

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1106

**MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA EM TEMPO REAL -
EQUACIONAMENTO PARA CÁLCULO DIRETO DA CURVA VQ**

Letícia Caixeta Nunes

DATA DA DEFESA: 18/02/2019

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA EM TEMPO REAL -
EQUACIONAMENTO PARA CÁLCULO DIRETO DA CURVA VQ**

Letícia Caixeta Nunes

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

Orientadora: Profa. Maria Helena Murta Vale

Belo Horizonte - MG

Fevereiro de 2019

N972m

Nunes, Letícia Caixeta.

Margem de potência reativa em tempo real – Equacionamento para cálculo direto do ponto de mínimo da curva VQ [manuscrito] / Letícia Caixeta Nunes. – 2019.

viii, 81 f., enc.: il.

Orientadora: Maria Helena Murta Vale.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 76-81.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas elétricos de potência - Teses. 3. Redes elétricas - Teses. 4. Potência reativa (Engenharia elétrica) - Teses. I. Vale, Maria Helena Murta. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Margem de Potência Reativa em Tempo Real -
Equacionamento para Cálculo Direto da Curva VQ"**

Leticia Caixeta Nunes

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 18 de fevereiro de 2019.

Por:

Maria Helena Murta Vale

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

Fernando Henrique Silveira

Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)

Rosilene Nietzsche Dias

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

Aos meus pais,
Gilmar e Silésia.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, professora Maria Helena Murta Vale, pela atenção, dedicação e compreensão durante todas as etapas da realização deste trabalho. Além disso, pelos valiosos ensinamentos que vão além da pesquisa científica.

Aos meus pais, Gilmar e Silésia, e irmão, Danilo, por serem meu porto seguro e por terem sempre me apoiado e acreditado na minha capacidade.

Ao meu namorado Bruno, pelo carinho, amizade e incentivo.

Aos professores do LRC, pelas disciplinas ministradas.

Aos meus amigos de LRC, pelo conhecimento compartilhado, pelos momentos de descontração e cafés da tarde que tornaram os dias mais suaves e alegres. Em especial aos amigos Edmar, Fábio, Ane, Alex, Carlos, Ósis, Bárbara e Débora.

RESUMO

A presente dissertação de mestrado aborda o tema Estabilidade de Tensão, no que diz respeito ao monitoramento da condição operativa dos Sistemas de Energia Elétrica na operação em tempo real. De forma mais específica, o trabalho apresenta uma proposta de metodologia, a partir do equacionamento de redes elétricas, para cálculo direto da curva VQ e da tensão e potência reativa no seu ponto de mínimo. As equações desenvolvidas podem ser aplicadas a equivalentes de redes de tempo real, ampliando a utilização da metodologia em sistemas de grande porte. O objetivo é que as informações trazidas pela curva VQ, como a Margem de Potência Reativa, possam ser calculadas em tempo real, assim como é feito para a curva PV, cuja Margem de Potência Ativa é determinada por equações já bem conhecidas. A metodologia proposta é aplicada a dois equivalentes de redes, calculados para o sistema de teste IEEE 14 barras: um deles é destinado a aplicações de tempo real e o outro considera uma referência analítica. Para o cálculo do equivalente de redes de tempo real, são consideradas duas amostras de corrente e de tensão obtidas por meio de incrementos nas cargas dos barramentos. O equivalente analítico é calculado a partir do teorema de Thévenin. Os resultados são comparados com valores obtidos de simulações sucessivas de programas de fluxo de potência, considerando um gerador síncrono fictício conectado ao barramento estudado. Adicionalmente, as equações propostas são também aplicadas a dados reais de medição de tensão e de corrente em um barramento do Sistema Interligado Nacional. Os resultados mostram que os valores obtidos pela metodologia proposta são consistentes, enfatizando sua significativa contribuição para a operação dos sistemas elétricos.

PALAVRAS CHAVE: Sistemas Elétricos de Potência, Estabilidade de Tensão, Margem de Potência Reativa, Operação de Tempo real.

ABSTRACT

This master thesis addresses the topic Voltage Stability regarding Electric Power Systems monitoring for real-time operation. More specifically, the work presents a methodology proposal, by means of electrical network equations, to calculate the VQ curve and the voltage and reactive power at its minimum point. The developed equations can be applied to real-time network equivalents, expanding the methodology use to large-scale systems. The objective is that the information brought by the VQ curve, such as the Reactive Power Margin, can be calculated in real-time, in the same way it is done for the PV curve, which Active Power Margin is obtained from well-known equations. The proposed methodology is applied for two network equivalents obtained from the IEEE 14 bus test system: an equivalent for real-time purposes and an analytical reference equivalent. To calculate real-time equivalent, two current and voltage samples are considered after load increment. The analytical equivalent is based on the Thévenin theorem. The results are compared with those obtained from successive power flow simulations considering a fictitious synchronous generator connected to the studied bus. In addition, the proposed equations are also applied to real-time voltage and current measurement data collected from a busbar of the National Interconnected System. The results show that the values obtained by the methodology are consistent, emphasizing its significant contribution to power system operation.

KEYWORDS: *Electrical Power Systems, Voltage Stability, Reactive Power Margin, Real-Time Operation.*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema elétrico de duas barras	9
Figura 2.2 Comportamento da tensão, corrente e potência da carga pela razão das impedâncias.....	12
Figura 2.3 Curva PV.....	14
Figura 2.4 Síncrono fictício	16
Figura 2.5 Curva VQ.....	17
Figura 2.6 Curva PV e curvas VQ para diferentes valores de carga	20
Figura 2.7 Curvas PV e VQ para sistemas 1 e 2	21
Figura 2.8 Curvas PV e VQ para sistemas 1 e 3	23
Figura 3.1 Circuito equivalente de duas barras.....	27
Figura 3.2 Circuito equivalente de Thévenin com efeito da carga da barra embutido	31
Figura 3.3 Circuito do Equivalente Analítico	32
Figura 4.1 Circuito equivalente de duas barras para cálculo da curva VQ.....	36
Figura 4.2 Curva VQ calculada pela formulação proposta	52
Figura 4.3 Curva VQ calculada por simulações de fluxo de potência	53
Figura 5.1 Curvas VQ calculadas por programa de fluxo e pela formulação proposta – Equivalente Analítico.....	58
Figura 5.2 Curvas VQ calculadas por programa de fluxo e pela formulação proposta – Equivalente de Vu.....	60
Figura 5.3 Monitoramento da MPR.....	63
Figura 5.4 Monitoramento da MPA.....	66
Figura 5.5 Diagrama esquemático do barramento de Taquaril	70
Figura 5.6 Margem de potência reativa para barramento de Taquaril	71
Figura 5.7 Margem de potência ativa para barramento de Taquaril.....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Comparação entre valores dos sistemas 1 e 2	22
Tabela 2.2 Comparação entre valores dos sistemas 1 e 3	23
Tabela 4.1 Estudo do domínio da função geral para cálculo da curva VQ.....	43
Tabela 4.2 Estudo do domínio da função geral para cálculo da curva VQ – Caso especial	48
Tabela 4.3 Síntese das formulações elaboradas	51

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESTABILIDADE DE TENSÃO E ASPECTOS ADICIONAIS RELATIVOS À CURVA VQ.....	8
2.1	Considerações Iniciais	8
2.2	Teorema da Máxima Transferência de Potência	9
2.3	Curvas do Tipo PV e a Margem de Potência Ativa	13
2.4	Curvas do Tipo VQ e a Margem de Potência Reativa.....	15
2.5	Carregamento do Sistema e o Comportamento da Curva VQ.....	19
2.6	Aspectos Adicionais Sobre a Utilização da Curva VQ.....	21
2.7	Considerações Finais	24
CAPÍTULO 3	EQUIVALENTES DE REDES UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DAS CURVAS VQ	25
3.1	Considerações Iniciais	25
3.2	Ambiente de Tempo Real.....	25
3.3	Equivalente de Vu	27
3.4	Equivalente Analítico.....	29
3.5	Metodologias de Cálculo de Carga.....	33
3.6	Considerações Finais	34
CAPÍTULO 4	MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA EM TEMPO REAL – METODOLOGIA PARA CÁLCULO DIRETO DO PONTO DE MÍNIMO DA CURVA VQ.....	35
4.1	Considerações Iniciais	35
4.2	Formulação para Cálculo Direto da Curva VQ e do Ponto Mínimo.....	36
4.2.1	Formulação Geral para Cálculo Direto da Curva VQ.....	37
4.2.2	Estudo do Domínio da Função	39
4.2.3	Desenvolvimento das Equações para o Ponto Crítico da Curva VQ.....	44
4.2.4	Estudo do Domínio da Função – Caso Específico	46
4.2.5	Desenvolvimento das Equações para o Ponto Crítico da Curva VQ – Caso Específico .	48
4.3	Síntese das Formulações Desenvolvidas.....	50

4.4	Validação do Equacionamento Proposto	52
4.5	Considerações Finais	54
CAPÍTULO 5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA – RESULTADOS E ANÁLISES.....		55
5.1	Considerações Iniciais	55
5.2	Aplicação da Formulação Geral para Cálculo da Curva VQ.....	55
5.2.1	Formulação Geral para Cálculo da Curva VQ Aplicada ao Equivalente Analítico.....	57
5.2.2	Formulação Geral para Cálculo da Curva VQ Aplicada ao Equivalente de Vu	59
5.3	Monitoramento da Margem de Potência Reativa	61
5.4	Monitoramento da Margem de Potência Ativa	64
5.5	Considerações Sobre os Resultados das Simulações	67
5.6	Simulações com Dados de Medições Reais.....	69
5.7	Considerações Finais	72
CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....		74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		76

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) devem ser capazes de garantir o fornecimento de energia elétrica para os consumidores com segurança e confiabilidade. O crescimento populacional, aliado ao desenvolvimento da economia, resulta em um aumento na demanda por energia elétrica. Por outro lado, a minimização dos gastos em melhorias na rede e as regulamentações cada vez mais rígidas tornam o gerenciamento desse sistema um desafio bastante complexo. Para que o SEE cumpra seu objetivo, são desenvolvidas as atividades de expansão e de operação. A expansão está relacionada ao planejamento, à elaboração e à execução de projetos para ampliação do parque gerador e das redes de transmissão e de distribuição. A operação corresponde às atividades de planejamento, de operação em tempo real e de pós-operação, as quais visam gerenciar os ativos já existentes no sistema, garantindo a otimização do custo total de operação e a continuidade do fornecimento de energia.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação está relacionado às atividades de operação, mais especificamente à operação em tempo real. Essa atividade consiste no monitoramento contínuo de diversas grandezas elétricas de forma a identificar as ações de controle necessárias. Essas ações podem ser automáticas ou manuais e visam manter o SEE no estado normal e seguro de operação, ou seja, manter as grandezas dentro dos seus limites operativos, minimizando a ocorrência de interrupções no fornecimento e danos aos componentes da rede.

Dentre os limites operativos a serem evitados, encontra-se o da perda da estabilidade de tensão do sistema. O tema central desta dissertação está relacionado ao monitoramento da condição operativa do SEE, quanto à sua proximidade a esse limite.

Segundo a referência [IEEE/CIGRE, 2004], estabilidade de tensão é a *“habilidade do sistema de potência de manter as tensões nos seus barramentos, após ser submetido a um distúrbio, a partir de uma condição inicial”*. Outra importante referência, o [IEEE, 1990], define estabilidade de tensão como *“a capacidade do sistema de manter as suas tensões, de forma que, quando a admitância da carga crescer, a sua potência também aumentará, pois tanto a demanda quanto as tensões são controláveis”*. A mesma referência define ainda instabilidade de tensão como sendo o *“estado de operação do sistema onde a tensão permanece decaindo*

de forma brusca ou lenta, e as ações automáticas de controle ou dos operadores não evitam tal decaimento”.

Caso se instale o fenômeno da instabilidade de tensão, podem ocorrer grandes desligamentos no SEE, trazendo significativos prejuízos para todo o setor elétrico, incluindo empresas e consumidores. Diante do impacto negativo da instabilidade de tensão, esse tema tem sido o foco de diversos trabalhos que visam identificar as características operativas que levam o sistema a tal condição.

Para se operar o sistema elétrico, e garantir a sua segurança quanto à estabilidade de tensão, é necessário conhecer a distância do ponto operativo atual ao ponto crítico que determina o limite entre a operação estável e instável. Esta distância informa sobre a margem operativa do SEE.

Na análise do fenômeno, o ponto crítico de estabilidade de tensão tem sido caracterizado pelo ponto de Máxima Transferência de Potência (MTP), para cargas do tipo potência constante. O ponto de MTP pode ser observado por meio das chamadas curvas do tipo PV (Potência Ativa *versus* Tensão). As curvas PV são largamente utilizadas nos estudos relativos à estabilidade de tensão e constituem a base de diversas metodologias e procedimentos para monitoramento da condição operativa do SEE.

A proposta desta dissertação introduz a utilização das curvas do tipo VQ (Potência Reativa *versus* Tensão) na avaliação do comportamento do sistema em tempo real, visando ampliar o conhecimento sobre o estado do SEE.

É importante salientar que, embora as curvas VQ sejam muito utilizadas por aqueles que atuam na análise de sistemas de potência, sua aplicação tem sido dada com maior ênfase aos estudos de controle de tensão dos barramentos. Nos aspectos de estabilidade de tensão, apesar de a literatura apresentar diversos trabalhos sobre o tema, sua aplicação tem sido apenas marginal. Especificamente, no que diz respeito ao monitoramento do SEE em tempo real, sua construção e aplicação não têm sido implementadas.

A forma como é realizada a avaliação da condição operativa do sistema elétrico, quanto à sua proximidade ao ponto crítico de estabilidade, está relacionada ao tipo de atividade. Nas etapas de planejamento, a construção das curvas PV e VQ é normalmente feita

a partir de simulações de programas de fluxo de potência. Já na operação em tempo real, tal proximidade deve ser avaliada de forma a acompanhar a dinâmica característica do comportamento do sistema, além de utilizar valores de medições de grandezas elétricas (coletadas a intervalos curtos de tempo), não disponibilizadas nos estudos de planejamento. Sendo assim, nas aplicações de tempo real, os estudos de fluxo de potência cedem lugar ao uso dos equivalentes de redes elétricas.

A equipe de pesquisadores do LRC/UFMG¹ tem investigado intensamente o tema estabilidade de tensão, desenvolvendo trabalhos de natureza acadêmica e práticas voltadas às atividades de expansão e de operação. Destaque é dado à implementação em barramento do Sistema Interligado Nacional (SIN) de um índice predictor de instabilidade de tensão, determinado a partir de medições fasoriais [Andrade, 2013], [Vale, 2013], [Andrade, 2014²].

A presente dissertação integra o conjunto dessas pesquisas, constituindo-se em uma continuidade das mesmas. Visando contextualizá-la dentro dessa perspectiva, torna-se interessante fazer um breve histórico dos trabalhos a ela relacionados.

A dissertação de mestrado [Lobato, 1998] marca o início dos estudos relacionados ao tema no LRC/UFMG apresentando os conceitos básicos e fundamentais da análise estática de estabilidade de tensão em SEE.

O trabalho [Cortez, 2001] dá continuidade ao estudo do tema ao aprofundar a pesquisa nos aspectos relacionados à interpretação física e matemática da estabilidade de tensão. Além disso, este trabalho aborda os métodos e ferramentas para avaliação da estabilidade de tensão, propondo um critério e procedimentos para avaliação da margem de segurança na atividade de planejamento da expansão do SIN.

A dissertação de mestrado [Mariano Junior, 2008] estuda o impacto da compensação reativa shunt na estabilidade de tensão, visando auxiliar o processo de tomada de decisão no que diz respeito à elaboração de planos de expansão. A metodologia proposta busca evitar a elevação da tensão no ponto de MTP para valores próximos da faixa operativa. Como diferencial, o trabalho propõe uma margem de segurança com base em valores de tensão, e não apenas no valor da potência.

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

Ainda no contexto da margem de estabilidade de tensão no planejamento da expansão, as pesquisas [Condega, 2013] e [Vilela, 2014] abordam os parâmetros de interesse para cálculo dessa margem. Em [Condega, 2013] é feita uma análise de sensibilidade sobre o impacto da incerteza desses parâmetros no valor da margem calculada. Em [Vilela, 2014], a pesquisa aborda a escolha do fator de distribuição entre os geradores, em resposta ao aumento das cargas do sistema, fator este que impacta de forma determinante a margem de estabilidade de tensão.

O tema de equivalente de redes de tempo real começa a ser estudado em [Silva, 2010]. Neste trabalho é proposto o Índice Previsor da Instabilidade de Tensão (PIT), calculado a partir de equivalentes de redes, cuja função é indicar ao operador a distância entre o ponto de operação atual do sistema e o limite dado pela Margem de Segurança de Tensão (MST). As simulações deste trabalho foram feitas a partir de dados de fluxo de potência.

O trabalho de [Ribeiro, 2011] introduziu os conceitos de corrente e carga equivalentes. Duas metodologias de cálculo da carga equivalente foram propostas visando definir o valor da carga em barramentos de transferência, nos quais a carga não é bem definida. Tais metodologias baseiam-se no sentido do fluxo das potências ativa e reativa nos ramos conectados ao barramento estudado.

O primeiro trabalho desenvolvido no LRC/UFMG, a utilizar dados provenientes de medições reais, foi elaborado por [Martins, 2012]. Neste, foi introduzido o uso do Método dos Mínimos Quadrados, para tratar as incertezas inerentes aos processos de medição.

Posteriormente, a dissertação de mestrado [Leal, 2013] propõe um método para cálculo de equivalente de redes denominado Método dos Mínimos Quadrados Ponderados. O objetivo do método é, além de tratar o erro do tipo ruído, ponderar as alterações sistêmicas do equivalente. As medições utilizadas (fasores de tensão e de corrente), obtidas de um centro de supervisão e controle, possuem taxa de amostragem de 1 medição por minuto.

Como continuidade das pesquisas anteriores, o trabalho de [Andrade, 2014¹] é desenvolvido a partir da disponibilização de dados de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, com uma taxa de amostragem de 10 medições por segundo. Este trabalho propõe quatro novas metodologias de ponderações para o equivalente de redes calculado pelo Método dos Mínimos Quadrados.

Em [Vale Visacro 2014] é desenvolvido o aplicativo Monitor, um Simulador para Avaliação da Estabilidade de Tensão, software que implementa as metodologias desenvolvidas em [Andrade,

2014 ¹]. Devido à sua interface amigável e facilidade de utilização, trouxe significativa agilidade às simulações, permitindo ampliar as análises de estabilidade de tensão.

A dissertação de mestrado [Silva, 2015] estuda o impacto das incertezas inerentes ao processo de medição nos equivalentes calculados. Além disso, propõe uma ferramenta computacional, o Simulador de Cenários (SimC), cujo objetivo é gerar conjuntos de medições fasoriais de tensão e de corrente, considerando a presença de incertezas de medição, para servir de insumo às análises de estabilidade com diversos cenários de medição.

Os trabalhos de dissertação [Barbosa, 2018] e [Andrade, 2018] aprofundam os estudos a respeito das quatro metodologias de ponderação propostas anteriormente por [Andrade, 2014 ¹]. Na primeira, é feita uma proposta de ajuste de parâmetros, visando à escolha mais adequada dos valores de forma a favorecer a convergência das impedâncias do equivalente para a referência analítica. Na segunda, são realizadas análises a respeito da exatidão e capacidade de filtragem dos estimadores que compõem a base dos equivalentes de redes, visando promover a evolução dos mesmos.

A partir da necessidade de uma referência analítica para os equivalentes de redes de tempo real, [Silva, 2018] propõe uma metodologia para cálculo do equivalente de Thévenin de forma matricial. Neste trabalho são apresentados também, os resultados de análises de sensibilidade em relação ao passo de carga e à incertezas nas medições para as principais metodologias de cálculo de equivalentes encontradas na literatura.

A dissertação de mestrado [Sousa, 2018] faz uma análise comparativa entre os principais indicadores encontrados na literatura, que visam identificar o risco de perda de estabilidade de tensão. Para viabilizar a análise, foi desenvolvida uma ferramenta computacional denominada Simulador de Índices de Estabilidade de Tensão (SIndex).

Toda a evolução retratada acima caracterizou uma das principais motivações para a realização deste trabalho. Os desenvolvimentos atingiram elevado nível técnico em termos de pesquisa e aplicação prática no setor elétrico. Toda esta experiência mostrou a necessidade de se investigar o comportamento de outras grandezas elétricas, além daquelas diretamente relacionadas à curva PV. O desafio dessa dissertação passou a ser, assim, investigar a curva VQ.

Conforme já citado, enquanto as margens e índices relacionados à curva PV e ao ponto de MTP são muito utilizados, a curva VQ e a margem de potência reativa não têm sido muito citadas em estudos que envolvem operação de tempo real.

Diferentemente da curva PV, que tem seu ponto de MTP determinado por equações bastante conhecidas aplicadas aos equivalentes de redes, não foi encontrada na literatura até então, um equacionamento que possibilitasse a determinação direta do ponto de mínimo da curva VQ, a partir do qual pudesse ser determinada a margem de potência reativa.

