Thevenin equivalent, Real-Time Operation and Synchronized Phasor Measurement System.**

---

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>X</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 ESTABILIDADE DE TENSÃO NO CONTEXTO DA OPERAÇÃO DO SEP.....</b>	<b>5</b>
2.2.1 ATIVIDADES RELACIONADAS AOS SISTEMAS DE POTÊNCIA .....	5
2.2.2 SUPERVISÃO E CONTROLE EM TEMPO REAL.....	6
2.2.3 ABORDAGEM ESTÁTICA DO FENÔMENO .....	8
<b>2.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADO .....</b>	<b>9</b>
<b>2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>13</b>
<b>3 ESTABILIDADE DE TENSÃO: CONCEITOS BÁSICOS .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 DEFINIÇÕES E TERMINOLOGIAS.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 CURVAS PV .....</b>	<b>17</b>
3.3.1 RELAÇÃO CARGA E ESTABILIDADE DE TENSÃO .....	19
3.3.2 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA – MTP .....	24
<b>3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>30</b>
<b>4 EQUIVALENTES DE REDES – EQUACIONAMENTO E APLICAÇÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2 O EQUIVALENTE DE THÉVENIN – EQUACIONAMENTO ADOTADO .....</b>	<b>33</b>
<b>4.3 VALIDAÇÃO DO EQUIVALENTE DE THÉVENIN ABORDADO .....</b>	<b>38</b>
<b>4.4 DEFINIÇÃO DA CARGA EQUIVALENTE .....</b>	<b>40</b>
4.4.1 METODOLOGIA 1: CARGA EQUIVALENTE BEM DEFINIDA .....	41
4.4.2 METODOLOGIA 2: CARGA EQUIVALENTE DO TIPO $P + jQ$ .....	44
4.4.3 METODOLOGIA 3: CARGA EQUIVALENTE DITADA PELO SINAL DA POTÊNCIA ATIVA .....	47
<b>4.5 EQUIVALENTE DE THÉVENIN UTILIZANDO AS METODOLOGIAS 2 E 3 .....</b>	<b>49</b>

---

4.5.1	ANÁLISE DO MÁXIMO CARREGAMENTO – METODOLOGIA 2 .....	49
4.5.2	ANÁLISE DO MÁXIMO CARREGAMENTO – METODOLOGIA 3 .....	54
<b>4.6</b>	<b>ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS 2 E 3 .....</b>	<b>57</b>
<b>4.7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>PROPOSTA PARA USO DO EQUIVALENTE NA DETECÇÃO DO PONTO DE INSTABILIDADE.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS .....</b>	<b>61</b>
5.2.1	EQUACIONAMENTO BÁSICO .....	61
5.2.2	ANÁLISE I – CARGA EQUIVALENTE CONSTANTE .....	62
5.2.3	ANÁLISE II – VARIAÇÃO ALTERNADA DA GERAÇÃO E DA CARGA.....	64
5.2.4	ANÁLISE III – POTÊNCIA CONSUMIDA PELA CARGA NÃO CONSTANTE .....	67
<b>5.3</b>	<b>PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DO EQUIVALENTE DE THEVENIN NA IDENTIFICAÇÃO DO RISCO DE INSTABILIDADE .....</b>	<b>69</b>
<b>5.4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>74</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E CONTINUIDADE .....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO II.....</b>	<b>85</b>

---

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Representação esquemática do SSC. Fonte [VALE,10].	6
Figura 2.2 - Desenho esquemático da configuração de um SMFS. Fonte: [ANDRADE,08]	10
Figura 3.1 – Formato característico da curva PV.	18
Figura 3.2 - Curvas de cargas do tipo $Z_{cte}$ , $I_{cte}$ e $P_{cte}$ . Fonte: [CORTEZ,01].	22
Figura 3.3 - Curvas para as cargas do tipo impedância, corrente e potência constante.	23
Figura 3.4 - Curva PV com a sinalização do Ponto Crítico.	24
Figura 3.5 - Sistema de duas barras para análise da MTP.	25
Figura 3.6 - Comportamento das grandezas P, V e I ao longo do incremento de carga. Fonte: [SILVA,10].	27
Figura 3.7 - Comportamento da potência ativa para diferentes fatores de potência. Fonte: [SILVA,10].	29
Figura 4.1 - (a) Sistema de duas barras, (b) Barra "k" conectada a outras três.	32
Figura 4.2 - Configuração do circuito equivalente de Thévenin.	33
Figura 4.3 - Representação de um sistema de duas barras a ser simulado.	38
Figura 4.4 - Módulo e ângulo de: (a) tensão de Thévenin, (b) impedância de Thévenin.	39
Figura 4.5 - (a) Sistema de seis barras com PMU instalada na barra 5, (b) Visão da barra 5 com sua carga instalada sendo a carga equivalente.	41
Figura 4.6 - Resultados da simulação da Metodologia 1.	42
Figura 4.7 - Exemplificação da Metodologia 2.	45
Figura 4.8 - Simulação para o tipo de carga equivalente da Metodologia 2.	46
Figura 4.9 - Exemplificação da Metodologia 3.	47
Figura 4.10 - Simulação para o tipo de carga equivalente da Metodologia 3.	48
Figura 4.11 – Simulação para análise da resposta da Metodologia 2.	50
Figura 4.12 - Comportamento das impedâncias de Thévenin e da carga equivalente ao longo da simulação – Metodologia 2.	53
Figura 4.13 - Simulação para análise da resposta da Metodologia 3.	54
Figura 4.14 - Comportamento da impedância de Thévenin e da carga equivalente ao longo da simulação – Metodologia 3.	56
Figura 5.1 - Sistema de três barras – Simulação com aumento somente de geração.	62
Figura 5.2 - Resultados da simulação para o sistema de 3 barras.	63
Figura 5.3 - Resultados para a simulação com alternância de aumento de potência.	64

---

Figura 5.4 - Resultados para simulação onde não se tem potência constante.....	68
Figura 5.5 - Resultados para auxiliar a introdução da proposta do uso do equivalente. ....	70
Figura 5.6 - Resultados da simulação para a proposta de uso do equivalente. ....	72
Figura 5.7 - Resultados para aumento de carga na mesma barra do equivalente.....	73
Figura 5.8 - Distância entre o ponto de máximo carregamento e o ponto atual de operação com valores já corrigidos. ....	74

---

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>CAG</b>	Controle Automático de Geração
<b>CIGRÉ</b>	<i>International Council on Large Electric Systems</i>
<b>ERAC</b>	Esquema Regional de Alívio de Carga
<b>ET</b>	Estabilidade de Tensão
<b>FINEP</b>	Financiadora de Estudos e Projetos
<b>FP</b>	Fator de Potência
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
<b>LRC</b>	<i>Lightning Research Center</i>
<b>LTC</b>	<i>Load Tap Changer</i>
<b>MATLAB</b>	<i>Matrix Laboratory</i>
<b>MST</b>	Margem de Segurança de Tensão
<b>MTP</b>	Máxima Transferência de Potência
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema
<b>PDC</b>	<i>Phasor Data Concentrator</i>
<b>PMU</b>	<i>Phase Measurement Unit</i>
<b>PPGEE</b>	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
<b>RAT</b>	Regulador Automático de Tensão
<b>SEP</b>	Sistema Elétrico de Potência
<b>SIN</b>	Sistema Interligado Nacional Brasileiro
<b>SMFS</b>	Sistema de Medição Fasorial Sincronizado
<b>SSC</b>	Sistema de Supervisão e Controle
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Minas Gerais
<b>UFSC</b>	Universidade Federal de Santa Catarina

---

# Lista de Símbolos

$\dot{E}$	Tensão Fasorial da Barra de Geração
$E$	Módulo da Tensão da Barra de Geração
$\dot{E}_{th}$	Tensão Fasorial de Thévenin
$E_{th}$	Módulo da Tensão de Thévenin
$E_{th,i}$	Parte Imaginária da Tensão de Thévenin
$E_{th,r}$	Parte Real da Tensão de Thévenin
$f_o$	Frequência Nominal
$i$	Corrente Fasorial
$I$	Módulo da Corrente
$\dot{I}_k$	Corrente Equivalente que passa na Barra “k” Monitorada
$I_k$	Módulo da Corrente Equivalente que passa na Barra “k” Monitorada
$I_{k,i}$	Parte Imaginária da Corrente Equivalente que passa na Barra “k” Monitorada
$I_{k,r}$	Parte Real da Corrente Equivalente que passa na Barra “k”
$I_{cc}$	Corrente de Curto Circuito
$k$	Identificação de uma Barra Qualquer do Sistema
$P_{eq}$	Potência Ativa da Carga Equivalente
$P_{m\acute{a}x}$	Potência Máxima Transferida
$P_o$	Potência Ativa Nominal
$Q_o$	Potência Reativa Nominal
$R_{Ceq}$	Resistência da Impedância da Carga Equivalente
$R_{th}$	Resistência da Impedância de Thévenin
$S$	Potência Aparente
$S_{eq}$	Potência Aparente da Carga Equivalente
$t$	Instante de uma Iteração Qualquer
$\dot{V}$	Tensão Fasorial da Barra de Carga
$V$	Módulo da Tensão da Barra de Carga
$\dot{V}_k$	Tensão Fasorial da Barra “k” Monitorada
$V_k$	Módulo da Tensão Fasorial da Barra “k” Monitorada
$V_{k,i}$	Parte Imaginária da Tensão Fasorial da Barra “k” Monitorada

---

$V_{k,r}$	Parte Real da Tensão Fasorial da Barra “k” Monitorada
$V_o$	Tensão Nominal da Barra de Carga
$X_{Ceq}$	Reatância da Impedância da Carga Equivalente
$X_{th}$	Reatância da Impedância de Thévenin
$Z_C$	Impedância da Carga
$Z_C$	Módulo da Impedância da Carga
$Z_{Ceq}$	Impedância da Carga Equivalente
$Z_{Ceq}$	Módulo da Impedância da Carga Equivalente
$Z_L$	Impedância da Linha
$Z_L$	Módulo da Impedância da Linha
$Z_{th}$	Impedância de Thévenin
$\theta_C$	Ângulo da Impedância da Carga
$\theta_{Eth}$	Ângulo da Tensão de Thévenin
$\theta_I$	Ângulo da Corrente Equivalente que Passa na Barra “Monitorada”
$\theta_L$	Ângulo da Impedância da Linha
$\theta_V$	Ângulo da Tensão da Barra de Carga
$\theta_{Z_{th}}$	Ângulo da Tensão da Barra de Carga
$\theta_{Z_{Ceq}}$	Ângulo da Impedância da Carga Equivalente

# 1

## INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são sistemas de grande porte que têm como funções gerar, transmitir e entregar para seus consumidores uma energia elétrica que atenda às restrições de qualidade, confiabilidade e continuidade de forma mais econômica possível. Devido às críticas condições de operação dos sistemas de potência caracterizadas pela sua proximidade dos limites máximos toleráveis e também pela imposição de tais restrições cada vez mais severas ao comportamento dos SEP, uma reestruturação do setor elétrico brasileiro foi motivada e acabou ocorrendo na década de 90.

Neste cenário, as concessionárias de energia vêm estudando novas formas de melhorar o desempenho de seus sistemas, de maneira a torná-los cada vez mais eficientes e econômicos. Com base neste contexto, destacam-se os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizado (SMFS) que trazem grande expectativa como solução para o aprimoramento da operação dos Sistemas Elétricos de Potência possibilitando a evolução do mesmo.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) está coordenando o Projeto Nacional de implantação de uma infraestrutura de medição fasorial sincronizada de grande porte (Projeto Estal) no Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN) [ONS,07]. Por este motivo, juntamente com o fato do uso da tecnologia dos SMFS ser recente, é de extrema importância que se estudem suas diferentes aplicações com o intuito de tornar o SIN um sistema mais eficiente e seguro.

Nesta direção, pesquisas relacionadas à aplicação dos SMFS na operação dos sistemas elétricos já veem sendo realizadas no LRC<sup>1</sup>/PPGEE/UFMG, conforme mostram as dissertações de mestrado já defendidas [ANDRADE,08] e [SILVA,10], ambas na área de **estabilidade de tensão** e [SANTOS,10], abordando o tema de recomposição do sistema elétrico de potência. É importante ressaltar que o tema Estabilidade de Tensão também tem sido objeto de vários trabalhos de mestrado desenvolvidos no LRC/PPGEE como [LOBATO 98], [CORTEZ,01] e [MARIANO,08].

---

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

O trabalho aqui proposto constitui uma continuidade das pesquisas relacionadas à aplicação dos SMFS nas análises de Estabilidade de Tensão, mais especificamente nos aspectos preventivos, visando evitar a ocorrência de Instabilidade de Tensão no sistema elétrico.

Conforme tratado posteriormente neste texto, várias são as definições relacionadas ao tema. Neste capítulo introdutório, para situar o objetivo do trabalho, vale citar a definição do IEEE para a condição de **instabilidade de tensão** do SEP [IEEE,90]: *“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, e o decaimento das tensões pode durar de poucos segundos a vários minutos.”*

Pode-se verificar, assim, que a perda da estabilidade de tensão constitui condição operativa degradada, podendo levar o sistema elétrico a situações extremamente críticas. Sendo assim, vários têm sido os esforços para se evitar sua ocorrência em todas as atividades relacionadas ao SEP, incluindo aquelas de Expansão e de Operação.

Esta dissertação atua na Operação do sistema elétrico, mais especificamente na área de Operação em Tempo Real, onde é importante se conhecer a proximidade da condição operativa atual do sistema daquela que corresponde ao ponto crítico de estabilidade. Tal conhecimento permite que ações preventivas sejam realizadas no sentido de se evitar a instabilidade e, com a utilização dos dados de medição fasorial sincronizada, isto poderá se dar de forma dinâmica.

Várias análises relativas ao tema estabilidade de tensão envolvem o uso de **equivalentes de redes elétricas** [CEMIG,11B]. Entretanto, a utilização de equivalentes nas análises de tempo real requer investigações acerca da sua aplicabilidade, uma vez que podem apresentar comportamento diferente daquele obtido nas simulações.

Neste trabalho, os Equivalentes de Redes são investigados de forma detalhada, sendo apresentadas definições e formulações. Uma rica discussão sobre os resultados de sua aplicação na previsão do risco de instabilidade é documentada, no sentido de garantir a representação de forma consistente do comportamento do sistema elétrico.

Adicionalmente, são propostos **indicadores** que tem por finalidade auxiliar as equipes de operação na tarefa de monitorar a proximidade do atual ponto de operação com o ponto de crítico para a perda da estabilidade de tensão.

Do exposto, pode-se identificar o **objetivo** deste trabalho como sendo o de investigar *O Uso de Equivalentes de Redes na Detecção em Tempo Real do Risco de Instabilidade de Tensão*, visando à aplicação dos SMFS.

A relevância deste tema para a área da engenharia elétrica, seu caráter inovador, o ganho para a qualidade da operação do sistema elétrico, bem como as condições favoráveis de desenvolvimento no LRC/PPGEE constituíram as principais **motivações** para a realização desta dissertação.

Para que seu objetivo seja alcançado, o presente texto está estruturado em seis capítulos da seguinte maneira:

- Neste capítulo 1, é realizada uma breve introdução do assunto abordado, apresentando as motivações da elaboração deste trabalho e o objetivo do mesmo.
- No capítulo 2, é feita uma contextualização do tema, ressaltando, de forma sucinta, os tópicos mais relevantes para o entendimento desta pesquisa.
- O capítulo 3 apresenta a teoria básica da Estabilidade de Tensão juntamente com a da Máxima Transferência de Potência.
- O capítulo 4 traz o desenvolvimento matemático do sistema equivalente de redes adotado nesta dissertação, bem como a sua implementação e aplicação em um sistema elétrico fictício.
- No capítulo 5 é apresentada uma proposta para a utilização adequada do equivalente de redes, visando propor formas de mostrar aos operadores a proximidade do sistema com relação à instabilidade de tensão.
- O capítulo 6 apresenta um fechamento da dissertação trazendo as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Adicionalmente, após o capítulo 6, são incluídas as Referências Bibliográficas utilizadas na elaboração desta dissertação, além do ANEXO I, que aborda uma breve revisão bibliográfica sobre o uso de equivalentes de redes na análise da estabilidade de tensão na operação em tempo real, e do ANEXO II, que apresenta os valores dos parâmetros dos dois sistemas elétricos simulados neste trabalho.

# 2

## CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas elétricos de potência estão constantemente sujeitos a pequenas ou grandes perturbações, sendo estas, por exemplo, o aumento gradual de carga ou a perda de uma linha de transmissão, respectivamente. Essas perturbações podem impactar o SEP de forma diferenciada, sendo importante identificar suas consequências, principalmente com relação às condições críticas.

A perda de estabilidade de tensão encontra-se entre os fenômenos que trazem grande risco à integridade dos sistemas elétricos. Complementando a definição introduzida no capítulo anterior, pode-se dizer que a estabilidade de tensão é a capacidade que o sistema tem de conseguir manter os níveis de tensão em suas barras dentro de limites pré-estabelecidos mesmo em condições de perturbação. Já a instabilidade de tensão, consiste no declínio progressivo e dificilmente reversível da tensão do sistema ocasionado por algum tipo de ocorrência como o aumento da carga ou alterações nas condições do sistema, [KUNDUR,94].

*Duas referências interessantes que abordam os diferentes tipos de estabilidade dos sistemas elétricos de potência são os livros [KUNDUR,94] e [ANDERSON & FOUAD,03]. Nestes, são tratadas as principais técnicas utilizadas em modelagem, estabilização e controle de sistemas elétricos de potência.*

Percebe-se, assim, quão negativo pode ser o impacto da ocorrência do fenômeno de instabilidade de tensão e a importância deste ser considerado de forma preventiva. Ações corretivas, emergenciais, com o fenômeno já ocorrendo, têm se mostrado pouco efetivas.

Análises têm sido introduzidas no processo de decisão das diversas atividades relacionadas aos SEP, na busca por minimizar situações de perda de estabilidade de tensão. Este capítulo procura contextualizar os desenvolvimentos realizados nesta dissertação, no âmbito dessas atividades. Destaque é dado às funcionalidades dos sistemas de supervisão e controle nos centros de operação do SEP.

Uma vez situada a área onde esta pesquisa se aplica, o capítulo aborda a questão do uso da modelagem estática nos estudos, bem como a importância da aplicação dos equivalentes. O texto inclui, também, informações relativas aos sistemas de medição fasorial sincronizado, nos aspectos de interesse desta dissertação.

## **2.2 ESTABILIDADE DE TENSÃO NO CONTEXTO DA OPERAÇÃO DO SEP**

### **2.2.1 ATIVIDADES RELACIONADAS AOS SISTEMAS DE POTÊNCIA**

As atividades realizadas que garantem que o SEP cumpra seus objetivos formam um vasto e complexo processo de tomadas de decisões. Tais atividades são normalmente identificadas como sendo de Expansão e de Operação. Apesar de integradas, possuem características próprias.

As atividades de Expansão são responsáveis por garantir o bom funcionamento do sistema na condição atual e futura. Estas são divididas em etapas de Planejamento e de Execução. No Planejamento da Expansão, por meio de estudos do comportamento atual e do previsto para o SEP, identifica-se a necessidade de instalação de *novos recursos*, como por exemplo, novas linhas de transmissão, novos parques geradores, etc. A Execução se faz na compra dos novos equipamentos, como também na construção dos empreendimentos (usinas, linhas de transmissão, etc.).

Já nas atividades relacionadas à Operação, o objetivo é gerenciar os *recursos já existentes*, visando um melhor aproveitamento destes. Incluem as etapas de Planejamento, Operação em Tempo Real e Pós-operação. No Planejamento, estudos são realizados considerando a condição atual e futura do SEP, visando gerar as instruções operativas a serem seguidas na Operação em Tempo Real, etapa esta responsável pela supervisão e controle do sistema. Na Pós-operação, são realizados estudos e análises relativas à operação já realizada.

*Duas referências interessantes sobre esse assunto o qual se refere às atividades de Expansão e de Operação do sistema elétrico são [VALE,08] e [VALE,10].*

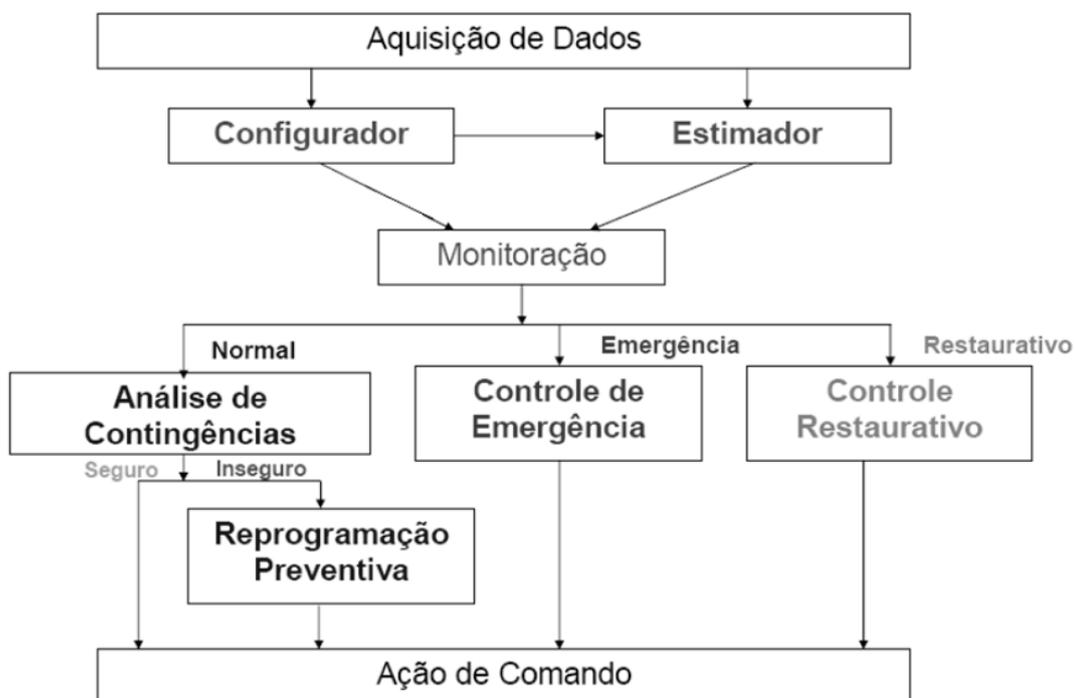
Em todas as atividades citadas acima, são realizadas, dentre outras, ações no sentido de se minimizarem os impactos de perturbações na integridade do sistema elétrico e garantir que a demanda de energia dos consumidores seja atendida obedecendo aos critérios de qualidade, confiabilidade e continuidade. Vale comentar que, com a implantação dos SMFS, todo este processo poderá se beneficiar.

Em termos das análises sobre estabilidade de tensão, estudos têm sido introduzidos nas etapas de planejamento. Entretanto, no que diz respeito ao monitoramento do risco de instabilidade de tensão em tempo real, o tema está apenas no início de sua exploração. Com as informações obtidas dos SMFS, cresce a atenção para as aplicações em tempo real, principalmente no sentido de acompanhar o comportamento do SEP, permitindo a ação de controle preventivo.

Como esta dissertação está voltada para as atividades de tempo real, o enfoque é dado às aplicações nos Centros de Operação dos sistemas de potência. Nestes centros, são realizadas as ações referentes aos Sistemas de Supervisão e Controle (SSC), cujas funcionalidades estão identificadas no próximo item.

### 2.2.2 SUPERVISÃO E CONTROLE EM TEMPO REAL

A Figura 2.1 apresenta um diagrama que ilustra as principais funcionalidades presentes em um SSC.



**Figura 2.1** - Representação esquemática do SSC. Fonte [VALE,10].

No topo da Figura 2.1, tem-se a Aquisição de Dados, onde são recolhidas informações de vários pontos espalhados por toda a rede, divididas em dois tipos:

→ **Dados de pontos digitais:** informações sobre o *status* (aberto/fechado) de equipamentos como chaves seccionadoras e disjuntores. Esses dados são enviados ao Configurador que tem a finalidade de determinar a configuração atual da rede.

→ **Dados de grandezas analógicas:** medições de grandezas elétricas como fluxos de potências ativa e reativa nas linhas e transformadores e módulos de tensão e corrente. Tais dados são transferidos ao Estimador que tem como função estimar o estado do SEP em regime permanente, ou seja, os valores dos módulos e ângulos das tensões nos barramentos da rede em tempo real.

Em seguida, na etapa de Monitoração, é determinada a condição operativa do SEP utilizando-se dos dados recebidos do Configurador e do Estimador. Nesta fase é identificado o estado atual de operação do sistema: Normal, Emergência ou Restaurativo.

A identificação do Tipo de Estado determina o Tipo de Controle específico a ser acionado, definindo as ações de controle a serem executadas, conforme descrito a seguir.

Os estados operativos são assim definidos:

→ **Estado Normal:** tem-se o atendimento total da potência demandada pela carga sem que haja nenhuma violação dos limites operativos do SEP, tais como, perfil de tensão e frequência, capacidade física de equipamentos, etc.

→ **Estado de Emergência:** é atendida a demanda da carga de forma plena, porém apresenta a violação de alguma restrição de operação, por exemplo, valores de tensão fora dos limites permitidos. Dependendo da gravidade da perturbação, há violações qualificadas como severas ou não severas.

→ **Estado Restaurativo:** é caracterizado por violações nas restrições de carga ocasionadas pelo não atendimento da sua demanda de potência. Neste Estado, desligamentos parciais de carga ou interrupção total no fornecimento de energia podem ocorrer.

Cada um desses três diferentes estados de operação requer Ações de Comando específicas para que seja mantida a integridade do sistema. As características particulares de cada tipo de controle são:

→ **Controle no Estado Normal:** também conhecido como *Controle Preventivo*, atua no sistema com o objetivo de mantê-lo operando no Estado Normal. Para que isso seja garantido, inúmeras funções de supervisão e controle são implementadas. Dentre estas, têm-se aquelas tradicionais, como os Controles Automáticos de Geração – CAG,

Reguladores Automáticos de Tensão – RAT, etc. e aquelas relacionadas ao *Controle de Segurança* do sistema, como a Análise de Contingências, Reprogramação Preventiva, etc.

A Análise de Contingências consiste em simular um conjunto de perturbações selecionadas e avaliar a reação do SEP a cada uma delas. Nos casos onde o sistema se mantém no estado normal em todas as simulações, é dito que o mesmo é **seguro** para àquelas simuladas. Caso contrário, o sistema é considerado **inseguro**. Já a Reprogramação Preventiva, é responsável por executar ações no SEP, quando este se encontra inseguro, de forma a fazer com que o mesmo volte a ser caracterizado como seguro.

→ **Controle de Emergência:** tem como função determinar e executar ações que eliminem as violações ocorridas na rede. Nem sempre é possível retornar o sistema ao Estado Normal de operação. Em algumas situações, é necessário realizar ilhamentos ou desligamentos parciais de carga, com o objetivo de evitar o alastramento de fenômenos em cascata que poderiam resultar na deterioração de todo o funcionamento do SEP. Este tipo de ação leva o sistema para o Estado Restaurativo e pode ser ilustrada pela seguinte frase: “Prejudicar uma parte para não comprometer o todo”.

→ **Controle Restaurativo:** sua principal função é restabelecer o fornecimento de energia às cargas após terem sido desconectadas do sistema de forma voluntária ou não. Para que isso seja feito, informações como o conhecimento de qual parte do SEP foi desligada, o motivo do desligamento, as condições para que as cargas sejam religadas, etc. são essenciais para o êxito das ações.

