

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA**

GABRIELA ROSALEE WEIGERT

**ANÁLISE MODAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE DE
SEGURANÇA ESTÁTICA DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2021

GABRIELA ROSALEE WEIGERT

**ANÁLISE MODAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE DE
SEGURANÇA ESTÁTICA DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

**Modal analysis based tool for static voltage security assessment in Power
Systems**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Processamento e Análise de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Augusto de S. Benedito

Co-orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava (UFPR)

CURITIBA

2021



GABRIELA ROSALEE WEIGERT

ANÁLISE MODAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE DE SEGURANÇA ESTÁTICA DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 21 de Julho de 2021

Prof Raphael Augusto De S Benedito, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Diego Issicaba, Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina (Ufsc)

Prof Roman Kuiava, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof.a Thelma Solange Piazza Fernandes, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 21/07/2021.

Dedico este trabalho a Deus, afinal, toda boa dádiva e todo dom perfeito vêm do alto.

Soli Deo gloria

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Raphael Augusto de Souza Benedito pela orientação, mentoria, amparo e investimento em mim e na minha formação científica.

Ao Prof. Dr. Roman Kuiava pela co-orientação e pelas valiosas contribuições depositadas neste trabalho.

Ao Dr. Cresencio Silvio Segura Salas pela confiança, supervisão e apoio ao longo desses dois anos de Lactec.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia pelo suporte acadêmico e financeiro.

Ao Lactec pela concessão da bolsa de mestrado (PD 2937-3018/2016).

Viver é muito perigoso... Querer o bem com demais força, de incerto jeito, pode já estar sendo se querendo o mal, por principiar. Esses homens! Todos puxavam o mundo para si, para o concertar concertado. Mas cada um só vê e entende as coisas dum seu modo.

João Guimarães Rosa

RESUMO

WEIGERT, Gabriela R.. ANÁLISE MODAL COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE DE SEGURANÇA ESTÁTICA DE TENSÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA. 118 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A análise de segurança estática de tensão em sistemas elétricos de potência envolve, além do estudo de estabilidade do ponto de operação em que o sistema se encontra, a análise de contingências e de ações de controle. Dentro da análise de contingências, utilizam-se diversos métodos para filtragem e ranqueamento das contingências selecionadas para o estudo. A fim de reduzir ao máximo o esforço computacional dessas análises, que são realizadas em tempo real, é essencial que a filtragem e ranqueamento de contingências sejam feitos de maneira eficaz, para que as simulações envolvendo modelos mais completos do sistema, e consequentemente dispendiosas, sejam executadas somente para as contingências mais críticas. Uma das métricas mais utilizadas para aferir a respeito da estabilidade de tensão de um sistema é a margem de estabilidade estática de tensão. No entanto, muitos dos métodos de ranqueamento de contingências consolidados na literatura (índice L, FVSI, PI) não são orientados por essa métrica, mas partem de outros tipos de análise mais simplificadas. Por consequência os ranqueamentos e índices obtidos a partir desses métodos nem sempre condizem com a proximidade que cada contingência se encontra da instabilidade, como indica a margem de estabilidade de tensão. Além disso, esses métodos de ranqueamento não têm participação na etapa de análise de ações de controle, sendo necessários outros estudos e índices capazes de sugerir ações de controle ao operador do sistema. Assim, este trabalho propõe uma nova metodologia a ser utilizada como parte do processo de análise de segurança estática de tensão. Utilizando a análise modal da matriz jacobiana das equações de fluxo de potência como ferramenta, propõe-se um método de ranqueamento e filtragem de contingências juntamente com um algoritmo de análise de ações de controle preventivo e emergencial. O intuito do algoritmo de ranqueamento e filtragem é identificar a contingência que levaria o sistema a operar com a menor margem de estabilidade. Aproveitando o resultado do ranqueamento e os fatores de participação levantados pela análise modal, ações de controle preventivo e emergencial são propostas. O objetivo dessas ações é levar o sistema a um estado seguro, ou o mais próximo disso. Para isso, são simuladas ações preventivas no sistema completo, levando em considerações as restrições de operação atuais e sugerindo ações de controle emergenciais a serem implementadas após a ocorrência da contingência. A metodologia proposta foi simulada para os sistemas-teste IEEE 14, 30 e 57 barras, obtendo resultados promissores para o algoritmo de ranqueamento, superando o desempenho dos métodos consolidados na literatura, no que diz respeito à proximidade da contingência à instabilidade. As análises de ação de controle são apresentadas a partir da simulação do sistema 57 barras. Embora não sejam feitas comparações para o algoritmo de controle, o seu desempenho é comentado.