Tal situação é justificada pelo fato do ponto de MTP ser determinado diretamente a partir do Teorema de Máxima Transferência de Potência, e o ponto de mínimo da curva VQ não ser tão facilmente determinado.

Neste contexto, pode-se caracterizar o objetivo desta dissertação de mestrado: a partir do estudo aprofundado da curva VQ, visando o monitoramento da estabilidade de tensão do SEE em tempo real, identificar informações além daquelas fornecidas pela curva PV.

De forma mais específica, o trabalho propõe uma metodologia, por meio de equacionamentos desenvolvidos em bases conceituais consistentes, para o cálculo direto da curva VQ, assim como da tensão e da potência reativa no seu ponto de mínimo, utilizando equivalentes de rede de tempo real.

A meta é que a Margem de Potência Reativa, calculada pelo equacionamento proposto, seja coerente com aquela calculada por programa de fluxo de potência. Da maneira como a metodologia foi desenvolvida, tal margem pode ser utilizada de forma conjunta com aquelas obtidas pela curva PV.

A contribuição deste trabalho se verifica no aprimoramento da supervisão em tempo real da condição operativa do SEE, visando evitar a perda de estabilidade de tensão, e nos consequentes benefícios para o setor elétrico, incluindo empresas e consumidores.

O presente trabalho está estruturado em 6 capítulos. Após este capítulo introdutório, no qual é feita a contextualização do tema, os demais capítulos estão organizados como identificado a seguir.

Os principais conceitos relacionados à estabilidade de tensão, necessários para a compreensão da proposta, são abordados no Capítulo 2. Nesse mesmo capítulo é feita ainda uma discussão sobre aspectos adicionais trazidos pela curva VQ.

O Capítulo 3 discute o ambiente de tempo real do monitoramento da estabilidade de tensão, destacando as suas principais características. Neste capítulo os métodos de cálculo de equivalente de redes utilizados nas simulações são descritos de forma detalhada, assim como as metodologias para cálculo da carga-equivalente.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta para cálculo da curva VQ em tempo real, assim como para o cálculo da tensão e potência reativa no seu ponto de mínimo. As equações desenvolvidas são aplicadas aos equivalentes de redes tratados no Capítulo 3.

O Capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta. São comparados os resultados obtidos a partir da aplicação das equações propostas com aqueles calculados por simulação de fluxo de potência no sistema de Teste do IEEE 14 Barras. O capítulo inclui também os resultados de simulações utilizando dados de medição real.

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

O documento é finalizado com as referências bibliográficas citadas no texto e que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ESTABILIDADE DE TENSÃO E ASPECTOS ADICIONAIS RELATIVOS À CURVA VQ

2.1 Considerações Iniciais

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos básicos relacionados ao tema estabilidade de tensão, temas estes considerados relevantes para o entendimento dos estudos realizados nessa dissertação. Destaque especial é dado à curva VQ, foco central do trabalho.

As definições dos termos estabilidade de tensão e instabilidade de tensão foram introduzidas no capítulo anterior e, neste capítulo, são tratados conceitos relacionados à abordagem estática deste tema.

Inicialmente, é feita uma revisão sobre o Teorema da Máxima Transferência de Potência, o qual constitui a base para os estudos estáticos de estabilidade de tensão. Observa-se que, embora esse teorema tenha sido desenvolvido para um sistema simples de duas barras, pode ser aplicado na análise de sistemas de grande porte, quando estes são representados por equivalentes de redes.

A partir desse teorema, são abordadas a Curva do Tipo PV e as margens obtidas a partir desta, em especial a Margem de Potência Ativa (MPA). Tal curva compõe a base da maior parte dos estudos relacionados à estabilidade de tensão.

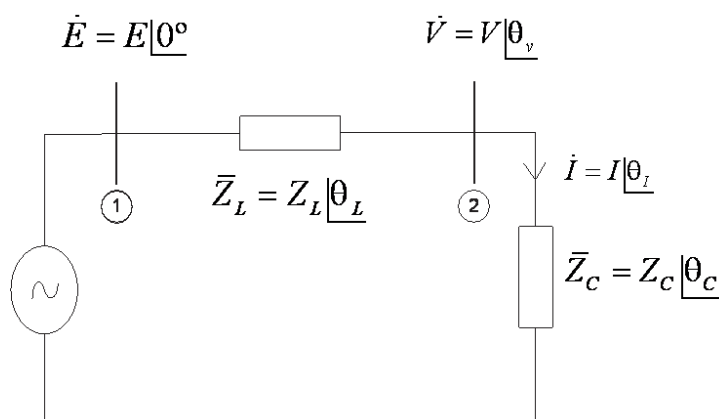
Da mesma forma, são apresentadas a Curva do Tipo VQ e a Margem de Potência Reativa (MPR), deixando clara a relação entre estas e o nível de carregamento do sistema. Apesar dessa relação não ser tão direta como no caso da curva PV, enfatiza-se a importância da MPR como uma ferramenta para análise de estabilidade de tensão.

Por fim, destaca-se a importância da consideração da MPR no monitoramento da estabilidade de tensão em tempo real, confirmando que tal margem traz relevantes informações adicionais àquelas trazidas pela curva PV.

2.2 Teorema da Máxima Transferência de Potência

No contexto da abordagem estática, o ponto crítico de estabilidade de tensão tem sido identificado como o ponto onde ocorre a Máxima Transferência de Potência (MTP) ou Ponto de Máximo Carregamento, para cargas do tipo potência constante. A teoria clássica que determina esta condição, conforme descrito em [KUNDUR, 1994], se baseia no Teorema da Máxima Transferência de Potência e é, normalmente, desenvolvida para um sistema simples de duas barras, como ilustrado na Figura 2.1.

Com relação à nomenclatura adotada nesta dissertação, sendo X uma grandeza elétrica qualquer, esta é apresentada com um ponto em cima para indicar fasores (\dot{X}) e com um traço para números complexos (\bar{X}). Para módulos, seja de números complexos ou de fasores, a representação é a própria letra referente à grandeza sem a necessidade dos símbolos de módulo (X).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.1 Sistema elétrico de duas barras

No sistema elétrico da Figura 2.1, a fonte de tensão é ideal e tomada como referência angular representada por $\dot{E} = E \angle 0^\circ$. A impedância da linha de transmissão é dada por $\bar{Z}_L = Z_L \angle \theta_L$ e a da carga é dada por $\bar{Z}_C = Z_C \angle \theta_C$. A tensão e a corrente na barra de carga são dadas por $\dot{V} = V \angle \theta_V$ e $\dot{I} = I \angle \theta_I$, respectivamente.

Para este sistema, a corrente é dada pela equação (2.1).

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

Utilizando a lei dos cossenos no denominador, escreve-se o módulo da corrente como na equação (2.2).

$$I = \frac{E}{\sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.2)$$

A tensão na barra de carga é dada pela expressão (2.3). Substituindo a equação de corrente dada por (2.2), obtém-se a equação (2.4) para o módulo desta tensão.

$$\dot{V} = \bar{Z}_C \dot{I} \quad (2.3)$$

$$V = \frac{Z_C E}{\sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.4)$$

A potência na carga é calculada a partir das equações de corrente e de tensão obtidas anteriormente. Dessa forma, a potência ativa é dada por (2.5).

$$P = V_c I \cos \theta_c = \frac{Z_C E^2 \cos \theta_c}{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)} \quad (2.5)$$

Para corresponder à condição de potência máxima, a equação (2.5) deve ser derivada em relação ao módulo da impedância da carga e igualada a zero, conforme (2.6).

$$\frac{dP}{dZ_c} = \frac{E^2 \cos \theta_c [Z_L^2 + Z_c^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta_L - \theta_c)] - Z_c E^2 \cos \theta_c [2Z_c + 2Z_L \cos(\theta_L - \theta_c)]}{[Z_L^2 + Z_c^2 + 2Z_L Z_c \cos(\theta_L - \theta_c)]^2} = 0 \quad (2.6)$$

Ao fazer as devidas simplificações em (2.6), determina-se que o máximo de potência ocorre quando o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão, condição mostrada na equação (2.7).

$$Z_c = Z_L \quad (2.7)$$

A partir dessa condição é possível determinar expressões para o cálculo dos parâmetros no ponto de MTP. Dessa forma, a tensão (V_{MTP}) e a potência (P_{MTP}) no ponto de MTP são calculadas pelas equações (2.8) e (2.9), respectivamente.

$$V_{MTP} = \frac{E}{\sqrt{2[1 + \cos(\theta_L - \theta_c)]}} \quad (2.8)$$

$$P_{MTP} = \frac{E^2 \cos \theta_c}{2Z_L [1 + \cos(\theta_L - \theta_c)]} \quad (2.9)$$

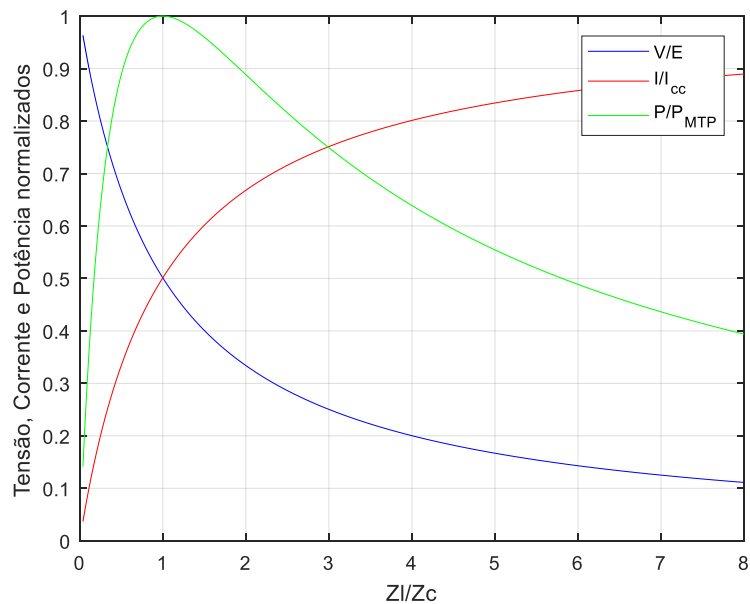
A visualização gráfica do comportamento das grandezas estudadas facilita a compreensão do fenômeno. Para isso, consideram-se os valores normalizados de tensão, corrente e potência, de acordo com as expressões (2.10), (2.11) e (2.12), para traçar as curvas da Figura 2.2. O módulo da corrente de curto-circuito do sistema é dado por $I_{cc} = E/Z_L$. As

curvas são traçadas considerando uma variação na carga mantendo o fator de potência constante.

$$\frac{V}{E} = \frac{Z_c}{\sqrt{Z_L^2 + Z_C^2 + 2Z_L Z_C \cos(\theta_L - \theta_C)}} \quad (2.10)$$

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

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



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.2 Comportamento da tensão, corrente e potência da carga pela razão das impedâncias

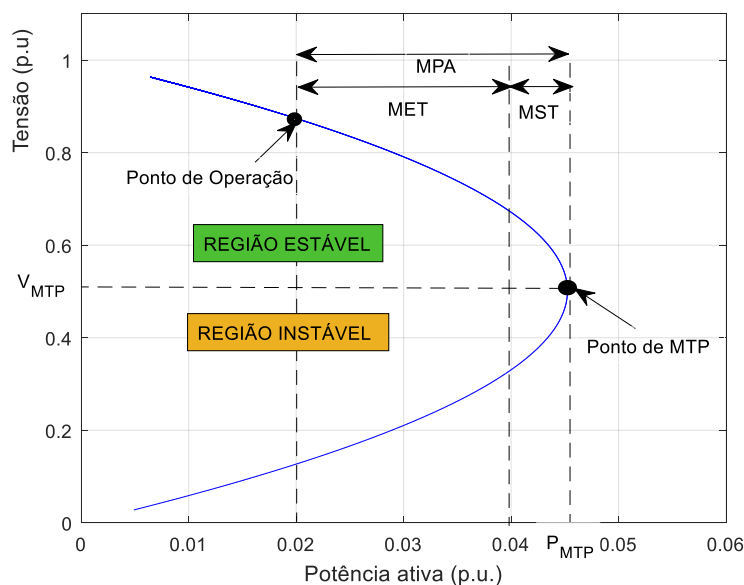
A análise das curvas da Figura 2.2 permite a observação de importantes características do sistema elétrico. À medida que a carga aumenta (Z_c diminui), a corrente do sistema aumenta e a tensão na barra de carga diminui. Enquanto $Z_c > Z_L$, o aumento da corrente supera a diminuição da tensão e o resultado é a elevação do valor de potência entregue à carga. No ponto em que a impedância da carga se iguala em módulo à impedância da linha (no gráfico $Z_L/Z_c = 1$), a curva de potência atinge seu pico. De acordo com o Teorema de Máxima Transferência de Potência, nesse ponto o sistema transfere potência máxima à carga. A partir desse ponto tem-se $Z_c < Z_L$, e a diminuição da tensão começa a superar o aumento da corrente, o que resulta na diminuição do valor de potência transferido.

O ponto determinado pela igualdade entre as impedâncias da carga e da linha, além de ser o ponto onde ocorre a Máxima Transferência de Potência, representa o limite de estabilidade de tensão do sistema, para cargas do tipo potência constante. A partir desse limite, na tentativa de se obter da rede uma potência superior àquela da MTP, as cargas do tipo potência constante reagem, aumentando a corrente por elas consumida e, em um processo contínuo, fazem com que a tensão diminua de forma tal que as ações de controle automáticas ou dos operadores não evitam tal diminuição. O aumento da corrente pode causar sobrecarga em equipamentos e a consequente atuação de sistemas de proteção, podendo resultar em grandes desligamentos, caracterizando o denominado colapso de tensão.

2.3 Curvas do Tipo PV e a Margem de Potência Ativa

Uma representação muito utilizada para identificar a capacidade de transferência de potência da rede é feita por meio da curva que mostra o comportamento do módulo da tensão em função da potência ativa entregue à carga, a curva PV, também conhecida como curva do “nariz”. A aplicação dessa curva na análise de estabilidade de tensão é tradicional, sendo adotada em diversos trabalhos.

Para um sistema simples de duas barras, como o da Figura 2.1, essa curva pode ser traçada da mesma forma adotada para as curvas da Figura 2.2, ou seja, variando a carga (Z_c), mantendo o fator de potência constante. Essa curva é apresentada na Figura 2.3 com destaque para alguns pontos de interesse.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.3 Curva PV

A ponta do “nariz” corresponde ao ponto de Máxima Transferência de Potência, caracterizado por valores críticos de potência e de tensão, P_{MTP} e V_{MTP} , destacados na curva PV. Esse ponto caracteriza o limite entre as regiões estável (acima do ponto de MTP) e instável (abaixo do ponto de MTP) de operação do sistema elétrico, para cargas do tipo potência constante. Como já foi discutido, a tentativa de aumentar a potência entregue a uma carga desse tipo, para valores além do ponto de MTP, leva o sistema à instabilidade. Dessa forma, para garantir que o sistema esteja sempre operando em uma região segura e estável, é necessário conhecer a distância do ponto de operação ao ponto crítico.

Neste contexto, são definidas margens, cujas definições podem variar de acordo com o objetivo do estudo. A Margem de Segurança de Tensão (MST) indica a distância mínima entre o ponto de operação do sistema e o ponto de MTP. Essa margem define uma região em que o sistema ainda é estável, porém não seguro, ou seja, está muito próximo da instabilidade. O Operador Nacional do Sistema Elétrico brasileiro (ONS) estabelece um valor para a MST de 4% para operação em tempo real [ONS, 2017]. A Margem de Estabilidade de Tensão (MET) corresponde à distância do ponto de operação ao ponto limite de segurança de tensão, ou seja, à distância do ponto de operação ao ponto limite da MST. Neste trabalho define-se ainda a Margem de Potência Ativa (MPA) que indica a distância efetiva do ponto de operação ao

ponto crítico. Na curva PV apresentada na Figura 2.3 tem-se uma visualização gráfica dessas margens.

Em ambiente de planejamento dos SEE, a construção da curva PV e a identificação do ponto de MTP para sistemas de grande porte envolve a solução sucessiva de fluxos de potência aumentando-se a carga. Observa-se que, com o fluxo de potência tradicional baseado no método de Newton-Raphson convencional é possível traçar apenas a parte estável da curva, até um ponto próximo ao ponto crítico. No ponto de MTP, a matriz Jacobiana do método é singular e, à medida que o sistema dele se aproxima, essa matriz já se torna mal condicionada, impossibilitando que o método chegue a uma solução. Para se obter a curva PV completa, incluindo as partes superior e inferior, é necessário o uso de um programa fluxo de potência continuado.

Em ambiente de tempo real, a identificação do ponto de MTP pode ser feita de forma direta aplicando-se as equações (2.8) e (2.9) a um equivalente, calculado em tempo real, que represente a rede por meio de um sistema de duas barras como o da Figura 2.1. Dessa forma, a obtenção dos valores de potência e tensão no ponto de MTP fica dependente apenas do conhecimento da fonte de tensão equivalente, da impedância equivalente e do fator de potência da carga. Conhecendo-se o ponto de MTP e o ponto de operação do sistema, podem ser obtidas, diretamente, as margens MPA e MET.

Vale destacar que, da mesma forma que é traçada a curva PV variando-se a carga com fator de potência constante, o mesmo pode ser feito para a potência reativa e a potência aparente, gerando curvas QV e SV, respectivamente. Essas curvas nem sempre são traçadas, pois trazem as mesmas informações que a PV e seus pontos de máximo podem ser obtidos a partir do ponto de MTP de forma direta, utilizando o fator de potência da carga.

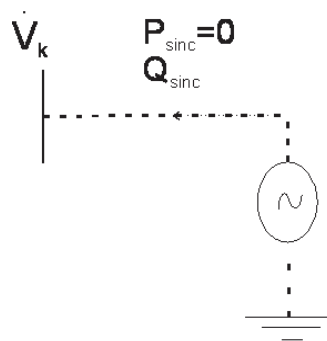
2.4 Curvas do Tipo VQ e a Margem de Potência Reativa

Outra forma de representar limites de transmissão de potência de um sistema elétrico é realizada por meio da curva do tipo VQ. Essa curva apresenta, para uma dada situação de carregamento do sistema, o comportamento da potência reativa injetada na barra em função da tensão nela especificada. Tradicionalmente, a curva VQ é vista como uma representação da necessidade de potência reativa do sistema para manter um dado perfil de tensão.

Vale destacar que alguns autores, como [Mousavi, 2013] e [Xu 2002], tratam essa curva por curva “QV”. Já em outros trabalhos, [Cutsem 2000] e [Dong 2005], os autores tratam-na por curva “VQ”. Essas nomenclaturas podem gerar confusão com relação a qual curva o autor está se referindo, pois, como mencionado, pode-se traçar uma curva do “nariz” para potência reativa, cujo significado e construção são completamente diferentes da curva tratada neste tópico.

Para evitar confusão em relação a essas curvas, faz-se necessária a adoção de um critério para nomeá-las. O critério adotado neste trabalho está relacionado aos eixos do gráfico. Portanto, se uma curva apresenta o parâmetro A nas abscissas e B nas ordenadas é chamada de curva AB. Seguindo este raciocínio, a curva tratada neste capítulo apresenta o parâmetro de tensão (V) no eixo das abscissas e (Q) no eixo das ordenadas e, por isso, é chamada de curva VQ.

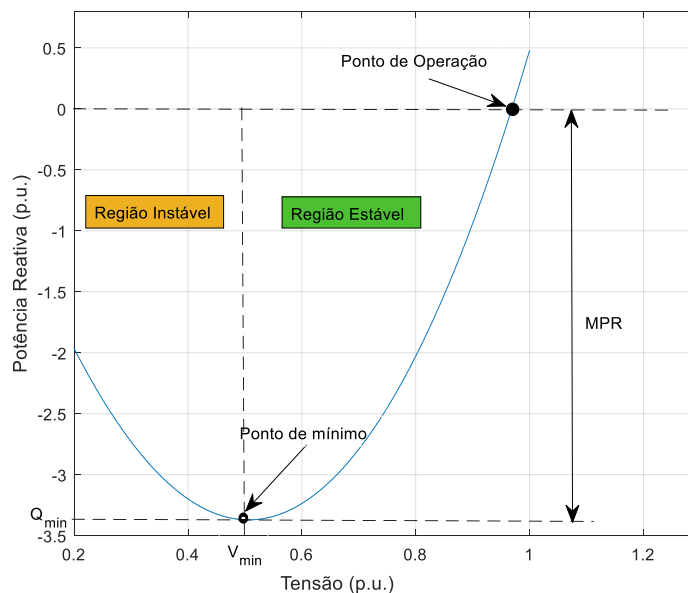
A obtenção da curva VQ envolve a simulação de sucessivos fluxos de potência variando-se a tensão na barra estudada. Diferentemente do que é feito para traçar a curva PV, a carga não sofre alterações na construção da curva VQ. À medida que se varia a tensão na barra, o valor de potência reativa necessária para manter esse perfil de tensão é calculado. Uma representação típica é a consideração de um síncrono fictício conectado à barra a ser estudada como apresentado na Figura 2.4. Esse síncrono fictício seria responsável pela injeção de potência reativa (Q_{sinc}), sendo igual a zero a potência ativa fornecida por ele (P_{sinc}).