O objetivo da proposta desta dissertação é atuar no **Controle Preventivo** realizado no Estado Normal de operação. Por meio do monitoramento em tempo real da proximidade do ponto atual de operação com relação ao ponto de instabilidade de tensão, ações preventivas podem ser realizadas para se evitar a ocorrência do fenômeno.

### 2.2.3 ABORDAGEM ESTÁTICA DO FENÔMENO

A instabilidade de tensão é um fenômeno inerentemente dinâmico, cujo estudo, almejando resultados mais exatos, deve considerar a dinâmica dos componentes do sistema, tais como a da carga, dos equipamentos (por exemplo, geradores síncronos e transformadores), das ações de controle (RAT e CAG), etc., modelando-os através de equações diferenciais e utilizando-se de integrações numéricas para resolvê-las. A análise

desse comportamento dinâmico torna-se mais ou menos complexa de acordo com a gravidade do problema enfrentado pelo sistema elétrico.

Em casos de *perturbações leves*, considera-se o SEP operando em *regime permanente senoidal*, uma vez que alterações sofridas pelo mesmo são de forma lenta e progressiva. Neste caso, o estudo empregando a utilização de equações linearizadas da rede torna-se perfeitamente justificável.

Por outro lado, quando o sistema é submetido a *grandes perturbações*, ocorrências que o expõe a distúrbios de grandes proporções, faz-se necessária a consideração da dinâmica de todos os componentes envolvidos, de forma a se obter uma análise mais correta do problema.

Nas aplicações práticas, em especial aquelas voltadas para a operação em tempo real, a análise estática tem sido a adotada. Isto decorre, principalmente, da dificuldade de se implementarem modelos que considerem toda a dinâmica do SEP.

*As referências [CORTEZ,01], [FRANCISCO,05] e [PILLCO,11] discutem a relação entre essa modelagem dinâmica e a instabilidade de tensão. A literatura apresenta vários outros estudos nesta direção, como por exemplo, [MORISON,93] e [CIGRÉ,93].*

O estado operativo calculado pelo Estimador de Estado, conforme tratado no item anterior, é o estado de regime permanente senoidal (módulo e ângulo das tensões nos barramentos). No estado normal de operação, este também é o estado considerado, uma vez que o SEP se encontra sujeito basicamente à evolução lenta e gradual da carga.

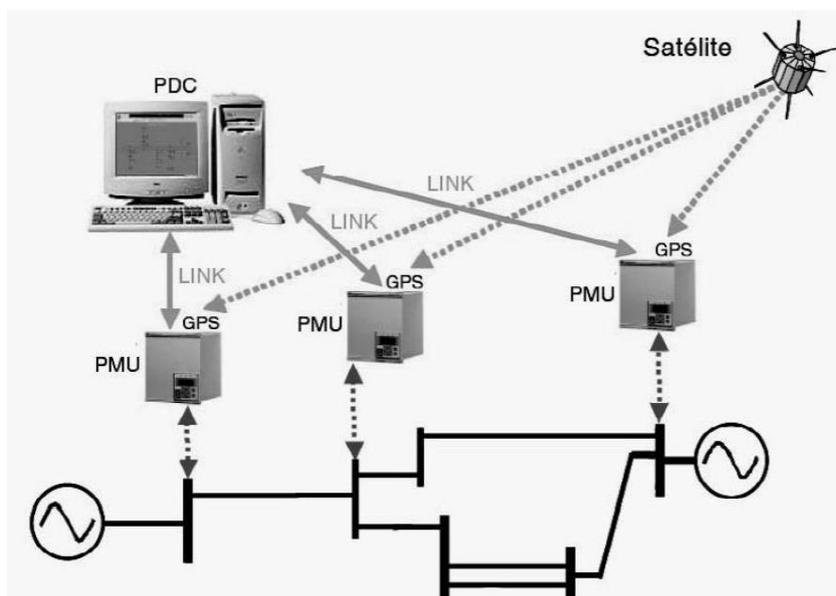
No contexto desta dissertação, onde o objetivo é a detecção em tempo real do risco de instabilidade de tensão, em **caráter preventivo**, considera-se que o SEP está sujeito a um comportamento de regime permanente que evolui lentamente no tempo. Desta forma, neste trabalho, é utilizada a abordagem estática para a análise da estabilidade de tensão.

### 2.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADO

No contexto da operação do sistema, inúmeros fatores colaboram para um aumento da complexidade de suas atividades. Dentre eles, podem ser citadas a evolução crescente da carga, as intervenções ambientais e sociais e as restrições mais rígidas de natureza elétrica, como por exemplo, o uso cada vez mais intenso dos recursos existentes, fazendo com que o sistema opere próximo de seus limites.

Como propostas de novas tecnologias nas áreas de SSC, sobretudo nos sistemas de monitoração baseados em requisitos de controle e segurança, encontram-se os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizado que vêm surgindo como possibilidade de melhorias significativas para a operação dos sistemas, despertando, tanto no mundo acadêmico/científico quanto no mundo profissional, ideias de diversas aplicações utilizando os seus dados. A previsão da perda da estabilidade de tensão, tema abordado nesta dissertação, é uma delas.

As unidades responsáveis pela medição dos SMFS são denominadas PMU (*Phase Measurement Unit*), cuja função é fazer a medição de forma sincronizada dos fasores<sup>2</sup> de tensão e corrente do ponto do sistema onde estão instaladas. Tal sincronismo é feito via satélite pelo Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*<sup>3</sup> – GPS), no qual cada PMU conectada à rede estará trabalhando na mesma referência de tempo. Estas PMU são interligadas, através de *links* de comunicação, a um ou mais concentradores de dados fasoriais denominados PDC (*Phasor Data Concentrator*) responsáveis pela centralização, tratamento e disponibilização das grandezas medidas para as diversas aplicações de interesse. A Figura 2.2 ilustra, de forma simplificada, a configuração básica de um SMFS.



**Figura 2.2** - Desenho esquemático da configuração de um SMFS. Fonte: [ANDRADE,08]

<sup>2</sup> Um fasor, também conhecido como vetor de rotação, trata-se da utilização de um vetor bidimensional para representar uma onda cossenoidal sendo representado por sua magnitude (módulo) e seu ângulo de fase.

<sup>3</sup> O GPS é um sistema de navegação por satélite que fornece a um aparelho receptor móvel a posição do mesmo, assim como informação horária, sob todas quaisquer condições atmosféricas, a qualquer momento e em qualquer lugar na Terra, desde que o receptor se encontre no campo de visão de quatro satélites GPS, [WIKIPÉDIA,11].

Grandes são as expectativas com os ganhos que o SMFS traz para os Centros de Operação do SEP, principalmente para as atividades relacionadas com os controles em tempo real.

*A dissertação de mestrado [ANDRADE,08] aborda de forma detalhada as aplicações dos SMFS no Brasil e no mundo, constituindo referência para o tema. A referência [IEEE,08] apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto e [PHADKE,08] também trata de forma aprofundada o SMFS e suas aplicações.*

As informações provenientes das medições fasoriais podem proporcionar avanço significativo nas ações de **Controle do Estado Normal**, sobretudo naquelas relacionadas com o Estimador de Estado, por possibilitar diagnósticos mais exatos e confiáveis com relação ao comportamento do sistema. A razão disso se deve ao fato de que, com a utilização do SMFS, o estado do sistema (módulo e ângulo de tensão de todas as barras) passa a ser determinado por meio de medições ao invés de ser por estimação, permitindo, assim, uma melhor visualização do comportamento dinâmico do SEP.

No **Controle de Emergência**, o SMFS beneficia os procedimentos automáticos utilizados nas situações de alto risco como os Esquemas de Proteção Sistêmica, no qual se destaca o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC). O ERAC age intervindo no balanço de carga e geração de forma a controlar a frequência do sistema: quanto menor a frequência, maior é a carga rejeitada [ONS,04].

No **Controle Restaurativo**, o uso dos sistemas de medição fasorial sincronizado pode trazer um significativo avanço na qualidade das suas ações, especialmente àquelas relacionadas com a monitoração da diferença angular em tempo real. Destaca-se, neste contexto, o processo de restabelecimento do sistema no qual envolve conexões de ilhas de carga e fechamento de anéis. Dessa maneira, tem-se a tarefa de sincronização de áreas realizada de forma mais ágil e eficiente.

No contexto desta dissertação, onde a proposta é atuar no Controle Preventivo no Estado Normal, os ganhos advindos dos SMFS são diretos. Isto se reflete, na esfera da estabilidade de tensão, em uma possível diminuição da margem de segurança estipulada pelo ONS, fazendo com que possa ser transferida mais potência pela rede.

Como exemplos do uso do sistema de medição fasorial sincronizado no âmbito internacional, destacam-se, conforme em [ANDRADE,08]:

- O projeto WECC (*Western Electric Coordinating Council*) nos Estados Unidos apresentando um crescimento sucessivo de registros locais e regionais de interconexão da rede de PMU nos últimos 30 anos;
- O projeto NASPI (*North American SynchroPhasor Initiative*), também nos Estados Unidos, com o desenvolvimento do Super PDC que permite a monitoração em tempo real e o rastreamento da dinâmica e estresse do sistema;
- A instalação de 30 PMU espalhadas em uma grande área na Itália e o desenvolvimento de *softwares* para a visualização de informações coletadas no SEP iniciada em 2005 pela empresa TERNA;
- A implementação do sistema WAMC (*Wide Area Monitoring and Control*) no sistema de transmissão da Suíça, utilizando 4 PMU instaladas em pontos estratégicos para monitorar o impacto de pesadas transferências de potência no eixo norte-sul da região;
- A utilização de 9 PMU instaladas na baixa tensão de algumas universidades do Japão com o objetivo de monitorar as oscilações de frequência entre as áreas do seu sistema elétrico.

No Brasil, dois projetos estão em andamento: o MedFase e o Projeto Estal.

O primeiro, “O Projeto de Sistema de Medição Fasorial Sincronizado com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica”, tem como objetivo a pesquisa e o desenvolvimento em quatro aspectos principais: as unidades de medição propriamente ditas (PMU); o sistema de transmissão e concentração de dados (PDC), as aplicações dos dados disponíveis no PDC e a melhoria de metodologias de monitoração e controle dos SEE em tempo real. Esse projeto foi inicialmente desenvolvido em 2001 de forma conjunta pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Reason Tecnologia S.A., contando, em 2003, com o financiamento oferecido pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) [MEDFASE,09].

O Projeto Estal, como mencionado no capítulo 1, consiste na instalação do SMFS na rede básica do sistema brasileiro pelo ONS em parceria com empresas concessionárias de energia. Esse projeto engloba uma quantidade de cerca de 100 PMU instaladas em 58 subestações espalhadas em diferentes pontos do país, 1 PDC primário a nível nacional em Brasília, 1 PDC secundário no Rio de Janeiro com a função de *back-up* do primário e 4

outros PDC a níveis regionais situados em Brasília, Rio de Janeiro, Recife e Florianópolis [ANDRADE,08].

## **2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conforme pode ser visto neste capítulo, os SMFS podem trazer ganhos significativos para toda a operação dos sistemas elétricos. No que diz respeito à operação em tempo real, tais ganhos podem ser percebidos com clareza quando são analisadas as funções de supervisão e controle presentes nos centros de operação.

Esta dissertação tem como objetivo contribuir para as análises preventivas realizadas no estado normal de operação do SEP, mais especificamente com respeito à detecção prévia do risco da perda da estabilidade de tensão. Nestas condições, a análise estática se aplica na composição de equivalentes de redes elétricas.

As pesquisas deste trabalho compõem o conjunto de desenvolvimentos que vêm sendo realizados pela equipe do LRC/UFMG e são grandes as expectativas de aplicação de seus resultados.

# 3

## ESTABILIDADE DE TENSÃO: CONCEITOS BÁSICOS

### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são tratados os conceitos básicos relacionados ao tema Estabilidade de Tensão que subsidiam as propostas apresentadas na dissertação. As definições e terminologias introduzidas anteriormente são aqui refinadas, sendo identificadas as diferentes formas em que se apresentam na literatura. Aquelas adotadas no trabalho são indicadas.

Conforme já contextualizado, o estudo aqui realizado sobre Estabilidade de Tensão se baseia na análise estática do sistema elétrico e do fenômeno. A análise estática se fundamenta na formulação dos Estudos de Fluxo de Potência do SEP, onde as grandezas envolvidas são, principalmente: tensão nos barramentos, corrente nos ramos, potências ativa e reativa injetadas nos barramentos e potências ativa e reativa circulantes pelos ramos.

Na análise estática, o fenômeno relacionado à perda de instabilidade de tensão tem sido relacionado a um ponto de operação do SEP onde a entrega de potência ativa da rede elétrica para a carga é máxima. Este é conhecido como Ponto de Máximo Carregamento e é estudado a partir do teorema da Máxima Transferência de Potência (MTP). A denominação Ponto de MTP também é muitas vezes adotada.

Uma das maneiras mais utilizadas para se investigar a MTP é utilizando as chamadas Curvas PV. Estas relacionam, para uma determinada barra do sistema, o comportamento da tensão “V” e da potência ativa “P” entregue à carga.

Percebe-se a importância da carga nas análises de estabilidade de tensão, sendo essa relação bastante relevante no contexto da proposta desta dissertação, principalmente nas análises dos equivalentes redes.

Diante da importância dos temas ressaltados anteriormente, são apresentados neste capítulo os conceitos relacionados ao tema Estabilidade de Tensão, considerados relevantes para o entendimento desta dissertação. Neste contexto, é de especial interesse as definições do fenômeno, a utilização das curvas PV, o teorema da Máxima Transferência de Potência (MTP) e a formulação matemática para o cálculo do ponto de MTP baseando-se em um sistema de duas barras.

### 3.2 DEFINIÇÕES E TERMINOLOGIAS

As definições e terminologias sobre o tema Estabilidade de Tensão apresentadas na literatura não são únicas, conforme *CIGRÉ*<sup>4</sup>, *IEEE*<sup>5</sup>, [CORTEZ,01], [IEEE,90] e [VALE,09]. Neste item estão colocadas aquelas mais citadas. Em um primeiro momento, estas podem parecer muito diferentes, em decorrência dos enfoques próprios. Entretanto, são consistentes e podem ser consideradas complementares, sendo, portanto, importante registrá-las para uma maior compreensão sobre o assunto.

Para Estabilidade de Tensão:

→ **CIGRÉ**: um sistema elétrico de potência operando em um ponto qualquer e sujeito a uma determinada perturbação é estável, sob o ponto de vista da Estabilidade de Tensão, se as tensões nas cargas das regiões próximas forem capazes de atingir novos valores de equilíbrio após tal perturbação ter sido encerrada. O novo ponto de operação pós-perturbação está dentro da região denominada como *região de atração*<sup>6</sup> do equilíbrio estável.

→ **IEEE**: é a capacidade do sistema de manter as suas tensões, de forma que, quando a admitância da carga crescer, a sua potência também aumentará, pois tanto a demanda quanto as tensões são controláveis.

---

<sup>4</sup> CIGRÉ – *International Council on Large Electric Systems*. Sociedade civil, sem fins lucrativos, fundada em 1971, que tem por objetivo promover o intercâmbio e desenvolvimento técnico, tecnológico e da engenharia.

<sup>5</sup> IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Sociedade técnico-profissional internacional, dedicada ao avanço da teoria e prática da engenharia nos campos da eletricidade, eletrônica e computação.

<sup>6</sup> Região de atração, ou ponto de equilíbrio estável, é uma região que engloba todos os pontos que, ao sofrerem qualquer perturbação, os mesmos irão retornar aos próprios pontos iniciais ou a lugares próximos a estes. Caso contrário, se um ponto pós-perturbação for afastado da sua localização inicial, é dito que o mesmo está dentro de uma região de repulsão.

Para a Instabilidade de Tensão:

→ **CIGRÉ**: é a ausência de estabilidade de tensão, resultando no decaimento ou no aumento progressivo do nível de tensão. Se os controles que contribuem para a instabilidade atingirem os seus limites, ou se alguma outra ação de controle for adotada (por exemplo o corte de carga), o sistema poderá ter a sua estabilidade global retomada.

→ **IEEE**: 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, e o decaimento das tensões pode durar de poucos segundos a vários minutos. Caso o decaimento das tensões se mantenha, ocorrerá uma instabilidade angular ou até mesmo um colapso de tensão.

Para o Colapso de Tensão:

→ **CIGRÉ**: um sistema de potência, em um dado ponto de operação e sujeito a uma determinada perturbação, sofre um colapso de tensão se as tensões ficam instáveis ou os valores de equilíbrio pós-perturbação estão abaixo dos limites aceitáveis. Um colapso de tensão pode ser total (*blackout*) ou parcial.

→ **IEEE**: é o processo no qual a instabilidade de tensão, ou angular, provoca uma degradação no perfil das tensões em uma parte significativa do sistema. Às vezes, somente uma análise pós-perturbação criteriosa pode revelar a causa principal do colapso de tensão.

Para a Estabilidade de Tensão a Pequenas Perturbações:

→ **CIGRÉ**: um sistema é estável para pequenas perturbações, sob o ponto de vista de tensão, se, para uma pequena variação no ponto de operação, as tensões se mantêm iguais ou muito próximas dos seus valores pré-distúrbio.

Para a Segurança de Tensão:

→ **IEEE**: é a habilidade de um sistema de operar estável e de manter a estabilidade das tensões após a ocorrência de uma contingência ou de uma mudança adversa no ponto de operação do mesmo.

Apesar da análise estática ser a adotada nesta dissertação, para completar o conjunto de definições pertinentes e, também, ter-se uma visão mais ampla do fenômeno dinâmico em que se constitui a instabilidade de tensão, abaixo são apresentadas

classificações com relação à variável tempo. Basicamente se referem ao comportamento transitório de longa duração do fenômeno, conforme descrição sucinta a seguir.

→ **Estabilidade Transitória de Tensão:** tem a duração que cobre o intervalo de tempo entre os milissegundos até vários segundos. Está envolvida, comumente, com grandes perturbações no SEP, como por exemplo, perdas de importantes linhas de transmissão e curtos-circuitos de grandes proporções. Associa-se, também, às cargas que possuem dinâmicas rápidas, como motores de indução, cargas controladas eletronicamente e conversores para sistemas de corrente contínua.

→ **Estabilidade de Tensão de Longa Duração:** possui um intervalo de duração que varia entre 30 segundos até meia hora. Envolve a lenta restauração da carga como, também, a dinâmica lenta de alguns equipamentos do sistema elétrico, por exemplo, transformadores com mudança de tal, cargas com função de resfriamento ou aquecimento e atuações de limitadores de corrente de geradores.

*Em [TAYLOR,94] é apresentada uma detalhada explicação sobre os fenômenos da Estabilidade Transitória de Tensão e da Estabilidade de Tensão de Longa-Duração.*

### 3.3 CURVAS PV

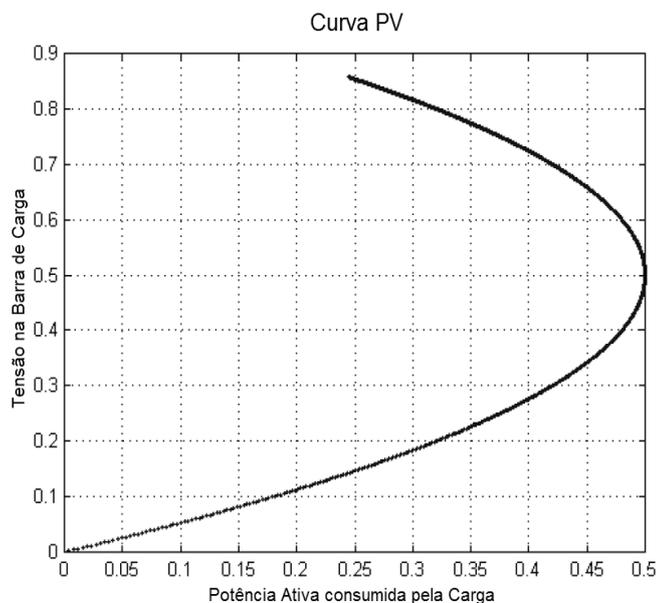
A utilização de curvas do tipo PV é um dos métodos mais usados na análise da estabilidade de tensão no contexto da análise estática.

A curva PV, correspondente a uma barra do SEP, é construída por meio da variação da carga suprida pela mesma, mantendo-se constante o seu fator de potência, a partir de um ponto de operação inicial. À medida que a carga varia, são registrados os valores da tensão da barra e da potência consumida pela mesma.

A título de ilustração, é mostrado na Figura 3.1 o formato de uma curva PV. Percebe-se que esta curva apresenta um ponto onde a potência é máxima (“nariz” da curva). Este ponto, conforme tratado em detalhes nos próximos itens, corresponde ao valor máximo de potência ativa que a barra pode suprir à carga, ou seja, corresponde ao Ponto de Máxima Transferência de Potência.

As simulações realizadas para construir a curva do tipo PV, quando consideram a variação de uma carga representada por uma impedância, não apresentam problemas de convergência. Este tipo de simulação é adotado, normalmente, em etapas de investigações, não sendo aplicado aos estudos de sistemas elétricos reais de grande porte, onde a carga é

normalmente representada por meio da sua potência consumida. Nos estudos de SEP reais, são utilizados os programas para Cálculo de Fluxo de Potência, que utilizam bancos de dados com cargas representadas pelas potências ativa e reativa que consomem.



**Figura 3.1** – Formato característico da curva PV.

Os programas tradicionais de cálculo de fluxos de potência baseados no método de *Newton-Raphson*<sup>7</sup> não conseguem gerar toda a curva PV, uma vez que, no ponto onde se tem o maior valor de potência, coordenada (0,5;0,5) na Figura 3.1, tal método não consegue convergir. Sua não convergência é justificada pelo fato de, neste ponto, a matriz Jacobiana do sistema ser singular<sup>8</sup>, ou seja, não possuir inversa. Sendo assim, o fluxo de potência tradicional não apresenta solução. Para contornar tal problema, em aplicações onde é necessária a construção de toda a curva, é utilizado o Método Continuo, que, realizando alterações no processo de construção da Jacobiana, as condições de singularidade da matriz são eliminadas. Várias são as referências que abordam os métodos Newton-Raphson e Continuo, tais como [MONTICELLI,83], [LOBATO,98] e [AJJARAPU,92].

<sup>7</sup> O método Newton-Raphson é um método de iteração linear para estimação de raízes de funções, o qual é atribuído a Sir Isaac Newton (1643-1727) e Joseph Raphson (1648-1715).

<sup>8</sup> Uma matriz quadrada do tipo  $A_{n \times n}$  é invertível ou não singular, se existe uma matriz  $B_{n \times n}$  tal que  $AB = BA = I_n$ , onde  $I_n$  é a matriz identidade de ordem  $n$ . Assim a matriz  $B$  é chamada de inversa de  $A$ . Matrizes não singulares possuem, também, determinantes diferentes de zero. Uma matriz que não possui inversa é dita singular e possui seu determinante nulo.

No contexto do uso da modelagem estática e das curvas PV, uma das principais aplicações é a chamada Margem de Segurança de Tensão (MST), que consiste na diferença entre o valor máximo de potência que a rede pode fornecer (“nariz” da PV) e o ponto limite, definido pelo ONS, que o sistema pode operar mantendo um determinado grau aceitável de segurança. Atualmente, a MST definida é de 4% para a Operação, como pode ser visto no documento Procedimentos de Redes [ONS,10].

### 3.3.1 RELAÇÃO CARGA E ESTABILIDADE DE TENSÃO

A estabilidade de tensão está tão ligada ao comportamento da carga conectada ao sistema que, alguns autores, costumam até denominá-la como “estabilidade de carga”, uma vez que as características da mesma são responsáveis por determinar os pontos de operação do SEP.

As cargas modeladas em sistemas de grande porte, na maioria das vezes, são expressas por meio de cargas equivalentadas, nem sempre representando somente clientes individuais consumidores de potência. Podem estar contidos neste equivalente, também, outros tipos de “consumidores”, como por exemplo, diversos equipamentos do sistema elétrico, sejam estas linhas de transmissão, redes primárias e secundárias de distribuição, transformadores e banco de capacitores *shunt*, etc. Esta situação deve ser considerada nas análises, pois pode levar a conclusões nem sempre consistentes.

Os modelos que representam o comportamento da carga se diferenciam em dinâmicos e estáticos:

→ **Modelo dinâmico:** é um modelo que mediante equações diferenciais ou de diferenças relaciona a potência ativa e reativa com o módulo da tensão e com a frequência da rede para um instante de tempo passado ou presente. A forma geral destes modelos, com relação à tensão é

$$f\left(\frac{\partial^n P}{\partial t^n}, \dots, \frac{\partial P}{\partial t}, P, \frac{\partial^m V}{\partial t^m}, \dots, \frac{\partial V}{\partial t}, V\right) = 0 \quad (3.1)$$

$$f\left(\frac{\partial^r Q}{\partial t^r}, \dots, \frac{\partial Q}{\partial t}, P, \frac{\partial^s V}{\partial t^s}, \dots, \frac{\partial V}{\partial t}, V\right) = 0 \quad (3.2)$$

→ **Modelo estático:** é um modelo que expressa a potência ativa e reativa para qualquer instante de tempo como uma função da tensão da barra e da frequência para o mesmo dado instante de tempo.

$$P = P(P_o, Q_o, V_o, f_o, V, f) \quad (3.3)$$

$$Q = Q(P_o, Q_o, V_o, f_o, V, f) \quad (3.4)$$

Como os sistemas elétricos de potência operando em *regime permanente* não apresentam variações relevantes no valor da frequência, a mesma é considerada constante durante este regime. Sendo assim, dois modelos matemáticos básicos para a modelagem estática foram desenvolvidos para representar os seguintes tipos de cargas: impedância constante, corrente constante e potência constante.

- **Carga do tipo impedância constante ( $Z_{cte}$ ):** a potência varia de forma quadrática com a tensão.

$$P = \Re \left\{ \frac{|V|^2}{Z} \right\} \quad (3.5)$$

$$Q = \Im \left\{ \frac{|V|^2}{Z} \right\} \quad (3.6)$$

- **Carga do tipo corrente constante ( $I_{cte}$ ):** a potência varia linearmente com a tensão.

$$P = \Re\{VI^*\} \quad (3.7)$$

$$Q = \Im\{VI^*\} \quad (3.8)$$

- **Carga do tipo potência constante ( $P_{cte}$ ):** a potência permanece constante com a variação da tensão.

$$P = cte \quad (3.9)$$

$$Q = cte \quad (3.10)$$

O primeiro modelo trata-se de uma representação polinomial das potências ativa e reativa da carga:

$$P = P_o \cdot \left[ \alpha_1 \left( \frac{V}{V_o} \right) \right]^2 + \alpha_2 \left( \frac{V}{V_o} \right) + \alpha_3 \quad (3.11)$$

$$Q = Q_0 \cdot [\alpha_4 (V/V_0)]^2 + \alpha_5 (V/V_0) + \alpha_6 \quad (3.12)$$

Onde:

$P$  e  $Q$ : Potências ativa e reativa efetivas consumidas pela carga para qualquer valor de tensão;

$V_0$ : Tensão nominal ou de referência da barra de carga;

$P_0$  e  $Q_0$ : Potências ativa e reativa nominais consumidas pela carga quando se tem a tensão nominal;

$\alpha_1$  e  $\alpha_4$ : Multiplicadores referentes à carga do tipo impedância constante;

$\alpha_2$  e  $\alpha_5$ : Multiplicadores referentes à carga do tipo corrente constante;

$\alpha_3$  e  $\alpha_6$ : Multiplicadores referentes à carga do tipo potência constante.