Palavras-chave: Análise de segurança de tensão, análise de contingências, controle preventivo, controle emergencial, análise modal.

ABSTRACT

WEIGERT, Gabriela R.. Modal analysis based tool for static voltage security assessment in Power Systems. 118 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Sistemas de energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Static voltage security assessment in electric power systems comprises stability analysis of the operation point, as well as contingency analysis and the proposition of control strategies. In order to perform contingency analysis, the selected contingencies must be screened and ranked. Contingency evaluation is executed in real-time, thus it is essential to reduce the computational cost of this part of the analysis. Therefore, the stages of contingency screening and ranking must be effective, in order to assure that the simulations involving more complete models are executed only for the most critical cases. One of the most frequent indices that measure voltage instability is the voltage stability margin. Still, most of the contingency ranking methods in literature (L, FVSI, PI) are not based on this indicator, yet are formulated on simpler grounds. Therefore, traditional ranking methods do not necessarily attest about the proximity of each contingency to instability, as does voltage stability margin. In addition, contingency ranking indices are not useful to determine control strategies. Thus, it is necessary to perform complementary analysis in order to suggest control strategies in a traditional contingency analysis method. In this manner, this work proposes a new method to be integrated to the process of static voltage security assessment. A method of contingency screening and ranking is proposed, as well as an analysis of control strategies method. Both tools rely on the modal analysis of the power flow equation's jacobian matrix. The goal of the proposed screening and ranking algorithm is to indicate the contingency associated with the most critical voltage stability margin. The indices obtained in the contingency analysis stage are kept and reused in the analysis of preventive and emergency control strategies, in order to drive the system to a secure state, or the closer it can get to a secure state. Preventive control strategies are proposed for the complete system, respecting operational limits, while emergency control strategies, to be implemented in a post-contingency situation, are proposed for the contingencies that violate security constraints. The proposed methodology was simulated on IEEE 14, 30 and 57 buses test-systems. The precision of the ranking algorithm was satisfying if compared with literature methods and with voltage stability margin based ranking. Control strategies propositions are presented for the 57 buses system. Even though there were no comparisons with literature control proposition methods, the performance of the proposed algorithm is commented.