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.4 Síncrono fictício

A Figura 2.5 apresenta um exemplo de curva VQ, com destaque para seus principais pontos, construída a partir da variação de V_k e do cálculo de Q_{sinc} necessária para mantê-la.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.5 Curva VQ

O ponto de mínimo da curva VQ é caracterizado por uma tensão de mínimo (V_{min}) e uma potência reativa de mínimo (Q_{min}). Um critério relacionado à estabilidade de tensão considera, para um ponto de operação, que a injeção de potência reativa em uma barra aumenta a sua tensão. Se, em qualquer barra do sistema, o comportamento oposto for observado, então o sistema é dito instável [Kundur, 1994]. Dessa forma, na Figura 2.5, o ponto de mínimo da curva define o limite entre a região estável e a região instável de operação, podendo ser chamado de ponto crítico da curva VQ. Na região estável, tem-se $\partial Q/\partial V > 0$, significando que um aumento na injeção de potência reativa, Q_{sinc} , causa a elevação da tensão na barra. Por outro lado, na região instável, tem-se $\partial Q/\partial V < 0$, onde um aumento na injeção de reativos é acompanhado de uma diminuição na tensão.

Para uma barra sem compensação reativa, o ponto de operação corresponde ao ponto onde a curva cruza o eixo das abscissas [Cutsem, 1998]. A Margem de Potência Reativa (MPR)

pode ser definida como a distância entre o ponto de operação e o ponto de mínimo ou ponto crítico da curva VQ. Essa margem corresponde ao valor de potência reativa que o sistema ainda consegue fornecer à carga para uma dada potência ativa. É importante observar que a MPR não corresponde ao carregamento limite do sistema, pois a construção da curva VQ não envolve aumentos sucessivos de carga. Essa margem deve ser entendida como uma medida da robustez do sistema em relação à potência reativa. Ela reflete o nível de estresse do sistema para determinada situação de carga [Cutsem, 1991].

À medida que a carga do sistema aumenta e a capacidade de fornecimento de reativos da rede diminui, a Margem de Potência Reativa diminui. Um sistema com MPR positiva é um sistema considerado estável. Quando o sistema apresenta MPR igual a zero, este se encontra no seu limite de fornecimento de reativos. Se a margem é negativa, não há ponto de operação viável para o sistema, e o valor da MPR é justamente o valor de compensação de potência reativa necessário para que o sistema possa atender à carga.

Com respeito aos critérios para se avaliar a condição do SEE quanto à estabilidade de tensão, alguns órgãos internacionais, como, por exemplo, o WSCC (*Western Systems Coordinating Council*), ditam que ambas as curvas, PV e VQ, devem ser consideradas para análise de estabilidade de tensão, tanto em ambiente de planejamento como de operação em tempo real. No entanto, o documento gerado por este mesmo órgão [RRWG, 1998] ressalta a impossibilidade de se calcularem essas curvas ou as margens relativas a cada uma delas em tempo real, na época de sua publicação.

A literatura apresenta estudos desenvolvidos no campo da estabilidade de tensão que incorporam a curva VQ. Em [Dong, 2005] e [Mousavi, 2013], são propostos métodos para o gerenciamento de reserva de reativos com o objetivo de melhorar a margem de estabilidade de tensão, baseados na curva VQ. Em [Upadhyay, 2015], a curva VQ é utilizada como critério de classificação de barras críticas e determinação de áreas de controle em um estudo de contingências. No entanto, estes trabalhos tratam de estabilidade de tensão em ambiente de estudos, ou de simulação. Nesse ambiente, é adotado o método de obtenção da curva VQ utilizando sucessivas simulações de fluxo de potência.

Para aplicações de tempo real, conforme discutido anteriormente, podem ser calculados equivalentes de rede a partir de medições locais. Diferentemente da curva PV, que

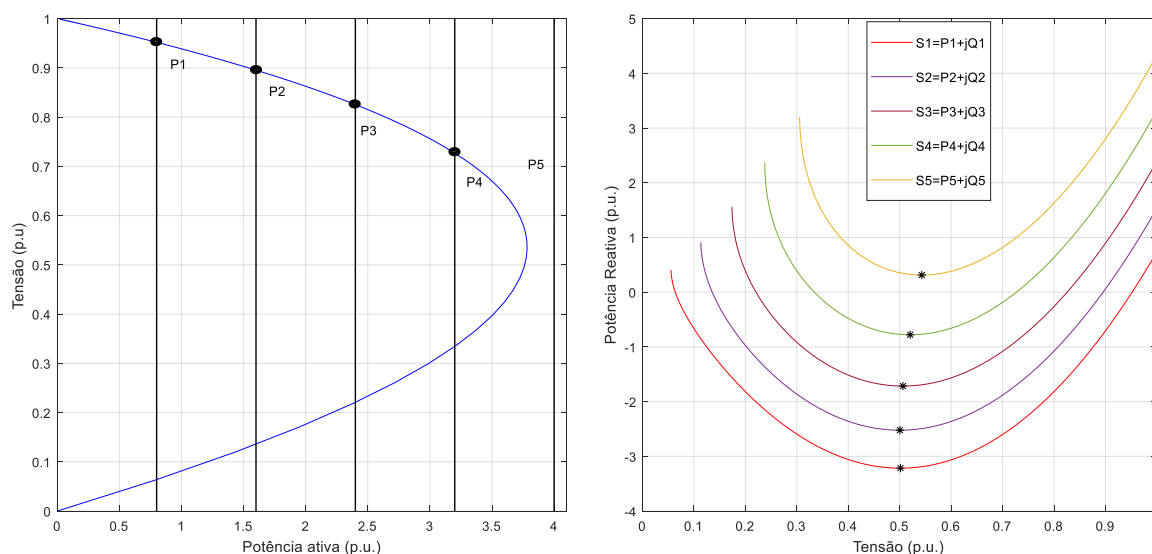
tem seu ponto de MTP determinado pelas equações (2.8) e (2.9) aplicadas aos equivalentes de redes, conforme desenvolvido no tópico anterior, não há equacionamento para a determinação direta do ponto de mínimo da curva VQ.

Neste contexto, destaca-se a importância do desenvolvimento de um equacionamento específico que permita o cálculo direto dos valores de tensão (V_{\min}) e de potência reativa (Q_{\min}) no ponto de mínimo da curva VQ, permitindo o cálculo da MPR em tempo real. Tal importância evidencia a contribuição da pesquisa realizada no mestrado, por meio da metodologia proposta.

2.5 Carregamento do Sistema e o Comportamento da Curva VQ

Tendo em vista que o fenômeno de instabilidade de tensão está associado à capacidade do sistema de atender à carga, torna-se importante analisar o comportamento da curva VQ em relação ao aumento da potência demandada.

Uma forma interessante de visualizar este comportamento é fazendo um paralelo entre as curvas PV e VQ. Para isso, a partir de diferentes valores de carga demandada, são traçadas curvas VQ. Os cinco diferentes valores de carga aparente escolhidos são dados por $S_1 < S_2 < S_3 < S_4 < S_5$, mantendo o mesmo fator de potência. Dessa forma, cada curva VQ traçada corresponde a uma situação de carga. Na curva PV, as linhas verticais representam valores da potência ativa para cada valor de carga do tipo potência constante. Esses diferentes valores de carga apresentam pontos de operação distintos $P_1 < P_2 < P_3 < P_4$, sendo que para o maior valor de potência P_5 não há um ponto de operação, ou seja, o sistema não pode atender a esse valor de carga. A Figura 2.6 apresenta o paralelo entre as curvas PV e VQ.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.6 Curva PV e curvas VQ para diferentes valores de carga

Observa-se na curva PV que os passos de carga são constantes com valor de 0,8 p.u., resultando em uma MPA que diminui também a passos constantes iguais a 0,8 p.u., à medida que a potência demandada aumenta.

Por outro lado, na curva VQ, nota-se que a MPR diminui à medida que a carga demandada aumenta. Apesar do aumento na carga ocorrer a passos constantes, a diminuição na MPR não ocorre da mesma forma. A diminuição dessa margem é mais acentuada à medida que o ponto de instabilidade de tensão fica mais próximo. Para a situação de carga S_5 , que não pode ser atendida pelo sistema, observa-se que a MPR muda de sinal. Essa MPR representa justamente o valor de compensação potência reativa necessária para que o sistema consiga atender à carga.

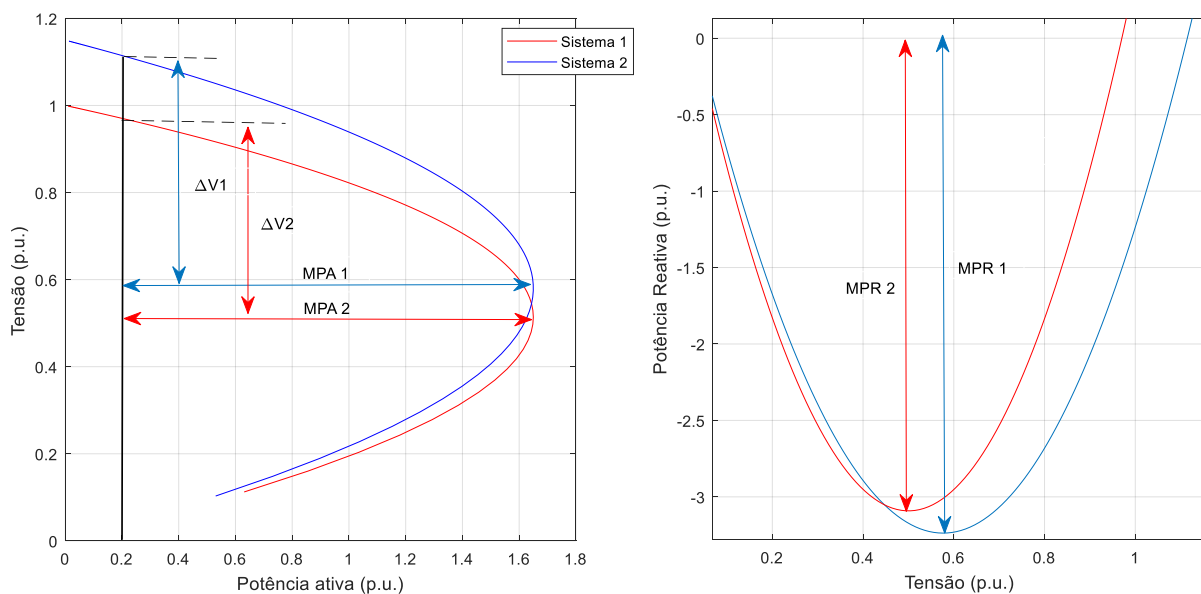
Para um valor de carga igual à potência no ponto de MTP, o ponto de mínimo da curva VQ estaria exatamente no eixo $Q=0$ e, portanto, a MPR seria zero.

Observa-se, também, que o ponto de mínimo da curva VQ se desloca para a direita no gráfico. Dessa forma, a tensão do ponto crítico aumenta à medida que o sistema se aproxima do ponto de instabilidade de tensão. Na curva PV, a tensão crítica se mantém fixa.

2.6 Aspectos Adicionais Sobre a Utilização da Curva VQ

A MPA obtida a partir da curva PV tem sido a margem mais tradicionalmente utilizada para medir a distância de um ponto operativo ao ponto de instabilidade de tensão. Entretanto, em alguns casos, essa margem não se mostra suficiente para caracterizar de forma plena a segurança do ponto operativo do sistema. A MPR pode trazer informações adicionais àquelas fornecidas pela MPA, conforme mostrado a seguir.

Na Figura 2.7 são apresentadas curvas PV e VQ para dois sistemas diferentes, Sistema 1 e Sistema 2. Estes sistemas apresentam o mesmo valor de potência no ponto de MTP e a mesma MPA, para uma determinada carga (potência operativa). No entanto, as MPR são diferentes. Destacam-se também as diferenças entre a tensão de operação e a tensão crítica (ΔV). A Tabela 2.1 apresenta os valores dos pontos de interesse para as curvas da Figura 2.7.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.7 Curvas PV e VQ para sistemas 1 e 2

Tabela 2.1 Comparação entre valores dos sistemas 1 e 2

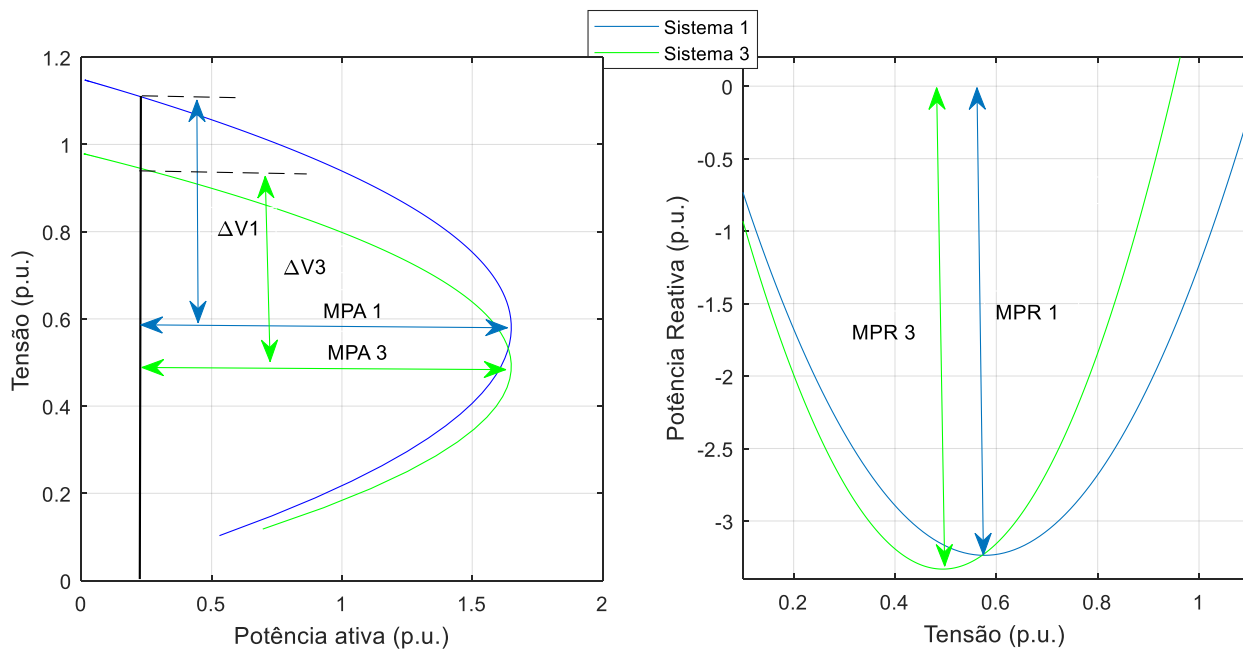
Variável (p.u.)	Sistema 1	Sistema 2
V_{op}	1,11	0,97
P_{MTP}	1,65	1,65
V_{MTP}	0,58	0,51
Q_{min}	-3,24	-3,09
V_{min}	0,58	0,50
ΔV	0,53	0,46
MPA	1,45	1,45
MPR	3,24	3,09

Fonte: Autoria Própria.

Em uma situação de monitoramento de estabilidade de tensão em tempo real, em que apenas as Margens de Potência Ativa fossem calculadas, poderia se chegar à conclusão de que os Sistemas 1 e 2 teriam o mesmo grau de segurança. No entanto, ao se observarem as Margens de Potência Reativa percebe-se que existe uma diferença nos valores obtidos. A MPR para o Sistema 1 é maior que a do Sistema 2, evidenciando que estes sistemas não apresentam a mesma criticidade em relação à estabilidade de tensão.

Uma análise superficial poderia sugerir que a MPR estaria relacionada à distância em tensão do ponto de operação ao ponto de MTP (ΔV). Isto porque, neste exemplo, assim como a MPR, o valor de ΔV para o Sistema 1 se apresenta maior que para o Sistema 2. No entanto, ao se analisarem características de outros sistemas pode-se perceber que essa observação não é sempre válida.

A Figura 2.8 apresenta as curvas PV e VQ para o mesmo Sistema 1 estudado anteriormente, e para um outro sistema, o Sistema 3. A Tabela 2.2 apresenta os valores dos pontos de interesse para estes sistemas.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.8 Curvas PV e VQ para sistemas 1 e 3

Tabela 2.2 Comparação entre valores dos sistemas 1 e 3

Variável (p.u.)	Sistema 1	Sistema 3
V_{op}	1,11	0,95
P_{MTP}	1,65	1,65
V_{MTP}	0,58	0,49
Q_{min}	-3,24	-3,33
V_{min}	0,58	0,49
ΔV	0,53	0,46
MPA	1,45	1,45
MPR	3,24	3,33

Fonte: Autoria Própria.

Da mesma forma que os sistemas comparados anteriormente, as MPA são iguais para os Sistemas 1 e 3, e as MPR são diferentes. No entanto, ao contrário do caso anterior, o sistema com maior MPR (Sistema 3) não é o sistema com maior distância em tensão do ponto de operação ao ponto de MTP.

A partir dessa observação percebe-se que a curva VQ pode trazer informações não observadas por meio da curva PV. As informações fornecidas pelas curvas se complementam e devem ser usadas em conjunto para análises relacionadas à estabilidade de tensão.

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo, os aspectos de destaque com respeito à curva VQ deixam clara a necessidade de se incluir a MPR na análise de estabilidade de tensão em tempo real. Tal margem está diretamente relacionada à proximidade do ponto operativo ao ponto de MTP.

A curva PV, sendo obtida a partir do Teorema de Máxima Transferência de Potência, faz com que os equacionamentos que permitem o cálculo da potência e da tensão no ponto de MTP sejam bastante conhecidos e aplicados. Dessa forma, a maior parte dos índices e margens de estabilidade de tensão, voltados para a operação em tempo real, é baseada nessa curva. Acredita-se que o fato de um equacionamento, que permita o cálculo da curva VQ ou do seu ponto de mínimo em tempo real, ainda não ser conhecido, tenha impossibilitado a incorporação da MPR nas análises.

Antes de apresentar a proposta deste trabalho, torna-se importante identificar algumas características próprias do ambiente de tempo real e os principais desafios relacionados ao cálculo de equivalentes de redes, tema do capítulo que se segue.

CAPÍTULO 3

EQUIVALENTES DE REDES UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DAS CURVAS VQ

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem por objetivo caracterizar os métodos adotados na fase de aplicação dos equacionamentos propostos neste trabalho, para a construção das curvas VQ.

Inicialmente, são discutidos alguns aspectos relacionados ao monitoramento da estabilidade de tensão em tempo real dos SEE, diferenciando-o das análises realizadas em ambiente de estudo. São destacados, também, os desafios e as dificuldades para a determinação de equivalentes de redes de tempo real.

Os métodos selecionados, para cálculo dos equivalentes de redes e da carga-equivalente vista de um barramento, são descritos. Foram escolhidos o método de cálculo de equivalentes de tempo real clássico, apresentado em [Vu, 1999], e o de equivalente analítico, proposto em [Silva, 2018]. São descritas também, duas metodologias para determinação da carga-equivalente, propostas em [Ribeiro, 2011]. Neste trabalho, uma dessas metodologias é utilizada para as simulações.

3.2 Ambiente de Tempo Real

A análise de estabilidade de tensão do SEE apresenta diferentes características, quando se consideram as atividades de estudo e de tempo real. Tais diferenças incluem a dinâmica envolvida na resposta da análise e as informações utilizadas para executá-la.

Nas etapas de estudo, o tempo para se realizarem as análises não é crucial, sendo utilizados dados detalhados, tais como a topologia da rede e os parâmetros do sistema elétrico analisado. Normalmente, as análises são feitas a partir de simulações de fluxo de potência onde a carga pode ser sucessivamente incrementada mantendo-se o fator de potência constante. Conforme já comentado, quando o sistema se encontra próximo ao ponto de máximo carregamento, a matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional do método de Newton-Raphson torna-se mal condicionada, impedindo a convergência. Para contornar esta condição do método, é utilizado o fluxo de potência continuado, o qual permite a construção

das curvas PV até mesmo após o ponto de máximo carregamento. Embora as análises elaboradas nas etapas de estudos possam ser bem detalhadas, estas se referem a situações previstas, estimadas.

Por outro lado, o monitoramento em tempo real exige o conhecimento da condição operativa dinâmica do SEE. A utilização de ferramentas computacionais utilizadas na elaboração dos estudos nem sempre se viabilizam na prática da operação de tempo real. Entretanto, diferentemente das condições previstas e estimadas, o monitoramento do estado do sistema pode se utilizar de medições coletadas na rede por meio dos sistemas de supervisão e controle.

A disponibilidade de dados medidos em tempo real permite avançar na construção de equivalentes de redes capazes de acompanhar a dinâmica do sistema. Porém, o ambiente de medições traz complexidades que não se apresentam nas simulações de fluxo de potência: presença de incertezas inerentes aos processos de medição, influência do passo do aumento de carga, taxa de amostragem das medições, dimensão da janela de dados, dentre outras.