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 100\%$$

$$\alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 = 100\%$$

Já o segundo modelo, representa as potências da carga por meio de equações exponenciais:

$$P = P_0 \cdot (V/V_0)^{n_p} \quad (3.13)$$

$$Q = Q_0 \cdot (V/V_0)^{n_q} \quad (3.14)$$

Onde:

$P$  e  $Q$ : Potências ativa e reativa efetivas consumidas pela carga para qualquer valor de tensão;

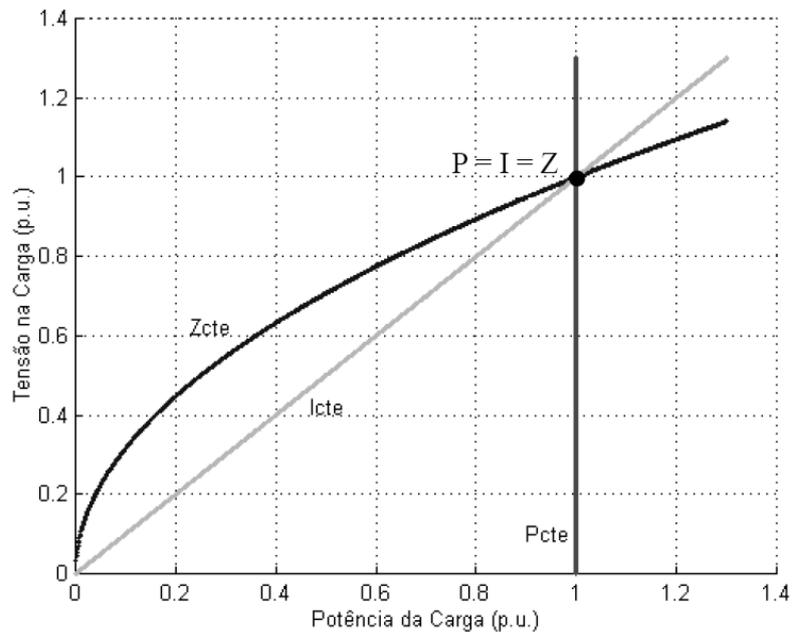
$V_0$ : Tensão nominal ou de referência da barra de carga;

$P_0$  e  $Q_0$ : Potências ativa e reativa nominais consumidas pela carga quando se tem a tensão nominal;

$n_p$ : Parâmetro de modelagem do comportamento da potência ativa com a tensão;

$n_q$ : Parâmetro de modelagem do comportamento da potência reativa com a tensão.

A título de ilustração, a Figura 3.2 representa graficamente o comportamento das curvas referentes aos três tipos de carga:  $Z_{cte}$ ,  $I_{cte}$  e  $P_{cte}$ . Nela pode ser observada a potência variando de forma quadrática com o aumento da tensão na curva de  $Z_{cte}$ , de forma linear em  $I_{cte}$  e valores constantes para  $P_{cte}$ .



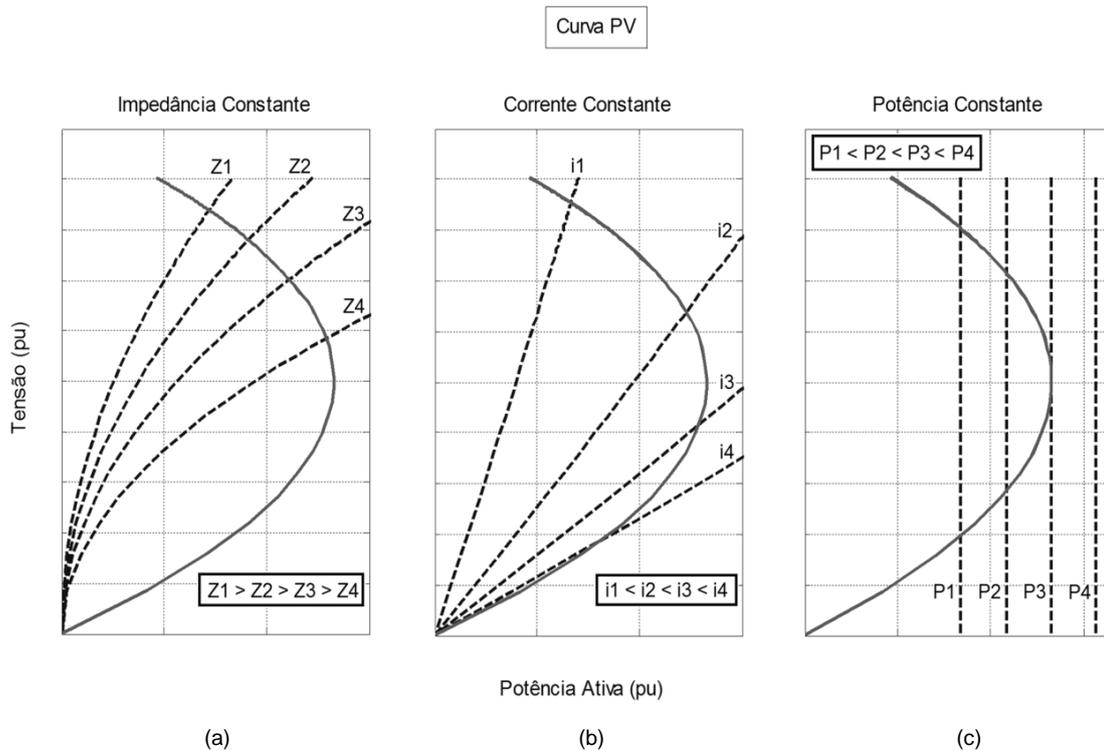
**Figura 3.2** - Curvas de cargas do tipo  $Z_{cte}$ ,  $I_{cte}$  e  $P_{cte}$ . Fonte: [CORTEZ,01].

A curva PV, como já mencionada, indica o comportamento da tensão da barra em relação à variação da potência demandada pela carga conectada a ela. A interseção da curva referente a um tipo de carga qualquer ( $Z_{cte}$ ,  $I_{cte}$  ou  $P_{cte}$ ), Figura 3.2, com a curva PV, Figura 3.1, determina o ponto de operação do sistema visto pela barra onde a carga está conectada.

Análises sobre o ponto de operação da barra quando esta alimenta os diferentes tipos de cargas, podem ser realizadas por meio da Figura 3.3 que apresenta curvas para carga  $Z_{cte}$ ,  $I_{cte}$  e  $P_{cte}$  sobrepostas a uma curva PV.

Para as cargas do tipo impedância e corrente constantes, Figuras 3.3 (a) e (b), sempre haverá um ponto de interseção entre as suas respectivas curvas e a PV. Entretanto, no que se diz respeito à curva de carga do tipo potência constante, Figura 3.3(c), diferentes situações se apresentam: para uma dada carga P, podem existir dois pontos de interseção (curvas P1 e P2), apenas um ponto (curva P3) ou nenhum (curva P4). A partir de P3, que

corresponde ao valor limite máximo de transferência de potência, a rede não consegue mais suprir a potência exigida pela carga.



**Figura 3.3** - Curvas para as cargas do tipo impedância, corrente e potência constante.

Pelas Figuras 3.3 (a) e (b) é possível perceber que, independente do aumento dos valores da carga (impedâncias menores ou correntes maiores), a rede consegue suprir a potência demandada por ela. Já para cargas do tipo  $P_{cte}$ , Figura 3.3(c), a rede não conseguirá suprir cargas de valores maiores que a representada por P3, ou seja, o valor de potência P4 não poderá ser atingido, mostrando que seria impossível a operação do sistema nesta situação.

A análise estática considera que o ponto de operação no “nariz” da curva corresponde ao ponto crítico de instabilidade de tensão para as cargas  $P_{cte}$ , pois este é o único tipo de carga impactado pela restrição imposta pelo sistema, ou seja, o valor de máxima transferência de potência. A partir deste ponto, a tentativa de aumento da carga corresponderá a um acréscimo de corrente que, por sua vez, fará diminuir a tensão da barra, de modo que a carga aumente a sua corrente consumida na busca pela potência constante. Tal comportamento faz com que a tensão decaia em um processo dinâmico e contínuo. Como exemplos desse tipo de carga podem ser citados os motores de indução,

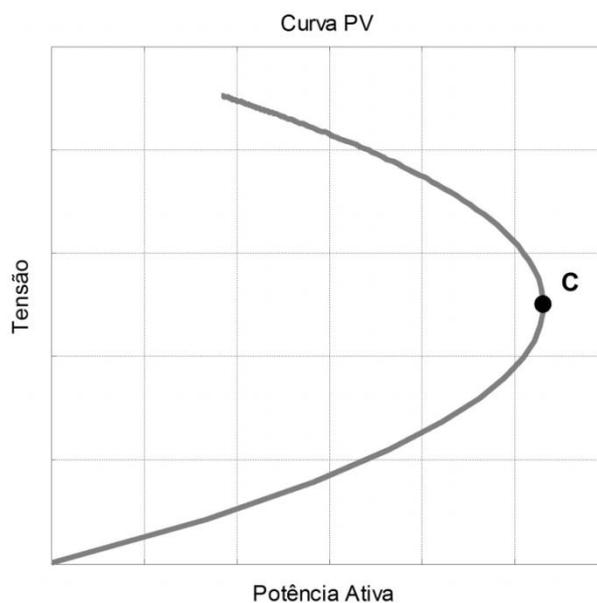
cargas alimentadas por meio de transformadores com mudança de tap – LTC (*Load Tap Changer*), cargas com função de aquecimento com controladores de temperatura, dentre outras.

Para as cargas do tipo  $Z_{cte}$  e  $I_{cte}$  este ponto não constitui risco para a operação do SEP, pois estas não “reagem” à diminuição de potência consumida em pontos posteriores ao de máxima transferência de potência.

### 3.3.2 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA – MTP

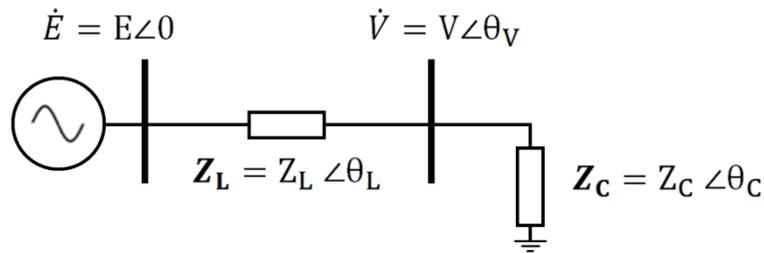
Utilizando a Figura 3.1, foi analisado o comportamento das tensões de uma barra em relação à potência consumida pela carga a ela conectada. Na análise, ficou ressaltada a importância do ponto que representa o valor máximo de potência que o sistema pode transmitir àquela carga específica conectada.

Vários nomes são atribuídos a esse ponto e, portanto, com o objetivo de facilitar o entendimento deste trabalho, são citados aqui aqueles utilizados nesta dissertação: “nariz” da curva PV, ponto de máximo carregamento do sistema, ponto de máxima transferência de potência e ponto crítico para a estabilidade de tensão. A Figura 3.4 mostra uma curva PV onde o tal ponto crítico é sinalizado com a letra “C”.



**Figura 3.4** - Curva PV com a sinalização do Ponto Crítico.

Para a melhor compreensão do ponto de máximo carregamento de um sistema, um dos tópicos mais importantes no estudo da estabilidade de tensão, neste item é recordada a teoria da Máxima Transferência de Potência – MTP. Para isso, é utilizado um sistema elétrico simplificado de duas barras, apresentado na Figura 3.5, como auxílio para a demonstração da MTP.



**Figura 3.5** - Sistema de duas barras para análise da MTP.

O circuito da Figura 3.5 possui uma barra geradora com uma fonte ideal de tensão de valor  $\dot{E} = E\angle 0$  definida como referência angular, uma linha de transmissão de impedância  $\mathbf{Z}_L = Z_L \angle \theta_L$  e uma carga com impedância  $\mathbf{Z}_C = Z_C \angle \theta_C$  conectada a uma barra de tensão  $\dot{V} = V\angle \theta_V$ .

Para esse circuito, a corrente é calculada da seguinte forma:

$$\dot{i} = \frac{\dot{E}}{\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_C} \quad (3.15)$$

Assim, tirando-se o módulo da equação (3.15),

$$\text{sendo que } |\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_C| = \sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)},$$

$$|\dot{i}| = I = \frac{E}{\sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (3.16)$$

Sabendo que a corrente de curto-circuito do sistema da Figura 3.5 é dada por:

$$I_{cc} = \frac{E}{Z_L} \quad (3.17)$$

Substituindo a equação (3.17) na equação (3.16), tem-se:

$$I = \frac{I_{cc}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (3.18)$$

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

$$V = Z_C I = \frac{I_{cc} Z_C}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (3.19)$$

A potência ativa da carga é calculada da seguinte forma:

$$P = VI\cos(\theta_C) = \frac{I_{cc}^2 Z_C \cos(\theta_C)}{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (3.20)$$

Derivando a equação (3.20) em relação à  $Z_C$ , obtém-se a expressão:

$$\frac{dP}{dZ_C} = \frac{I_{cc}^2 \cos(\theta_C) \left[ 1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C) \right] - I_{cc}^2 Z_C \cos(\theta_C) \left[ 2\left(\frac{Z_C}{Z_L^2}\right) + \frac{2}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C) \right]}{\left[ 1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C) \right]^2} \quad (3.21)$$

Igualando a equação (3.21) a zero a fim de se obter a impedância da carga  $Z_C$  que corresponde à máxima transferência de potência do sistema da Figura 3.5, tem-se:

$$\frac{dP}{dZ_C} = 0 \quad (3.22)$$

$$\left[ 1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 - 2\left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C) - 2\frac{Z_C}{Z_L}\cos(\theta_L - \theta_C) \right] = 0 \quad (3.23)$$

$$\left[ 1 - \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 \right] = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{Z_C = Z_L} \quad (3.24)$$

Assim, de acordo com a equação (3.24), a potência máxima transferida pelo sistema analisado, " $P_{m\acute{a}x}$ ", ocorre no exato momento em que o módulo da impedância da carga ( $Z_C$ ) se iguala ao módulo da impedância da linha ( $Z_L$ ).

Com base no desenvolvimento aqui apresentado, importantes relações entre as grandezas elétricas envolvidas (potência, tensão e corrente) podem ser obtidas:

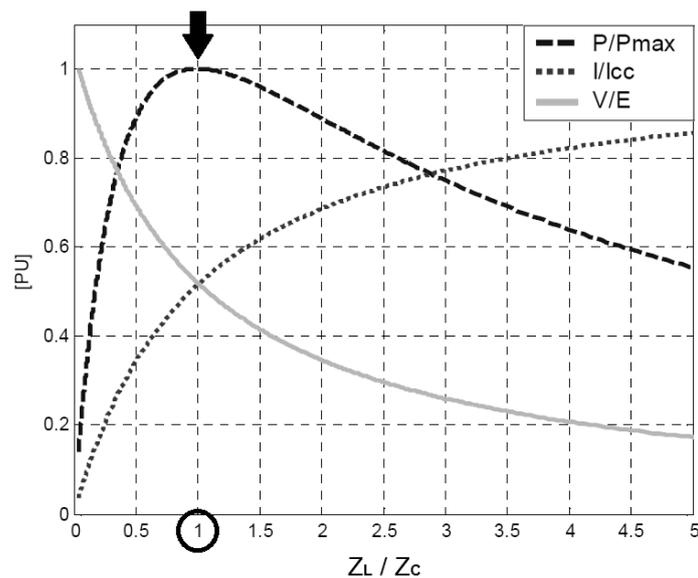
$$\frac{P}{P_{\text{máx}}} = \frac{2 \frac{Z_C}{Z_L} [1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]}{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (3.25)$$

$$\frac{V}{E} = \frac{\frac{Z_C}{Z_L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (3.26)$$

$$\frac{I}{I_{\text{cc}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_C}{Z_L}\right)^2 + 2 \frac{Z_C}{Z_L} \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (3.27)$$

O desenvolvimento matemático aqui apresentado, referente ao ponto de máxima transferência de potência, é encontrado de forma mais detalhada em [CORTEZ,01].

As relações apresentadas nas equações (3.25), (3.26) e (3.27) podem ser utilizadas para realizar a análise do comportamento dessas grandezas ao longo do carregamento do sistema elétrico, como poder ser visto na Figura 3.6.



**Figura 3.6** - Comportamento das grandezas P, V e I ao longo do incremento de carga. Fonte: [SILVA,10].

As curvas da Figura 3.6 são geradas para um sistema de duas barras, onde a fonte de tensão é ideal e mantida em  $1\angle 0^\circ$  p.u. durante toda a simulação. A carga é incrementada de forma que é mantido o seu fator de potência constante para todas as iterações. Os “Procedimentos de Redes do ONS”, [ONS,10], recomendam esta metodologia.

Nessa figura, observa-se que nos casos onde se tem carga leve no sistema, ou seja, valores muito altos para a impedância da carga ( $Z_C \gg Z_L$ ), as tensões da barra são próximas do valor da fonte, uma vez que as correntes presentes são de baixo valor. À medida que a carga vai aumentando (diminuição de  $Z_C$ ), as correntes vão aumentando e, por provocarem maiores quedas de tensão na impedância  $Z_L$  da linha, as tensões na barra vão caindo progressivamente. Porém, mesmo com a diminuição de  $V$ , a potência transferida para a carga vai adquirindo valores maiores, pois o aumento da corrente é mais significativo do que a queda no valor de tensão. No exato momento onde se têm os módulos das impedâncias da carga e da linha idênticos ( $Z_L/Z_C = 1$ ), o valor da potência transferida no circuito chega ao seu valor máximo possível (teoria da MTP), como sinalizado no gráfico. Após esse instante, mesmo com o aumento da carga, a potência transferida começa a diminuir, pois nos casos de carga elevada ( $Z_C \ll Z_L$ ), a queda de tensão se torna preponderante ao aumento da corrente.

É importante mencionar que a potência ativa transferida da fonte para a carga está fortemente ligada ao valor do fator de potência da mesma. Para cargas de mesmo módulo, quanto mais capacitivo for o seu fator de potência, mais potência ativa o sistema consegue entregar e, conseqüentemente, o ponto de máxima transferência ocorrerá em valores mais elevados de potência. A Figura 3.7 ilustra tal comportamento, mostrando que a carga com a característica mais capacitiva dentre as simuladas ( $FP = 0,8$  capacitivo) faz com que o sistema consiga transferir mais potência ativa em comparação com as outras.

A determinação do ponto de máxima transferência de potência é uma das tarefas mais importantes no que se refere ao estudo da previsão da instabilidade de tensão, pois somente com esta informação é possível estabelecer quão distante o sistema elétrico está do ponto crítico. Como mencionado anteriormente, o ponto de máximo carregamento pode ser determinado com a geração da curva PV através de programas de fluxo de potência continuado. No entanto, para a operação em tempo real do sistema, que na grande maioria das vezes exige rapidez na obtenção das informações relacionadas ao estado do mesmo, é necessário que soluções mais eficientes sejam empregadas.

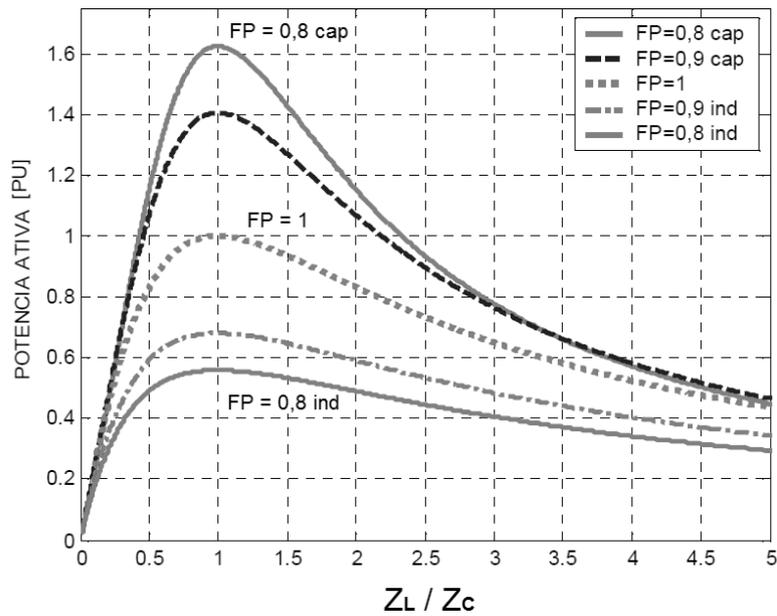


Figura 3.7 - Comportamento da potência ativa para diferentes fatores de potência. Fonte: [SILVA,10].

Neste contexto, é determinada a seguir uma expressão capaz de calcular o ponto crítico para a estabilidade de tensão sem a necessidade de ser realizado todo o procedimento de geração da curva PV. A dedução matemática se inicia utilizando a equação (3.20), reescrita aqui, que relaciona o valor de potência ativa fornecida pela fonte da Figura 3.5 com as grandezas  $I_{cc}$ ,  $Z_L \angle \theta_L$  e  $Z_C \angle \theta_C$ .

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

Multiplicando-se tanto o numerador quanto o denominador da equação (3.20) pelo fator  $Z_L^2$ , obtém-se:

$$P = \frac{E^2 Z_C \cos(\theta_C)}{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (3.28)$$

Sabendo que no ponto de máxima transferência de potência os módulos das impedâncias da linha e da carga são idênticos,  $Z_L = Z_C$ , e fazendo a substituição da impedância da carga por  $Z_L$  na equação (3.28), é encontrada a seguinte expressão:

$$P_{\text{máx}} = \frac{E^2 \cos(\theta_C)}{2Z_L [1 + \cos(\theta_L - \theta_C)]} \quad (3.29)$$

Com a solução da equação (3.29) é possível determinar de forma direta o ponto de MTP, bastando, somente, que sejam conhecidos os parâmetros do sistema na sua condição atual de operação.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de compreender melhor o fenômeno da instabilidade de tensão é extremamente importante que o ponto de máximo carregamento seja analisado juntamente com as características da carga do sistema. Isso porque a existência desse ponto limite de transferência de potência não significa por si só uma ameaça à estabilidade de tensão. É preciso que seja considerado o comportamento da carga também, uma vez que somente cargas do tipo potência constante trazem riscos à estabilidade de tensão.

Os conceitos lembrados neste capítulo trazem importantes informações que precisam ser consideradas quando da sua aplicação nas análises de sistemas reais. Várias são as considerações feitas com respeito à determinação do ponto de máximo carregamento (crescimento da carga mantendo fator de potência constante, por exemplo), trazendo limitações que não devem ser relevadas.

Apesar de todas as limitações inerentes à análise estática, seus resultados têm sido extremamente positivos. Uma das formas de se lidar com estas limitações é considerar margens de segurança com relação à distância do ponto de operação atual do SEP e o ponto de máximo carregamento, como aquela definida pelo ONS mencionada anteriormente.

É importante ressaltar que toda essa formulação matemática é baseada em um sistema simples de apenas duas barras como aquele apresentado na Figura 3.5. No entanto, na prática, os sistemas elétricos de potência são compostos por circuitos bastante complexos os quais possuem diversas barras de carga e de geração, barras de passagem, transformadores, bancos de capacitores *shunt*, dentre outros equipamentos.

Nesta direção, metodologias que abordam a utilização de equivalentes de redes capazes de representar um sistema elétrico complexo em outro de duas barras, vêm ganhando destaque no meio acadêmico/científico, sobretudo para aqueles que estudam o fenômeno da instabilidade de tensão.

No que diz respeito ao uso em tempo real dos dados dos SMFS no monitoramento do risco de perda de estabilidade, com vistas ao controle preventivo, o uso de equivalentes se mostra essencial.

Uma breve revisão bibliográfica contendo comentários sobre as contribuições mais relevantes encontradas na literatura a respeito da utilização de equivalentes de redes na análise da estabilidade de tensão na operação em tempo real pode ser encontrada no ANEXO I deste trabalho.

O tema **Equivalentes de Redes**, em especial o Equivalente de Thévenin, constitui tema central desta dissertação, sendo tratado de forma detalhada no próximo capítulo.

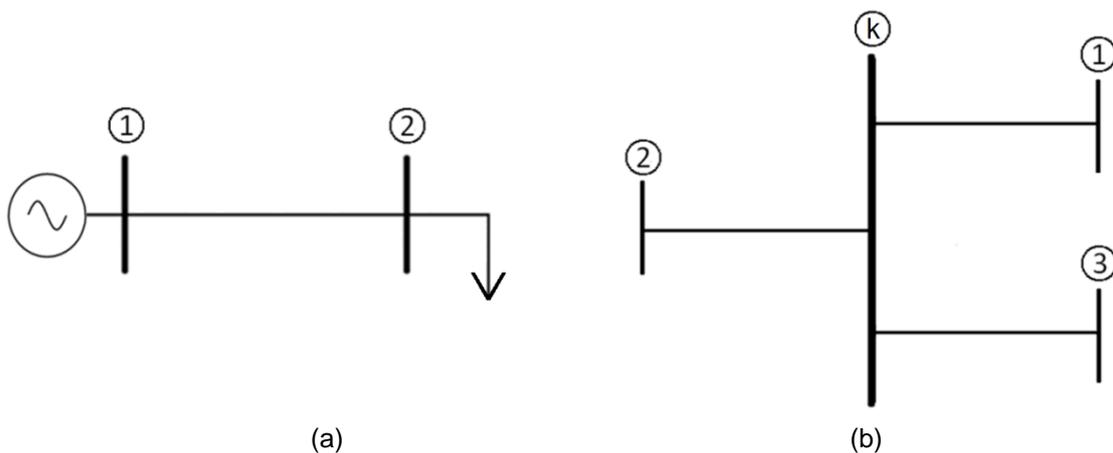
# 4

## EQUIVALENTES DE REDES – EQUACIONAMENTO E APLICAÇÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Conforme discutido anteriormente, a determinação do ponto de máxima transferência de potência de um sistema elétrico é uma tarefa fundamental para se avaliar o risco da perda da estabilidade de tensão, já que a tentativa de ultrapassar este ponto de operação comprometeria a integridade de toda a rede.

O procedimento de geração da curva PV, como também a utilização de equações para o cálculo do ponto crítico, se tornam tarefas triviais quando o sistema em análise possui somente duas barras, ou seja, uma de geração e outra de carga, Figura 4.1(a). Para sistemas elétricos reais de maior porte, além de haver várias barras presentes, estas ainda podem possuir diversas linhas conectadas a elas, Figura 4.1(b).



**Figura 4.1** - (a) Sistema de duas barras, (b) Barra "k" conectada a outras três.

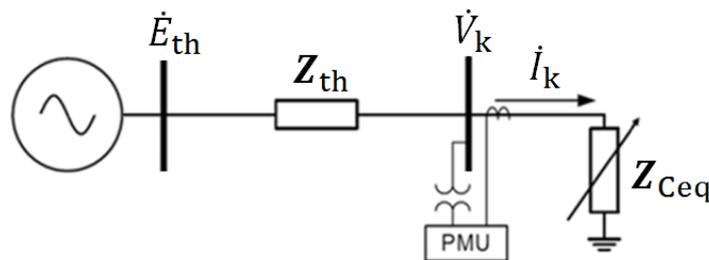
Com o objetivo de utilizar toda a teoria proveniente das curvas PV, é importante que se possa construir, a partir de qualquer barra do sistema e independentemente do número

de linhas conectadas a ela, um **sistema equivalente de duas barras** que represente o comportamento do restante do sistema elétrico visto pela barra em análise.

No presente capítulo, é realizado um embasamento teórico do equivalente de redes, conhecido também como Equivalente de Thévenin, bem como um estudo aprofundado sobre a utilização e limitações quanto à aplicação do mesmo.

#### 4.2 O EQUIVALENTE DE THÉVENIN – EQUACIONAMENTO ADOTADO

O sistema equivalente de Thévenin tem como função representar uma barra monitorada qualquer do sistema, Figura 4.1(b), em um sistema simples de duas barras, uma contendo uma fonte de tensão e a outra com uma carga nela instalada. Estas duas barras são conectadas entre si por meio de uma linha de transmissão modelada somente como uma impedância série. A Figura 4.2 mostra a configuração do circuito equivalente para uma barra “k” qualquer do sistema que possui uma PMU instalada.