Keywords: Voltage security assessment, contingency analysis, preventive control, corrective control, modal analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Análise de segurança de tensão e as etapas da análise de contingências. . .	20
FIGURA 2.1– Curva de capacidade de um gerador desconsiderando saliência e saturação.	27
FIGURA 2.2 – Sistema de uma carga contra um barramento infinito.	29
FIGURA 2.3 – Curvas PV de um sistema ilustrativo.	30
FIGURA 2.4 – Curvas PV da rede e da carga ($\alpha = \beta = 0$).	33
FIGURA 2.5 – Curvas PV da rede e da carga ($\alpha = \beta = 0,7$).	33
FIGURA 2.6 – Ilustração da margem de estabilidade de tensão.	35
FIGURA 2.7 – Exemplo de trajetórias de equilíbrio e ponto de bifurcação.	36
FIGURA 2.8 – Transição do parâmetro de continuação no método da parametrização local.	44
FIGURA 2.9 – Análise e descarte das contingências na busca binária do LOS.	51
FIGURA 3.1 – Fluxograma geral do algoritmo proposto.	58
FIGURA 3.2 – Fluxograma do algoritmo de análise de contingências.	60
FIGURA 3.3– Exemplo de trajetórias dos autovalores críticos de duas contingências diferentes.	62
FIGURA 3.4 – Ilustração do método de extrapolação linear.	63
FIGURA 3.5 – Fluxograma do algoritmo de análise de ações de controle preventivo.	69
FIGURA 3.6 – Comparação dos fatores de participação e as diferentes normalizações.	72
FIGURA 3.7 – Fluxograma do algoritmo de análise de ações de controle emergencial.	75
FIGURA 4.1 – Sistema 57 barras.	83
FIGURA 4.2 – Margem de estabilidade do caso base.	84
FIGURA 4.3 – Resultado da análise de contingências para o sistema 57 barras.	85
FIGURA 4.4 – Evolução da tensão nas barras do sistema a cada iteração do algoritmo de controle preventivo.	86
FIGURA 4.5 – Evolução da MET da contingência crítica e das ações de controle a cada iteração do algoritmo de controle preventivo.	87
FIGURA 4.6 – Fatores de participação reativa para o sistema contingenciado L41 e a indicação das barras com bancos de capacitor.	88
FIGURA 4.7 – Fatores de participação ativa para o sistema contingenciado L41 e a indicação das barras com máquinas síncronas.	88
FIGURA 4.8 – Fatores de participação ativa para o sistema contingenciado L47 e a indicação das barras com máquinas síncronas.	90
FIGURA 4.9 – Resultado pós ações preventivas de controle para o sistema 57 barras.	91
FIGURA 4.10 Fatores de participação ativa para as barras de carga do sistema contingenciado L46.	92
FIGURA 4.11– Tensão nas barras pré e pós corte de carga para o sistema contingenciado	

	L46.	92
FIGURA 4.12	Fatores de participação ativa para as barras de carga do sistema contingenciado L47.	93
FIGURA 4.13-	Tensão nas barras pré e pós corte de carga para o sistema contingenciado L47.	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Precisão do método de extrapolação linear calculado via simulação de Monte Carlo.	79
TABELA 4.2 – Precisão do método de extrapolação linear calculada via simulação de Monte Carlo para diferentes patamares de carga.	80
TABELA 4.3 – Precisão dos demais métodos calculada via simulação de Monte Carlo para diferentes patamares de carga.	82
TABELA 4.4 – Resposta da margem de estabilidade de tensão e autovalor crítico do caso base a cada iteração de controle preventivo.	86
TABELA 4.5 – Aumento do APF após iteração de controle de excitação das máquinas. ...	89
TABELA 4.6 – Comparação de parte do ranqueamento obtido para o sistema 14 barras. ..	94
TABELA 4.7 – Comparação de parte do ranqueamento obtido para o sistema 30 barras. ..	96
TABELA 4.8 – Comparação de parte do ranqueamento obtido para o sistema 57 barras. ..	97
TABELA A.1 – Dados de barra do sistema-teste 14 barras.	105
TABELA A.2 – Dados de linha do sistema-teste 14 barras.	106
TABELA A.3 – Dados de barra do sistema-teste 30 barras.	106
TABELA A.4 – Dados de linha do sistema-teste 30 barras.	107
TABELA A.5 – Dados de barra do sistema-teste 57 barras.	109
TABELA A.6 – Dados de linha do sistema-teste 57 barras.	110
TABELA B.1 – Comparação do ranqueamento obtido para o sistema 14 barras.	114
TABELA B.2 – Comparação do ranqueamento obtido para o sistema 30 barras.	115
TABELA B.3 – Comparação do ranqueamento obtido para o sistema 57 barras.	116

LISTA DE QUADROS

QUADRO 4.1–	Parâmetros utilizados em cada patamar de carga.	79
QUADRO 4.2–	Contingências inadequadas e instáveis ao fim das recursões do algoritmo de controle preventivo.	87