Outra questão a ser observada é a determinação da carga-equivalente vista pelo barramento da rede, uma vez que se têm as medições locais, mas não se conhece a topologia do sistema. Caso tais questões não sejam observadas e tratadas, resultados inconsistentes podem ser obtidos.

Conforme já salientado no capítulo introdutório, a equipe do LRC/UFMG vem atuando de forma intensa na construção de equivalentes de redes, para aplicação em tempo real, haja vista os inúmeros trabalhos acadêmicos e práticos já realizados. Nesses trabalhos, as questões levantadas acima são discutidas e tratadas de forma bastante detalhada, permitindo a criação de equivalentes consistentes e de aplicação efetiva em tempo real.

É importante ressaltar que este trabalho não tem como objetivo dissertar sobre equivalentes de redes. Entretanto, o equacionamento proposto na dissertação é aplicado a sistemas equivalentes, sendo necessária, portanto, a escolha daqueles a serem utilizados nas análises. Optou-se por dois equivalentes, um baseado em medições e outro em cálculo matricial: Equivalente de Vu [Vu, 1999] e Equivalente Analítico [Silva, 2018].

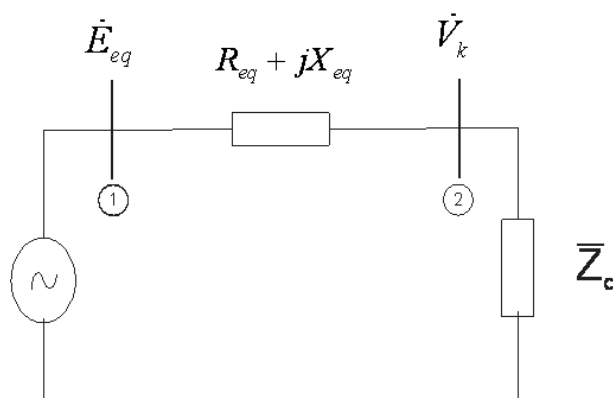
A escolha do Equivalente de Vu se justifica pelo fato de ser considerado o marco inicial da construção de equivalentes de tempo real, constituindo a base para diversos desenvolvimentos. Construído a partir de medições de tensão e de corrente coletadas em barramento do sistema elétrico, possui formulação simples e de fácil compreensão. O Equivalente Analítico, desenvolvido no LRC/UFGM, se baseia no Teorema de Thévenin, tendo sido projetado para servir de referência na avaliação dos resultados apresentados pelas diversas abordagens apresentadas para cálculo de equivalentes.

A decisão de se adotar uma das as metodologias para cálculo da carga-equivalente propostas em [Ribeiro, 2011] se justifica pelo fato destas serem projetadas para aplicações em tempo real, e de mostrarem resultados consistentes quando de sua aplicação.

3.3 Equivalente de Vu

Em [Vu, 1999] é proposto um método, baseado em medições locais, para monitorar a proximidade do ponto de instabilidade de tensão. O método consiste em calcular um equivalente de rede a partir de medições de corrente e de tensão.

O algoritmo para cálculo do equivalente é baseado na equação (3.1) que corresponde à Lei das Malhas aplicada a um circuito equivalente de duas barras, como aquele apresentado na Figura 3.1. Nesta figura, \dot{E}_{eq} representa a tensão da fonte, e $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ a impedância do equivalente, respectivamente. A impedância Z_c representa a carga e \dot{V}_k é a tensão na barra de carga.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.1 Circuito equivalente de duas barras

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

Sabendo que $\dot{E}_{eq} = E_{R_{eq}} + jE_{I_{eq}}$, $\dot{V}_k = u + jw$ e $\dot{I} = g + jh$, pode-se reescrever a equação (3.1) separando as partes real e imaginária. Obtém-se então o sistema de equações na forma $\tilde{A}\vec{x} = \vec{b}$ apresentado em (3.2), em que \tilde{A} é a matriz dos coeficientes, \vec{x} é o vetor de incógnitas e \vec{b} é o vetor dos termos independentes.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -g & h \\ 0 & 1 & -h & -g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{R_{eq}} \\ E_{I_{eq}} \\ R_{eq} \\ X_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Nesse sistema, os valores dos coeficientes g e h e o vetor de termos independentes u e w são obtidos das medições realizadas na barra estudada. O vetor de incógnitas do sistema corresponde aos parâmetros do equivalente de redes a serem calculados.

Para que o sistema seja determinado, são necessárias, no mínimo, duas medições de tensão e de corrente em instantes consecutivos, admitindo que os parâmetros do equivalente a serem calculados não sofram alterações durante esses instantes.

No caso da utilização de exatamente duas medições, a determinação dos parâmetros do equivalente, \dot{E}_{eq} e \bar{Z}_{eq} , pode ser obtida a partir da inversa da matriz de coeficientes, como apresentado na equação (3.3).

$$\vec{x} = \tilde{A}^{-1} \vec{b} \quad (3.3)$$

O uso de uma janela de dados com mais de duas medições torna o sistema sobredeterminado. Neste caso, a determinação dos parâmetros do equivalente \dot{E}_{eq} e \bar{Z}_{eq} é feita da forma apresentada em (3.4), por meio da matriz pseudoinversa \tilde{A}_p^{-1} calculada da forma apresentada em (3.5).

$$\vec{x} = \tilde{A}_p^{-1} \vec{b} \quad (3.4)$$

$$\tilde{A}_p^{-1} = (\tilde{A}^T \tilde{A})^{-1} \tilde{A}^T \quad (3.5)$$

A utilização de um número de medições maior que dois torna-se interessante quando se trata de medições de tempo real pelo fato de que possibilitam uma melhor filtragem de erros do tipo ruído.

3.4 Equivalente Analítico

O Equivalente Analítico apresentado em [Silva, 2018] é proposto como uma referência para a avaliação dos resultados apresentados pelos equivalentes de tempo real. Este se baseia em equações básicas de circuitos elétricos, mais especificamente no equivalente de Thévenin, para a determinação dos parâmetros \dot{E}_{eq} e \bar{Z}_{eq} .

O equivalente de Thévenin é tradicionalmente obtido a partir de técnicas de análise de circuitos e associações de impedâncias em série e paralelo. A metodologia do Equivalente Analítico permite o cálculo do equivalente de Thévenin visto de cada barramento do SEE de forma direta, por meio de matrizes.

Considerando a matriz de admitâncias tradicional do fluxo de potência, \tilde{Y}_B , e a matriz de admitâncias dos geradores e cargas, \tilde{Y}_B^{G-C} , pode-se calcular a matriz de admitâncias modificada, \tilde{Y}_B^{MOD} , da forma apresentada em (3.6).

$$\tilde{Y}_B^{MOD} = \tilde{Y}_B + \tilde{Y}_B^{G-C} \quad (3.6)$$

A matriz \tilde{Y}_B pode ser obtida pelo meio do algoritmo de montagem direta. Os elementos da diagonal principal são constituídos pelo somatório das admitâncias diretamente ligadas à barra e os elementos fora da diagonal principal são o negativo do somatório das admitâncias ligadas entre as barras.

A matriz \tilde{Y}_B^{G-C} é obtida por meio da interpretação do Teorema de Thévenin para barras conectadas a cargas e a geradores. Os elementos da diagonal principal são dados pelo somatório das admitâncias do elemento gerador e da carga ligada à barra, a depender do tipo de barra.

Para barras do tipo PQ, as admitâncias dos geradores (\bar{Y}_G) e das cargas (\bar{Y}_C) são calculadas de acordo com as equações (3.7) e (3.8). Neste tipo de barra a impedância do gerador é considerada infinita para que a admitância se torne nula. A admitância da carga é dada pelo inverso da sua impedância, que pode ser calculada a partir da tensão na barra de carga e da potência consumida.

$$\bar{Y}_G = 0 \quad (3.7)$$

$$\bar{Y}_C = (\bar{Z}_C)^{-1} = \left(\frac{V_C^2}{S_C^*} \right)^{-1} \quad (3.8)$$

Para barras com tensão controlada, sejam elas do tipo PV ou V θ , as admitâncias dos geradores (\bar{Y}_G) são calculadas de acordo com a equação (3.9). A admitância tendendo ao infinito representa o curto-circuito nos geradores. Se existir carga nessas barras, o valor da sua admitância (\bar{Y}_C) é dado pela equação (3.10) e, se não existir, o valor dessa admitância é zero.

$$\bar{Y}_G \rightarrow \lim_{\substack{G \rightarrow \infty \\ B \rightarrow \infty}} (G + jB) \quad (3.9)$$

$$\bar{Y}_C = (\bar{Z}_C)^{-1} = \left(\frac{V_C^2}{S_C^*} \right)^{-1} \quad (3.10)$$

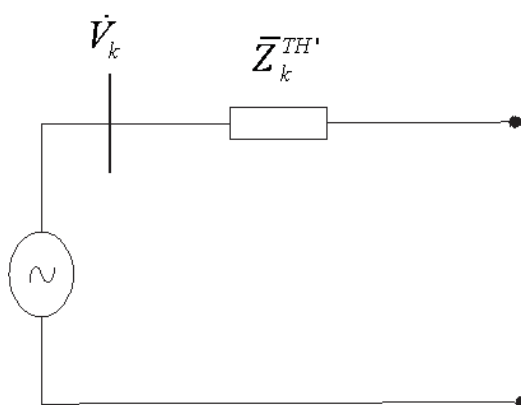
A matriz de admitância modificada (\tilde{Y}_B^{MOD}) possui a forma apresentada em (3.11). Observa-se que, para obter essa matriz, é necessário, além de se conhecer a matriz de admitâncias de barra tradicional (\tilde{Y}_B), saber o resultado do fluxo de potência, pois é necessário o valor da tensão de cada barra para se determinarem os elementos de \tilde{Y}_B^{C-G} .

$$Y_B^{MOD} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{B(1,1)} + \bar{Y}_{G(1,1)} + \bar{Y}_{C(1,1)} & \bar{Y}_{B(1,2)} & \cdots & \bar{Y}_{B(1,N)} \\ \bar{Y}_{B(2,1)} & \bar{Y}_{B(2,2)} + \bar{Y}_{G(2,2)} + \bar{Y}_{C(2,2)} & \cdots & \bar{Y}_{B(2,N)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{Y}_{B(N,1)} & \bar{Y}_{B(N,1)} & \cdots & \bar{Y}_{B(N,N)} + \bar{Y}_{G(N,N)} + \bar{Y}_{C(N,N)} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

A matriz de impedâncias modificada pode ser obtida a partir da inversão de \tilde{Y}_B^{MOD} . Na dissertação [Silva, 2018] é provado que a matriz \tilde{Y}_B^{MOD} sempre possui inversa. Portanto, tem-se definida na equação (3.12) a matriz de impedâncias modificada.

$$\tilde{Z}_B^{MOD} = \left(\tilde{Y}_B^{MOD} \right)^{-1} \quad (3.12)$$

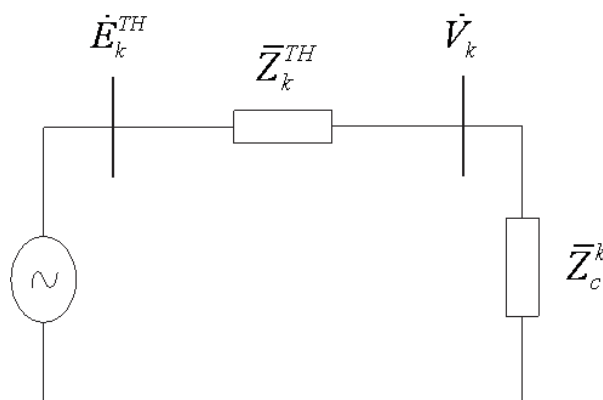
Os elementos da diagonal de \tilde{Z}_B^{MOD} correspondem à impedância equivalente de Thévenin $\bar{Z}_k^{TH'}$ visto da barra correspondente à posição de cada elemento na matriz. A tensão \dot{V}_k resultante do fluxo de potência para cada barra é a tensão do equivalente de Thévenin. O equivalente obtido é apresentado na Figura 3.2.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.2 Circuito equivalente de Thévenin com efeito da carga da barra embutido

Observa-se que este equivalente inclui o efeito da carga. Para os estudos de estabilidade de tensão é necessário modificá-lo de forma a calcular o equivalente de Thévenin visto de uma barra qualquer do sistema, excluindo o efeito da carga dessa barra. Assim, pode-se representar o equivalente, denominado Equivalente Analítico, como um sistema de duas barras conforme a Figura 3.3.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.3 Circuito do Equivalente Analítico

Para calcular a impedância desse novo equivalente, basta considerar que $\bar{Z}_k^{TH'}$ corresponde ao paralelo entre a impedância de Thévenin (\bar{Z}_k^{TH}) e a impedância da carga (\bar{Z}_c^k). Dessa forma, o valor de \bar{Z}_k^{TH} pode ser calculado pela expressão (3.13).

A tensão é calculada considerando o conceito de divisor de tensão no circuito da Figura 3.3. Portanto o valor da tensão \dot{E}_k^{TH} é dado pela expressão (3.14).

$$\bar{Z}_k^{TH} = \left(\frac{1}{\bar{Z}_k^{TH'}} - \frac{1}{\bar{Z}_c^k} \right)^{-1} \quad (3.13)$$

$$\dot{E}_k^{TH} = \left(1 + \frac{\bar{Z}_k^{TH}}{\bar{Z}_c^k} \right) \dot{V}_k \quad (3.14)$$

O Equivalente Analítico pode ser calculado de forma matricial para SEE de grande porte, sendo adotado como referência para os estudos de equivalentes de tempo real.

3.5 Metodologias de Cálculo de Carga

Os equivalentes de redes de tempo real, quando calculados a partir de medições de tensão e de corrente em um barramento, requerem um valor para cada grandeza. A tensão é a própria tensão medida na barra. No entanto, em uma barra podem incidir vários ramos, sendo necessário identificar qual é a corrente que representaria a carga-equivalente vista pelo barramento.

A dissertação [Ribeiro, 2011] propõe duas metodologias para cálculo da carga-equivalente, denominadas Metodologia de Cálculo de Carga 1 (CM1) e Metodologia de Cálculo de Carga 2 (CM2), as quais são definidas de acordo com os sentido dos fluxos de potência nos ramos incidentes na barra estudada.

A primeira considera como carga-equivalente o somatório das potências aparentes para as quais a potência ativa tem sinal positivo no sentido de deixar a barra, seja o sinal positivo ou negativo da potência reativa. A segunda classifica como carga-equivalente o somatório das potências ativas e reativas que apresentam sinal positivo no sentido de deixar a barra.

As equações (3.15) e (3.16) mostram como são calculadas as cargas-equivalentes para as metodologias CM1 e CM2, nas quais Ω_1 corresponde ao conjunto de barras para os quais a potência ativa flui da barra k para i e Ω_2 corresponde ao conjunto de barras para os quais a potência reativa flui da barra k para j .

$$\bar{S}_{eq}^{CM1} = \sum_{i \in \Omega_1} (P_{ki} + jQ_{ki}) \quad (3.15)$$

$$\bar{S}_{eq}^{CM2} = \sum_{i \in \Omega_1} P_{ki} + j \sum_{j \in \Omega_2} Q_{kj} \quad (3.16)$$

A partir da carga-equivalente calculada por um dos dois métodos descritos pode-se calcular a impedância-equivalente da carga e a corrente-equivalente de carga, como apresentado nas expressões (3.17) e (3.18).

$$\bar{Z}_c^{eq} = \frac{(\dot{V}_k)^2}{\bar{S}_{eq}^{CM_{1,2}}} \quad (3.17)$$

$$\dot{i}_k^{eq} = \left(\frac{\bar{S}_{eq}^{CM_{1,2}}}{\dot{V}_k} \right)^* \quad (3.18)$$

A corrente-equivalente obtida pode ser utilizada para o cálculo do equivalente de Vu ou outro equivalente de tempo real que tenha como base medições de tensão e de corrente de carga.

3.6 Considerações Finais

Conforme discutido neste capítulo, o ambiente de tempo real possui características particulares que tornam a atividade de monitoramento da estabilidade de tensão uma atividade bastante desafiadora e complexa. Isto reforça a importância do desenvolvimento de ferramentas que tragam informações consistentes e de forma dinâmica para a operação.

A metodologia proposta neste trabalho contribui nesta direção, possibilitando o monitoramento em tempo real da tensão, V_{\min} , da potência reativa, Q_{\min} , no ponto de mínimo da curva VQ, e da margem de potência reativa, MPR.

O capítulo que se segue apresenta a proposta deste trabalho, cujo equacionamento é desenvolvido já considerando o circuito calculado por técnica de equivalente de redes de tempo real.

CAPÍTULO 4

MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA EM TEMPO REAL – METODOLOGIA PARA CÁLCULO DIRETO DO PONTO DE MÍNIMO DA CURVA VQ

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia proposta, para o cálculo da curva do tipo VQ em tempo real, e também para o cálculo direto do ponto de mínimo dessa curva. As equações são desenvolvidas para um equivalente de duas barras. A ideia é que, assim como é feito para a curva PV, a curva VQ e a MPR possam ser calculadas em tempo real a partir de equações e, dessa forma, possam complementar as informações trazidas pela curva PV.

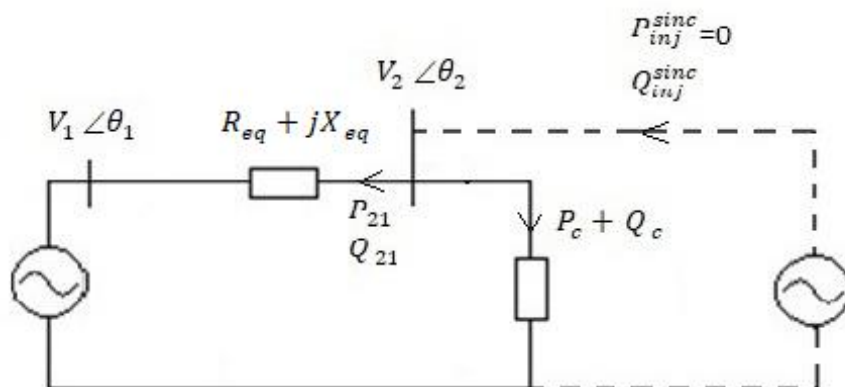
O equacionamento é desenvolvido seguindo o mesmo raciocínio que é feito para a obtenção das equações do Teorema da Máxima Transferência de Potência apresentado no Capítulo 2. A partir da observação de que o ponto crítico da curva VQ é um ponto de mínimo, pode-se utilizar a derivada para obter suas coordenadas. No entanto, as equações para a curva VQ não são tão simples quanto aquelas da curva PV.

A proposta inicia-se com a obtenção de uma equação para a potência reativa injetada na barra. Essa equação é uma função da tensão na barra de carga. Pelo fato de apresentar um termo dentro de uma raiz quadrada, a função é irracional e torna-se necessário determinar o intervalo onde a função é definida. Em seguida, para encontrar equações para o cálculo da potência e tensão no ponto de mínimo, calcula-se o ponto onde a derivada dessa função é igual a zero.

Por fim são feitas simulações que comprovam que as equações desenvolvidas resultam na mesma curva VQ e no ponto crítico obtidos por meio da resolução de sucessivos fluxos de potência em um sistema de duas barras.

4.2 Formulação para Cálculo Direto da Curva VQ e do Ponto Mínimo

Para se construir a curva VQ de uma determinada barra do SEE, deve-se acrescentar um síncrono fictício ao circuito equivalente de duas barras referente a ela, conforme indicado na Figura 4.1.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 4.1 Circuito equivalente de duas barras para cálculo da curva VQ

Visando facilitar a nomenclatura das variáveis nas equações, a barra com a fonte de tensão equivalente é a barra 1 com tensão $V_1 \angle \theta_1$, enquanto a barra de carga, para a qual se deseja calcular a curva VQ, é a barra 2 com tensão $V_2 \angle \theta_2$. Nessa figura, as potências ativa e reativa, que fluem da barra 2 para a barra 1, são representadas por P_{21} e Q_{21} , e as potências consumidas pela carga são indicadas por P_c e Q_c , respectivamente.

O síncrono fictício é representado por um gerador conectado à barra 2, com injeção de potência reativa Q_{inj}^{sinc} , e de potência ativa P_{inj}^{sinc} igual a zero. Os parâmetros do equivalente de rede e da carga são conhecidos e obtidos a partir do método de cálculo de equivalentes escolhido.