**Figura 4.2** - Configuração do circuito equivalente de Thévenin.

Os parâmetros contidos no circuito da Figura 4.2 são:

$\dot{V}_k$  → fasor de tensão da barra “k” monitorada

$\dot{I}_k$  → fasor de corrente equivalente que passa pela barra “k”

$\dot{E}_{th}$  → fasor de tensão da fonte Thévenin

$Z_{th}$  → impedância complexa de Thévenin ou impedância da linha

$Z_{Ceq}$  → impedância complexa da carga equivalente

Como o sistema de medição fasorial sincronizado coleta valores de módulo e ângulo das grandezas elétricas tensão e corrente, são disponibilizados os fasores  $\dot{V}_k$  e  $\dot{I}_k$  a todo instante de medição. Estes são utilizados para determinar todos os outros parâmetros do circuito equivalente:  $\dot{E}_{th}$ ,  $Z_{th}$  e  $Z_{Ceq}$ .

O cálculo da impedância da carga equivalente,  $Z_{Ceq}$ , é feito utilizando a razão entre os fasores de tensão e corrente.

$$Z_{Ceq} = \frac{\dot{V}_k}{\dot{I}_k} \quad (4.1)$$

Já os outros dois parâmetros,  $\dot{E}_{th}$  e  $Z_{th}$ , são calculados utilizando uma metodologia matricial proposta por [VU,99].

Com base no circuito elétrico da Figura 4.2, é possível obter a equação 4.2 que descreve o comportamento das tensões nas duas barras.

$$\dot{E}_{th} = \dot{V}_k + \dot{I}_k Z_{th} \quad (4.2)$$

Reescrevendo as grandezas para a notação de números complexos, tem-se:

$$\begin{aligned} \dot{V}_k &= V_k \angle \theta_V = V_{k,r} + jV_{k,i} \\ \dot{I}_k &= I_k \angle \theta_I = I_{k,r} + jI_{k,i} \\ \dot{E}_{th} &= E_{th} \angle \theta_{E_{th}} = E_{th,r} + jE_{th,i} \\ Z_{th} &= Z_{th} \angle \theta_{Z_{th}} = R_{th} + jX_{th} \\ Z_{Ceq} &= Z_{Ceq} \angle \theta_{Z_{Ceq}} = R_{Ceq} + jX_{Ceq} \end{aligned}$$

Substituindo as grandezas da equação (4.2) pelos seus respectivos números complexos, tem-se a equação (4.3).

$$(E_{th,r} + jE_{th,i}) = (V_{k,r} + jV_{k,i}) + (I_{k,r} + jI_{k,i})(R_{th} + jX_{th}) \quad (4.3)$$

Efetuada as multiplicações, isolando a variável complexa  $(V_{k,r} + jV_{k,i})$  e separando o resultado em parte real e parte imaginária, têm-se as equações (4.4) e (4.5), respectivamente.

$$\text{Parte real} \quad E_{th,r} + 0E_{th,i} - I_{k,r}R_{th} + I_{k,i}X_{th} = V_{k,r} \quad (4.4)$$

$$\text{Parte imaginária} \quad 0E_{th,r} + E_{th,i} - I_{k,i}R_{th} - I_{k,r}X_{th} = V_{k,i} \quad (4.5)$$

Assim, reunindo as equações 4.4 e 4.5, é obtido o sistema matricial dado pela equação 4.6.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k,r} & I_{k,i} \\ 0 & 1 & -I_{k,i} & -I_{k,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{th,r} \\ E_{th,i} \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k,r} \\ V_{k,i} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A equação 4.6 possui quatro incógnitas ( $E_{th,r}$ ,  $E_{th,i}$ ,  $R_{th}$  e  $X_{th}$ ) para serem determinadas a partir de somente duas equações (4.4 e 4.5). Como se trata de um sistema linear do tipo  $Ax = B$ , que tem como solução  $x = A^{-1}B$ , fazem-se necessárias mais duas equações para que a matriz “A” seja quadrada permitindo que a solução  $x$  possa ser calculada. Sendo assim, as outras duas equações que faltam para resolver o problema matricial podem ser obtidas através de uma segunda medição de  $\hat{V}_k$  e  $\hat{I}_k$  em uma condição diferente de operação da primeira. Observa-se que, para se obter a solução, a matriz “A” deve ser não singular. Em [VU,99], o autor cita a possibilidade do uso de um número maior de medições para determinar o equivalente de Thévenin. Porém, nesse caso, por se tratarem de matrizes não-quadradas (número de linhas diferente de número de colunas), faz-se necessária a utilização da pseudo-inversa para o cálculo dos valores dos parâmetros do circuito equivalente. A referência [CHEN,99] aborda, de forma aprofundada, a utilização das pseudo-inversas como forma de encontrar a solução de sistemas lineares envolvendo matrizes não-quadradas.

É importante ressaltar que para utilizar o sistema linear contendo as duas medições é imprescindível que se faça a consideração de que os parâmetros do equivalente de Thévenin se mantêm constantes entre esses dois momentos. Dessa forma, é recomendável que sejam utilizadas **medições consecutivas** de tensões e correntes, como sugerido em [VU,99], e dentro de um pequeno intervalo de tempo.

A equação 4.7 mostra como fica o sistema linear da equação 4.6 já contendo as duas medições consecutivas representadas por instantes “1” e “2”.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_{k1,r} & I_{k1,i} \\ 0 & 1 & -I_{k1,i} & -I_{k1,r} \\ 1 & 0 & -I_{k2,r} & I_{k2,i} \\ 0 & 1 & -I_{k2,i} & -I_{k2,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{th,r} \\ E_{th,i} \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k1,r} \\ V_{k1,i} \\ V_{k2,r} \\ V_{k2,i} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Outro modo de se obterem os parâmetros do circuito equivalente é utilizando operações matriciais por blocos, de forma a calcular a inversa de matrizes de dimensões

2x2 e não mais de 4x4, como na equação 4.7. Como o cálculo de inversas de matrizes pode ser uma tarefa não muito simples dependendo do condicionamento das mesmas, a redução da dimensão da matriz a ser invertida pode minimizar de forma satisfatória os erros presentes nos métodos atuais de inversão numérica.

Assim, a equação 4.6 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$[I | C] \cdot \begin{bmatrix} E \\ Z \end{bmatrix} = [V] \quad (4.8)$$

onde “I” é a matriz identidade  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , “C” é a matriz de correntes  $\begin{bmatrix} -I_{k,r} & I_{k,i} \\ -I_{k,i} & -I_{k,r} \end{bmatrix}$ , “E” é o vetor de tensões de Thévenin  $\begin{bmatrix} E_{th,r} \\ E_{th,i} \end{bmatrix}$ , “Z” é o vetor de impedâncias de Thévenin  $\begin{bmatrix} R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix}$  e “V” é o vetor de tensões na barra  $\begin{bmatrix} V_{k,r} \\ V_{k,i} \end{bmatrix}$ .

Resolvendo a multiplicação matricial da equação (4.8):

$$[E] + [C][Z] = [V] \quad (4.9)$$

Utilizando-se duas medições consecutivas em instantes “1” e “2”, respectivamente:

$$\begin{aligned} [E] + [C_1][Z] &= [V_1] \\ [E] + [C_2][Z] &= [V_2] \end{aligned} \quad (4.10)$$

Subtraindo a primeira medição da segunda:

$$([C_1] - [C_2])[Z] = ([V_1] - [V_2]) \quad (4.11)$$

Isolando a variável “Z”:

$$[Z] = \{[C_1] - [C_2]\}^{-1} \cdot \{[V_1] - [V_2]\} \quad (4.12)$$

Obtendo-se [Z], da equação (4.12), o parâmetro restante do equivalente de Thévenin [E] pode ser obtido diretamente pela substituição de [Z] em qualquer uma das expressões contidas em (4.10).

É importante observar que a matriz de correntes [C], presente nas equações acima, já contém o sinal negativo referente ao sentido da corrente definida na Figura 4.2. Isso explica o motivo desta matriz possuir o sinal positivo na equação (4.9).

Analisando a equação (4.12), nota-se uma característica interessante sobre o cálculo da impedância de Thévenin. Esta impedância é obtida pela razão entre a diferença de duas medições de tensão e a diferença entre duas medições de corrente. Só que nesta equação, a operação de divisão é feita matricialmente. Entretanto, a expressão para a obtenção de  $Z_{th}$  pode ser escrita de outra forma, como é descrito logo a seguir.

Reescrevendo a equação elétrica (4.2), tem-se:

$$\dot{E}_{th} = \dot{V}_k + \dot{I}_k Z_{th} \quad (4.13)$$

Partindo do pressuposto que a equação (4.13) represente uma função contínua, que seus limites são idênticos nas suas duas dimensões e, conseqüentemente, seja derivável em todo o seu intervalo, a sua *derivada*<sup>9</sup> em relação à corrente, considerando  $\dot{E}_{th}$  e  $Z_{th}$  constantes, é mostrada na equação (4.14).

$$0 = \frac{d\dot{V}_k}{d\dot{I}_k} + Z_{th} \quad (4.14)$$

Isolando a impedância de Thévenin, tem-se:

$$Z_{th} = -\frac{d\dot{V}_k}{d\dot{I}_k} \quad (4.15)$$

Ou de forma discreta:

$$Z_{th_t} = -\left(\frac{\dot{V}_{k_t} - \dot{V}_{k_{t-1}}}{\dot{I}_{k_t} - \dot{I}_{k_{t-1}}}\right) \quad (4.16)$$

Assim, conclui-se que  $Z_{th}$  é determinada pelo negativo da derivada da tensão em relação a corrente em um gráfico  $V \times I$ , equação (4.15), mostrando, mais uma vez, a sua relação com a razão entre diferenças de tensões e diferenças de correntes, equação (4.16). Dessa forma, mostra-se a **sensibilidade** da impedância de Thévenin mediante as variações de tensão e corrente do sistema. Vale ressaltar que a variável “t” presente na equação (4.16) não faz menção à grandeza **tempo** e sim, a um instante qualquer da iteração.

---

<sup>9</sup> A referência [Brown & Churchill,95] aborda, de forma detalhada, o tema relativo aos métodos de derivação envolvendo números complexos.

Com a metodologia do equivalente introduzida e explicada, o próximo passo consiste em aplicá-la a um sistema elétrico de duas barras, objetivando a validação da mesma.

### 4.3 VALIDAÇÃO DO EQUIVALENTE DE THÉVENIN ABORDADO

O presente item possui o propósito de verificar quão eficiente é a determinação dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin quando se é utilizada a metodologia proposta por [VU,99]. Tal procedimento consiste em aplicar esta metodologia a um sistema de duas barras e simular um aumento na potência demandada pela carga de forma a representar o carregamento de um sistema elétrico real. Dessa forma, é esperado que os parâmetros de Thévenin calculados correspondam aos próprios valores do circuito em análise.

O sistema de duas barras a ser simulado é mostrado na Figura 4.3. Nesta figura pode ser vista uma fonte conectada à barra 1 com uma tensão  $\dot{V}_1 = 1,05 \angle 10^\circ$  p.u., uma linha de transmissão de impedância  $Z_{12} = 0,22 \angle 63^\circ$  p.u. ou  $Z_{12} = 0,10 + j0,20$  p.u. conectando a barra 1 à barra 2 e uma carga instalada na barra 2 com potência inicial  $S_{inical} = 1,22 \angle 35^\circ$  p.u. ou  $S_{inical} = 1,00 + j0,70$  p.u. Há, também, uma PMU instalada na barra de carga<sup>10</sup>.

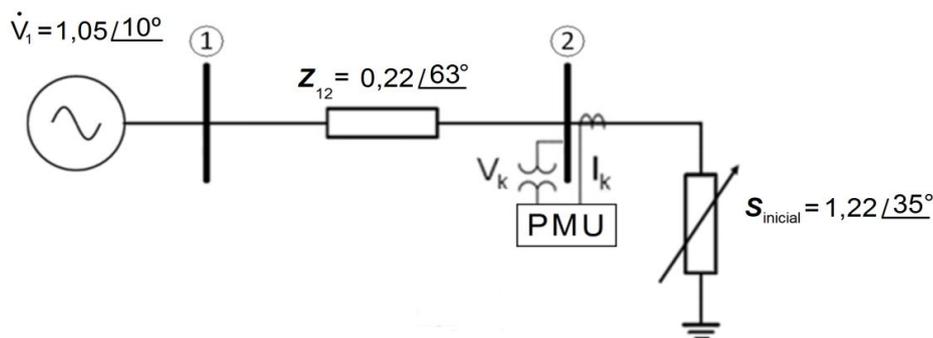


Figura 4.3 - Representação de um sistema de duas barras a ser simulado.

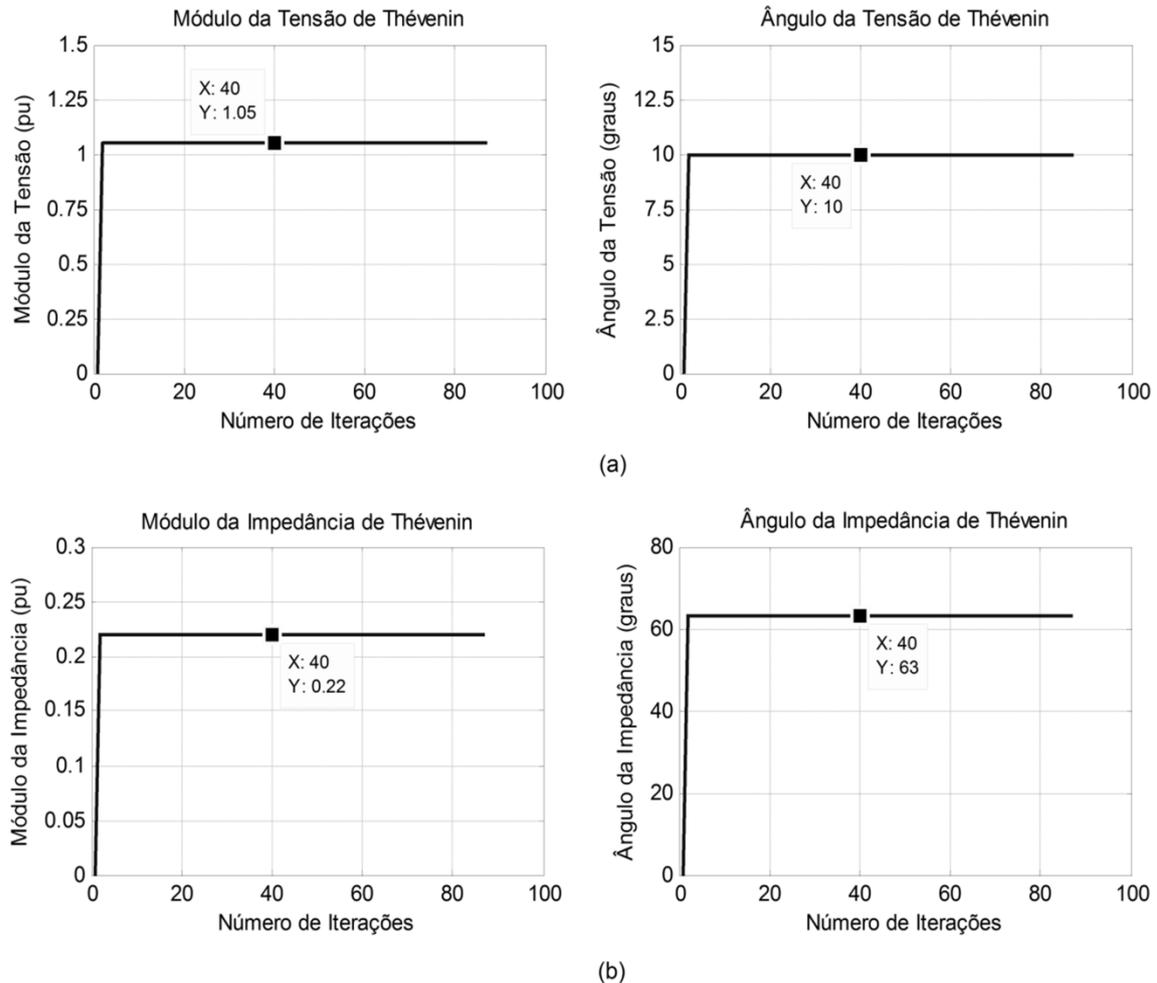
Para representar as medições de tensão e corrente provenientes do SMFS a cada nova configuração do sistema gerada a partir do incremento de carga, é utilizado um programa de fluxo de potência baseado no método Newton-Raphson implementado pelo

<sup>10</sup> Barra de carga de um sistema, conhecida também, nos estudos de Fluxo de Potência, como barra do tipo PQ, é aquela que possui uma carga de potência bem definida conectada a ela.

próprio autor desta dissertação. Como resultado do fluxo, têm-se o módulo e o ângulo das tensões de todas as barras do sistema, sendo possível, assim, determinar todos os fasores de tensão de cada barra e corrente circulantes nas linhas de transmissão.

O critério de parada adotado em todas as simulações desta dissertação é a não convergência do método de Newton-Raphson baseado em um número máximo de iterações pré-estabelecido. O *software* utilizado é o MATLAB®<sup>11</sup>.

Nessa simulação é incrementada a carga instalada na barra 2 em 0,1% a cada iteração mantendo o seu fator de potência constante, partindo do valor de  $S_{inicial} = 1 + j0,7$  p.u. e finalizando com o valor de  $S_{final} = 1,08 + j0,75$  p.u. Os resultados do cálculo dos parâmetros de Thévenin  $\vec{E}_{th}$  e  $Z_{th}$  são mostrados na Figura 4.4.



**Figura 4.4** - Módulo e ângulo de: (a) tensão de Thévenin, (b) impedância de Thévenin.

<sup>11</sup> MATLAB (*MATrix LABoratory*) é um *software* de alto nível de linguagem de programação e com ambiente interativo que permite executar tarefas computacionais, como integração numérica e cálculo com matrizes.

A Figura 4.4 apresenta os resultados para o comportamento do módulo e ângulo da tensão e da impedância do circuito equivalente de Thévenin no decorrer do aumento da carga do sistema, Figura 4.4 (a) e (b), respectivamente. Através dos valores mostrados nessa figura e comparando-os com os que estão presentes na Figura 4.3, nota-se que os cálculos dos parâmetros do equivalente foram bastante satisfatórios.

Com o objetivo de verificar de forma mais significativa a eficiência do método aqui abordado, inúmeras simulações utilizando diferentes configurações para o sistema da Figura 4.3 foram realizadas. Em todos os casos estudados, tal metodologia obteve êxito na determinação dos parâmetros de Thévenin.

Sendo assim, pode-se concluir que o procedimento de construção do circuito equivalente adotado neste trabalho se mostra muito eficiente quanto à determinação dos parâmetros  $\dot{E}_{th}$  e  $Z_{th}$ , tornando-se justificável o estudo de sua aplicação nos estudos de estabilidade de tensão.

Dando sequência nesta presente dissertação ao estudo sobre o equivalente, o próximo item aborda os pormenores da utilização do circuito de Thévenin como representação de um sistema elétrico de potência mais complexo.

#### 4.4 DEFINIÇÃO DA CARGA EQUIVALENTE

A formulação do uso do equivalente de Thévenin, da forma como colocada nos itens anteriores, exige que sejam conhecidos os fasores de tensão e de corrente da barra monitorada. Com relação ao fasor tensão a ser considerado, este consiste do próprio valor medido pela PMU. Já com relação ao fasor corrente, este merece atenção especial, uma vez que podem existir várias medições de corrente para uma mesma barra.

O fato de haver várias medições de corrente leva ao questionamento sobre aquela a ser utilizada no equivalente, ou seja, o valor a ser inserido no sistema matricial da equação (4.6). Tal questionamento trouxe a necessidade de se investigar a determinação desta “corrente equivalente”. Nesta direção, diversas metodologias foram analisadas, entretanto, neste item, são detalhadas aquelas consideradas as mais pertinentes:

**Metodologia 1:** Carga equivalente bem definida.

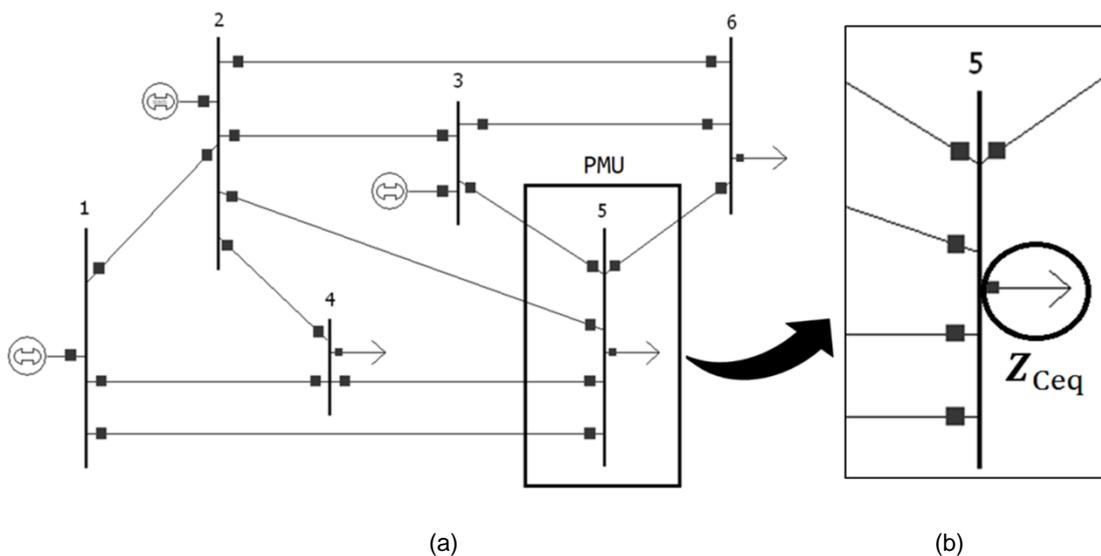
**Metodologia 2:** Carga equivalente do tipo  $P + jQ$ .

**Metodologia 3:** Carga equivalente ditada pelo sinal da Potência Ativa.

A metodologia 1 corresponde a um conceito de carga que já tem sido explorado e utilizado em pesquisas anteriores no LRC [SILVA,10]. As duas outras abordagens correspondem a novas metodologias propostas pelo autor deste trabalho.

#### 4.4.1 METODOLOGIA 1: CARGA EQUIVALENTE BEM DEFINIDA

A primeira aplicação do equivalente de Thévenin apresentada nesta dissertação é a abordada em [SILVA,10]. Nesse trabalho, a autora utiliza o cálculo do equivalente aplicando-o às barras de carga do sistema, definindo como carga equivalente ( $Z_{Ceq}$ ) a própria carga instalada na barra, também denominada *carga efetiva da barra*<sup>12</sup>. Nesta metodologia, tem-se que a corrente utilizada no procedimento de cálculo dos parâmetros de Thévenin é a mesma corrente consumida por esta carga. Portanto, o circuito equivalente gerado representa todo o restante do sistema visto a partir da carga efetiva da barra monitorada. A Figura 4.5 ilustra esta abordagem.



**Figura 4.5** - (a) Sistema de seis barras com PMU instalada na barra 5, (b) Visão da barra 5 com sua carga instalada sendo a carga equivalente.

A Figura 4.5(a) mostra um sistema de seis barras com três barras de geração e três barras de carga, possuindo uma unidade de medição fasorial instalada na barra 5. Nesta barra de carga onde se encontra a PMU, há cinco linhas de transmissão que a conecta a todas as outras barras do sistema. Adicionalmente, tem-se o ramo que a conecta à sua

<sup>12</sup> Carga efetiva da barra é definida nessa dissertação como sendo a carga instalada na própria barra.

carga efetiva. Já a Figura 4.5(b) mostra uma visão aumentada da barra 5 no qual é definida como sendo a carga do circuito equivalente de Thévenin a sua própria carga efetiva.

Com o intuito de exemplificar a metodologia utilizada em [SILVA,10], é simulado o sistema da Figura 4.5(a) no qual é gerado o equivalente de Thévenin visto da carga conectada à barra 5. Os valores dos parâmetros deste sistema são apresentados no ANEXO II desta dissertação.

A simulação consiste em aumentar o valor da potência demandada pela carga da barra 5 em 0,1% a cada iteração, partindo do valor de  $1 + j0,7$  p.u. e atingindo o valor de  $3,42 + j2,40$  p.u. É aumentada a potência ativa e reativa da carga na mesma proporção de forma a garantir seu fator de potência de 0,82 constante durante todo o processo.

Os gráficos (a) e (b) da Figura 4.6 mostram o comportamento da carga equivalente quanto ao seu aumento de potência ativa e reativa, respectivamente.

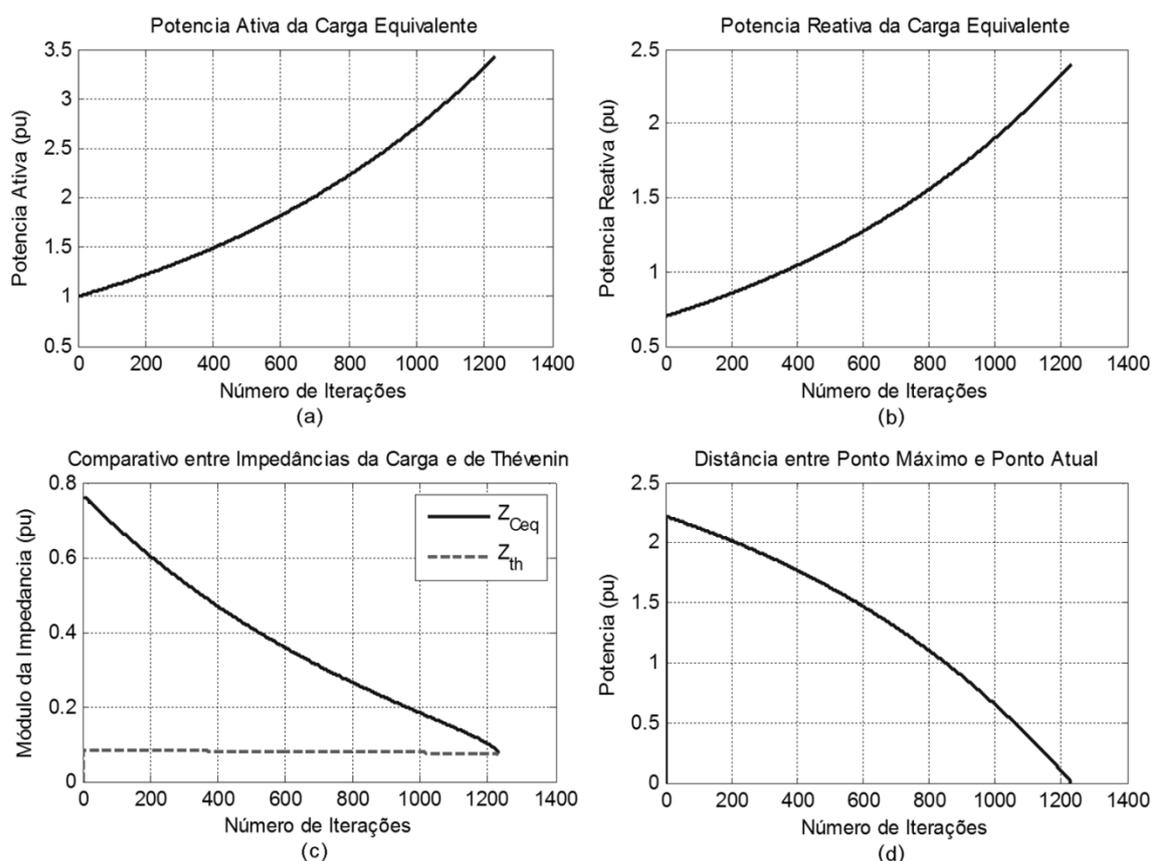


Figura 4.6 - Resultados da simulação da Metodologia 1.