LISTA DE SIGLAS

APF	Fator de Participação Ativa
BSN	Bifurcação sela-nó
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FPC	Fluxo de Potência Continuado
FVSI	Índice Rápido de Estabilidade de Tensão
LOS	Limite de Operação Segura
MET	Margem de Estabilidade de Tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema
PEE	Ponto de Equilíbrio Estável
PI	Índice de Performance
PMC	Ponto de Máximo Carregamento
RPF	Fator de Participação Reativa
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional

LISTA DE SÍMBOLOS

Z	Impedância série da linha
R	Resistência da linha
X_L	Reatância indutiva da linha
V	Tensão terminal do estator
I	Corrente de armadura da máquina
I^{max}	Corrente máxima de armadura
X	Reatância equivalente da máquina
X_d	Reatância do eixo direto
X_q	Reatância do eixo de quadratura
E_q^{lim}	Tensão interna gerada da máquina
I_f	Corrente de campo
I	Corrente fasorial
V	Tensão fasorial na barra
V	Magnitude da tensão na barra
θ	Ângulo da tensão da barra
E	Tensão fasorial no barramento infinito, ou gerador
E	Magnitude da tensão no barramento infinito
S	Potência aparente
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
$\tan \phi$	Fator de potência do carregamento
V	Magnitude de tensão na barra analisada
z	Demanda da carga
V_0	Magnitude da tensão de referência na barra
P_0	Potência ativa para o consumo de referência
Q_0	Potência reativa para o consumo de referência
α	Expoente do modelo exponencial de potência ativa da carga
β	Expoente do modelo exponencial de potência reativa da carga
y	Vetor das variáveis de estado
x	Vetor das variáveis algébricas
p	Parâmetro do sistema de equações algébrico-diferenciais
f	Vetor de equações diferenciais
g	Vetor de equações algébricas
x*	Vetor dos pontos de equilíbrio
ε	Tolerância, ou valor de erro
J(x)	Matriz jacobiana de uma função em relação a x
u = T x^j	Vetor tangente de um ponto x^j
$\text{rank}(\cdot)$	Posto de uma matriz
eⁱ	Vetor da base canônica
η	Parâmetro que determina o valor da variável x_i
NPV	Quantidade de barras PV no sistema

NPQ	Quantidade de barras PQ no sistema
λ	Carregamento do sistema
ΔP	Vetor de equação de balanços de potência ativa
ΔQ	Vetor de equação de balanços de potência reativa
P_{Gk}	Potência ativa gerada na barra k
P_{Lk}	Potência ativa consumida pela carga na barra k
P_{Tk}	Injeção de potência ativa na barra k
Q_{Gk}	Potência reativa gerada na barra k
Q_{Lk}	Potência reativa consumida pela carga na barra k
Q_{Tk}	Injeção de potência reativa na barra k
P_{Gk0}	Potência ativa gerada inicial na barra k
FP_{Gk}	Fator de participação de geração ativa de cada barra do tipo PV
P_{Lk0}	Configuração inicial de consumo de potência ativa pela carga na barra k
FP_{Lk}	Fator de participação de aumento de carga na barra k
$S_{\Delta BASE}$	Potência base do sistema
φ_k	Ângulo do fator de potência da carga na barra k
G_{km}	Elemento km da matriz de condutância G
G	Matriz de condutância
B_{km}	Elemento km da matriz de susceptância B
B	Matriz de susceptância
Λ	Matriz diagonal dos autovalores
Θ	Matriz dos autovetores pela direita
Γ	Matriz dos autovetores pela esquerda
λ_i	Autovalor i , modo de instabilidade i
u_i	Vetor coluna do autovetor pela direita i
v_i	Vetor linha do autovetor pela esquerda i
λ_{crit}	Autovalor crítico, modo de instabilidade crítico
APF_{ki}	Fator de participação ativo da barra k no modo i
RPF_{ki}	Fator de participação reativo da barra k no modo i
H	Matriz de incidência barra-ramo
H_F	Matriz de incidência barra-ramo fatorada
I	Matriz identidade
R	Matriz de redundância de ramos
N_1 e N_2	Vetores-linha nulos
Q_{km}	Fluxo de potência reativa que flui da barra k para a barra m
V_k	Módulo da tensão na barra k
$FVSI_{km}$	Índice rápido de instabilidade da linha km
α	Ângulo de inclinação da extrapolação linear da MET_{lin}
MET_{lin}	Margem de estabilidade de tensão extrapolada linearmente
N	Conjunto das contingências estudadas
N_r	Conjunto das contingências reduzido pelo método de ranqueamento
S	Sistema referente ao caso base
$cont$	Sistema contingenciado
APF_k	Fator de participação ativo da barra k no modo crítico
RPF_k	Fator de participação reativo da barra k no modo crítico