4.2.1 Formulação Geral para Cálculo Direto da Curva VQ

O primeiro passo é obter uma equação para a potência reativa injetada pelo síncrono fictício na barra de carga em função da tensão nesta mesma barra, considerando nula a potência ativa por ele injetada. Para isso, sabendo-se que a soma das potências injetadas em um nó deve ser igual à soma das potências que saem desse nó, podem ser escritas as equações (4.1) e (4.2) para a barra 2.

$$0 = P_{21} + P_c \quad (4.1)$$

$$Q_{inj}^{sync} = Q_{21} + Q_c \quad (4.2)$$

Considerando o fluxo de potência na impedância equivalente, saindo da barra 2 para a barra 1, S_{21} , pode-se escrever a equação (4.3). Nesta equação $\theta_{21} = \theta_2 - \theta_1$.

$$S_{21} = \frac{V_2^2 R_{eq} + jV_2^2 X_{eq} - V_2 V_1 (R_{eq} \cos \theta_{21} + jR_{eq} \text{sen} \theta_{21} + jX_{eq} \cos \theta_{21} - X_{eq} \text{sen} \theta_{21})}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (4.3)$$

Separando a potência ativa (parte real) e a potência reativa (parte imaginária), têm-se as equações (4.4) e (4.5).

$$P_{21} = \frac{V_2^2 R_{eq} - V_2 V_1 R_{eq} \cos \theta_{21} + V_2 V_1 X_{eq} \text{sen} \theta_{21}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (4.4)$$

$$Q_{21} = \frac{V_2^2 X_{eq} - V_2 V_1 R_{eq} \text{sen} \theta_{21} - V_2 V_1 X_{eq} \cos \theta_{21}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \quad (4.5)$$

Substituindo (4.4) e (4.5) nas equações (4.1) e (4.2), respectivamente, são obtidas as equações (4.6) e (4.7).

$$0 = \frac{V_2^2 R_{eq} - V_2 V_1 R_{eq} \cos \theta_{21} + V_2 V_1 X_{eq} \text{sen} \theta_{21}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} + P_c \quad (4.6)$$

$$Q_{inj}^{\text{sin c}} = \frac{V_2^2 X_{eq} - V_2 V_1 R_{eq} \text{sen} \theta_{21} - V_2 V_1 X_{eq} \cos \theta_{21}}{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} + Q_c \quad (4.7)$$

Como a curva VQ é construída para variações no módulo da tensão na barra estudada, é necessário obter uma expressão em função apenas de V_2 . A potência reativa injetada pelo síncrono na equação (4.7) está em função de V_2 e θ_2 . Deve-se então isolar θ_{21} na expressão (4.6) como apresentado em (4.8). Nessa expressão, θ_{eq} corresponde ao ângulo da impedância equivalente \bar{Z}_{eq} .

$$\theta_{21} = \arccos \left(\frac{V_2^2 \cos \theta_{eq} + P_c Z_{eq}}{V_2 V_1} \right) - \theta_c \quad (4.8)$$

Ao substituir (4.8) em (4.7) e utilizar algumas propriedades trigonométricas para simplificar a equação, obtém-se uma expressão geral para o cálculo direto da curva VQ. Essa

equação, apresentada em (4.9), depende apenas do conhecimento do equivalente de redes e da carga.

$$Q_{inj}^{sinc} = \frac{V_2^2 \text{sen} \theta_{eq} - \sqrt{V_2^4 (-\cos^2 \theta_{eq}) + V_2^2 (V_1^2 - 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}) - P_c^2 Z_{eq}^2}}{Z_{eq}} + Q_c \quad (4.9)$$

A equação obtida permite calcular a curva VQ diretamente a partir do equivalente de redes. Basta promover variações no módulo da tensão na barra de carga e calcular os valores de potência reativa injetada, Q_{inj}^{sinc} , correspondentes a cada variação. Essa equação é uma função de V_2 e pode ser chamada de **Função Geral para Cálculo da Curva VQ**.

4.2.2 Estudo do Domínio da Função

Observa-se que a formulação geral para cálculo da curva VQ desenvolvida no tópico anterior é uma função irracional. Funções desse tipo só são definidas em um intervalo específico denominado domínio da função.

No caso, como aparece um termo dentro de uma raiz quadrada, para valores de V_2 fora do domínio, a função assume valores imaginários. Não é esperado que Q_{inj}^{sinc} assumam valores imaginários e, portanto, devem ser estabelecidos os valores de tensão na barra de carga que pertençam ao domínio da função. Esse domínio é definido pelos valores de V_2 que atendam à inequação (4.10).

$$V_2^4 (-\cos^2 \theta_{eq}) + V_2^2 (V_1^2 - 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}) - P_c^2 Z_{eq}^2 \geq 0 \quad (4.10)$$

Para determinar quais são esses valores, deve-se fazer o estudo de sinais. Esse estudo consiste em calcular as raízes do polinômio à esquerda do sinal de desigualdade e determinar

os intervalos para os quais a inequação é atendida. As raízes são dadas pelas expressões de (4.11) a (4.14).

$$V_2^I = -\sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} + V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.11)$$

$$V_2^{II} = +\sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} + V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.12)$$

$$V_2^{III} = -\sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} - V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.13)$$

$$V_2^{IV} = +\sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} - V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.14)$$

Observando as expressões obtidas, percebe-se que elas podem apresentar valores reais ou imaginários dependendo dos parâmetros. Se os parâmetros forem tais que a expressão dentro das raízes seja negativa, o resultado é um valor imaginário e, nesse caso, não corresponde a um ponto onde a função muda de sinal. Portanto, não é um ponto a ser considerado no estudo dos sinais.

Para analisar se as expressões obtidas para as raízes resultam em valores reais, ou seja, se realmente representam pontos onde a equação muda de sinal, as expressões (4.11) a (4.14) são escritas considerando três termos, $T_1 = -V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}$, $T_2 = V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}$ e $T_3 = -2 \cos^2 \theta_{eq}$, como apresentado em (4.15) a (4.18).

$$V_2^I = -\sqrt{\frac{T_1 + T_2}{T_3}} \quad (4.15)$$

$$V_2^{II} = +\sqrt{\frac{T_1 + T_2}{T_3}} \quad (4.16)$$

$$V_2^{III} = -\sqrt{\frac{T_1 - T_2}{T_3}} \quad (4.17)$$

$$V_2^{IV} = +\sqrt{\frac{T_1 - T_2}{T_3}} \quad (4.18)$$

A análise desses termos resulta em quatro casos. O primeiro acontece quando o valor dentro da raiz de T_2 é negativo. Nesse caso, as quatro raízes são imaginárias. Como o coeficiente do termo de quarta ordem em (4.10) é negativo, a função representada por este polinômio tende a menos infinito quando V_2 tende para menos ou mais infinito. Se as raízes são todas imaginárias, então a função é sempre negativa e a inequação em (4.10) nunca é satisfeita. Logo, o domínio da função é um conjunto vazio.

Os demais casos ocorrem quando o termo dentro da raiz quadrada de T_2 é maior ou igual a zero, como apresentado em (4.19), sendo T_2 , portanto, maior ou igual a zero.

$$V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} \geq 0 \quad (4.19)$$

Se (4.19) é satisfeita, pode-se afirmar que o termo T_1 é, necessariamente, negativo. Assim, pode-se escrever a equação (4.20).

$$-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} \leq 0 \quad (4.20)$$

Nessa situação, as raízes identificadas pelos índices III e IV resultam em valores reais, pois o numerador $(T_1 - T_2)$ é um número necessariamente negativo e o denominador T_3 também.

Já as raízes com índices I e II podem ser imaginárias, reais e iguais a zero ou reais e diferentes de zero. Se o módulo de T_1 for maior que módulo de T_2 , o numerador resulta em um número negativo $(T_1 + T_2)$ e essas raízes são reais e diferentes de zero. Se o módulo de T_1 for igual ao módulo de T_2 , essas raízes são reais e iguais a zero. Se o módulo de T_1 for menor que o módulo de T_2 essas raízes são imaginárias.

Pode-se afirmar ainda que, quando as quatro raízes existirem, os valores dos módulos das raízes apresentarão a seguinte relação: $|V_2^I| = |V_2^{II}| \leq |V_2^{III}| = |V_2^{IV}|$.

A Tabela 4.1 apresenta o estudo de sinais descrito anteriormente na forma gráfica.

Tabela 4.1 Estudo do domínio da função geral para cálculo da curva VQ

Caso	Raízes	Estudo de sinais	Domínio da função
T_2 imaginário	$V_2^I, V_2^{II}, V_2^{III}$ e V_2^{IV} imaginários	$-\cos^2\theta_{eq}$ - 0 -	\emptyset
T_2 real $ T_1 < T_2 $	V_2^I e V_2^{II} imaginários V_2^{III} e V_2^{IV} reais	$-\cos^2\theta_{eq}$ - V_2^{III} - 0 - V_2^{IV} - V_2^{III} - + + + V_2^{IV} - - - + Domínio - + + -	$V_2^{III} \leq V_2 \leq V_2^{IV}$
T_2 real $ T_1 = T_2 $	$V_2^I = V_2^{II} = 0$ V_2^{III} e V_2^{IV} reais	$V_2^I = V_2^{II} = 0$ $-\cos^2\theta_{eq}$ - V_2^{III} - 0 - V_2^{IV} - V_2^I - - + + V_2^{II} - - + + V_2^{III} - + + + V_2^{IV} - - - + Domínio - + + -	$V_2^{III} \leq V_2 \leq V_2^{IV}$
T_2 real $ T_1 > T_2 $	$V_2^I, V_2^{II}, V_2^{III}$ e V_2^{IV} reais	$-\cos^2\theta_{eq}$ - V_2^{III} - V_2^I - 0 - V_2^{II} - V_2^{IV} - V_2^I - - + + + + V_2^{II} - - - - + + V_2^{III} - + + + + + V_2^{IV} - - - - - + Domínio - + - - + -	$V_2^{III} \leq V_2 \leq V_2^I$ \cup $V_2^{II} \leq V_2 \leq V_2^{IV}$

Fonte: Autoria Própria

A curva calculada pela equação (4.9) é simétrica em relação ao eixo das ordenadas. No contexto da curva VQ, não faz sentido considerar a parte negativa do domínio, uma vez que a curva é traçada para variações no módulo de V_2 . Dessa forma, devem ser seguidas as condições indicadas abaixo, para se determinar o intervalo de interesse para a curva VQ.

- Quando V_2^I , V_2^{II} , V_2^{III} e V_2^{IV} são imaginários, o domínio é o conjunto vazio. Não é possível traçar a curva VQ.
- Quando V_2^{III} e V_2^{IV} são reais e V_2^I e V_2^{II} imaginários ou reais iguais a zero, o domínio é $V_2^{III} \leq V_2 \leq V_2^{IV}$. A curva VQ deve ser traçada no intervalo $0 \leq V_2 \leq V_2^{IV}$.
- Quando V_2^I , V_2^{II} , V_2^{III} e V_2^{IV} são reais, o domínio é $V_2^{III} \leq V_2 \leq V_2^I \cup V_2^{II} \leq V_2 \leq V_2^{IV}$. A curva VQ deve ser traçada no intervalo $V_2^{II} \leq V_2 \leq V_2^{IV}$.

4.2.3 Desenvolvimento das Equações para o Ponto Crítico da Curva VQ

Sabendo que o ponto crítico da curva VQ é um ponto de mínimo, para obter os valores de tensão e de potência reativa que caracterizam esse ponto, deve-se calcular a derivada da equação (4.9). Essa derivada é apresentada na equação (4.21).

$$\frac{dQ_{inj}^{sinc}(V_2)}{dV_2} = \frac{2V_2 \text{sen} \theta_{eq} - \frac{V_1^2 V_2 - 2V_2^3 \cos^2 \theta_{eq} - 2V_2 P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}{\sqrt{V_2^4 (-\cos^2 \theta_{eq}) + V_2^2 (V_1^2 - 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}) - P_c^2 Z_{eq}^2}}}{Z_{eq}} \quad (4.21)$$

Ao igualar essa derivada a zero e organizar os termos, obtém-se uma equação irracional, apresentada em (4.22).

$$\sqrt{V_2^4 (-\cos^2 \theta_{eq}) + V_2^2 (V_1^2 - 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}) - P_c^2 Z_{eq}^2} = \frac{V_1^2 - 2V_2^2 \cos^2 \theta_{eq} - 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}{2 \text{sen} \theta_{eq}} \quad (4.22)$$

Para resolver uma equação irracional, o primeiro passo é elevar ambos os lados ao expoente adequado de forma a eliminar o radical. A equação obtida a partir dessa operação é chamada equação consequente. Essa equação deve ser resolvida de forma a encontrar os valores da incógnita. Se o expoente for par, os valores obtidos são compostos pelas raízes da equação original e, em alguns casos, raízes estranhas. Essas últimas não são raízes da equação original, mas satisfazem a equação consequente. Para determinar se as raízes obtidas são estranhas ou não, deve-se efetuar uma verificação. Essa verificação consiste em substituir os valores encontrados na equação original e observar se o resultado é consistente.

Como o radical é de índice dois, pode-se resolver a equação (4.22) elevando ambos os lados ao quadrado. A equação consequente (4.23) é uma equação biquadrada e, portanto, apresenta quatro raízes.

$$V_2^4(-4\cos^2\theta_{eq}) + V_2^2(4V_1^2 - 8P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq}) + (-4P_c^2 Z_{eq}^2 - V_1^4 + 4V_1^2 P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq}) = 0 \quad (4.23)$$

As quatro raízes são apresentadas nas equações de (4.24) a (4.27) e identificadas pelos índices de R1 a R4. Para determinar se elas realmente satisfazem a equação (4.22), é necessário fazer a substituição de cada raiz. Ao proceder a essa substituição, observa-se que apenas as raízes V_2^{R1} e V_2^{R2} geram resultados consistentes, sendo de fato raízes de (4.22). Por outro lado, V_2^{R3} e V_2^{R4} não geram resultados consistentes. Elas são raízes estranhas e não fazem parte do conjunto solução da equação.

Sabendo-se que a curva VQ é traçada para valores positivos de tensão, pode-se concluir que V_2^{R2} , por ser negativo, não representa o valor de tensão no ponto de mínimo da curva VQ. Logo, o valor de V_2^{R1} , calculado pela equação apresentada em (4.24), é o valor da tensão no ponto de mínimo da curva VQ e, então, $V_{\min} = V_2^{R1}$.

$$V_2^{R1} = + \sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} + V_1 \text{sen} \theta_{eq} \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.24)$$

$$V_2^{R2} = - \sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} + V_1 \text{sen} \theta_{eq} \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.25)$$

$$V_2^{R3} = + \sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} - V_1 \text{sen} \theta_{eq} \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.26)$$

$$V_2^{R4} = - \sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq} - V_1 \text{sen} \theta_{eq} \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2 \cos^2 \theta_{eq}}} \quad (4.27)$$

Ao substituir (4.24) na equação (4.9), obtém-se a expressão para o valor de potência reativa no ponto de mínimo da curva VQ. Essa expressão é apresentada em (4.28).

$$Q_{\min} = \frac{\text{sen} \theta_{eq} (-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}) + V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos \theta_{eq}}}{-2Z_L \cos^2 \theta_{eq}} + Q_c \quad (4.28)$$

4.2.4 Estudo do Domínio da Função – Caso Específico

Para o caso específico em que a impedância do equivalente de redes possui parte real igual a zero, simplificação muito comum em estudos de sistemas de extra-alta tensão, o estudo do domínio e a formulação para cálculo do ponto de mínimo ficam diferentes.

Em um primeiro momento, se poderia supor que fazer $R_{eq} = 0$ nas expressões obtidas anteriormente bastaria. No entanto, os desenvolvimentos feitos neste tópico 4.2.4 e no tópico 3.2.5 mostram que os resultados não são os mesmos.

Neste caso, para o cálculo do domínio, a equação dentro da raiz em (4.9) pode ser simplificada e o domínio da função deve atender à inequação (4.29).

$$V_2^2 V_1^2 - P_c^2 Z_{eq}^2 \geq 0 \quad (4.29)$$

Essa inequação possui apenas duas raízes apresentadas em (4.30) e (4.31).

$$V_2^I = -\frac{P_c X_{eq}}{V_1} \quad (4.30)$$

$$V_2^{II} = +\frac{P_c X_{eq}}{V_1} \quad (4.31)$$

O estudo de sinais é mostrado na Tabela 4.2. Como as raízes são reais, independentemente dos valores das variáveis, o estudo de sinais é composto por apenas um caso.

Tabela 4.2 Estudo do domínio da função geral para cálculo da curva VQ – Caso especial

Raízes	Estudo de sinais	Domínio da função
V_2^I e V_2^{II} reais	$ \begin{array}{ccccccc} & - & V_2^I & + & 0 & + & V_2^{II} & + \\ & \text{---} & & \text{---} & & \text{---} & & \text{---} \\ & & & & & & & \\ & - & & - & - & - & & + \\ & \text{---} & & \text{---} & & \text{---} & & \text{---} \\ & & & & & & & \\ \text{Domínio} & + & & - & & - & & + \\ & \text{---} & & \text{---} & & \text{---} & & \text{---} \end{array} $	$V_2 \leq V_2^I \cup V_2 \geq V_2^{II}$

Fonte: Autoria Própria.

Como já discutido anteriormente, a parte da curva que corresponde a valores negativos de V_2 não interessa para o estudo da curva VQ, uma vez que essa curva é traçada para valores de módulo de tensão. Por isso, nesse caso, a curva VQ deve ser traçada de acordo com a seguinte condição:

- Se a parte real do equivalente é nula, o domínio é dado por $V_2 \leq V_2^I \cup V_2 \geq V_2^{II}$. A curva VQ deve ser traçada no intervalo $V_2 \geq V_2^{II}$.

Caso fosse feito simplesmente $R_{eq} = 0$ nas expressões (4.11) a (4.14), o resultado não seria o mesmo, uma vez que, para $R_{eq} = 0$, $\cos \theta_{eq} = 0$. Isso resultaria em uma indeterminação nas expressões das raízes.

4.2.5 Desenvolvimento das Equações para o Ponto Crítico da Curva VQ – Caso Específico

Da mesma forma feita para o caso geral, as expressões para tensão e potência no ponto de mínimo devem ser desenvolvidas para o caso particular em que a parte real do equivalente de redes é zero. Pode-se calcular, simplificando a expressão (4.22) de maneira a se obter (4.32).

$$\sqrt{V_2^2 V_1^2 - P_c^2 X_{eq}^2} = \frac{V_1^2}{2} \quad (4.32)$$

Procedendo da mesma forma que foi feita anteriormente, ao elevar ambos os lados da expressão (4.32) ao quadrado, obtém-se (4.33).

$$V_2^2(4V_1^2) + (-V_1^4 - 4P_c^2 X_{eq}^2) = 0 \quad (4.33)$$

As raízes dessa equação são apresentadas pelas expressões (4.34) e (4.35). Nesse caso, ambas as raízes obtidas são solução de (3.32) e, portanto, nenhuma delas é raiz estranha. Como a raiz apresentada em (4.35) é negativa, pode-se afirmar que ela não corresponde ao valor de tensão no mínimo da curva VQ. Dessa forma, o valor de tensão no ponto de mínimo da curva é dado por $V_{\min} = V_{2(R_{eq}=0)}^{R1}$.

$$V_2^{R1} = + \sqrt{\frac{V_1^2}{4} + \frac{P_c^2 X_{eq}^2}{V_1^2}} \quad (4.34)$$

$$V_2^{R2} = - \sqrt{\frac{V_1^2}{4} + \frac{P_c^2 X_{eq}^2}{V_1^2}} \quad (4.35)$$

Assim como feito anteriormente, ao substituir (4.34) na equação (4.9), considerando $R_{eq} = 0$, obtém-se a expressão para o cálculo do valor de potência reativa no ponto de mínimo da curva VQ. Essa expressão é apresentada em (4.36).

$$Q_{\min} = \frac{-V_1^2}{4X_{eq}} + \frac{P_c^2 Z_{eq}}{V_1^2} + Q_c \quad (4.36)$$

Caso fosse considerado simplesmente $R_{eq} = 0$ nas expressões (4.24) e (4.28), os resultados obtidos não seriam os mesmos. Ambos os casos resultariam em indeterminação.

4.3 Síntese das Formulações Desenvolvidas

A Tabela 4.3 apresenta as principais expressões obtidas por meio dos desenvolvimentos feitos neste capítulo.

A partir do conhecimento das expressões apresentadas nessa tabela, é possível traçar a curva VQ ou calcular apenas o ponto de mínimo dessa curva de forma direta a partir do conhecimento do equivalente de redes e da carga. Para traçar a curva VQ, basta determinar o intervalo onde ela é definida, de acordo com cada caso, e utilizar a Função Geral para Cálculo da Curva VQ. Para obter diretamente o ponto de mínimo, basta utilizar as equações associadas ao caso geral ou ao caso específico.

A MPR é obtida de forma direta a partir da potência reativa no ponto de mínimo. Como essa margem corresponde à distância do ponto de operação ao ponto de mínimo, para um sistema sem compensação, tem-se que $MPR = 0 - Q_{\min}$.