Percebe-se que a simulação ocorre até o instante em que o sistema atinge o seu ponto de máximo carregamento, ou seja, quando o módulo da impedância da carga equivalente ( $Z_{Ceq}$ ) se iguala ao módulo da impedância de Thévenin ( $Z_{th}$ ). Este fato é evidenciado pelo gráfico da Figura 4.6(c), onde  $Z_{Ceq}$  alcança  $Z_{th}$  aproximadamente na iteração de número 1200 ( $Z_{Ceq} = Z_{th} = 0,072$  p.u.). Neste instante, os valores para a potência ativa e reativa da carga equivalente são 3,423 p.u. e 2,398 p.u., respectivamente, conforme apresentado na Figura 4.6 (a) e (b).

Analisando o gráfico da Figura 4.6(d), nota-se que, no decorrer da simulação, com o aumento progressivo do carregamento do sistema, a distância entre o ponto atual de operação e o ponto de máxima transferência de potência diminui gradualmente até o valor zero, momento em que o sistema *atinge*<sup>13</sup> o ponto crítico para a estabilidade de tensão.

Sendo assim, pode-se concluir que a metodologia abordada em [SILVA,10] traz resultados coerentes e muito interessantes para o estudo da previsão da instabilidade de tensão, uma vez que consegue determinar, em tempo real, a distância que o sistema se encontra do perigo da perda da estabilidade de tensão. Apesar dos resultados positivos desta abordagem, vale ressaltar que ela é aplicada apenas às barras de carga.

Como um avanço às pesquisas apresentadas em [SILVA,10], nesta dissertação expande-se o uso dos equivalentes de redes para qualquer tipo de barra do sistema, não o deixando restrito somente às de carga. De forma mais específica, define-se a carga equivalente como uma carga fictícia que corresponde àquela que consome uma potência equivalente que flui pela barra em análise. Assim, o conceito de carga torna-se mais abrangente, não considerando somente a carga efetiva da barra.

Para que se possa utilizar essa nova metodologia, é primordial que se determine tal potência equivalente, definindo de forma clara o que seria fonte e o que seria carga vista pela barra monitorada. Uma vez quantificada a potência, em conjunto com a medição de tensão, é possível calcular a **corrente** que será utilizada para se obterem os parâmetros de Thévenin conforme a equação (4.17). Esta é denominada, neste texto, por corrente equivalente.

$$I_k = \frac{S_{eq}^*}{\dot{V}_k^*} \quad (4.17)$$

---

<sup>13</sup> Como é utilizado um programa de fluxo de potência com o método Newton-Raphson para simular as medições de tensão e corrente, no ponto de máxima transferência de potência este método não converge. Sendo assim, nas simulações, tal ponto nunca é atingido, porém chega-se muito próximo a ele.

Neste contexto, são propostas neste trabalho, duas diferentes formas de se caracterizar o que é fonte e o que é carga vistas de uma barra, conforme descrito nos próximos subitens.

#### 4.4.2 METODOLOGIA 2: CARGA EQUIVALENTE DO TIPO P + jQ

A grande maioria das cargas existentes no sistema elétrico brasileiro é de característica indutiva, ou seja, consomem uma potência elétrica com as parcelas ativa e reativa positivas. Portanto, esta segunda metodologia define a carga equivalente como sendo uma carga que possui sempre características indutivas, de tal forma a consumir uma potência equivalente dada por  $S_{eq} = P + jQ$ .

Com as medições dos fasores de tensão e correntes provenientes do SMFS, obtêm-se todas as potências que circulam pela barra. Assim, o cálculo de  $S_{eq}$  se baseia simplesmente na aplicação da *Lei de Kirchhoff*<sup>14</sup> para as parcelas ativa e reativa destas potências, separadamente. Isto é, a somatória de todas as potências ativas e reativas vistas pela barra, é igual a zero. Tem-se, então:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad , \quad \sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (4.18)$$

onde  $n$  é o número de linhas que estão conectadas à barra, incluindo a que conecta à sua carga efetiva.

Dessa forma, definindo-se a carga equivalente como sendo do tipo P + jQ, a corrente equivalente é calculada utilizando-se como potência equivalente a somatória das parcelas positivas das potências ativas e reativas que passam pela barra. A equação (4.19) demonstra este cálculo:

$$I_k = \frac{S_{eq}^*}{V_k^*} = \frac{[(\sum_{i=1}^n P_i) + j(\sum_{i=1}^n Q_i)]^*}{V_k^*} \quad (4.19)$$

---

<sup>14</sup> A Lei de Kirchhoff para as correntes diz que em um nó, a soma das correntes elétricas que entram é igual à soma das correntes que saem, ou seja, um nó não acumula carga. Como para cada nó há somente uma tensão associada, essa lei pode ser atribuída para as potências também, tanto para as partes reais quanto para as partes imaginárias.

A Figura 4.7 exemplifica esta metodologia de determinação da potência equivalente. Ela ilustra uma *barra de passagem*<sup>15</sup> aleatória “k” do sistema conectada às barras 1, 2 e 3. Constam também os fluxos de potência circulantes nas linhas cuja orientação é a seguinte: sinal positivo significa saindo da barra e sinal negativo entrando na mesma.

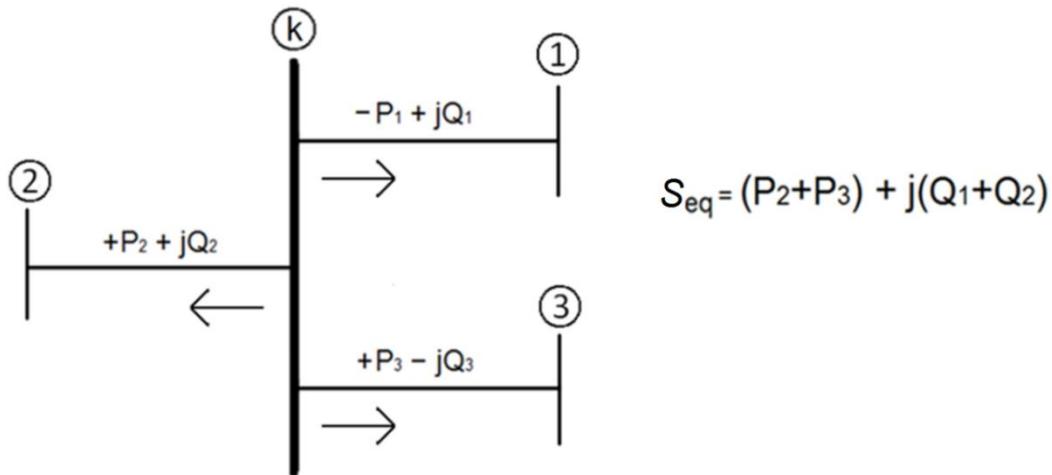


Figura 4.7 - Exemplificação da Metodologia 2.

Para esse circuito, de acordo com a equação (4.19), o resultado para corrente equivalente da Figura 4.7 é dado por:

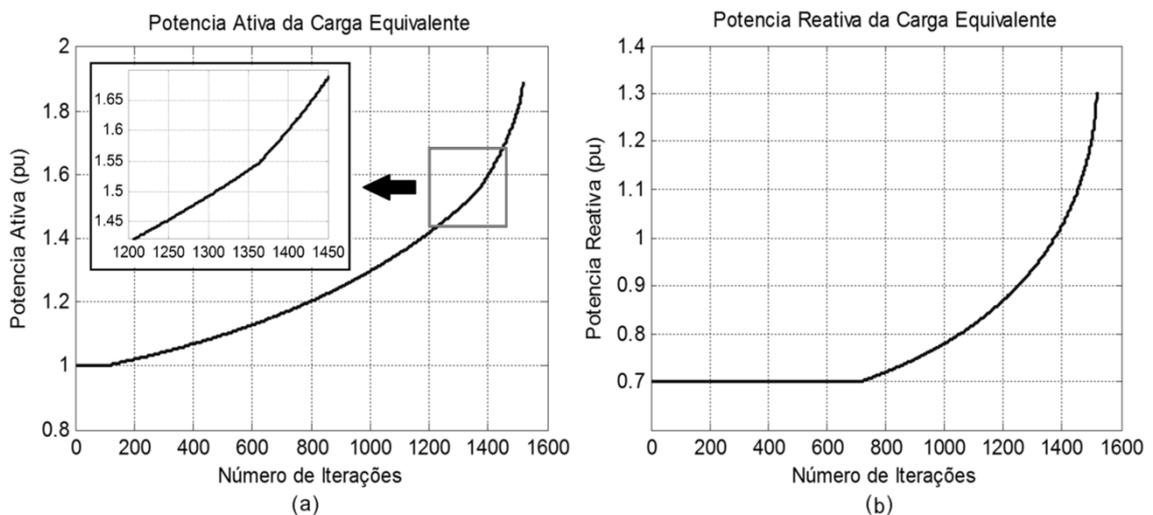
$$\dot{I}_k = \frac{S_{eq}^*}{\dot{V}_k^*} = \frac{[(P_2 + P_3) + j(Q_1 + Q_2)]^*}{\dot{V}_k^*}$$

A título de ilustração, a Figura 4.8 mostra os resultados da simulação do comportamento da potência ativa e reativa da carga equivalente quando se é utilizada a Metodologia 2 para a determinação de  $S_{eq}$ . Tal simulação foi realizada utilizando-se o sistema de seis barras da Figura 4.5(a), no qual é aumentada a carga da barra 6 em 0,1% a cada iteração e gerado o circuito equivalente visto da barra 5.

Observa-se na Figura 4.8(a) que a potência ativa da carga equivalente se mantém constante até a iteração 100, aproximadamente, e depois deste instante passa a aumentar continuamente. Este comportamento acontece pelo fato de que, até a iteração 100, todas as linhas conectadas à barra 5 fornecem potência para alimentar somente a sua carga efetiva, que possui o valor de  $1,0 + j0,7$  p.u. Após este instante, como a demanda da carga

<sup>15</sup> Barra de passagem é uma barra do sistema elétrico que não possui uma carga efetiva, ou seja, não há nenhuma carga instalada nela.

instalada na barra 6 aumenta gradativamente, esta barra deixa de enviar potência à barra 5 e começa a receber potência da mesma. Este acréscimo de potência é suprido pelas outras linhas conectadas à barra 5 que, além de fornecerem potência à carga desta barra, também suprem o excedente enviado à barra 6. Outra mudança de fluxo de potência acontece aproximadamente na iteração 1350, onde se percebe um aumento na taxa de acréscimo de potência ativa, como pode ser visto no *zoom* mostrado no gráfico. Esta variação de sentido de fluxo ocorre na linha que conecta a barra 5 à barra 3.



**Figura 4.8** - Simulação para o tipo de carga equivalente da Metodologia 2.

A mesma explicação feita para a potência ativa pode ser atribuída à potência reativa, Figura 4.8(b). Sua potência permanece inalterada até o momento em que, por volta da iteração 700, o fluxo de potência reativa da linha que segue para a barra 6 inverte de sentido. Os valores finais para a potência ativa e reativa da carga equivalente são 1,879 p.u. e 1,302 p.u., respectivamente.

A independência entre as potências ativa e reativa da carga equivalente pode ser explicada através da própria maneira em que  $S_{eq}$  é calculada. Como na equação (4.19) é feito o somatório da parte real separadamente da parte imaginária, a potência equivalente passa a ter sua parcela ativa desvinculada da parcela reativa.

### 4.4.3 METODOLOGIA 3: CARGA EQUIVALENTE DITADA PELO SINAL DA POTÊNCIA ATIVA

Na área de sistemas de potência, costuma-se considerar como carga tudo aquilo que está, de alguma forma, consumindo potência ativa. Partindo da premissa de que a potência ativa flui dos geradores em direção aos consumidores, a metodologia aqui proposta considera como sendo carga as potências ativas positivas que partem da barra monitorada. Sendo assim, a definição de carga vista pela barra passa a ser ditada pelo sinal positivo da potência ativa.

Aplicando-se este conceito para uma barra “k” do sistema na qual se pretende gerar o equivalente de Thévenin, é definido que toda linha de transmissão conectada a ela que possuir a parcela ativa da potência circulante com sinal positivo é considerada carga. A que possuir sinal negativo é considerada fonte. A Figura 4.9 exemplifica esta metodologia.

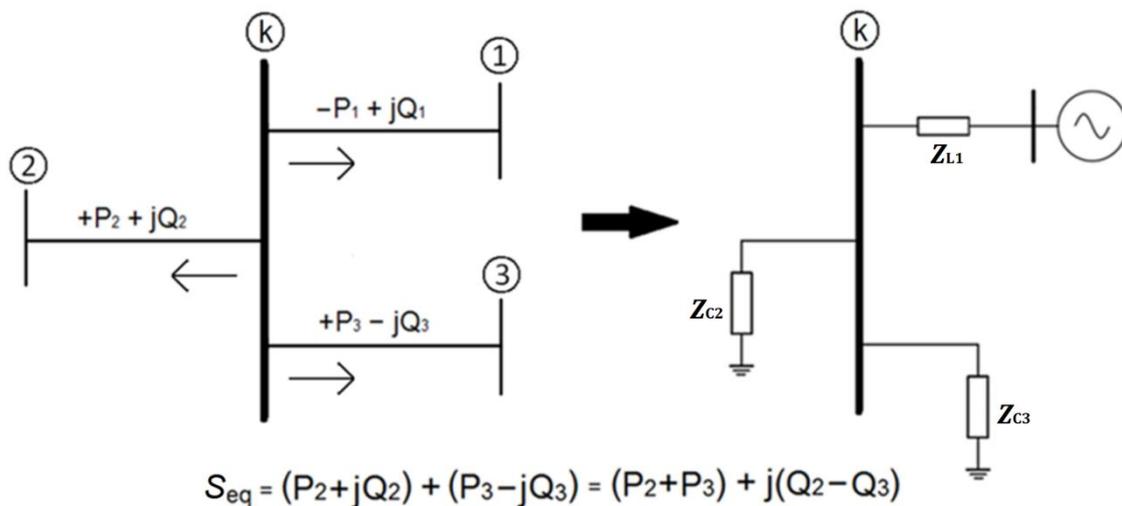


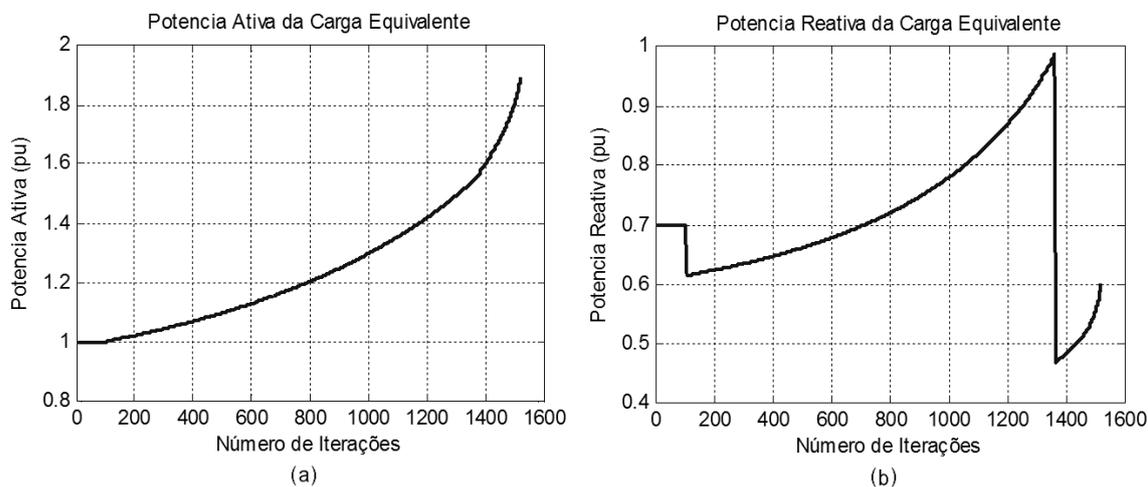
Figura 4.9 - Exemplificação da Metodologia 3.

Dessa forma, o resultado do cálculo da corrente equivalente da Figura 4.9 é:

$$i_k = \frac{S_{eq}^*}{\dot{V}_k^*} = \frac{[(P_2 + P_3) + j(Q_2 - Q_3)]^*}{\dot{V}_k^*}$$

Os resultados da simulação do comportamento das potências ativa e reativa da carga equivalente ao se utilizar a metodologia 3 são mostrados na Figura 4.10.

Esta simulação é realizada da mesma forma que na metodologia 2, onde é aumentada a carga da barra 6 do sistema da Figura 4.5(a) em 0,1% a cada iteração e gerado o equivalente de Thévenin visto da barra 5.



**Figura 4.10** - Simulação para o tipo de carga equivalente da Metodologia 3.

A potência ativa da carga equivalente, como pode ser vista na Figura 4.10(a), possui o mesmo comportamento que a mostrada na Figura 4.8(a). Isso porque o seu cálculo é idêntico em ambas as metodologias, ou seja, é a somatória das parcelas positivas de potência ativa de cada linha conectada à barra. Sendo assim, a explicação para tal comportamento também é a mesma utilizada para a figura da metodologia 2.

Já a Figura 4.10(b), que mostra o valor da potência reativa da carga durante a simulação, é bem diferente da apresentada na Figura 4.8(b). Como neste caso a potência reativa está vinculada à potência ativa, qualquer variação no sinal da parte real da potência circulante em cada linha, impacta no valor resultante da potência reativa da carga equivalente. Este comportamento é evidenciado no gráfico em dois instantes diferentes. No primeiro, em torno da iteração 100, tem-se a inversão do sentido da potência ativa na linha que conecta a barra 5 à barra 6, que antes estava indo em direção à 5 e depois passa a ir à 6. Com isso, toda a parcela reativa desta potência, que até então era considerada como fonte, passa a ser vista como carga para o equivalente. Como o valor da potência reativa que flui nesta linha é negativo, a mudança de sinal da parcela ativa implica a soma deste valor negativo à potência reativa total da carga equivalente, ocasionando sua diminuição. O segundo instante no qual se tem variação brusca no gráfico da Figura 4.10(b) é por volta da iteração 1350. Neste momento, agora é o fluxo de potência ativa circulante na linha que

conecta a barra 5 à barra 3 que tem seu sentido invertido. Da mesma forma que na primeira situação, ao mudar o sinal desta potência ativa de positivo para negativo, associa-se à carga equivalente a respectiva potência reativa, que neste caso também possui valor negativo, fazendo com que o valor resultante seja diminuído. Os valores finais para a potência ativa e reativa da carga equivalente são 1,879 p.u. e 0,601 p.u., respectivamente.

Pode-se concluir, então, com base nas simulações apresentadas nas Figuras 4.8 e 4.10, que as duas metodologias para a determinação da carga equivalente do circuito de Thévenin propostas nesta dissertação, apresentam características particulares quanto aos valores de potência reativa de  $S_{eq}$ . Tendo em vista que esta potência equivalente está presente na expressão que é obtida a corrente equivalente, equação (4.17), e que esta, por sua vez, é requisito para a determinação dos parâmetros de Thévenin, tais características afetam significativamente os resultados dos cálculos dos pontos de máximo carregamento de potência, cruciais na análise da estabilidade de tensão e no estudo de sua prevenção.

Portanto, é importante que sejam investigados de maneira minuciosa e detalhada quais são os impactos do uso de cada metodologia de determinação da carga equivalente no que se refere aos pontos de máxima transferência de potência gerados a partir do circuito de Thévenin.

## **4.5 EQUIVALENTE DE THÉVENIN UTILIZANDO AS METODOLOGIAS 2 E 3**

O objetivo maior do cálculo dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin é a possibilidade de se obterem, em tempo real, tanto o ponto de máximo carregamento da barra em monitoração quanto a distância, em potência ou porcentagem, deste ponto crítico em relação ao ponto atual de operação. A distância é o indicativo mais relevante para o operador, uma vez que lhe traz a informação fundamental de quão longe o sistema está do perigo.

Os subitens a seguir mostram a resposta de cada metodologia proposta nesta dissertação no que se refere aos cálculos dos máximos carregamentos.

### **4.5.1 ANÁLISE DO MÁXIMO CARREGAMENTO – METODOLOGIA 2**

Como mencionado anteriormente, a definição da carga equivalente que compõe o circuito de Thévenin é uma tarefa que exige extremo cuidado, uma vez que todos os

parâmetros deste circuito equivalente, como também, os resultados por ele gerados, são afetados de acordo com esta escolha.

Na Figura 4.11 são mostrados os resultados para a simulação quando se define como carga equivalente a somatória das potências ativas e reativas que fluem pela barra em monitoração. Esta simulação consiste em aumentar a carga da barra 6 da Figura 4.5(a) em 0,1% a cada iteração e gerar o equivalente visto da barra 5. Tendo em vista que esta simulação é a mesma realizada no item 4.4.2 desta dissertação, tanto os gráficos presentes na Figura 4.8 quanto todas as explicações referentes aos mesmos, podem ser atreladas ao entendimento dos resultados apresentados na Figura 4.11.

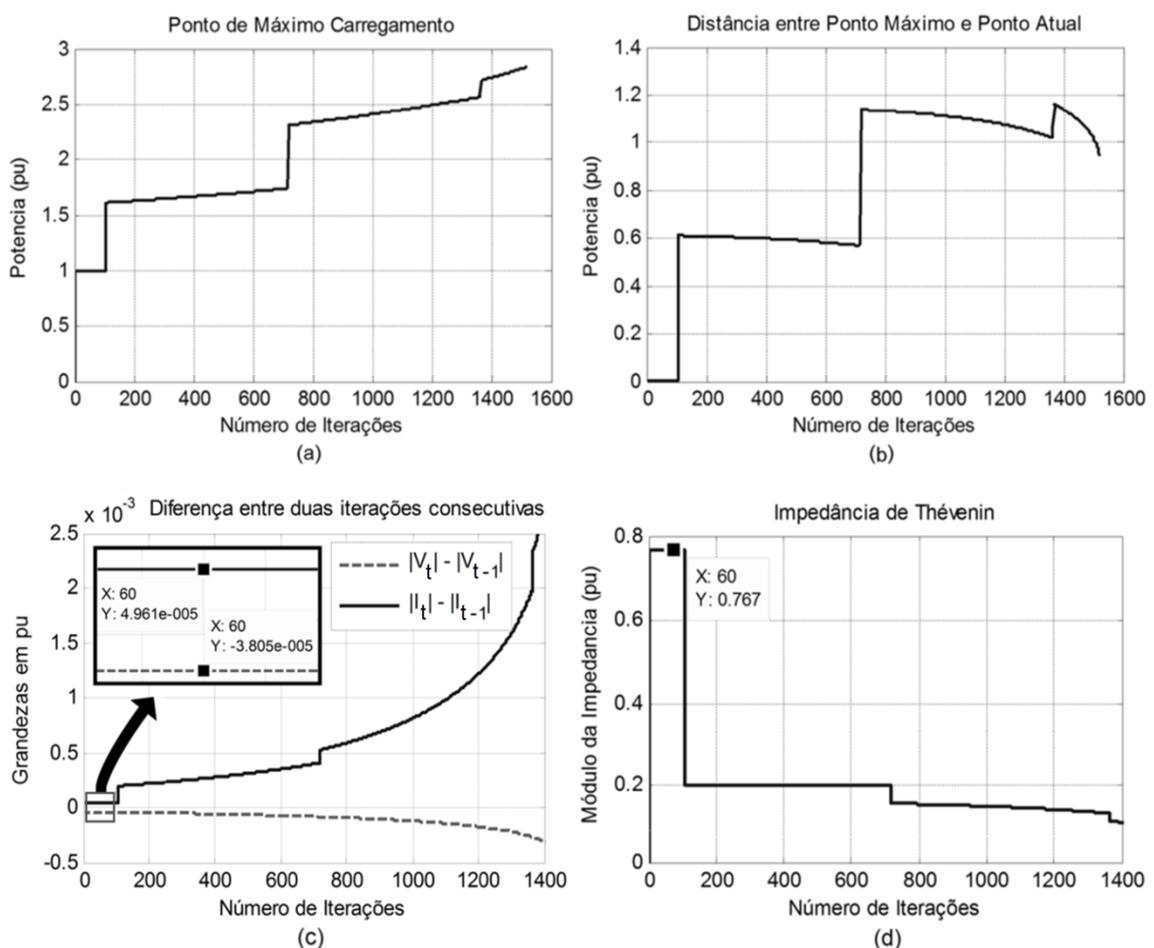


Figura 4.11 – Simulação para análise da resposta da Metodologia 2.

A Figura 4.11(a) mostra o resultado do comportamento do ponto de máxima transferência de potência ao longo das iterações de incremento de carga da barra. Primeiramente, pode-se notar neste gráfico que, com o aumento da carga do sistema, os

valores dos pontos de máxima transferência de potência passam a ser cada vez maiores. Era de se esperar que, mesmo com o crescimento da carga, o ponto de máxima transferência de potência tivesse um comportamento mais constante em torno de um valor. O que acontece é que a cada iteração, uma nova curva PV está associada ao sistema e, como a carga equivalente não mantém constante seu fator de potência, estas curvas se diferem umas das outras. Por isso, têm-se pontos de máximo carregamento diferentes no decorrer da simulação. É interessante observar que além desses valores não serem iguais, eles vão aumentando à medida que a carga cresce. Comportamento aparentemente estranho, para um sistema elétrico de potência, ter seu ponto de máxima transferência de potência aumentado à medida que a carga demanda mais potência da rede. Tal comportamento é explicado pelo fato do valor do módulo da impedância de Thévenin ir diminuindo com o passar das iterações, como se pode ver na Figura 4.11(d). Lembrando que, o ponto de máximo carregamento é alcançado quando o módulo da impedância da carga se iguala ao módulo da impedância da linha.

Observa-se, também, que o gráfico da Figura 4.11(a) apresenta grandes descontinuidades em três momentos distintos: iterações 100, 700 e 1350, aproximadamente. Estes “saltos” no valor da potência máxima são reflexos das variações bruscas ocorridas no valor do módulo da impedância de Thévenin. Basta observar no gráfico da Figura 4.11(d) que é possível notar claramente descontinuidades ocorridas exatamente nesses mesmos instantes.

A Figura 4.11(b) apresenta o cálculo da distância entre o ponto de máxima transferência de potência e o ponto atual de operação, que nada mais é que a subtração do ponto de máximo carregamento pela potência ativa da carga equivalente. Por este motivo, este gráfico também apresenta descontinuidades nas mesmas iterações que as citadas anteriormente. Um comportamento muito interessante é possível ser observado neste gráfico. Mesmo os valores dos pontos de máxima transferência de potência apresentados na Figura 4.11(a) terem seu valor aumentado com o acréscimo da carga, a distância entre estes pontos e o atual de operação sempre diminui, mostrando que o sistema, realmente, está indo de encontro ao seu máximo carregamento, salvo, é claro, nos momentos de descontinuidades. Vale comentar que, o fato da barra 6 atingir o ponto de MTP faz com que a simulação se encerre, mesmo o sistema equivalente estando distante do seu ponto de máximo carregamento.

Um fato curioso que pode ser notado nesse gráfico é que ele apresenta valor zero nas primeiras cem iterações da simulação, ou seja, para o equivalente o sistema se encontra de fato operando no seu ponto de máximo carregamento. Entretanto, esta

informação aparenta não ser verdadeira pelo seguinte motivo: após a carga equivalente aumentar sua potência demandada, como pode ser visto na Figura 4.8(a) por volta da iteração 100, o sistema simplesmente deixa de operar no ponto crítico para operar em outro ponto de forma a possuir, ainda, uma distância de 0,6 p.u. até o novo ponto crítico. Sabe-se que esse comportamento não condiz com uma situação real, uma vez que seria praticamente impossível a carga aumentar sua demanda já estando no ponto de máximo carregamento e conseguir operar em um outro ponto estável.