$\Delta P_{corte,k}$	Corte de carga a ser implementado na barra k
$APF_{k,p}$	Fator de participação ativa ponderado para o corte de carga na barra k
Δp	Soma do corte de carga total a ser realizado no sistema
β	Coefficiente de variação da esperança matemática
$E(G)$	Esperança matemática da função teste G
$\sqrt{V(G)}$	Desvio padrão da função teste G
n	Quantidade de amostras
G	Função teste
S_{L_i}	Configuração aleatória de carga
C_{crit}	Contingência mais crítica
$E_F(G)$	Esperança matemática do método de extrapolação linear ao ranquear corretamente a contingência mais crítica
β_F	Coefficiente de variação referente ao $E_F(G)$
$E_{\lambda_0}(G)$	Esperança matemática do método direto de autovalor crítico
β_{λ_0}	Coefficiente de variação referente ao $E_{\lambda_0}(G)$
$E_{F\lambda_0}(G)$	Esperança matemática do método direto de autovalor crítico ao ranquear corretamente a contingência mais crítica
$\beta_{F\lambda_0}$	Coefficiente de variação referente ao $E_{F\lambda_0}(G)$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	21
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2 FUNDAMENTOS SOBRE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO	24
2.1 FORMULAÇÃO CLÁSSICA DO PROBLEMA DE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO	24
2.1.1 Aspectos da geração	26
2.1.2 Aspectos do sistema de transmissão	28
2.1.3 Aspectos da carga	31
2.1.4 Ponto de máximo carregamento	34
2.1.4.1 Margem de Estabilidade de Tensão	34
2.1.4.2 Bifurcações e o ponto de máximo carregamento	35
2.2 MÉTODOS DE SOLUÇÃO	39
2.2.1 Método de continuação	39
2.2.1.1 Parametrização local	39
2.2.1.2 Aplicação do método ao problema de Fluxo de Potência	41
2.2.2 Análise Modal	45
2.2.2.1 Fatores de participação de barra	46
2.3 ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS	47
2.3.1 Identificação de ramos críticos	48
2.3.2 Ranqueamento de contingências	48
2.3.3 Limite de operação segura	49
2.4 ENQUADRAMENTO NO ESTADO DA ARTE	51
2.4.1 Análise e proposta de ações de controle	52
2.4.2 Ranqueamento de contingências e índices de estabilidade de tensão	54
2.4.3 Enquadramento do trabalho	55
3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS E AÇÕES DE CONTROLE	57
3.1 ALGORITMO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE E CONTINGÊNCIAS	59
3.1.1 Identificação de ramos críticos	60
3.1.2 Formação do conjunto de contingências	61
3.1.3 Redução do conjunto de contingências via análise modal	61
3.1.3.1 Extrapolação linear da trajetória de autovalores	62
3.1.4 Cálculo do Limite de Operação Segura a partir do conjunto reduzido de contingências	66
3.2 ALGORITMO DE ANÁLISE DE AÇÕES DE CONTROLE PREVENTIVO E EMERGENCIAL	67
3.2.1 Análise de ações de Controle preventivo	68
3.2.1.1 Estratégias de controle	70
3.2.2 Análise de ações de controle emergencial	74