Tabela 4.3 Síntese das formulações elaboradas

<p>Função geral para cálculo da curva VQ</p>	$Q_{inj}^{sinc}(V_2) = \frac{V_2^2 \text{sen}\theta_{eq} - \sqrt{V_2^4(-\cos^2\theta_{eq}) + V_2^2(V_1^2 - 2P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq}) - P_c^2 Z_{eq}^2}}{Z_{eq}} + Q_c \quad (4.9)$		<p>(4.9)</p>	
<p>Intervalo do domínio a ser considerado para curva VQ</p>	<p>Caso geral</p>	<p>$0 \leq V_2 \leq V_2^{IV}$ se V_2^{II} não for real ou $V_2^{II} \leq V_2 \leq V_2^{IV}$ se V_2^{II} for real.</p>	$V_2^{II} = + \sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq} + V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq}}}{-2\cos^2\theta_{eq}}} \quad (4.12)$	<p>(4.12)</p>
	<p>Caso com $R_{eq} = 0$</p>	<p>$V_2 \geq V_2^{II}$</p>	$V_2^{II} = + \frac{P_c X_{eq}}{V_1} \quad (4.31)$	<p>(4.31)</p>
	<p>Caso com $R_{eq} = 0$</p>			
<p>Equação para cálculo da tensão no ponto crítico da VQ</p>	<p>Caso geral</p>	$V_{min} = + \sqrt{\frac{-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq} + V_1 \text{sen}\theta_{eq} \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq}}}{-2\cos^2\theta_{eq}}} \quad (4.24)$	<p>(4.24)</p>	
	<p>Caso com $R_{eq} = 0$</p>	$V_{min} = + \sqrt{\frac{V_1^2}{4} + \frac{P_c^2 X_{eq}^2}{V_1^2}} \quad (4.34)$	<p>(4.34)</p>	
<p>Equação para cálculo da potência reativa no ponto crítico da VQ</p>	<p>Caso geral</p>	$Q_{min} = \frac{\text{sen}\theta_{eq}(-V_1^2 + 2P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq}) + V_1 \sqrt{V_1^2 - 4P_c Z_{eq} \cos\theta_{eq}}}{-2Z_L \cos^2\theta_{eq}} + Q_c \quad (4.28)$	<p>(4.28)</p>	
	<p>Caso com $R_{eq} = 0$</p>	$Q_{min} = \frac{-V_1^2}{4X_{eq}} + \frac{P_c^2 Z_{eq}}{V_1^2} + Q_c \quad (4.36)$	<p>(4.36)</p>	

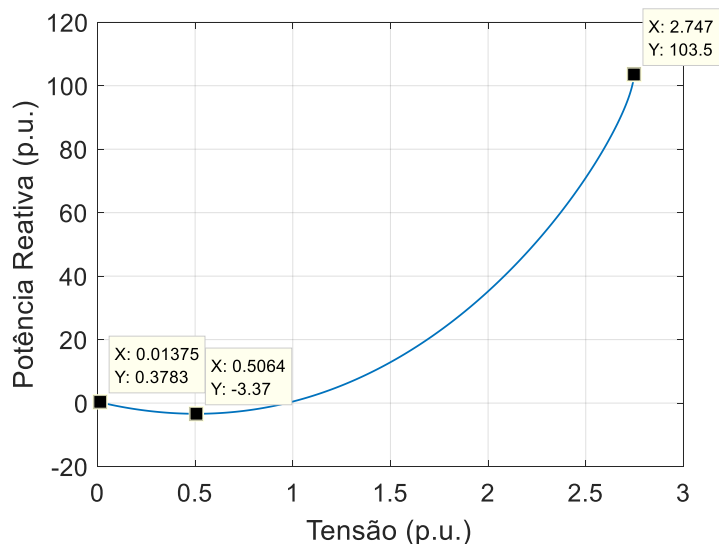
Fonte: Autoria Própria.

4.4 Validação do Equacionamento Proposto

Para validar as equações propostas foram feitas diversas simulações considerando diferentes sistemas simples de duas barras, ou seja, diferentes valores de carga, de impedância e de fonte de tensão. As simulações foram feitas no sentido de comparar as curvas VQ obtidas a partir de simulações de fluxo de potência e a partir da Função Geral para Cálculo da Curva VQ.

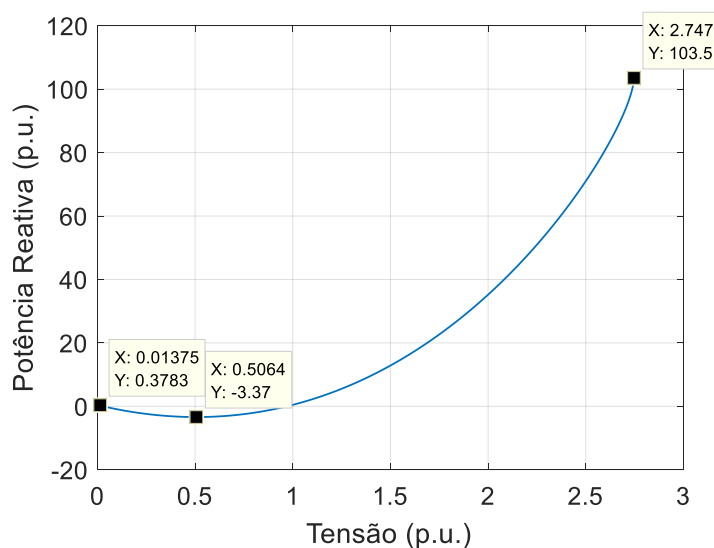
Neste tópico são apresentados os resultados das simulações para um desses sistemas, pois os resultados e observações são os mesmos para os demais, o que confirma a generalidade das equações propostas.

Considerando um sistema equivalente de duas barras com valores de $V_1 \angle \theta_1 = 1 \angle 0^\circ$ p.u., $\bar{Z}_{eq} = 0,0246 + j0,0633$ p.u., e $S_c = 0,2 + j0,4$ p.u., são construídas as curvas VQ mostradas na Figura 4.2 e Figura 4.3. Na Figura 4.2, a curva é construída a partir do equacionamento proposto e, na Figura 4.3, utilizando programa de fluxo de potência.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 4.2 Curva VQ calculada pela formulação proposta



Fonte: Autoria Própria.

Figura 4.3 Curva VQ calculada por simulações de fluxo de potência

Como a parte real da impedância equivalente é diferente de zero, deve-se utilizar as equações (4.11) a (4.14), para determinar a parte positiva do domínio da função de acordo com a Tabela 4.3. Dessa forma obtém-se o intervalo $0,0136 \leq V_2 \leq 2,747$. Utiliza-se, então, a equação (4.9) para calcular a curva VQ no intervalo definido anteriormente.

A tensão e a potência reativa no ponto de mínimo são calculadas pelas equações (4.24) e (4.28), respectivamente. Os valores obtidos são $V_{\min} = 0,5064$ p.u. e $Q_{\min} = -3,3704$ p.u., ambos destacados na Figura 4.2.

Ao serem realizadas sucessivas simulações de fluxo de potência e traçada a curva VQ, para todo o intervalo em que o método de Newton-Raphson obtém convergência, observa-se que esse intervalo é o mesmo calculado pelas expressões propostas. Os pontos correspondentes aos limites desse intervalo são destacados nos gráficos. Na prática, curvas VQ não precisam ser traçadas para valores muito maiores que 1,2 p.u., pois tais valores não correspondem aos observados em sistemas de potência. Entretanto, os gráficos estudados neste tópico foram traçados para todo o intervalo possível, para mostrar que o intervalo definido pelas equações é coerente com os resultados do fluxo de potência.

Os valores de tensão e de potência reativa no ponto de mínimo, obtidos por simulações de fluxo de potência, também estão destacados no gráfico da Figura 4.3. Observe-se que esses pontos são exatamente os mesmos obtidos utilizando as equações propostas.

A MPR para esse sistema é dada por: $MPR = 0 - Q_{\min}$. Portanto, o valor obtido para esse sistema de duas barras é dado por $MPR=3,37$.

Dessa forma, pode-se dizer que a curva traçada utilizando a equação é correspondente à curva traçada por meio do fluxo de potência. As equações desenvolvidas viabilizam a obtenção da curva VQ e o seu ponto de mínimo diretamente a partir de um equivalente de redes.

4.5 Considerações Finais

A metodologia proposta, apresentada por meio do equacionamento detalhado neste capítulo, se mostra consistente, permitindo a obtenção direta da MPR, bem como da tensão no ponto crítico da curva VQ.

Destaca-se que os resultados das equações propostas são exatos, quando comparados àqueles calculados por fluxo de potência para um sistema de duas barras.

A investigação realizada, para que o equacionamento desenvolvido fosse configurado em bases conceituais sólidas, não foi trivial. Entretanto, a aplicação da metodologia se mostra direta e bem estruturada.

Todo o desenvolvimento foi realizado considerando um sistema de duas barras. Para um SEE de maior porte, a metodologia pode ser aplicada a barramentos para os quais são construídos circuitos equivalentes de duas barras. Esta é a situação analisada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA – RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo se dedica à aplicação da metodologia proposta na dissertação, tendo como objetivo apresentar os resultados da utilização do equacionamento desenvolvido no capítulo anterior.

Para fins de avaliação da metodologia, são realizadas comparações entre seus resultados e aqueles calculados por programa de fluxo de potência. Para tal, é utilizado o Sistema de Testes IEEE 14 Barras, disponível em [UW,1999].

As simulações são feitas no sentido de se analisar a adequação das equações propostas para cálculo da curva VQ e grandezas de interesse, a partir de sistemas de duas barras gerados por equivalentes de redes. A comparação, entre os resultados esperados e aqueles obtidos por meio das equações, permite perceber o impacto de se observar o sistema a partir de equivalentes, ou seja, denota a relevância da exatidão do equivalente, na obtenção da curva VQ.

O capítulo, além de registrar a análise desenvolvida para uma rede elétrica de teste, apresenta uma aplicação prática da metodologia, a partir de medições de tempo real coletadas em barramento do sistema elétrico brasileiro. As simulações com dados reais confirmam a complementariedade das Margens de Potência Ativa e Reativa.

5.2 Aplicação da Formulação Geral para Cálculo da Curva VQ

Considerando a solução por meio de programa de fluxo de potência, as curvas VQ podem ser calculadas tanto para barras de carga como para barras de geração. Ao se considerar um gerador síncrono fictício conectado em barras do tipo PQ, estas são transformadas em barras do tipo PV, pois sua tensão será especificada e não calculada pelo fluxo de potência. Para barras de tensão controlada, ou seja, do tipo PV e V θ , não é necessário modificar o tipo da barra, pois o parâmetro de tensão já é especificado na formulação do fluxo de potência.

Após definir a barra para a qual se deseja traçar a curva VQ, basta realizar sucessivos incrementos na tensão desta barra e obter os valores de potência reativa injetada ou consumida pelo síncrono fictício, para manter cada nível de tensão.

Deve-se observar que, para barras do tipo PV e V θ , já existe um gerador ou compensador inicialmente conectado à barra e, portanto, há um valor de injeção (ou consumo) de potência reativa no caso base. Ao se procederem aos incrementos na tensão e resolver o fluxo de potência, obtém-se o valor de potência reativa total injetada (ou consumida) na barra. Deve-se então, subtrair deste valor a potência reativa do caso base, para obter o valor injetado apenas pelo síncrono fictício.

Conforme já introduzido, as simulações são realizadas no Sistema de Teste IEEE 14 Barras. As curvas VQ são traçadas, inicialmente, utilizando sucessivas simulações de fluxo de potência para as barras de carga desse sistema, considerando o caso base. O valor de incremento de tensão utilizado é de 1% para cada iteração. Os resultados dessas simulações são referência para as curvas obtidas a partir do equacionamento desenvolvido nesta dissertação.

A aplicação da metodologia proposta é feita adotando os dois equivalentes descritos no Capítulo 3: o Equivalente Analítico [Silva, 2018] e o Equivalente de Vu [Vu, 1999].

No cálculo do Equivalente Analítico, é feita uma simulação de fluxo de potência no caso base para que os valores de tensão nas barras sejam obtidos. A partir desses valores, a matriz de admitâncias \tilde{Y}_B^{G-C} pode ser calculada. Os valores de impedância e de tensão do Equivalente Analítico são obtidos a partir da inversa da matriz de admitâncias modificada da forma descrita no capítulo anterior.

O Equivalente de Vu é calculado considerando duas amostras de tensão e de corrente na barra estudada. Para simular a amostragem no sistema, é realizado um incremento de 1% na carga, a partir do caso base, mantendo-se o fator de potência constante. Os valores de tensão e de corrente, obtidos a partir das consecutivas simulações do fluxo de potência, são tomados como amostras para o cálculo do equivalente.

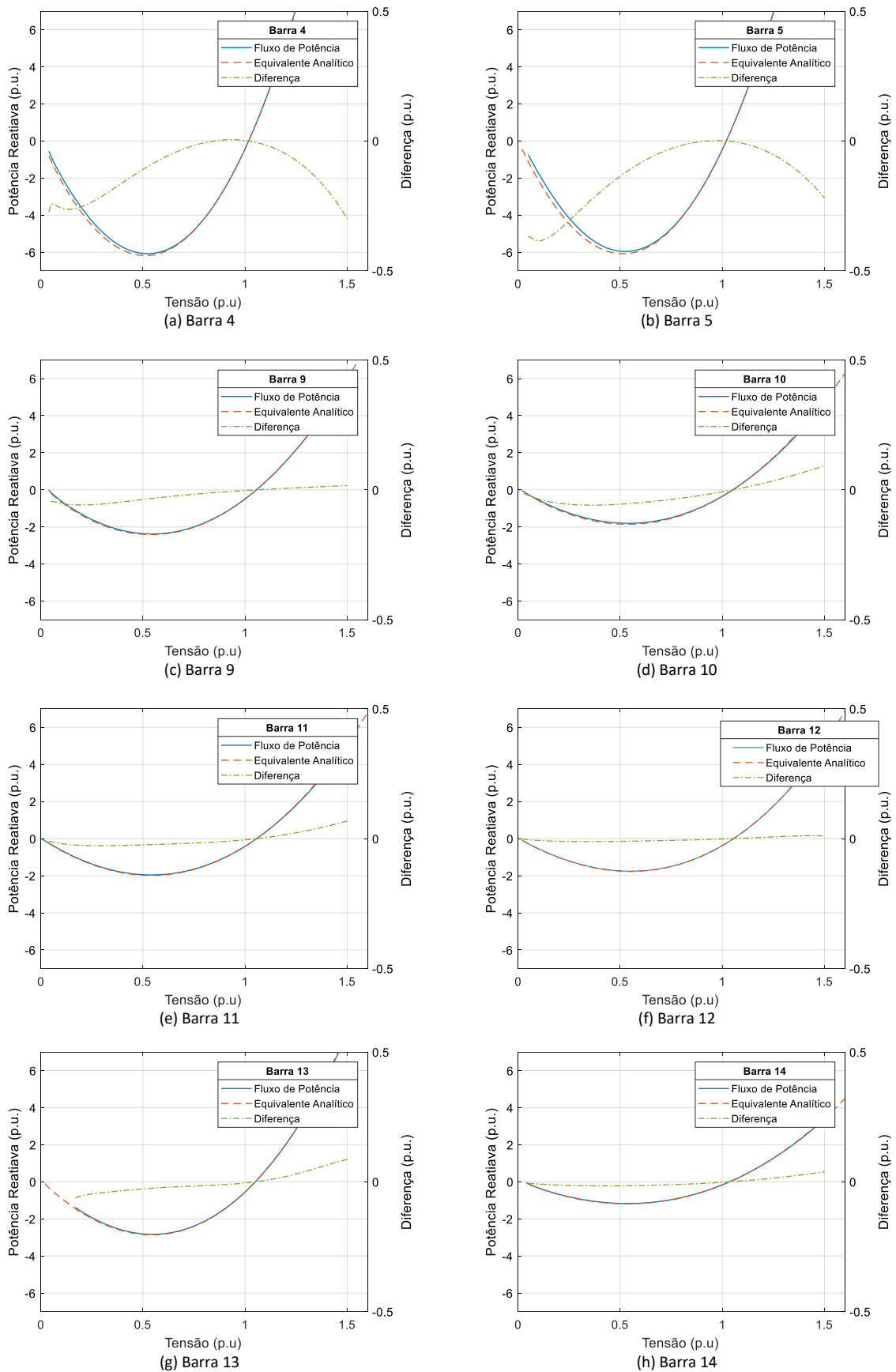
A partir dos valores calculados de impedância e de tensão do Equivalente Analítico e do Equivalente de Vu, aplica-se a formulação geral para cálculo da curva VQ. As curvas obtidas

são comparadas com as curvas calculadas por simulação de fluxo de potência no sistema completo.

5.2.1 Formulação Geral para Cálculo da Curva VQ Aplicada ao Equivalente

Analítico

A Figura 5.1 apresenta a comparação entre as curvas VQ obtidas a partir de simulações de fluxo de potência no sistema completo IEEE 14 Barras e as curvas VQ obtidas a partir da formulação geral proposta aplicada ao Equivalente Analítico. A diferença entre essas duas curvas é apresentada nos mesmos gráficos considerando o eixo à direita em uma escala aumentada para melhor visualização. Nesta figura, os gráficos de (a) a (h) são referentes às barras 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, respectivamente, que são as barras de carga do sistema.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.1 Curvas VQ calculadas por programa de fluxo e pela formulação proposta – Equivalente Analítico

Observa-se que a curva VQ, calculada por meio da formulação geral considerando o Equivalente Analítico, é muito próxima à curva traçada pelo programa de fluxo de potência, para todas as barras consideradas. Se observadas sem o devido critério, poder-se-ia concluir que são iguais. Entretanto, ao se analisar o gráfico da diferença entre as duas curvas com a escala devidamente ajustada, percebe-se que seus pontos não são coincidentes.

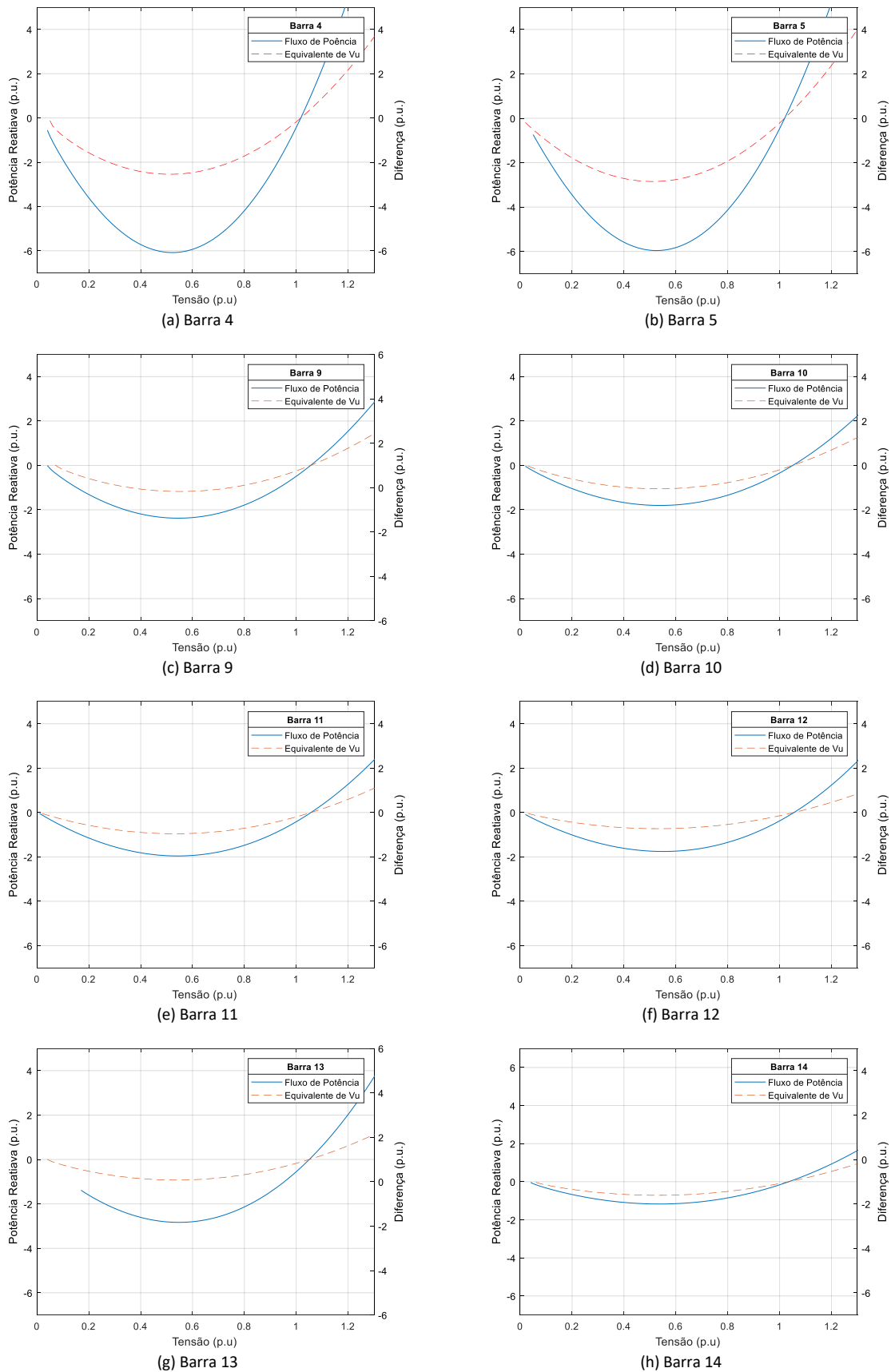
As barras que apresentam maiores diferenças são as barras 4 e 5, com valor máximo de diferença de 0,3854 p.u., para a barra 5. No entanto, essa diferença máxima acontece em um ponto do lado esquerdo da curva VQ onde a tensão é de aproximadamente 0,1 p.u., ou seja, em um ponto no qual o sistema não chega a operar.