No gráfico da Figura 4.11(c) são mostradas duas curvas de diferenças: uma com a subtração do módulo da tensão atual pela do instante anterior; e a outra do módulo da corrente equivalente atual pela do instante anterior. De forma matemática, têm-se  $\Delta V = |V_t| - |V_{t-1}|$  e  $\Delta I = |I_t| - |I_{t-1}|$ , respectivamente. Nota-se, nesse gráfico, principalmente no da corrente, a presença, também, de três descontinuidades que ocorrem nas mesmas iterações citadas anteriormente: 100, 700 e 1350, aproximadamente. Tais “saltos” representam elevações bruscas no valor do módulo da corrente do circuito de Thévenin ocasionadas pelo comportamento da potência da carga equivalente nesses instantes, como mostrado na Figura 4.8 e explicado no item 4.4.2 desta dissertação.

É importante notar nessa figura a distinção dos sinais entre o gráfico de corrente e o de tensão. Esta diferença se dá pelo fato de que no decorrer do acréscimo da carga, o valor do módulo da corrente está sempre adquirindo valores maiores, por isso o seu sinal positivo, e o da tensão, valores menores, obtendo valor negativo.

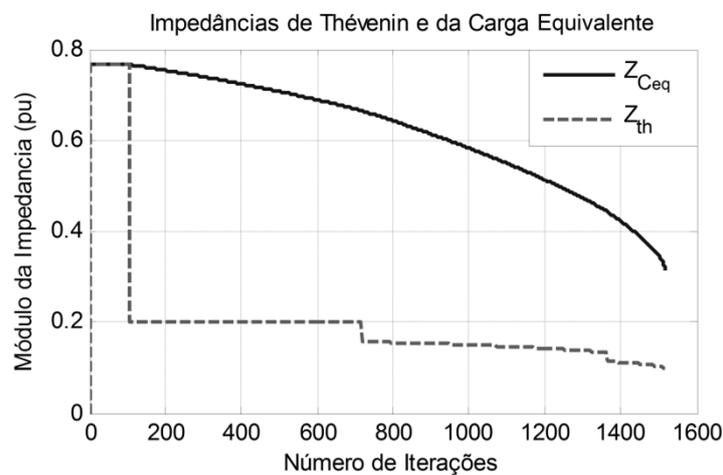
Ainda na Figura 4.11(c), pode ser observado um *zoom* da parte inicial da simulação mostrando as duas curvas de diferenças juntamente com o valor de cada uma delas na iteração 60. O objetivo dessas informações é exemplificar o uso da equação (4.16) que se refere ao cálculo da impedância de Thévenin como sendo o negativo da razão entre a diferença entre duas tensões e duas correntes, sobretudo explicar a razão de ocorrer as descontinuidades nos gráficos (a), (b) e (d) da Figura 4.11. Portanto, na Figura 4.11(c) têm-se os valores de  $4,961 \times 10^{-5}$  para a corrente e  $-3,805 \times 10^{-5}$  para a tensão e, de acordo com a equação (4.16), é obtido o valor de módulo de  $Z_{th}$ :

$$|Z_{th}| = Z_{th} = \left| -\frac{\Delta V}{\Delta I} \right| = \left| -\left( \frac{-3,805 \times 10^{-5}}{4,961 \times 10^{-5}} \right) \right| = 0,767 \text{ p. u.}$$

Percebe-se que esse valor calculado para o módulo da impedância de Thévenin é o mesmo apresentado na Figura 4.11(d) para a iteração de número 60. Sendo assim, é possível concluir que as variações bruscas ocorridas na corrente equivalente refletem tanto

no cálculo de  $Z_{th}$ , por meio da equação (4.16), como no da potência de máximo carregamento e distância entre esse ponto e o atual de operação. Outra conclusão é que o fato do módulo da impedância de Thévenin ir diminuindo no decorrer das iterações se deve ao valor da variação da corrente “ $\Delta I$ ” ser cada vez sempre maior que a variação de tensão “ $\Delta V$ ”.

Outro resultado para a mesma simulação da Figura 4.11 é apresentado na Figura 4.12, no qual mostra o comportamento do módulo da impedância da carga equivalente e da impedância de Thévenin ao longo da simulação.



**Figura 4.12** - Comportamento das impedâncias de Thévenin e da carga equivalente ao longo da simulação – Metodologia 2.

Na Figura 4.12 é possível perceber que, no decorrer do aumento de carga do sistema, o módulo da impedância da carga equivalente vai de encontro ao módulo da impedância de Thévenin. É importante notar que a simulação termina com o módulo de  $Z_{Ceq}$  bem distante do módulo de  $Z_{th}$ . Isso é explicado pelo fato de que como é aumentada a carga efetiva de uma barra diferente daquela onde se está gerando o equivalente de Thévenin, esta atinge o ponto de máximo carregamento primeiro do que da barra do circuito equivalente, fazendo com que o método de Newton-Raphson não convirja e a simulação seja interrompida. Outra observação que pode ser feita nesse gráfico é que ele mostra as impedâncias de Thévenin e da carga equivalente possuindo valores idênticos durante as primeiras cem iterações, ou seja, para o equivalente, o sistema já se encontra operando exatamente no ponto de máximo carregamento. Como discutido para a Figura 4.11(b), essa informação aparenta não ser verdadeira pelos mesmos motivos explicados anteriormente.

Durante essas primeiras iterações iniciais, nota-se também que a impedância da carga se mantém “quase” constante. Este comportamento é explicado pelo fato de que nessa fase inicial da simulação, a potência da carga equivalente se mantém fixa em  $1 + j0,7$  p.u. e a variação da tensão da barra é da ordem de grandeza de  $10^{-5}$ , como visto nas Figuras 4.8 e 4.11(c), respectivamente. Dessa forma, tem-se uma variação ínfima de  $Z_{C_{eq}}$ .

### 4.5.2 ANÁLISE DO MÁXIMO CARREGAMENTO – METODOLOGIA 3

Neste item, é realizada a mesma análise feita no item 4.5.1 desta dissertação, porém utilizando a Metodologia 3 para a determinação da carga equivalente. Lembrando que esta metodologia considera um fluxo de potência com parte real positiva representando uma carga e com parte real negativa representando uma fonte, Figura 4.9.

A Figura 4.13 mostra alguns resultados para uma simulação feita de forma idêntica à do item 4.4.3, ou seja, aumento de carga na barra 6 e equivalente realizado na barra 5.

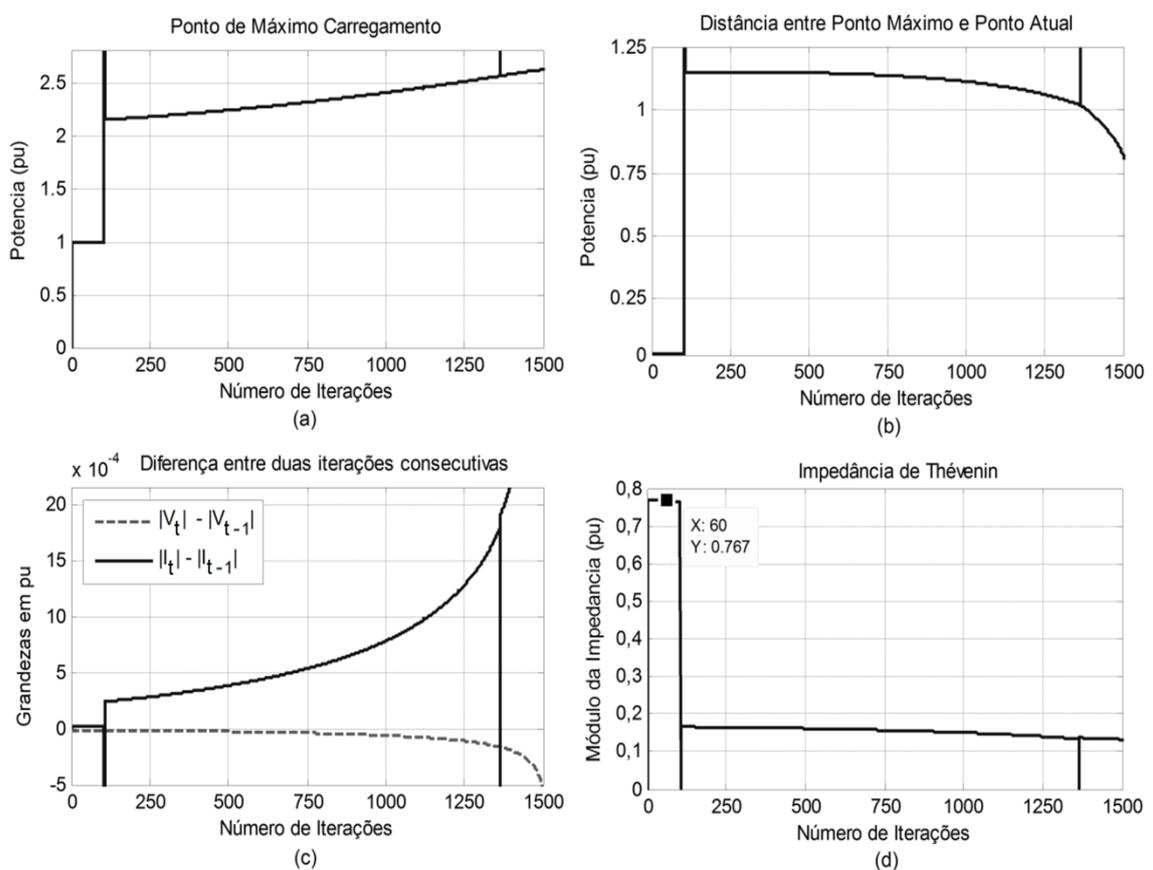


Figura 4.13 - Simulação para análise da resposta da Metodologia 3.

A Figura 4.13(a) mostra o comportamento dos pontos de máxima transferência de potência ao decorrer da simulação. Percebe-se que esses valores vão aumentando à medida que se tem o aumento da carga do sistema. A explicação para tal comportamento é a mesma utilizada para a Figura 4.11(a), ou seja, como os valores do módulo da impedância de Thévenin vão diminuindo durante o acréscimo de carga, isto implica curvas PV com pontos de máximo carregamento mais distantes e, conseqüentemente, mais capacidade de transferência de potência pelo sistema equivalente.

Percebe-se que há a presença de dois picos na Figura 4.13(a) nas iterações de número 100 e 1350, aproximadamente. Estes dois momentos acontecem pelo fato de que, como mencionado anteriormente, o cálculo do ponto de máxima transferência de potência está intimamente ligado ao comportamento da impedância de Thévenin e, como pode ser visto na Figura 4.13(d), nessas iterações o valor de  $Z_{th}$  assume praticamente o valor nulo. Dessa forma, como pode ser visto na equação (3.29), o cálculo desses pontos de máximo carregamento resulta em valores tendendo ao infinito.

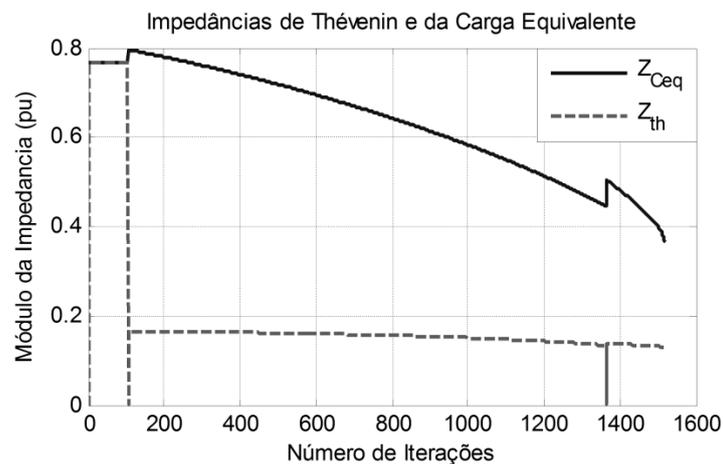
Na Figura 4.13(b), é possível observar que os picos mostrados da Figura 4.13(a) se propagaram, também, no cálculo da distância entre o ponto de máxima transferência de potência e o ponto atual de operação. Nota-se, da mesma forma que na Figura 4.11(b), que para as cem primeiras iterações tem-se uma distância nula entre o ponto de máximo carregamento e o atual de operação, ou seja, o circuito equivalente já se encontra no ponto crítico para a estabilidade de tensão. Pelo mesmo motivo exposto no item 4.5.1, o qual fala da impossibilidade de uma carga operar nesse ponto crítico e conseguir, após um aumento na sua demanda de potência, continuar operando em uma região estável, essa informação mostra-se aparentemente como falsa.

A Figura 4.13(c) apresenta as curvas de diferenças de tensão da barra monitorada e de corrente equivalente do circuito de Thévenin. Percebe-se que o gráfico de tensão, possui sinal negativo informando que esta grandeza diminui ao longo do aumento de carga. Já o de corrente, é sempre positivo, mostrando que ela aumenta no decorrer de toda a simulação, salvo nas iterações em que ocorrem os picos. Tais picos são ocasionados pela diminuição brusca da potência da carga equivalente, principalmente pela parte reativa da mesma, como pode ser visto na Figura 4.10. Nesses momentos, a diferença entre correntes equivalentes de duas iterações consecutivas adquire os valores de -0,05 p.u. para o primeiro pico e de -0,25 p.u. para o segundo pico. O sinal negativo de ambos comprova a diminuição da carga equivalente como causa desses picos. Lembrando que, nesse gráfico de diferenças, tanto para corrente como para a tensão, é feito o cálculo da subtração da grandeza da iteração atual pela anterior.

É mostrado na Figura 4.13(d) o comportamento do módulo da impedância de Thévenin no decorrer das iterações. Nesta figura, é possível notar que os valores de  $Z_{th}$  diminuem ao longo de toda a simulação. O motivo disto é o fato de que a variação da corrente equivalente se torna cada vez maior que a variação da tensão, como visto na Figura 4.13(c). Por conta disso e de que  $Z_{th}$  é calculado de acordo com a equação (4.16), tem-se, como consequência, a diminuição dos valores do módulo da impedância de Thévenin ao aumentar o carregamento do sistema.

Ainda na Figura 4.13(d), nota-se que é mostrado o valor que  $Z_{th}$  assume na iteração de número 60. Comparando-o com o valor apresentado na Figura 4.11(d), percebe-se que são valores iguais, ou seja, durante toda a fase inicial das duas simulações em que a potência da carga equivalente é a mesma potência da carga efetiva da barra em monitoração,  $1 + j0,7$  p.u., no caso da barra 5, as impedâncias de Thévenin de ambas as metodologias são idênticas. Somente depois da iteração 100, quando ocorrem variações nos sentidos dos fluxos de potência nas linhas é que essas impedâncias passam a assumir valores diferentes.

A Figura 4.14, a seguir, mostra o comportamento tanto do módulo da impedância de Thévenin, quanto da carga equivalente no decorrer do aumento de carga.



**Figura 4.14** - Comportamento da impedância de Thévenin e da carga equivalente ao longo da simulação – Metodologia 3.

É possível observar que o gráfico da Figura 4.14 possui algumas características semelhantes à apresentada na Figura 4.12. São elas: módulo da impedância da carga

equivalente indo de encontro ao módulo da impedância de Thévenin; término da simulação havendo uma distância considerável entre  $Z_{C_{eq}}$  e  $Z_{th}$ ; módulo de ambas as impedâncias possuindo valores idênticos nas cem primeiras simulações de forma a indicar, aparentemente, uma falsa operação do sistema no ponto crítico para a estabilidade de tensão; valores praticamente constantes para os módulos da impedância da carga equivalente e impedância de Thévenin na fase inicial da simulação. Dessa forma, podem ser atribuídas a essas semelhanças mencionadas, as mesmas explicações utilizadas para a Figura 4.12.

Uma característica é exclusiva desta simulação. Analisando o gráfico da evolução de  $Z_{C_{eq}}$  percebe-se que nos dois instantes em que o módulo da impedância de Thévenin assume praticamente o valor zero, o módulo da impedância da carga equivalente tem o seu valor aumentado, como visto nas iterações 100 e 1350, aproximadamente. A causa deste comportamento é a mesma que explica o valor quase nulo de  $Z_{th}$  nestas duas iterações. Como nestes dois momentos ocorrem reduções bruscas no valor da potência da carga equivalente, causando diminuições consideráveis na corrente equivalente, tem-se o aumento do valor calculado para o módulo de  $Z_{C_{eq}}$ , como mostrado pela equação (4.1). Isto porque a tensão da barra monitorada tem uma variação mais sutil nessas iterações em comparação com a sofrida pela corrente.

Após serem apresentadas de forma mais detalhada as características e particularidades das metodologias de determinação da carga equivalente propostas nesta dissertação, faz-se necessária, agora, uma comparação entre esses dois métodos de forma a apontar qual delas se mostra mais aplicável no estudo da estabilidade de tensão.

#### 4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DAS METODOLOGIAS 2 E 3

Foi visto no item anterior que a resposta do circuito equivalente de Thévenin quanto ao cálculo dos pontos de máximos carregamentos e, por consequência, da distância entre estes e os pontos atuais de operação, está fortemente atrelada ao modo como a potência da carga equivalente é determinada. Baseando-se nisso, é realizado neste item, um paralelo entre as duas metodologias de obtenção de  $S_{eq}$  propostas no presente trabalho, de forma a definir qual destas proporcionam resultados mais coerentes com o real comportamento do sistema elétrico.

Analisando-se os gráficos apresentados nas Figuras 4.11(a) e 4.13(a), que mostram o cálculo do ponto de máxima transferência de potência para cada configuração do sistema, é possível perceber comportamentos bastante distintos entre os mesmos.

O gráfico da Figura 4.11(a), o qual se refere à utilização da metodologia 2 de determinação da carga equivalente, exibe, ao longo de toda a simulação, três descontinuidades expressivas nos seus valores. Estas são causadas por alterações nos sentidos dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas conectadas à barra monitorada. Já o gráfico da Figura 4.13(a), referente ao uso da metodologia 3 e que também possui picos causados por inversões de fluxos de potência, apresenta um formato com variações mais suaves no decorrer do aumento de carga.

Essa mesma análise comparativa pode ser feita, também, entre as Figuras 4.11(b) e 4.13(b), no qual é apresentado o cálculo das distâncias entre o ponto de máximo carregamento e o ponto atual de operação, e entre as Figuras 4.11(d) e 4.13(d), onde é mostrado o módulo da impedância de Thévenin. Nas figuras em que é feito o uso da metodologia 2, Figura 4.11 (b) e (d), nota-se a presença de descontinuidades significativas durante a simulação. Já naquelas em que se utiliza a metodologia 3, Figura 4.13 (b) e (d), pode-se perceber que as variações se dão de forma gradual e uniforme.

Visando identificar qual metodologia apresenta resultados mais consistentes, torna-se importante analisá-los quanto à sua relação com o comportamento esperado do sistema elétrico que o circuito equivalente almeja representar.

As inversões nos sentidos das potências circulantes nas linhas, razão de todas as descontinuidades mostradas e discutidas anteriormente, ocorrem de forma gradual no sistema elétrico simulado. Ou seja, com o aumento da carga se fazendo de forma lenta, não há a presença de mudanças bruscas nos valores das grandezas elétricas pertencentes a esse sistema. E, realmente, é de esperar que o sistema elétrico no qual seu carregamento esteja aumentando uniformemente possua tal comportamento. Dessa forma, nota-se que as descontinuidades nos valores das potências de máximo carregamento presentes na Figura 4.11(a) não condizem com o estado em que o sistema se encontra. Por outro lado, a menos de uma descontinuidade localizada nas primeiras iterações da simulação, os gráficos mostrados na Figura 4.13 apresentam resultados mais coerentes com o funcionamento esperado do SEP em análise.

Do exposto acima, é plausível inferir que o uso da **Metodologia 3** para a determinação da carga equivalente presente no circuito de Thévenin se mostra mais

adequada para representar o comportamento do sistema elétrico de potência utilizado para as simulações.

Apesar de essas duas metodologias apresentarem essa diferença significativa entre elas, as mesmas possuem um comportamento idêntico quando há no sistema elétrico uma situação particular. Como pode ser visto nas Figuras 4.8 e 4.11, referentes à metodologia 2, e Figuras 4.10 e 4.13, referentes à metodologia 3, durante os momentos em que o valor da potência da carga equivalente se mantém constante e tem-se o aumento do carregamento do sistema, ambas as metodologias mostram resultados que indicam que o sistema equivalente de Thévenin já está operando no ponto crítico para a estabilidade de tensão. Como já abordado e discutido anteriormente, vale relembrar que tais resultados aparentam não ser verdadeiros.

#### **4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As análises técnicas do circuito equivalente de Thévenin apresentadas neste capítulo juntamente com os estudos sobre a sua aplicação, permitem observar que o uso do equivalente requer alguns cuidados. Como foi visto, os resultados fornecidos pelo método de Thévenin abordado neste trabalho são fortemente influenciados pelo critério de determinação da potência da carga equivalente.

Observou-se, também, que a metodologia 3 foi a que forneceu resultados mais consistentes com o comportamento esperado para o sistema elétrico no qual foram realizadas as simulações. Entretanto, esta metodologia apresentou informações que merecem ser investigadas de forma mais aprofundada, como por exemplo, aquelas que indicam que o sistema já se encontraria operando no ponto de máxima transferência de potência. Tal investigação é abordada detalhadamente no capítulo 5, visando o uso do equivalente de forma consistente na previsão do risco de perda de estabilidade de tensão.

# 5

## PROPOSTA PARA USO DO EQUIVALENTE NA DETECÇÃO DO PONTO DE INSTABILIDADE

### 5.1 INTRODUÇÃO

Os resultados obtidos com a utilização da metodologia 3 de determinação da carga equivalente se mostraram consistentes com o comportamento do SEP em análise, salvo em algumas situações particulares identificadas no capítulo 4.

Neste capítulo, é feito um estudo minucioso sobre o que provoca esse comportamento anômalo do equivalente, como também são propostos procedimentos que devem ser executados de forma a garantir que os resultados obtidos com a aplicação do circuito de Thévenin sejam os mais coerentes possíveis.

Analisando os resultados obtidos com a aplicação do equivalente de Thévenin, sobretudo quando é utilizada a metodologia 3, é levantada a seguinte questão: “Por que em determinadas situações o circuito equivalente mostra que o sistema já se encontra no ponto de máximo carregamento sem que ele esteja de fato?”. Para responder tal questionamento, é feita uma investigação no âmbito de uma análise matemática, aliada a simulações computacionais, objetivando o entendimento desse fenômeno.

Como resultado de toda esta intensa investigação, neste capítulo é apresentada uma Proposta para uso do Equivalente de Thévenin na Detecção do Ponto de Instabilidade. Tal proposta é descrita sob a forma de um “algoritmo básico”, que tem por objetivo tratar as informações provenientes do equivalente de Thévenin, visando torná-las aplicáveis na concepção de indicadores de risco de instabilidade, a serem apresentados aos operadores dos centros de operação em tempo real.

## 5.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

### 5.2.1 EQUACIONAMENTO BÁSICO

Com base na Figura 4.2, a expressão que calcula a potência ativa consumida pela carga equivalente é dada por:

$$P_{eq} = V_k \cdot I_k \cdot \cos(\theta_V - \theta_I) \quad (5.1)$$

Onde:

$P_{eq}$  → potência ativa da carga equivalente

$V_k$  → módulo da tensão da barra “k”

$I_k$  → módulo da corrente equivalente passa pela barra “k”

$\cos(\theta_V - \theta_I)$  ou  $\cos(\theta_C)$  → fator de potência da carga equivalente

Isolando a tensão na equação (5.1) e derivando a expressão resultante em relação à corrente, considerando que  $P_{eq}$  e  $\cos(\theta_C)$  não variam com a mesma, já que estão sendo analisados os momentos onde a carga equivalente é constante, têm-se as equação 5.2 e 5.3, respectivamente.

$$V_k = \frac{P_{eq}}{I_k \cdot \cos(\theta_C)} \quad (5.2)$$

$$\frac{dV_k}{dI_k} = - \left( \frac{P_{eq}}{\cos(\theta_C)} \right) \cdot \left( \frac{1}{I_k^2} \right) \quad (5.3)$$

Sabe-se que o módulo da potência aparente é dado pela equação (5.3).

$$|S_{eq}| = \left( \frac{P_{eq}}{\cos(\theta_C)} \right) \quad (5.4)$$

Assim, substituindo a equação (5.3) na (5.2), tem-se:

$$\frac{dV_k}{dI_k} = - \frac{|S_{eq}|}{I_k^2} \quad (5.5)$$

De acordo com a equação (4.15), a derivada da tensão em relação à corrente fornece o negativo da impedância de Thévenin. Pode-se observar que o módulo da equação (5.5) resulta no módulo da impedância da carga equivalente, como mostrado na equação (5.6).

$$\left| -\frac{S_{eq}}{I_k^2} \right| = |Z_{C_{eq}}| \quad (5.6)$$

Sendo assim, com base nas equações (4.15) e (5.6), tem-se que:

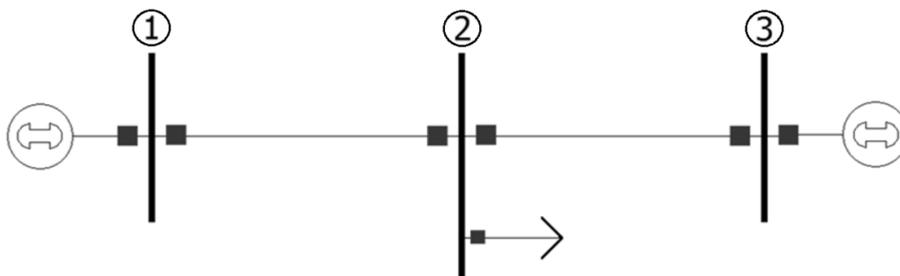
$$\left| \frac{dV_k}{dI_k} \right| = |Z_{th}| = |Z_{C_{eq}}| \quad (5.7)$$

Dessa forma, analisando a equação (5.7), pode-se concluir que em todos os momentos em que a potência da carga equivalente se mantiver inalterada e houver variações de tensão da barra em análise e de corrente que flui por ela, os cálculos do circuito equivalente de Thévenin resultarão em módulos iguais para  $Z_{th}$  e  $Z_{C_{eq}}$ . Assim, nesse momento, é considerado para o equivalente que o sistema já se encontra no ponto crítico para a estabilidade de tensão mesmo operando em um ponto distante do mesmo.

É importante lembrar que é necessário que haja variações tanto na tensão da barra quanto na corrente equivalente para que seja possível calcular os parâmetros do circuito de Thévenin, como mostrado na equação (4.16).

### 5.2.2 ANÁLISE I – CARGA EQUIVALENTE CONSTANTE

Para ilustrar a análise matemática descrita no item anterior, é realizada uma simulação utilizando o sistema de três barras mostrado na Figura 5.1. A simulação consiste em aumentar gradativamente a geração de potência ativa da barra 3 em 0,1% a cada iteração e manter inalterada a carga efetiva da barra 2. Assim, é forçada uma carga equivalente constante no valor de  $1 + j0,7$  p.u., bem como variações na tensão e corrente equivalente na barra 2, estas ocasionadas pela alteração da geração e, conseqüentemente, pelos fluxos de potência nas linhas.



**Figura 5.1** - Sistema de três barras – Simulação com aumento somente de geração.

O circuito equivalente de Thévenin é criado a partir da barra 2 e são realizadas 600 iterações de aumento de geração. Os resultados para a simulação são mostrados na Figura 5.2 e os parâmetros do sistema simulado são apresentados no ANEXO II desta dissertação.