Destaca-se que, no ponto de operação, a diferença é sempre zero. Isso acontece porque este é o ponto para o qual o equivalente foi calculado. Neste ponto, o equivalente de redes representa exatamente as características do sistema. Ao promover alterações na tensão da barra estudada no sistema completo, os fluxos se rearranjam nas linhas deste sistema e, conseqüentemente, as tensões em todas as outras barras sofrem variações. Por outro lado, o equivalente calculado para o caso base inicial é estático durante o processo de cálculo da curva VQ. Por isso, ao se afastar do ponto de operação do caso base, as diferenças entre as curvas tendem a tornarem-se mais significativas.

O ponto de maior relevância é o de mínimo da curva VQ, que corresponde ao ponto de interesse para o cálculo da MPR. Neste ponto, é desejável que a diferença seja a menor possível. No tópico 5.3 os resultados para esse ponto específico, no caso do cálculo da MPR, são apresentados.

5.2.2 Formulação Geral para Cálculo da Curva VQ Aplicada ao Equivalente de Vu

A Figura 5.2 apresenta a comparação entre as curvas VQ obtidas a partir de simulações de fluxo de potência no sistema completo IEEE 14 Barras e as curvas VQ obtidas a partir da formulação geral proposta aplicada ao Equivalente de Vu. Da mesma forma feita anteriormente, os gráficos de (a) a (h) são referentes às barras, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, respectivamente, que são as barras de carga do sistema.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.2 Curvas VQ calculadas por programa de fluxo e pela formulação proposta – Equivalente de Vu

Observa-se que, para o Equivalente de Vu, a curva VQ calculada pela formulação geral não é tão próxima da curva traçada por fluxo de potência para as barras consideradas. Neste caso, a diferença entre as curvas pode ser claramente percebida sem a necessidade de modificação na escala do gráfico.

As barras que apresentam maiores diferenças são, novamente, as barras 4 e 5, com valor máximo de diferença de 3,539 p.u. para a barra 4. Essa diferença máxima acontece no ponto onde a tensão é de 0,53 p.u., que é aproximadamente a tensão no ponto de mínimo da curva VQ.

Destaca-se novamente que, no ponto de operação, as curvas são coincidentes e, portanto, a diferença é sempre zero. O Equivalente de Vu, da mesma forma que o Equivalente Analítico, é calculado para um determinado ponto de operação. Neste ponto, o equivalente representa de forma fiel as características de corrente e de potência no ponto estudado. Ao promover alterações na tensão da barra estudada no sistema completo, as tensões em todas as outras barras sofrem variações, enquanto o equivalente fica estático.

Considerando o Equivalente de Vu, as curvas VQ obtidas não correspondem exatamente às aquelas de referência. No ponto de mínimo da curva foram observadas as maiores diferenças, gerando questionamentos quanto à MPR obtida.

Por outro lado, sabe-se que à medida que o sistema é carregado e o ponto de operação se aproxima do ponto de MTP, a MPR diminui e o ponto de mínimo da curva VQ fica cada vez mais próximo do ponto de operação do sistema. Sendo assim, quanto mais próximo ao ponto crítico o sistema estiver, mais correta será a estimação do ponto de mínimo da curva VQ a partir de equivalentes de redes.

5.3 Monitoramento da Margem de Potência Reativa

Neste tópico, a evolução da MPR calculada a partir das equações propostas é comparada à evolução da MPR obtida a partir de simulações de fluxo de potência.

Para simular o aumento da demanda do sistema são realizados incrementos sucessivos na carga, mantendo o fator de potência constante, até um ponto próximo ao ponto de MTP. O valor do passo de incremento de carga é de 1%. Para cada incremento, a MPR é calculada.

Dessa forma, obtêm-se as curvas da evolução desta margem à medida que o sistema se aproxima do ponto crítico de estabilidade de tensão.

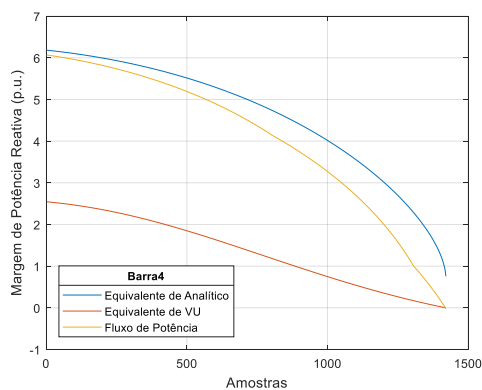
No caso das curvas traçadas através de simulações de fluxo de potência, para cada incremento na carga, é feito todo o processo descrito anteriormente para cálculo da curva VQ. Ou seja, para cada passo de carga, são realizados incrementos sucessivos na tensão e calculados fluxos de potência para obter a curva VQ. A partir da curva construída, tem-se o valor de potência reativa no ponto de mínimo. Este valor é armazenado para que, ao fim do processo de incremento de carga, a curva de evolução da MPR seja gerada.

Conforme já salientado, o método de solução de fluxo de potência utilizado é o tradicional. Por isso, o incremento de carga é feito até que não seja mais possível obter a convergência do método e, dessa forma, tem-se o último ponto dos gráficos. Portanto, é um ponto de operação bem próximo do ponto de MTP.

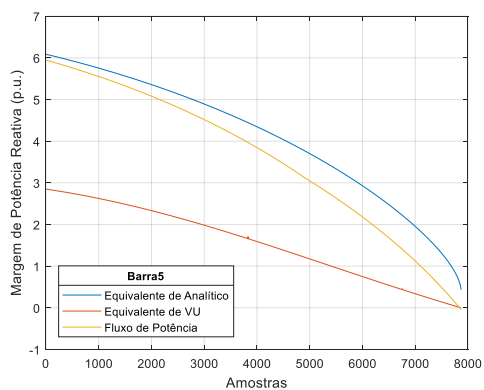
Da mesma forma adotada anteriormente, para cada incremento de carga, a solução do fluxo de potência é utilizada para calcular a matriz \tilde{Y}_B^{G-C} . O Equivalente Analítico é obtido a partir da inversa da matriz de admitâncias modificada. Para o cálculo do Equivalente de Vu, foram consideradas duas amostras de tensão e de corrente consecutivas.

A partir dos equivalentes obtidos para cada passo de carga, são aplicadas as equações para cálculo da potência reativa no ponto de mínimo da curva VQ. A MPR é dada por $MPR = 0 - Q_{\min}$ para cada amostra, até o máximo carregamento.

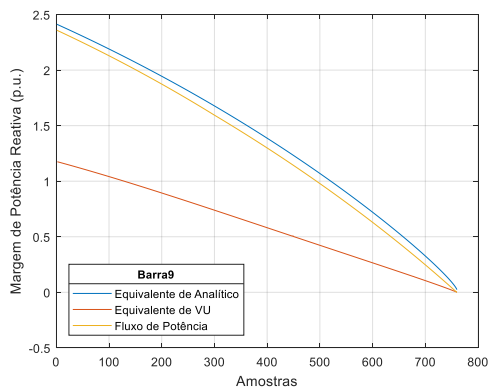
A Figura 5.3 apresenta a evolução da MPR durante o carregamento do sistema para cada barra de carga. Os gráficos de (a) a (h) são referentes às barras, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, respectivamente, que são as barras de carga do sistema.



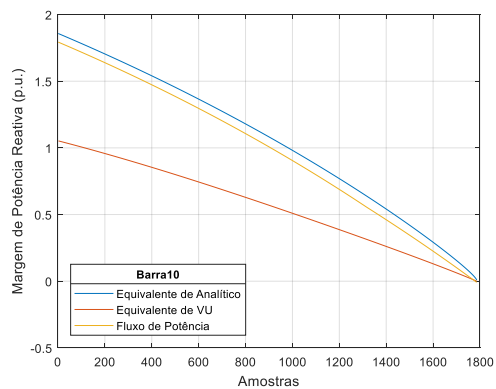
(a) Barra 4



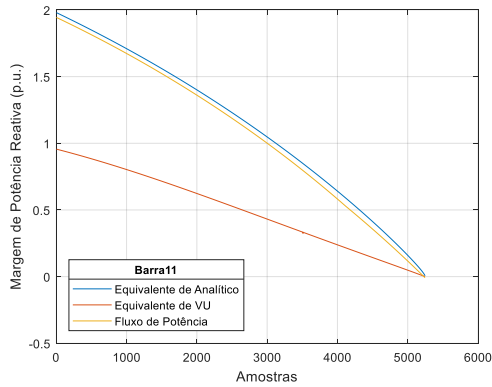
(b) Barra 5



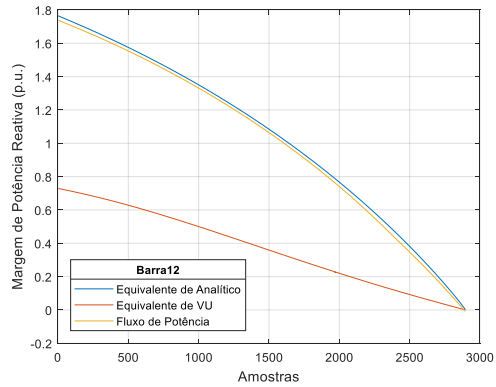
(c) Barra 9



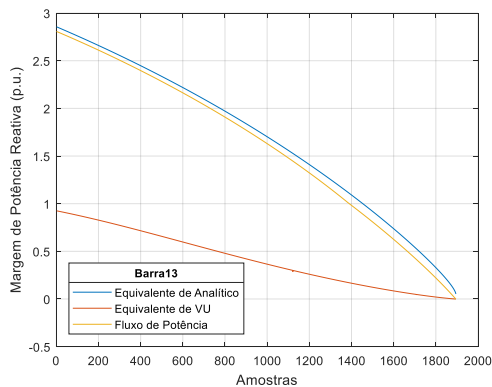
(d) Barra 10



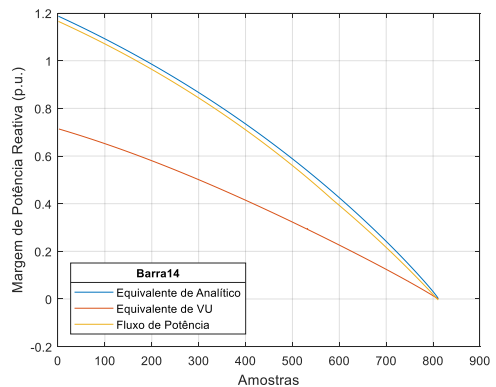
(e) Barra 11



(f) Barra 12



(g) Barra 13



(h) Barra 14

Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.3 Monitoramento da MPR

Observa-se a diminuição da margem em todas as barras e para os três métodos adotados, à medida que o sistema se aproxima do ponto de MTP. Isto denota que a MPR é um importante indicativo da proximidade do ponto operativo do SEE ao ponto de instabilidade de tensão.

A margem calculada pela metodologia proposta considerando o Equivalente Analítico é maior que a margem do fluxo de potência, durante todo o carregamento para todas as barras. A maior diferença entre os valores calculados e os valores esperados ocorre, novamente, para as barras 4 e 5. Nas demais barras, os valores são bastante próximos durante todo o carregamento.

Os resultados do equacionamento proposto aplicado ao Equivalente de Vu são mais distantes dos valores esperados. A diferença é mais significativa no início do processo de carregamento do sistema. À medida que se aproxima do máximo carregamento as curvas de MPR calculadas, a partir deste equivalente, se aproximam de zero, assim como o esperado.

Percebe-se que à medida que se aumenta o carregamento do sistema existe uma tendência de aproximação entre as curvas calculadas a partir dos equivalentes e a curva calculada a partir de fluxo de potência, o que evidencia que a observação da margem a partir de equivalentes se torna mais próxima da MPR real à medida que o sistema se aproxima do ponto de MTP.

5.4 Monitoramento da Margem de Potência Ativa

Neste tópico são apresentados os resultados das simulações feitas com o intuito de observar o comportamento da evolução da MPA durante o aumento da carga nos barramentos, para o mesmo Sistema de Testes IEEE 14 Barras. A evolução da MPA, calculada a partir dos equivalentes, é comparada àquela determinada por meio de simulações de fluxo de potência.

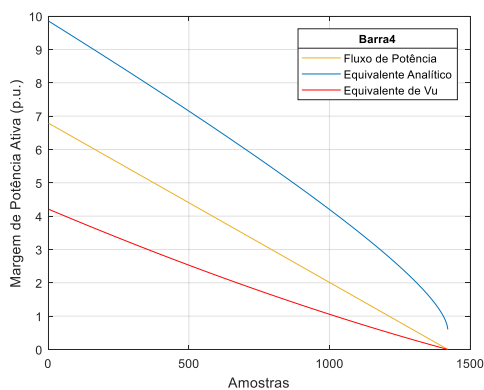
Os procedimentos adotados para a obtenção das curvas são similares aos feitos anteriormente. São realizados incrementos na carga do sistema, mantendo o fator de potência constante. Como o método utilizado é o fluxo de potência convencional, tal incremento de carga é feito até o último ponto de convergência do Newton-Raphson, sendo este o último ponto dos gráficos. O valor do passo de incremento de carga é de 1%. Para cada

incremento, a MPA é calculada. Dessa forma, obtêm-se as curvas da evolução desta margem à medida que o sistema se aproxima do ponto de MTP.

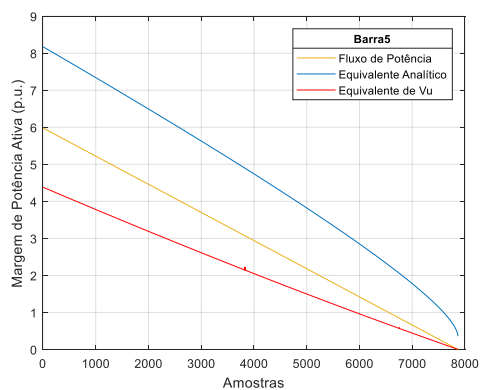
No caso das curvas traçadas por meio de simulações de fluxo de potência, para obter a MPA, basta calcular a diferença entre a potência máxima a qual o barramento consegue chegar e a potência ativa consumida pela carga em cada amostra.

O cálculo do Equivalente Analítico e do Equivalente de Vu é feito da mesma forma descrita no tópico anterior. A partir dos equivalentes obtidos para cada passo de carga, é aplicada a equação para cálculo da potência ativa no ponto de MTP, deduzida a partir do Teorema de Máxima Transferência de Potência apresentado no Capítulo 2. A MPA é dada por $MPA = P_{MTP} - P_C$ para cada amostra até o máximo carregamento.

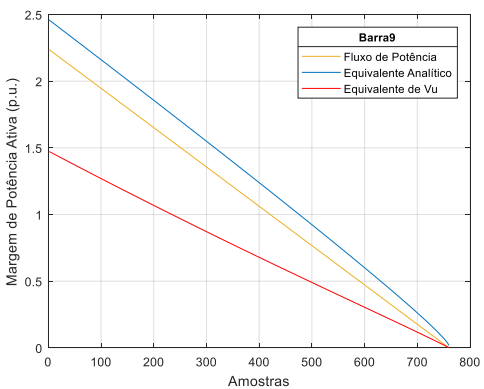
A Figura 5.4 apresenta a evolução da MPA durante o carregamento do sistema para cada barra de carga. Os gráficos de (a) a (h) são referentes às barras, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13 e 14, respectivamente, que são as barras de carga do sistema.



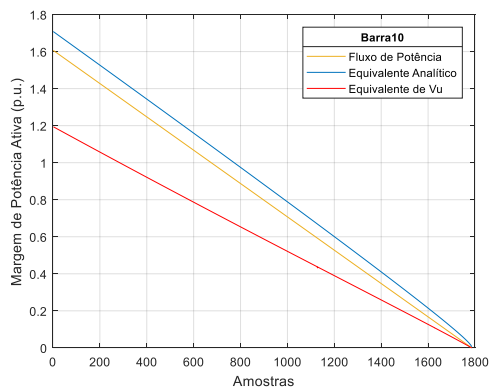
(a) Barra 4



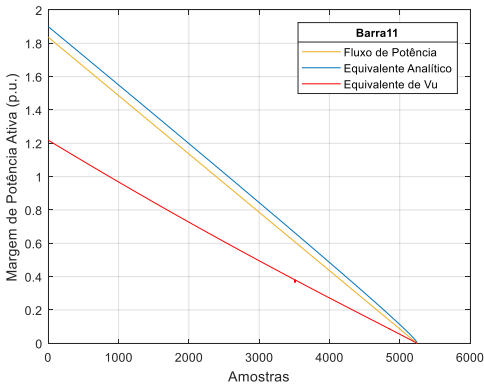
(b) Barra 5



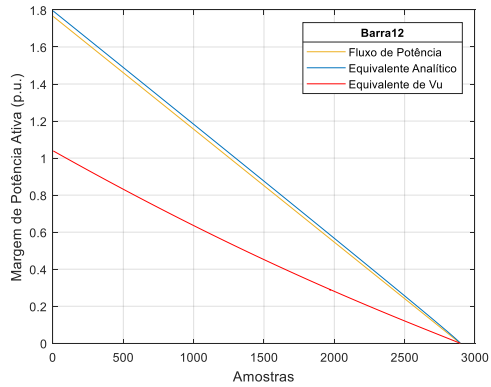
(c) Barra 9



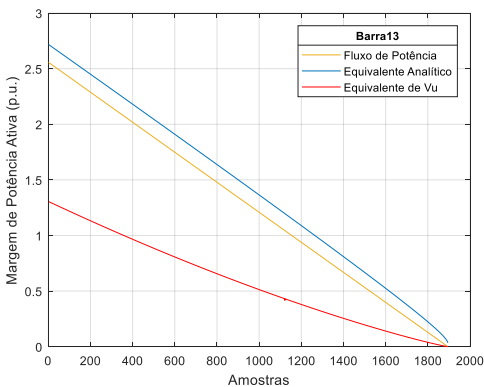
(d) Barra 10



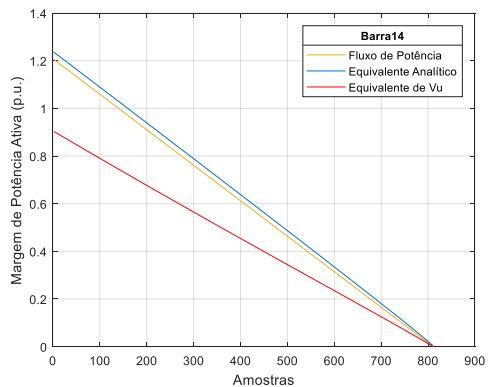
(e) Barra 11



(f) Barra 12



(g) Barra 13



(h) Barra 14

Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.4 Monitoramento da MPA

Observa-se a diminuição da MPA, para todas as barras e para os três métodos adotados, à medida que o sistema se aproxima do ponto de MTP.

Assim como observado para a MPR, a MPA calculada por equação aplicada ao Equivalente Analítico é maior que a margem do fluxo de potência, durante todo o carregamento para todas as barras. A maior diferença entre os valores calculados e os valores esperados ocorre, novamente, para as barras 4 e 5. Nas demais barras, os valores são bastante próximos durante todo o carregamento. Mais uma vez, observa-se uma tendência de aproximação das curvas à medida que aumenta o carregamento.

Os resultados da MPA, calculada a partir de equação aplicada ao Equivalente de Vu, são mais distantes, se comparados aos do Equivalente Analítico, dos valores calculados por fluxo de potência. A diferença, como nos casos anteriores, mostra-se mais significativa no início do processo de carregamento. À medida que o ponto operativo se aproxima do ponto de máximo carregamento, as curvas de MPA calculadas se aproximam de zero, conforme o esperado.

Os resultados indicam que o Equivalente de Vu apresenta-se menos exato, para representar a rede elétrica, que o Equivalente Analítico. Esta mesma condição foi indicada nas simulações apresentadas no tópico 5.2.2, as quais mostram que a diferença entre as curvas VQ é bastante significativa, especialmente no ponto de mínimo, quando o sistema se encontra no caso base.

Esta é uma constatação importante. Os equivalentes influenciam de forma semelhante a determinação da MPA e da MPR. A distância entre os valores das margens e os de referência do fluxo estão relacionados ao equivalente utilizado, e não ao equacionamento para a determinação das mesmas.

5.5 Considerações Sobre os Resultados das Simulações

As curvas VQ, calculadas a partir metodologia proposta, são obtidas a partir de sistemas equivalentes. Esta dissertação não tem por objetivo avaliar o desempenho dos equivalentes de redes. Entretanto, os resultados da metodologia serão mais exatos, quanto mais exatos forem os equivalentes.