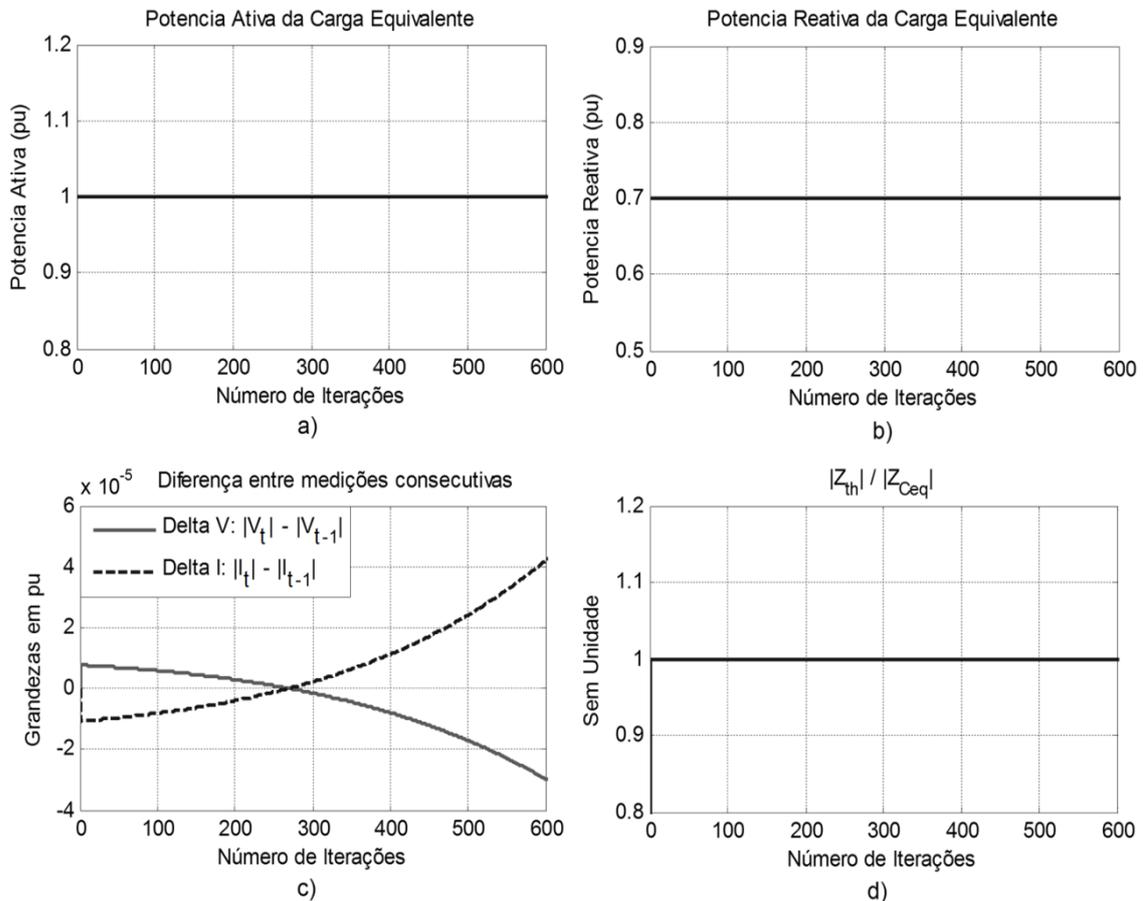


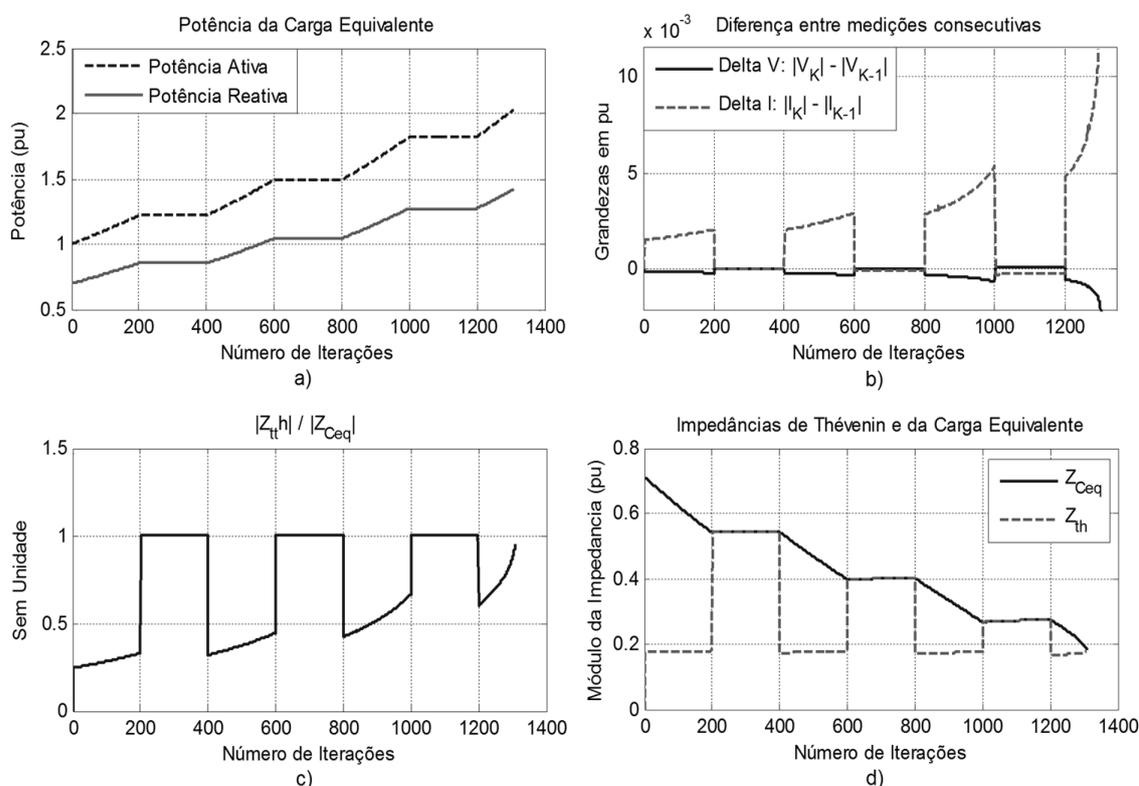
Figura 5.2 - Resultados da simulação para o sistema de 3 barras.

Os resultados apresentados na Figura 5.2 mostram que, quando as potências ativa e reativa da carga equivalente são mantidas constantes, Figuras 5.2 (a) e (b), e ocorrem variações na tensão da barra monitorada e na corrente que passa por ela, Figura 5.2(c), os **módulos das impedâncias** de Thévenin e da carga equivalente são **iguais**, possuindo uma razão unitária entre elas, Figura 5.2(d).

Tal comportamento das impedâncias pode também ser visualizado, a título de ilustração, nas Figuras 4.12 e 4.14. Nelas pode ser observado que, durante todo o instante onde se tem carga equivalente constante, os módulos de  $Z_{th}$  e  $Z_{Ceq}$  são idênticos.

### 5.2.3 ANÁLISE II – VARIAÇÃO ALTERNADA DA GERAÇÃO E DA CARGA

Outra simulação é realizada utilizando o sistema de três barras da Figura 5.1 com o intuito de exemplificar a equação (5.6). Porém, dessa vez, é feita uma alternância entre os aumentos de potência de geração e de demanda da carga. A simulação consiste em aumentar a carga efetiva da barra 2 em 0,1% a cada iteração durante 200 iterações e, em seguida, parar de incrementar a carga e iniciar o aumento de geração da barra 3 em 0,1% a cada iteração, também durante as próximas 200 iterações. Sendo assim, a cada 200 iterações ora é aumentada a carga, ora é aumentada a geração. Os resultados para essa simulação são mostrados na Figura 5.3.



**Figura 5.3** - Resultados para a simulação com alternância de aumento de potência.

A Figura 5.3(a) mostra os valores das potências ativa e reativa da carga equivalente ao longo da simulação. Percebe-se que durante um período de 200 iterações, ora ela é aumentada, ora ela permanece inalterada. Nos instantes onde a carga é constante, a potência de geração é aumentada, uma vez que é possível observar que mesmo não havendo incremento da carga há variações das tensões da barra em análise e das correntes que passam por ela, Figura 5.3(b).

A Figura 5.3(c) apresenta a razão entre a impedância de Thévenin e a impedância da carga equivalente. Nota-se que durante todos os intervalos em que a carga permanece invariante, a razão das impedâncias é unitária, ou seja, nestas iterações o cálculo do equivalente de Thévenin resulta em módulos idênticos para as impedâncias  $Z_{th}$  e  $Z_{C_{eq}}$ . Essa mesma observação pode ser feita analisando o gráfico da Figura 5.3(d). Outra importante observação que pode ser feita da Figura 5.3(c) é que o gráfico tende ao valor 1 quando o sistema vai se aproximando do ponto de máximo carregamento.

Esse comportamento da razão entre as impedâncias ser unitário só acontece em situações quando a carga equivalente do circuito de Thévenin for a mesma que a carga efetiva da barra em análise. Isto porque, como visto anteriormente, a igualdade entre os módulos de  $Z_{th}$  e  $Z_{C_{eq}}$ , a menos do ponto de MTP, só acontece quando a carga equivalente se mantém constante mesmo havendo variações de tensão da barra.

Quando a carga equivalente é composta pela carga efetiva da barra monitorada mais uma parcela de potência que flui em direção a uma outra barra, mesmo não havendo incremento de carga no sistema, a potência da carga equivalente não se mantém constante, já que a variação da tensão da barra monitorada e da corrente que passa por ela, altera o valor do fluxo de potência que flui em direção a outra barra. Entretanto, como nestes casos a variação nos valores de tensão e corrente é relativamente pequena, da ordem de  $10^{-5}$  p.u. (Figura 5.2(c)), a potência da carga equivalente também sofre pequenas alterações, fazendo com que a razão entre as impedâncias forneça um valor próximo do unitário. O desenvolvimento matemático a seguir descreve esse comportamento.

Derivando a equação (5.2) em relação à corrente, mas considerando agora que tanto a potência ativa  $P_{eq}$  quanto o fator de potência da carga equivalente  $\cos(\theta_C)$  não sejam constantes, ou seja, que ambos variem com  $I_k$ , tem-se a equação (5.8).

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \frac{dP_{eq}}{dI_k} \cdot \frac{1}{I_k \cdot \cos(\theta_C)} + P_{eq} \left[ \left( -\frac{1}{I_k^2 \cdot \cos(\theta_C)} \right) + \left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(\cos(\theta_C)^{-1})}{dI_k} \right) \right] \quad (5.8)$$

Efetuada as multiplicações na equação (5.8) e posteriormente a rearranjando, é obtida a equação (5.9).

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \frac{dP_{eq}}{dI_k} \cdot \frac{1}{I_k \cdot \cos(\theta_C)} + \frac{d(\cos(\theta_C)^{-1})}{dI_k} \cdot \frac{P_{eq}}{I_k} - \frac{P_{eq}}{I_k^2 \cdot \cos(\theta_C)} \quad (5.9)$$

Substituindo a equação (5.4) na (5.9), tem-se:

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \frac{dP_{eq}}{dI_k} \cdot \frac{1}{I_k \cdot \cos(\theta_C)} + \frac{d(\cos(\theta_C)^{-1})}{dI_k} \cdot \frac{P_{eq}}{I_k} - \frac{|S_{eq}|}{I_k^2} \quad (5.10)$$

Rearranjando a equação (5.10), obtém-se:

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(P_{eq} \cdot \cos(\theta_C)^{-1})}{dI_k} \right) - \frac{|S_{eq}|}{I_k^2} \quad (5.11)$$

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(|S_{eq}|)}{dI_k} \right) - \frac{|S_{eq}|}{I_k^2} \quad (5.12)$$

Dessa forma, a equação (5.12) se assemelha à equação (5.5) a menos da parcela

$$\left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(|S_{eq}|)}{dI_k} \right) \quad (5.13)$$

Na situação em que o módulo da carga equivalente for constante,  $\frac{d(|S_{eq}|)}{dI_k} = 0$ , ambas as equações se tornam idênticas. Do contrário, a parcela apresentada na equação (5.13) tende a diminuir o valor da impedância de Thévenin quanto maior for a sua variação com relação à corrente. Essa mesma análise matemática iniciada na equação (5.1) para a potência ativa da carga equivalente  $P_{eq}$  pode ser feita, também, para a potência reativa  $Q_{eq}$ . Nesse desenvolvimento são executados os mesmos passos realizados para a potência ativa já considerando que tanto a potência reativa quanto o fator  $\text{sen}(\theta_C)$  variam com a corrente.

$$Q_{eq} = V_k \cdot I_k \cdot \text{sen}(\theta_C) \quad (5.14)$$

$$V_k = \frac{Q_{eq}}{I_k \cdot \text{sen}(\theta_C)} \quad (5.15)$$

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \frac{dQ_{eq}}{dI_k} \cdot \frac{1}{I_k \cdot \text{sen}(\theta_C)} + Q_{eq} \left[ \left( -\frac{1}{I_k^2 \cdot \text{sen}(\theta_C)} \right) + \left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(\text{sen}(\theta_C)^{-1})}{dI_k} \right) \right] \quad (5.16)$$

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \frac{dQ_{eq}}{dI_k} \cdot \frac{1}{I_k \cdot \text{sen}(\theta_C)} + \frac{d(\text{sen}(\theta_C)^{-1})}{dI_k} \cdot \frac{Q_{eq}}{I_k} - \frac{Q_{eq}}{I_k^2 \cdot \text{sen}(\theta_C)} \quad (5.17)$$

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \frac{dQ_{eq}}{dI_k} \cdot \frac{1}{I_k \cdot \text{sen}(\theta_C)} + \frac{d(\text{sen}(\theta_C)^{-1})}{dI_k} \cdot \frac{Q_{eq}}{I_k} - \frac{|S_{eq}|}{I_k^2} \quad (5.18)$$

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(Q_{eq} \cdot \text{sen}(\theta_c)^{-1})}{dI_k} \right) - \frac{|S_{eq}|}{I_k^2} \quad (5.19)$$

$$\frac{dV_k}{dI_k} = \left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(|S_{eq}|)}{dI_k} \right) - \frac{|S_{eq}|}{I_k^2} \quad (5.20)$$

De forma análoga, a equação (5.20) se assemelha à equação (5.5) a menos da mesma parcela apresentada na equação (5.13):

$$\left( \frac{1}{I_k} \cdot \frac{d(|S_{eq}|)}{dI_k} \right) \quad (5.21)$$

A demonstração matemática apresentada tem como objetivo mostrar, de forma independente tanto para a potência ativa quanto para a reativa, que, para o módulo de  $Z_{th}$  ser idêntico ao de  $Z_{C_{eq}}$ , basta que o módulo da potência da carga equivalente seja constante quando se têm variações de tensão da barra e da corrente que flui por ela.

#### 5.2.4 ANÁLISE III – POTÊNCIA CONSUMIDA PELA CARGA NÃO CONSTANTE

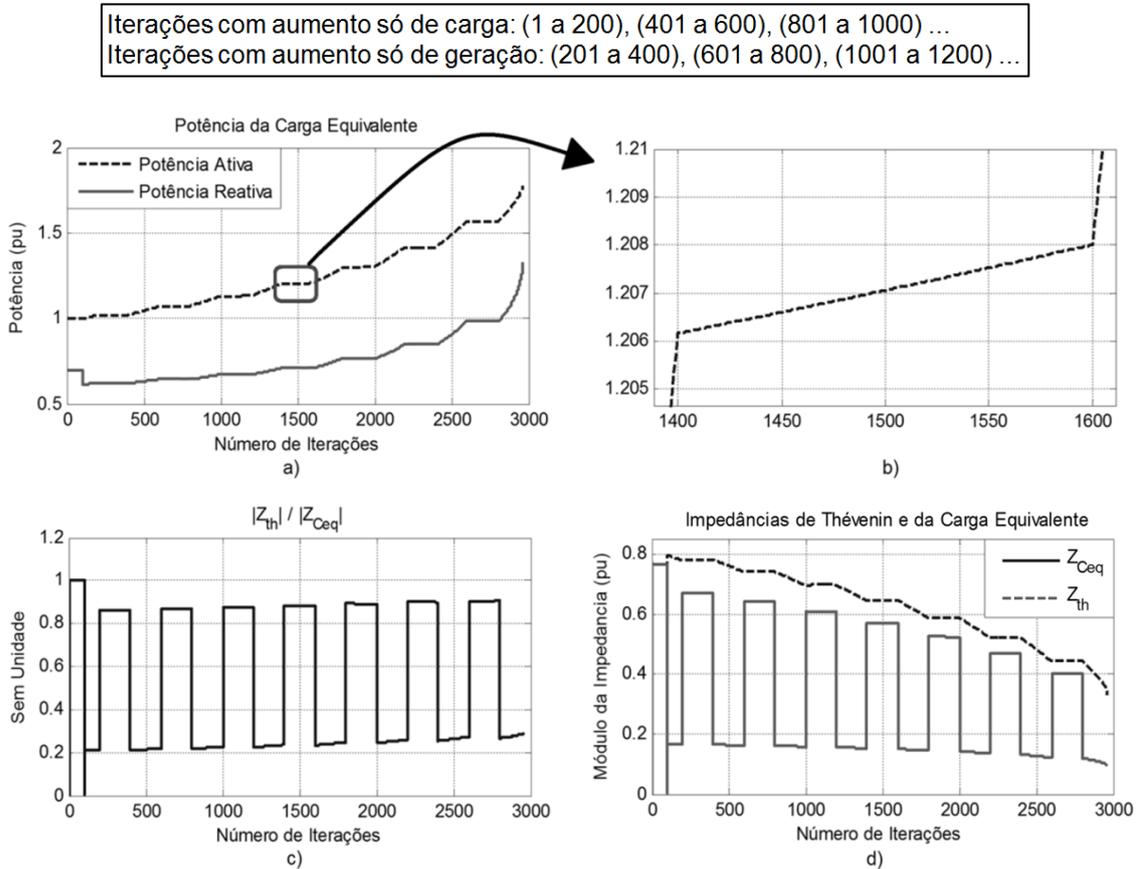
O comportamento das impedâncias de Thévenin e da carga equivalente quando a potência consumida por  $Z_{C_{eq}}$  não é constante é exemplificado com a simulação a seguir. Esta utiliza o sistema de seis barras mostrado na Figura 4.5(a) e consiste em gerar o circuito equivalente visto da barra 5 fazendo o incremento de carga na barra 6 de 0,1% a cada iteração. O aumento de geração é feito nas barras 1 e 3 no valor de 0,1% a cada iteração. Vale ressaltar que a geração na barra 2 não é alterada pois ela é a barra *Slack*<sup>16</sup> do programa de fluxo de potência. Os resultados da presente simulação são mostrados na Figura 5.4. O quadro localizado na parte superior da figura sintetiza a dinâmica do aumento de carga/geração.

A Figura 5.4(a) mostra os valores das potências ativa e reativa da carga equivalente no decorrer da simulação. É possível ver patamares aparentemente constantes tanto na curva de potência ativa quanto na de reativa. Entretanto, aplicando um *zoom* em um patamar referente à potência ativa, localizado entre as iterações de número 1400 e 1600, como apresentado na Figura 5.4(b), percebe-se que este varia de forma relativamente

---

<sup>16</sup> A barra *Slack* em um programa de fluxo de potência é aquela responsável pelo fechamento do balanço de potência do sistema em análise. Dessa forma, não é permitido ao usuário estipular a potência de geração da mesma.

pequena no intervalo mencionado. Como já explicado anteriormente, estas variações sutis são ocasionadas pelas alterações nos valores de tensão e de corrente da barra em análise.



**Figura 5.4** - Resultados para simulação onde não se tem potência constante.

Na Figura 5.4(c) são apresentados os valores da razão entre  $Z_{th}$  e  $Z_{Ceq}$ . Nota-se que, inicialmente, mesmo havendo o incremento da carga do sistema, a razão entre estas impedâncias possui valor unitário. Isso é explicado pelo fato de que no começo da simulação, a carga equivalente é a própria carga efetiva da barra 5, ou seja, todas as linhas estão suprindo essa carga. Com isso, tanto  $P_{eq}$  quanto  $Q_{eq}$  se mantêm constantes durante, aproximadamente, as primeiras 100 iterações. Após esse momento, o fluxo de potência ativa fornecida pela barra 6 tem o seu sentido invertido, fazendo com que a carga equivalente seja composta pela carga efetiva da barra 5 mais este excedente consumido pela barra 6. Por essa razão, durante todos os outros intervalos que se tem somente o aumento de geração, a razão entre  $Z_{th}$  e  $Z_{Ceq}$  é próxima de 1, e não exatamente o valor unitário como no caso anterior, Figura 5.3(c).

A Figura 5.4(d) ilustra a discussão realizada referente à Figura 5.4(c), onde é mostrado o comportamento dos módulos das impedâncias de Thévenin e da carga equivalente, separadamente, no decorrer da simulação. Na Figura 5.4(d), é observado que ambas as impedâncias possuem módulos idênticos durante as primeiras iterações e que, depois disso, passam a ter valores razoavelmente próximos nos instantes onde se tem somente aumento de geração.

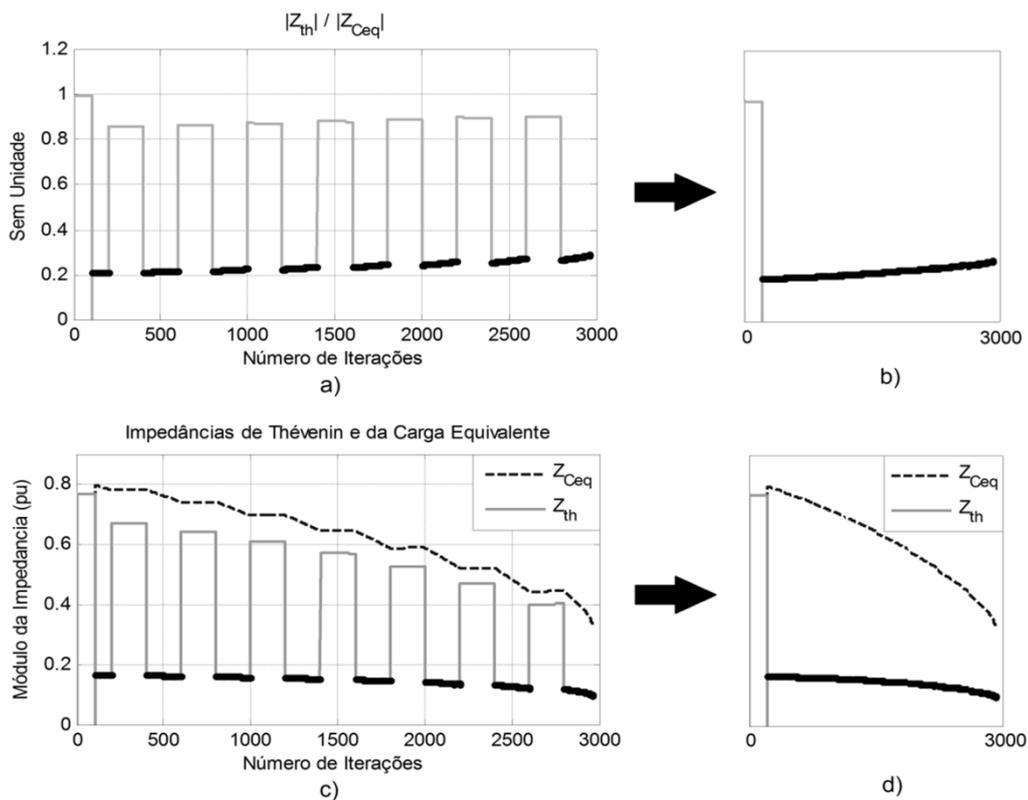
### 5.3 PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DO EQUIVALENTE DE THEVENIN NA IDENTIFICAÇÃO DO RISCO DE INSTABILIDADE

Após a investigação e o entendimento do porquê dos resultados do circuito equivalente de Thévenin se mostrarem, de certa forma, inconsistentes, principalmente no que se diz respeito às impedâncias  $Z_{th}$  e  $Z_{C_{eq}}$ , torna-se imprescindível verificar sua aplicação prática na detecção de risco de perda de estabilidade de tensão.

No que diz respeito à operação em tempo real dos SEP, é fundamental que o ponto de operação atual, bem como a sua distância ao ponto crítico, sejam indicados ao operador de forma suficientemente confiável.

Neste contexto, este capítulo apresenta uma proposta de como tratar as informações obtidas com o uso do equivalente de Thévenin, sobretudo nos momentos onde não se tem alteração na carga do sistema, de forma a torná-las corretamente aplicáveis na identificação da perda da estabilidade de tensão do sistema elétrico.

Como auxílio para introduzir tal proposta, são apresentados na Figura 5.5 os gráficos das Figuras 5.4 (c) e (d), evidenciando apenas as partes referentes aos intervalos onde há o aumento da carga. Nesta figura, são sinalizados de preto os valores relativos aos instantes nos quais somente é aumentada a potência da carga. É importante ressaltar que os valores referentes às primeiras cem iterações da simulação não são sinalizadas devido ao fato de que, mesmo pertencendo ao intervalo de aumento de carga, a carga equivalente do sistema permanece contínua nestes instantes, fazendo com que os módulos das impedâncias de Thévenin e da carga equivalente sejam idênticos.



**Figura 5.5** - Resultados para auxiliar a introdução da proposta do uso do equivalente.

Observando a Figura 5.5(a), é possível notar que os valores assinalados de preto parecem fazer parte de uma curva a qual possui um comportamento aparentemente contínuo. Excluindo do gráfico os intervalos referentes aos instantes onde é feito apenas o aumento de geração, é obtida a Figura 5.5(b), na qual tal comportamento é melhor visualizado. Com estes intervalos retirados, nota-se que a curva em preto mostra, realmente, uma característica contínua, apontando para o fato que nesses momentos o circuito equivalente de Thévenin está conseguindo representar o sistema elétrico.

Nessa mesma direção, são apresentadas as Figuras 5.5 (c) e (d) contendo os resultados da simulação para as impedâncias de Thévenin e da carga equivalente. Novamente, nota-se um comportamento tendendo a uma curva contínua para as partes em preto na Figura 5.5(c), o qual é melhor evidenciado na Figura 5.5(d).

Objetivando uma aplicação consistente do circuito de Thévenin, no qual se espera obter através deste, resultados coerentes com o comportamento do sistema, é de suma importância para a operação do sistema elétrico que os valores inconsistentes sejam tratados. Além disso, é fundamental que durante essas situações sejam apresentadas ao operador informações que representem o estado real do SEP.

A proposta do algoritmo para resolver esse problema parte da ideia de que nos momentos onde não se tem aumento de carga do sistema, ou seja, potência consumida constante, a configuração do sistema elétrico também permanece inalterada. Dessa forma, é aceitável afirmar que, por conta desta constância de carga, os valores dos parâmetros do circuito de Thévenin continuam sendo os mesmos. Sendo assim, é **sugerido** que nos instantes onde o SEP possui tal comportamento sejam utilizados os valores dos parâmetros de Thévenin calculados na última vez em que a carga do sistema foi alterada.

Para isso, é necessário que o algoritmo do circuito equivalente seja capaz de detectar os momentos onde não se tem aumento de carga no sistema de forma que o mesmo possa parar de calcular os parâmetros e passe a mostrar o último conjunto de parâmetros calculado. Isso é feito até o próximo momento em que a carga sofre alteração, no qual o algoritmo deixa de utilizar os valores antigos e volta a calculá-los novamente.

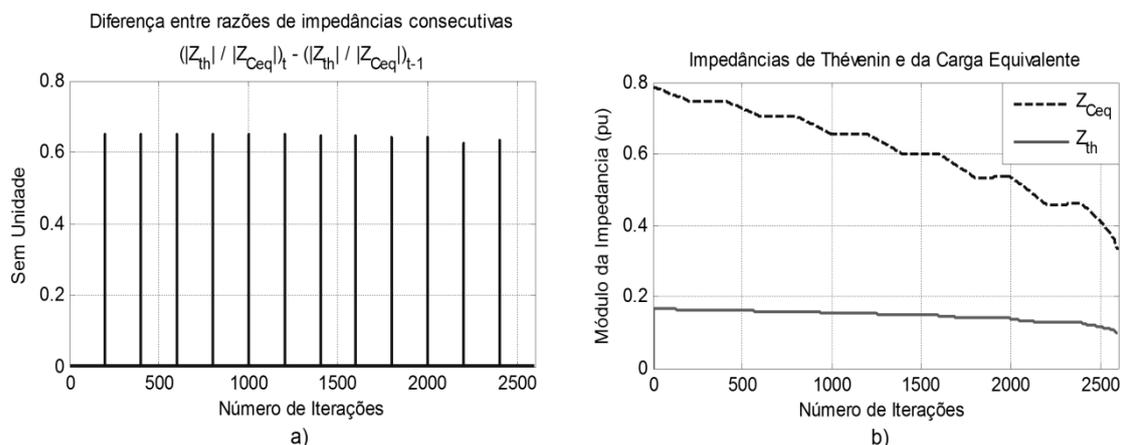
O método escolhido neste trabalho para executar tal detecção propõe utilizar, como indicador, a diferença entre as razões dos módulos da impedância de Thévenin ( $Z_{th}$ ) e da carga equivalente ( $Z_{C_{eq}}$ ) da iteração atual “t” e da iteração anterior “t-1”, como apresentado na equação (5.22). Através da Figura 5.4(c), pode-se notar que, nos momentos de transição entre os intervalos de geração de energia e os de aumento de carga, os valores para essa razão de impedâncias variam significativamente, tornando-se bons indicadores para tal função.

$$\left( \frac{|Z_{th}|}{|Z_{C_{eq}}|} \right)_t - \left( \frac{|Z_{th}|}{|Z_{C_{eq}}|} \right)_{t-1} \quad (5.22)$$

Com a finalidade de ilustrar a utilização dessa proposta, é realizada a mesma simulação apresentada na Figura 5.4. Como essa simulação se inicia fornecendo valores inconsistentes para as cem primeiras iterações, já que a carga equivalente se mantém constante durante esse período, tal intervalo será desconsiderado nesta nova simulação. Devido ao fato de se tratar da fase inicial da simulação, não há valores previamente calculados para os parâmetros de Thévenin para serem utilizados, provocando uma falha na execução do algoritmo proposto. Os resultados desta simulação referentes ao indicador e às curvas das impedâncias do circuito equivalente são mostrados na Figura 5.6.

Pela Figura 5.6(a), nota-se que nos momentos onde há a mudança de comportamento do sistema elétrico, tal indicador possui valores significativamente maiores que nos instantes entre as transições, tornando-os úteis para esta função. Foi utilizado, na presente simulação, o valor de 0,15 para indicar que realmente houve a mudança de

comportamento do sistema. Este valor de referência foi adotado com base nas simulações realizadas, devendo ser ajustado de acordo com as características do sistema sob análise.

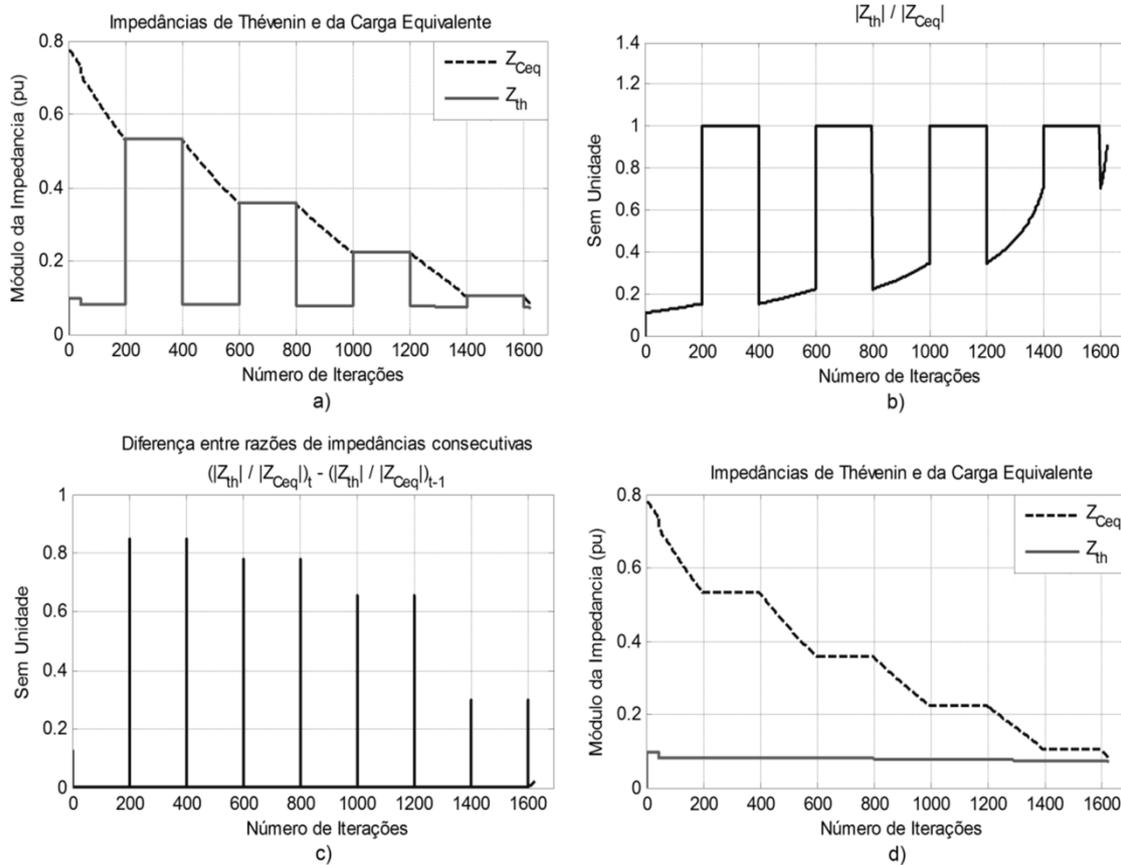


**Figura 5.6** - Resultados da simulação para a proposta de uso do equivalente.

Na Figura 5.6(b) são mostradas as curvas para o módulo das impedâncias de Thévenin e da carga equivalente já apresentando as correções nos valores de  $Z_{th}$  quando utilizado o indicador da Figura 5.6(a). Pode-se observar que a curva referente à impedância de Thévenin adquire uma forma mais condizente com o comportamento esperado do SEP, representando-o de maneira mais fidedigna.

Outra situação é apresentada neste trabalho com o objetivo de ilustrar a aplicação da razão das impedâncias para detecção de transições entre aumento e constância da carga. Agora, é simulado o aumento da carga sendo feito na própria barra monitorada, ou seja, naquela onde é gerado o circuito equivalente. Dessa forma, têm-se resultados onde a carga equivalente atinge, praticamente, a impedância de Thévenin, possibilitando analisar com mais rigor a aplicação desta proposta. Tal simulação consiste em aumentar tanto a carga efetiva da barra 5 quanto a geração nas barras 1 e 3 em 0,15% a cada iteração, porém em intervalos distintos espaçados de 200 iterações, como realizado anteriormente na Figura 5.4. O circuito de Thévenin é gerado a partir da barra 5. Os resultados são exibidos na Figura 5.7.

Iterações com aumento só de carga: (1 a 200), (401 a 600), (801 a 1000) ...  
 Iterações com aumento só de geração: (201 a 400), (601 a 800), (1001 a 1200) ...

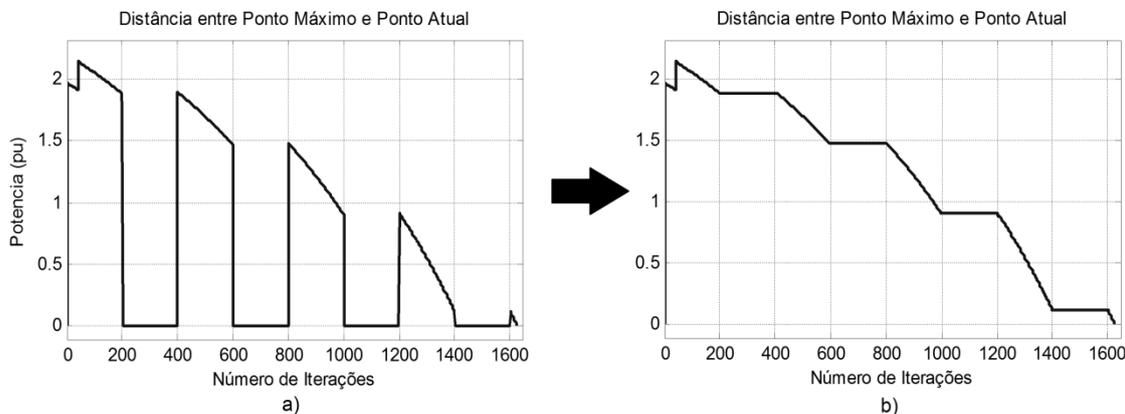


**Figura 5.7** - Resultados para aumento de carga na mesma barra do equivalente.

A Figura 5.7 apresenta os resultados em uma sequência “cronológica” do que é proposto neste capítulo. Na Figura 5.7(a) têm-se os resultados para os módulos de  $Z_{th}$  e  $Z_{Ceq}$  antes de serem tratados, onde podem ser vistos os instantes nos quais os módulos são idênticos. Com os valores já calculados para estas impedâncias, é obtida a razão entre elas, como mostrado na Figura 5.7(b). Em seguida, como indicado na Figura 5.7(c), calcula-se a diferença entre tais razões a fim de se determinar os pontos de transição. Nesta simulação, da mesma forma que na simulação anterior, foi definido o valor de 0,15 para detectar as transições ocorridas. E, por último, é mostrado na Figura 5.7(d), o gráfico da impedância de Thévenin com seus valores já corrigidos.

O algoritmo de tratamento dos dados provenientes do circuito equivalente pode ser utilizado, também, para outras grandezas além da impedância de Thévenin. A Figura 5.8

ilustra a aplicação deste para o cálculo da distância entre o ponto de máximo carregamento e o ponto atual de operação para a mesma simulação apresentada na Figura 5.7.



**Figura 5.8** - Distância entre o ponto de máximo carregamento e o ponto atual de operação com valores já corrigidos.

A Figura 5.8(a) apresenta os valores calculados para a distância entre o ponto crítico para estabilidade de tensão e o ponto atual de operação sem ter sido realizada a correção dos mesmos. Nota-se que, nos intervalos onde a carga da barra 5 se mantém constante, tal distância possui valor nulo, indicando que o sistema está operando no seu limite de transferência de potência. Já na Figura 5.8(b), são mostradas as informações presentes no gráfico da letra (a) após terem sido tratadas.

É possível observar um pequeno salto localizado, aproximadamente, na iteração de número 50. Tal aumento nesse valor de distância é ocasionado pela diminuição da impedância de Thévenin, como pode ser visualizado na Figura 5.7 (a) ou (d). Com a redução no valor de  $Z_{th}$ , mais potência pode ser transferida pelo circuito equivalente, fazendo com que o ponto de máxima transferência de potência tenha seu valor aumentado, conforme detalhado no capítulo 4.

## 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aliando as análises elaboradas neste capítulo àquelas do capítulo anterior, pode-se perceber claramente a importância de se investigarem os equivalentes de redes, antes de aplicá-los diretamente nos estudos do comportamento do SEP.

Os estudos realizados associaram o desenvolvimento matemático próprio dos equivalentes, como forma de identificar o porquê de suas respostas, ao comportamento esperado do SEP por eles representado.

Apesar das respostas inicialmente obtidas terem se mostrado aparentemente inconsistentes, a investigação detalhada e criteriosa levou à identificação de tendências de comportamento das grandezas envolvidas, mostrando a potencialidade do uso dos equivalentes.

A proposta apresentada neste capítulo abre a possibilidade de aplicação dos equivalentes na concepção de indicadores de risco de instabilidade de tensão a serem utilizados em tempo real, aplicando dados dos SMFS. Sugere-se que se faça a utilização da distância entre o ponto de máximo carregamento e o ponto atual de operação como forma de monitoramento deste risco e prevenção contra a perda da estabilidade de tensão.

Dentre as pesquisas que vêm sendo realizadas pela equipe do LRC/UFMG relacionados ao uso de equivalentes na previsão do risco de instabilidade de tensão, encontra-se a dissertação [SILVA,10]. Nesta referência, é proposto um índice de proximidade com relação à distância do ponto de operação atual do SEP e a Margem de Segurança de Tensão estipulada pelo ONS. A proposta apresentada nesta dissertação poderia ser implementada na formulação desenvolvida na referência citada, integrando os desenvolvimentos.

# 6

## CONCLUSÕES E CONTINUIDADE

A literatura apresenta trabalhos relacionados ao uso de Equivalentes de Redes na identificação do ponto de máxima transferência de potência. Praticamente todos partem dos mesmos conceitos básicos relacionados à análise estática e ao uso das curvas PV.

Entretanto, quando os equivalentes são investigados sob a ótica do resultado que apresentam com relação ao comportamento do SEP, nem sempre se mostram consistentes. Soluções matematicamente corretas muitas vezes escondem respostas que representam condições peculiares que requerem atenção. Utilizá-las diretamente pode levar a erros na operação do sistema.

Nos estudos realizados nesta dissertação, foi levantado todo o potencial dos equivalentes de redes para as análises de estabilidade de tensão em tempo real. Seus pontos positivos foram identificados, bem como suas fragilidades, normalmente decorrentes, como já citado, de soluções matemáticas obtidas em determinadas condições operativas especiais.

Identificar, compreender, investigar tais condições operativas especiais, por si só, já seria uma importante contribuição desta dissertação. Porém, um passo a mais foi dado, sendo apresentada uma proposta para tratar as informações provenientes dos equivalentes, possibilitando seu uso na detecção do ponto de instabilidade. Este passo é essencial para aplicação dos dados dos SMFS nas análises de tempo real.

Uma continuidade natural desta dissertação é a utilização de seus resultados na implementação de uma metodologia para previsão de instabilidade de tensão que vem sendo implementada numa parceria LRC/UFMG e a empresa CEMIG, por meio de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento [CEMIG,11A]. Neste projeto, serão utilizados dados provenientes de PMU distribuídas no sistema elétrico da empresa, trazendo todo o ambiente de tempo real para a pesquisa. Isto denota toda a relevância e o caráter inovador deste mestrado.

Espera-se que esta dissertação possa contribuir de forma efetiva para a área de operação dos sistemas elétricos, principalmente no que concerne às análises de estabilidade de tensão em tempo real.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [AJJARAPU,92] AJJARAPU, V.; CHRISTY, C., "The Continuation Power Flow: a Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Power Systems Transactions, IEEE Power & Energy Society, fevereiro de 1992.
- [ANDERSON & FOUAD,03] ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A., "Power System Control and Stability". IEEE Press Power Engineering Series – 2ª Edição – IEEE Press – Wiley-Interscience, 2003.
- [ANDRADE,08] ANDRADE, S. R. C., "Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Aplicações para Melhoria da Operação de Sistemas Elétricos de Potência". Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, junho de 2008.
- [BROWN & CHURCHILL,95] BROWN, J. W.; CHURCHILL, R. V., "Complex Variables and Applications", McGraw-Hill Science/Engineering/Math, outubro de 1995.
- [CEMIG,11A] CEMIG, LRC/UFMG, "Desenvolvimento de Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada", Projeto P&D GT 354 – CEMIG ANEEL, 2010.
- [CEMIG,11B] CEMIG, LRC/UFMG, "Desenvolvimento de Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada", Projeto P&D GT 354 – CEMIG ANEEL, Relatório Técnico – Produto Integrado 01, 02 e 03, 2011, abril de 2011.
- [CHEN,99] CHEN, C. T., "Linear System Theory and Design", The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering, Oxford University Press, 3ª Edição, 1999.
- [CIGRÉ,93] CIGRÉ Task Force 38.02.10, "Modelling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena". CIGRÉ Brochure N° 75, Paris, abril de 1993. 55p.

- [CORSI,08] CORSI, S.; TARANTO, G. N., "A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements", IEEE Transactions on Power System, agosto de 2008.
- [CORTEZ,01] CORTEZ, A. N., "Critérios e Procedimentos para a Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, fevereiro de 2001.
- [FRANCISCO,05] FRANCISCO, G. S., "Avaliação de Ferramentas de Análise de Estabilidade de Tensão", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNIFEI, outubro de 2005.
- [GUERRA,09] GUERRA, L. N. A., "Indicadores de Proximidade de Instabilidade de Tensão Utilizando Medição Fasorial em Tempo Real", Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, COPPE, março de 2009.
- [HAQUE,03] HAQUE, M. H., "On-Line Monitoring of Maximun Permissible Loading of a Power System Within in Voltage Stability Limits", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150, Nº 1, janeiro de 2003.
- [IEEE,90] IEEE Working Group on Voltage Stability, "Voltage Stability of Power Systems Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience", IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR, Piscataway, New Jersey (N.Y.), 1990.
- [IEEE,08] "PMUs are the System of Choice", IEEE Power&Energy, Vol. 6, Nº 5, setembro de 2008.
- [JULIAN,00] JULIAN, D. E.; SCHULZ, R. P.; VU, K. T., QUAINANCE, W. H. N.; BHATT, B.; NOVOSEL, D. "Quantifying Proximity to Voltage Collapse Using The Voltage Instability Predictor (VIP)", IEEE, 2000.
- [KUNDUR,94] KUNDUR, P., "Power System Stability and Control". Electrical Engineering Series – EPRI Editors, Mc Graw-Hill, 1994.
- [LARSSON,03] LARSSON, M.; REHTANZ, C.; BERTSCH, J. "Real-Time Voltage Stability Assessment for Transmission Corridors", IFAC, Seoul, 2003.

- [LOBATO,98] LOBATO, M. V. C., “Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Estudo do Fenômeno e de Métodos para Análise Estática”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, julho de 1998.
- [MARIANO,08] MARIANO, L., “Procedimento para Avaliação do Impacto da Compensação Reativa Shunt Capacitiva na Estabilidade de Tensão”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, dezembro de 2008.
- [MEDFASE,09] Projeto MedFase – Monitoramento do SIN em Tempo Real, “Projeto de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica”, 2009.  
Site: <http://150.162.1.150/~labplan/index.php>
- [MILOSEVIC,03] MILOSEVIC, B.; BEGOVIC, M., “Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurements”, IEEE Transactions on Power Systems, fevereiro de 2003.
- [MONTICELLI,83] MONTICELLI, A. J., “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, CEPTEL, Editora Edgard Blücher Ltda., 1983.
- [MORISON,93] MORISON, G.K.; GAO, B.; KUNDUR, P., “Voltage stability analysis using static and dynamic approaches”. IEEE Transaction Power System, vol.8, nº 3, 1993.
- [ONS,04] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Acompanhamento do Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC – Leitura de 15 de dezembro de 2004.
- [ONS,07] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Projeto Estal – Utilização de Fasores no Sistema Interligado Nacional, julho de 2007.
- [ONS,10] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, 2010.
- [PHADKE,08] PHADKE, A. G.; THORP, J. S., “Synchronized Phasor Measurements and Their Applications”, Editora Springer, 2008.

- [PILLCO,11] PILLCO, E. C., “A Importância da Região de Estabilidade no Problema de Análise de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, maio de 2011.
- [SANTOS,10] SANTOS, A. F. C. R., “Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Aplicações na Recomposição do Sistema Elétrico de Potência”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, julho de 2010.
- [SILVA,10] SILVA, R. G. F., “Aplicação dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada na Avaliação da Estabilidade de Tensão”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFMG, julho de 2010.
- [SMON,06] SMON, I.; VERBIC, G.; GUBINA, F., “Local Voltage-Stability Index Using Tellegen’s Theorem”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 21, Nº 3, agosto de 2006.
- [TAYLOR,94] TAYLOR, C. W., “Power System Voltage Stability”, 1ª Edição, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [TURAN,06] TURAN, M.; DEMIRCI OGLU, S. B.; YALCIN, M. A., “Voltage Stability Evaluation by Using Maximum Power Transfer Phasor Diagram”, Journal of Applied Sciences, Asian Network for Scientific Information, 2006.
- [VALE,86] VALE, M. H. M., “Centros Modernos de Supervisão e Controle de Sistemas de Energia Elétrica”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRJ, dezembro de 1986.
- [VALE,08] VALE, M. H. M., Apostila de notas de aula da disciplina “Planejamento dos Sistemas de Energia Elétrica” do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, PPGE/UFMG.
- [VALE,09] VALE, M. H. M., Apostila de notas de aula da disciplina “Estabilidade de Tensão” do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, PPGE/UFMG.

## Referências Bibliográficas

---

- [VALE,10] VALE, M. H. M., Apostila de notas de aula da disciplina “Supervisão e Controle do Sistema Elétrico de Potência” do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, PPGEE/UFMG.
- [VU,99] VU, K.; BEGOVIC, M. M.; NOVOSEL, D.; SAHA, M. M., “Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin”, IEEE Transactions on Power Systems, August, 1999.
- [WIKIPÉDIA,11] WIKIPÉDIA, “A Enciclopédia Livre”. Artigo editado pela última vez em junho de 2011.  
Site: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_posicionamento\\_global](http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamento_global)

# ANEXO I

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O USO DE EQUIVALENTES DE REDES NA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TENSÃO EM TEMPO REAL

Durante a elaboração desta dissertação, foram estudados trabalhos relacionados ao uso de Equivalentes de Redes na análise do risco da perda da estabilidade de tensão. Abaixo são tecidos comentários sobre as principais contribuições daqueles considerados os mais relevantes no contexto desta dissertação.

O trabalho [VU,99] constitui referência pioneira no segmento de estudo, pois introduz a ideia de se trabalhar somente com medições locais de tensão e corrente de uma barra para calcular os parâmetros de Thévenin e, assim, ser possível determinar o ponto de máximo carregamento fazendo a monitoração das impedâncias da carga e de Thévenin.

Em [JULIAN,00], é apresentada a previsão da instabilidade de tensão em termos da distância entre duas curvas de tensão da barra monitorada ou duas curvas de impedâncias do circuito equivalente de Thévenin. É proposta uma margem utilizando potência para descrever a proximidade do sistema quanto à perda de estabilidade.

No trabalho apresentado em [MILOSEVIC,03], os autores expressam a utilização de medições locais através da utilização de PMU para a monitoração da instabilidade de tensão e para os controles de proteção e de emergência nos casos onde há tensões críticas nas cargas causadas por reservas pequenas ou inexistentes de potência reativa.

O trabalho de [LARSON,03] propõe a utilização de sistemas de medição de grandes áreas para avaliar a perda da estabilidade de tensão em corredores de transmissão entre sistemas de potência interconectados ou sistemas de transmissão em grandes extensões.

Em [HAQUE,03], é apresentada uma modificação no método utilizado para o cálculo dos parâmetros de Thévenin mostrado em [VU,99]. Ao invés de utilizar as medições de corrente da barra provenientes do SMFS, o autor propõe sua substituição pelo emprego de valores de potência ativa e reativa da carga. É feita, também, uma comparação entre indicadores de previsão da instabilidade de tensão baseados em impedância e em potência.

Em [SMON,06] é proposta a utilização do Teorema de Tellegen como ferramenta para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente de Thévenin. Tal teorema

depende exclusivamente das Leis de Kirchhoff e da configuração da rede elétrica e pode ser aplicado em qualquer sistema elétrico não importando se o mesmo é linear ou não-linear, variante ou invariante no tempo e se são desconhecidas as condições iniciais, uma vez que estas são irrelevantes. A única restrição é que o sistema a ser aplicado o teorema de Tellegen deve, também, obedecer às Leis de Kirchhoff. Nessa referência, é proposta, também, a utilização da razão entre as impedâncias de Thévenin e da carga como índice para a análise da perda da estabilidade de tensão.

No trabalho [TURAN,06] é proposta a utilizando-se de medições locais em uma barra e de circuitos equivalentes de Thévenin para a construção de um diagrama fasorial da máxima transferência de potência, com o propósito de facilitar a análise das relações entre os parâmetros que mais afetam o sistema quanto à estabilidade de tensão.

Em [CORSI,08], os autores apresentam um algoritmo de determinação dos parâmetros do equivalente de Thévenin baseado em uma identificação adaptativa em tempo real que consiste em regras de otimização para estimar o valor da impedância e a da tensão de Thévenin. É usada uma consideração nesse trabalho de que tal impedância é composta somente por uma parte imaginária, justificado pelo motivo de que o método é aplicado somente em sistemas de extra-alta tensão.

A referência [GUERRA,09] utiliza o mesmo algoritmo proposto em [CORSI,08] para a determinação do circuito de Thévenin e, com base nele, o autor realiza uma comparação com inúmeros indicadores de risco de instabilidade de tensão em tempo real.

Em [SILVA,10], é apresentada uma metodologia inovadora por meio de um índice consistente e ágil para avaliar o risco da instabilidade de tensão, utilizando-se de uma margem definida em termos da relação de impedâncias em tempo real.

# ANEXO II

## PARÂMETROS DOS SISTEMAS SIMULADOS

As informações referentes aos parâmetros dos dois sistemas simulados nesta dissertação são apresentadas a seguir no formato do arquivo de entrada do *software* MATLAB®.

➤ **Sistema de 6 Barras (Figura 4.5):**

```

%Valores em p.u. (Potência Base: 100 MVA, Tensão Base: 138 kV)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           Barra  Tensão  Angulo      Geração  Geração  Carga  Carga
%           -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
%
B_Slack =   2      1.05     0           0         0         0         0
%
B_PV =      1      1.05     0         0.90      0         0         0
%           3      1.05     0         0.60      0         0         0
%
B_PQ =      4         0     0           0         0         0.90     0.60
%           5         0     0           0         0         1.00     0.70
%           6         0     0           0         0         0.90     0.60
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%           Linha  Linha
%           de     para  Resistência  Reatância  Susceptância
%           -----  -----  -----  -----  -----
%
Linha =     1      2         0.10         0.20         0.04
%           1      4         0.05         0.20         0.04
%           1      5         0.08         0.30         0.06
%           2      3         0.05         0.25         0.06
%           2      4         0.05         0.10         0.02
%           2      5         0.10         0.30         0.04
%           2      6         0.07         0.20         0.05
%           3      5         0.12         0.26         0.05
%           3      6         0.02         0.10         0.02
%           4      5         0.20         0.40         0.08
%           5      6         0.10         0.30         0.06

```

➤ Sistema de 3 Barras (Figura 5.1):

```

%Valores em p.u. (Potência Base: 100 MVA, Tensão Base: 138 kV)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%          Barra  Tensão  Angulo  Geração  Geração  Carga  Carga
%          -----  -----  -----  -----  -----  -----  -----
%          B_Slack =  1      1.05    0         0         0         0         0
%
%          B_PV =    3      1.05    0        0.90      0         0         0
%
%          B_PQ =    2         0      0         0         0        1.30      0.80
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%          Linha  Linha
%          de     para  Resistência  Reatância  Susceptância
%          -----  -----  -----  -----  -----
%
%          Linha =  1      2         0.15      0.30         0.00
%                  2      3         0.00      0.30         0.00
    
```