Sendo assim, as curvas VQ nem sempre se apresentam idênticas às aquelas calculadas a partir de fluxo de potência no sistema completo. Neste trabalho, a diferença entre as curvas mostrou-se maior quando se considera o Equivalente de Vu, para o qual as maiores discrepâncias ocorrem justamente no ponto de mínimo da curva. Essa diferença enfatiza a importância de se escolherem equivalentes que melhor representem a rede elétrica, para que a determinação da curva VQ em tempo real, utilizando o equacionamento proposto, possa ser a mais fiel possível à condição real do sistema.

É interessante notar que, observando o gráfico das MPR, percebe-se que, apesar das margens calculadas não corresponderem exatamente às aquelas determinadas pelo fluxo de potência, elas têm o comportamento esperado de diminuição à medida que o sistema se aproxima do ponto de MTP. Além disso, quanto mais próximo ao ponto de MTP, o valor da MPR calculada pelas equações propostas mais se aproxima da margem ditada pelo fluxo de potência. Isso indica que, apesar da exatidão dos resultados estar atrelada à qualidade do equivalente, os valores obtidos são um bom indicativo da aproximação ao ponto de instabilidade de tensão.

Da mesma forma, a MPA obtida a partir dos equivalentes também não corresponde exatamente aos valores calculados pelo fluxo de potência. Apesar disso, essa margem, bem como índices derivados da equação de potência no ponto de MTP, tem sido amplamente utilizada no monitoramento da estabilidade de tensão em tempo real. Assim como para a MPR, as margens de potência ativa obtidas se aproximam do valor ditado pelo fluxo de potência à medida que o sistema se aproxima do ponto de MTP.

A diferença entre os valores ditados pelo fluxo de potência e aqueles obtidos pelas equações aplicadas aos equivalentes, tanto para a MPR como para a MPA, pode ser explicada pelo fato do equivalente de redes ser calculado para um ponto estático do sistema, mas ser usado para o cálculo de um ponto que não corresponde àquele para o qual ele foi calculado.

No caso da MPR, o equivalente é calculado para um determinado ponto de operação e a equação calcula a potência reativa no ponto de mínimo da curva VQ. Esse ponto corresponde a uma situação de operação diferente daquela para a qual o equivalente foi obtido, uma vez que, para chegar nesse ponto, são feitas sucessivas alterações na tensão do

barramento estudado, o que resulta em alterações nos fluxos e tensões de todos os outros barramentos.

De forma semelhante, para a MPA, o equivalente é calculado para um determinado ponto de operação e a potência ativa correspondente ao “nariz” da curva PV é definida por uma equação, conforme descrito no Capítulo 2. Tal equação, correspondente ao ponto de MTP, é obtida considerando um aumento da carga na barra, mantendo fixo o equivalente. Já no fluxo de potência, o aumento da carga resulta em alterações nos fluxos e tensões do sistema elétrico como um todo.

A aproximação entre os valores calculados e os ditados pelo fluxo de potência, à medida que o sistema é carregado, está relacionada ao fato de que o ponto de operação se aproxima do ponto de MTP (no caso da curva PV) e do ponto de mínimo (no caso da curva VQ). Dessa forma, como o ponto estimado pelas equações fica cada vez mais próximo ao ponto para o qual o equivalente é calculado, o erro na estimativa diminui. Sendo assim, quanto mais próximo do ponto crítico o sistema estiver, mais exata se torna a estimativa do ponto de mínimo da curva VQ e do ponto de MTP a partir dos equivalentes de redes.

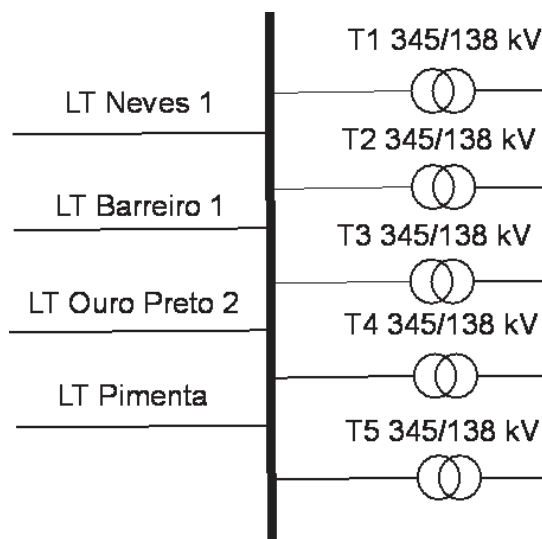
5.6 Simulações com Dados de Medições Reais

Este tópico apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta, quando são utilizados dados de medição de tempo real na construção do equivalente da rede elétrica. Para exemplificar esta aplicação, são utilizados dados de medição no barramento de Taquaril. Esse barramento faz parte de uma subestação da rede básica do SIN brasileiro.

Em projeto de pesquisa conjunta entre o LRC/UFMG e a Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais), foi desenvolvido um Sistema de Medição Fasorial para a empresa, denominado SISMEF [Andrade, 2013], [Vale, 2013], [Andrade, 2014²]. No SISMEF, encontra-se implementado o módulo PIT (Previsor de Instabilidade de Tensão), aplicado ao barramento de Taquaril. Tal módulo se baseia em informações fornecidas pela curva PV. Sendo assim, é de especial interesse para esta dissertação, examinar o comportamento das curvas VQ na operação de Taquaril.

O barramento estudado é de 345kV e possui nove ramos incidentes, sendo quatro linhas de transmissão (LT) e cinco transformadores de tensão 345/138kV (T1 a T5). A Figura

5.5 ilustra o diagrama esquemático deste barramento. A taxa de amostragem dos fasores de tensão da barra e de corrente nos ramos, via SISMEF, é de 10 medições por segundo.

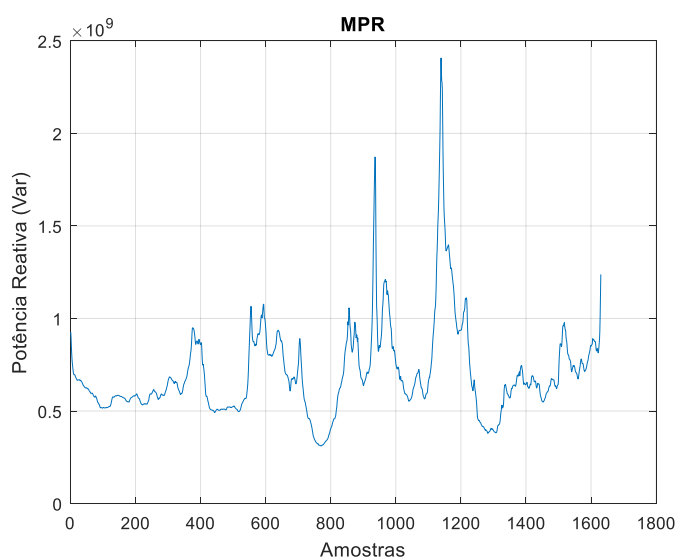


Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.5 Diagrama esquemático do barramento de Taquaril

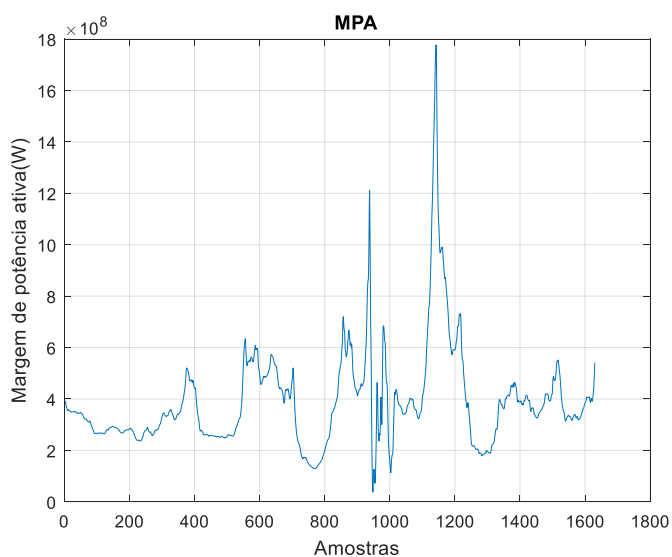
Para definir a carga equivalente vista do barramento é considerada a metodologia CM1 descrita no Capítulo 3. A partir dos fasores de tensão (medida) e da corrente-equivalente de carga (calculada a partir das medições), aplica-se o algoritmo para cálculo do Equivalente de V_u , selecionado para este exemplo. Nesse caso, como se trata de medições de tempo real é interessante escolher uma janela de dados maior que duas medições, para que haja uma filtragem do erro do tipo ruído. A janela de dados escolhida é de 120 medições.

Os gráficos da Figura 5.6 e da Figura 5.7 apresentam as margens MPR e MPA, para um intervalo de tempo correspondente a 1630 amostras.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.6 Margem de potência reativa para barramento de Taquaril



Fonte: Autoria Própria.

Figura 5.7 Margem de potência ativa para barramento de Taquaril

Nota-se que os formatos das curvas apresentam-se muito semelhantes. Quando se observa uma diminuição/aumento da MPR, o mesmo comportamento é mostrado pela MPA. Para esse caso, percebe-se que as informações das duas margens se complementam.

No sentido de enfatizar, mais uma vez, a importância da exatidão dos equivalentes, na análise do comportamento dos SEE, vale comentar sobre a aplicação do Equivalente de Vu, neste exemplo. Uma dificuldade encontrada na aplicação da metodologia proposta utilizando

as medições no barramento de Taquaril foi o fato de que, para determinados conjuntos de amostras, a impedância calculada pelo Equivalente de Vu apresentar parte real negativa. Para outros conjuntos, o equivalente apresenta parte imaginária negativa, sendo que, por natureza, a rede possui característica indutiva e não capacitiva. Em alguns casos apresenta tanto parte real quanto imaginária negativas.

Percebe-se assim que, nem sempre as redes equivalentes, apesar de matematicamente corretas, representam as características físicas do sistema elétrico de forma coerente. Nessa dissertação, os resultados apresentados nos gráficos são referentes a um intervalo de medições onde essas inconsistências não ocorrem.

5.7 Considerações Finais

Embora existam diversas publicações que propõem margens e índices de estabilidade de tensão para aplicação em tempo real, a maior parte delas se baseia na curva PV e no Teorema da Máxima Transferência de Potência. Sendo assim, os resultados apresentados neste capítulo se mostram inovadores, onde a metodologia proposta para cálculo da MPR é aplicada tanto em um sistema de testes quanto para um barramento do SIN, utilizando dados reais de medições.

A partir dos resultados das simulações no sistema de teste IEEE 14 Barras percebe-se que a curva VQ calculada pelo equacionamento proposto é coerente com a curva calculada para o sistema completo. Fica claro que a proximidade entre os valores calculados e aqueles esperados depende fortemente do equivalente adotado, tendo em vista as diferenças apresentadas pelos equivalentes de VU e Analítico. As diferenças são bem menores para o Equivalente Analítico.

As simulações da evolução das margens MPR e MPA reiteram a observação de que os valores calculados pelas equações dependem da coerência dos equivalentes calculados.

A análise dos resultados apresentados neste capítulo mostra que, apesar das diferenças entre os valores calculados pela metodologia proposta e os valores esperados, quanto mais próximo do ponto de instabilidade de tensão, mais assertiva é a estimação das margens calculadas. Outra importante observação é o fato de que o mesmo ocorre para a MPA.

As simulações com dados de Taquaril permitem ter uma visualização da metodologia proposta aplicada a equivalentes criados a partir de dados reais de medição. Pode-se observar como as informações obtidas da curva PV e VQ se complementam. Essas simulações destacam também as dificuldades de cálculo de um equivalente de tempo real consistente, o que é requisito fundamental para o monitoramento do SEE, não apenas para a análise da curva VQ.

A importância de se construírem equivalentes de redes que, de fato, representem bem o sistema a ser monitorado, em especial aqueles obtidos a partir de medições, tem motivado as pesquisas que, de forma evolutiva, têm sido desenvolvidas no LRC/UFMG. Esta dissertação traz significativa contribuição nesta direção.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A metodologia proposta nesta dissertação consiste no desenvolvimento de equacionamentos que permitem o cálculo direto da tensão e da potência reativa no ponto de mínimo da curva VQ. A partir da potência reativa calculada no ponto de mínimo, obtém-se diretamente a MPR, que serve de indicativo da proximidade do ponto de operação do sistema ao ponto de perda de estabilidade de tensão.

A proposta é considerada inovadora, tendo em vista que, na literatura, grande parte das abordagens para monitoramento da estabilidade de tensão em tempo real é baseada na curva PV. Neste trabalho, mostra-se que a curva VQ traz importantes informações, relacionadas à proximidade do ponto de operação ao ponto de instabilidade de tensão, não percebidas pela curva PV. Os resultados apresentados deixam clara a relação entre a MPR calculada e a proximidade do ponto operativo ao ponto crítico de estabilidade, evidenciando a necessidade de uma metodologia que permitisse o seu cálculo em tempo real.

As equações são desenvolvidas para um sistema de duas barras, e sua aplicação em SEE de maior porte se dá por meio do uso de equivalentes de redes. Neste contexto, os resultados das simulações mostram que a margem calculada depende do equivalente de redes utilizado, evidenciando a importância da escolha daquele que represente bem o sistema a ser monitorado.

Os resultados das simulações considerando dados reais de medições no barramento de Taquaril destacam a aplicabilidade da proposta para monitoramento da MPR em tempo real. Os resultados evidenciam, também, a dificuldade de se trabalhar com medições reais, em especial no cálculo do equivalente. O Equivalente de Vu, por exemplo, resulta, em alguns casos, em impedâncias equivalentes com parte real negativa ou parte imaginária negativa. Nestes casos, a impedância obtida não representa bem a rede. Esse tipo de comportamento não ocorreu em ambiente de simulação, quando foram considerados os dados do sistema teste IEEE 14 barras.

Como proposta de continuidade, sugere-se uma maior investigação sobre as diferenças em tensão do ponto de operação ao ponto de MTP e sua relação com as margens de potência ativa e reativa. No contexto deste trabalho, apesar de ter sido investigada a relação entre essa diferença em tensão e a MPR, entende-se que estudos mais aprofundados possam ser realizados, visando ao desenvolvimento de índices que considerem não apenas a potência, mas também a tensão.

Com relação ao equacionamento proposto neste trabalho, destaca-se a possibilidade de desenvolvimento de novos índices e margens de estabilidade de tensão, a partir das informações trazidas pela curva VQ.

Os resultados das equações desenvolvidas podem também servir de base para o aprimoramento dos próprios equivalentes elaborados para tempo real, uma vez que a comparação dos valores de MPR obtidos com os valores reais é uma forma de observar se o equivalente representa de maneira efetiva o sistema de potência estudado.

A pesquisa realizada no mestrado traz avanços significativos para os desenvolvimentos realizados no LRC/UFMG. Sua contribuição para a operação em tempo real, em especial no controle preventivo, se dá no sentido de um melhor monitoramento do estado operativo, visando que situações críticas de instabilidade de tensão e seus impactos negativos sobre o SEE sejam evitados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Andrade, 2013] Andrade, S. R. C.; Vale, M. H. M.; Chaves, F. S. **Sistema de Medição Fasorial Sincronizada da CEMIG – SISMEF**. VII CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica: Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [Andrade, 2014 ¹] Andrade, M. M. S. **Uso de Medições Fasoriais na Determinação de Equivalentes para Avaliação da Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Andrade, 2014 ²] Andrade, M. M. S.; Vale, M. H. M.; Cardoso, A. G. G.; Andrade, S. R. C.; Leal, O. E. S. **WAMPACS – Avaliação do Risco de Instabilidade de Tensão de Barramentos do SIN**. 2014. XIII SEPOPE.
- [Andrade, 2018] Andrade, P. R. A. **Metodologias para Avaliação da Estabilidade de Tensão – Análise do Comportamento dos Equivalentes de Redes Elétricas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Barbosa, 2018] Barbosa, R. D. **Análise de Sensibilidade de Metodologias para Monitoramento da Segurança do Sistema Elétrico Quanto à Estabilidade de Tensão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- [Condega, 2013] Condega, S. Y. C. **Metodologia para Determinação da Margem de Estabilidade de Tensão sob a Perspectiva da Expansão e da Operação de Sistemas de Potência**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Cortez, 2001] Cortez, A. N. **Proposta de Critério e Procedimentos para Avaliação da Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Cutsem, 1991] Cutsem, T. V. **A Method to Compute Reactive Power Margins with Respect to Voltage Collapse**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 1, pp. 145-156, 1991.
- [Cutsem, 1998] Cutsem, T. V.; Vournas, C. **Voltage Stability of Electric Power Systems**. Springer US, 1998.
- [Cutsem, 2000] Cutsem, T. V. **Voltage Instability: Phenomena, Countermeasures, and Analysis Methods**. Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 2, 2000
- [Dong, 2005] Dong, F.; Chowdhury, B. H.; Crow, M. L.; Acar L. **Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 1, 2005.
- [IEEE, 1990] IEEE Working Group on Voltage Stability. **Voltage Stability of Power Systems Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience**. IEEE Special Publication 90TH0358-2-PWR, Piscataway, New Jersey, 1990.
- [IEEE/CIGRÉ, 2004] IEEE/CIGRÉ Joint Task Force on Stability Terms And Definition. **Definition and Classification of Power System Stability**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 2, 2004.

- [Kundur, 1994] Kundur, P. **Power System Stability and Control**. New York, NY. McGraw-Hill, 1994.
- [Leal, 2013] Leal, O. E. S. **Metodologia para Cálculo de Equivalente de Rede para Monitoração da Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência em Tempo Real**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Lobato, 1998] LOBATO, M. V. C. **Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica: Estudo do Fenômeno e de Métodos para Análise Estática**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Mariano Júnior, 2008] Mariano Júnior, L. **Procedimento para Avaliação do Impacto da Compensação Reativa Shunt Capacitiva na Estabilidade de Tensão**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Martins, 2012] Martins, D. S. **Aplicação de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada na Previsão de Instabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência**. 2012. Projeto Final de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Mousavi, 2013] Mousavi, O. A.; Bozorg, M.; Cherkaoui, R. **Preventive Reactive Power Management for Improving Voltage Stability Margin**. Electric Power Systems Research, vol. 96, pp. 36-46, 2013.
- [ONS, 2017] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Procedimentos de Rede – Submódulo 23.3: Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos**. 2017.

- [Ribeiro, 2011] Ribeiro, G. L. S. **O Uso de Equivalentes de Redes na Análise de Estabilidade de Tensão dos Sistemas Elétricos de Potência**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [RRWG, 1998] RRWG - Reactive Power Reserve Work Group. **Voltage Stability Criteria, Under Voltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology**. Technical Studies Subcommittee, Western Systems Coordinating Council (WSCC), 1998.
- [Silva, 2010] Silva, R. G. F. D. **Aplicação dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada na Avaliação da Estabilidade de Tensão**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Silva, 2015] Silva, F. S. **Influência das Incertezas de Medições no Cálculo de Equivalentes de Redes Aplicados nos Estudos de Estabilidade de Tensão**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Silva, 2017] Silva, F. D.; Vale, M. H. M.; de Souza; C. E.; Nunes, L. C. **Equivalentes de Redes para Análises de Estabilidade de Tensão – Abordagem Comparativa**. XII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, 2017.
- [Silva, 2018] Silva, F. D. **Equivalente Analítico de Redes Elétricas - Determinação de Parâmetros de Referência para Avaliação da Estabilidade de Tensão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- [Sousa, 2018] Sousa, C. E. **Índices de Estabilidade de Tensão – Uma Análise Comparativa**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Upadhyay, 2015] Upadhyay, P. A.; Dobariya, D. R.; Joshi, S. K. **Contingency Analysis and Weakest Bus Ranking by Reactive Power Reserve Margin**. IEEE International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), 2015.
- [UW, 1999] University Of Washington (UW). **Power System Test Case Archive**. 1999. Disponível em: < <http://labs.ece.uw.edu/pstca/> >. Acesso em: 07 out. 2017.
- [Vale, 2013] Vale, M. H. M. ; Chaves, F. S. ; Andrade, S. R. C. ; Leal, O. E. S. **Resultados Práticos da Aplicação do Previsor de Instabilidade de Tensão Desenvolvido para o Sistema de Medição Fasorial da Cemig**. 2013. Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ - XV ERIAC.
- [Vale Visacro, 2014] Vale Visacro, S. V. Implementação de uma Ferramenta para Análise de Risco de Instabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos. 2014. Projeto Final de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Vilela, 2014] Vilela, A. O. R. **Margem de Estabilidade de Tensão no Planejamento dos Sistemas Elétricos – Análise do Impacto do Despacho da Geração**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [Vu, 1999] Vu, K.; Begovic, M.; Novosel, D.; Saha, M. M. **Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 3, 1999.

- [Xu, 2002] Xu, X.; Gustafson, M. W.; Lam, B. P.; Mountford, J. D. ; Johnson, S. L. **Assessment of Voltage Stability and Real and Reactive Margins Using Advanced Analytical Tools**. Proceedings. International Conference on Power System Technology, 2002, vol.4.