4	RESULTADOS	77
4.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÉTODO DE REDUÇÃO DO CONJUNTO DE CONTINGÊNCIAS	77
4.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O SISTEMA 57 BARRAS	82
4.2.1	Resultados da Etapa 1: análise do caso base	83
4.2.2	Resultados da Etapa 2: análise de contingências	84
4.2.3	Resultados da Etapa 3: análise de ações de controle preventivo	85
4.2.4	Resultados da Etapa 4: análise de ações de controle emergencial	91
4.3	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE RANQUEAMENTO	94
5	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	101
	Apêndice A – SISTEMAS-TESTE	105
	Apêndice B – RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO	114

1 INTRODUÇÃO

A análise de segurança atesta a respeito da resiliência de um SEP diante de perturbações, ou contingências, e é essencial para que um serviço contínuo e de qualidade seja fornecido (KUNDUR, 1994; KUNDUR *et al.*, 2004).

Dentro das análises realizadas, considerando diferentes variáveis físicas do sistema e janelas de tempo, pode-se destacar os estudos de estabilidade de tensão, que compõem parte essencial da análise de segurança (KUNDUR *et al.*, 2004).

A estabilidade de tensão consiste na habilidade do SEP de manter ou restaurar o seu equilíbrio, do ponto de vista da tensão, dada a ocorrência de uma perturbação (KUNDUR *et al.*, 2004). Dentre as causas que podem contribuir para a instabilidade, podem ser destacadas: um perfil inicial de tensão já abaixo de um limite operativo, ou mesmo próximo do limite inferior, uma demanda excessiva de carga, uma operação próxima à capacidade de transmissão do sistema, a falta de reserva reativa e até mesmo a distância geográfica entre os centros de carga e geração (TUAN *et al.*, 1994).

A instabilidade de tensão pode levar a cenários mais críticos, como o colapso de tensão. Tuan *et al.* (1994) descrevem o início de um cenário de colapso de tensão como uma queda gradual da tensão em uma ou várias barras do sistema, que inicialmente leva a maiores perdas reativas, o que faz com que os *taps* dos transformadores sejam chaveados para seus valores máximos. Esse movimento de compensação também pode levar geradores e compensadores aos seus limites de geração de potência reativa. Quando a reserva de potência reativa chega ao fim, a tensão começa a cair de maneira mais abrupta. Do ponto de vista dos sistemas de proteção isso pode isolar geradores e linhas de maneira encadeada, podendo causar variações na frequência da rede, perda de continuidade, oscilações de potência, podendo culminar em um colapso de tensão no sistema e, por fim, em um *blackout* (KUNDUR, 1994).

Como a instabilidade de tensão pode galgar até um cenário de colapso, é essencial que, do ponto de vista de segurança, sempre se busque a estabilidade de tensão, recorrendo a ações de controle preventivo e corretivo, que mantenham o sistema em um estado de operação seguro

(KUNDUR, 1994).

No Brasil o operador nacional do sistema (ONS) realiza a gestão de segurança operativa. Dentre as diversas análises realizadas nas salas de controle vale destacar as executadas através do software Organon. Os resultados apresentados por essa ferramenta apresentam a condição de segurança operativa do sistema através de gráficos de regiões de segurança, que indicam os diferentes limitantes operacionais do sistema, para diferentes pontos de operação. Assim, o estudo de segurança é feito para diferentes tipos de análises (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020a).

O processo de análise de segurança de tensão proposto por Ejebe *et al.* (1995) é apresentado na Figura 1.1.

Como mostra a Figura 1.1 o primeiro passo para a análise de segurança de tensão é garantir que o ponto de operação atual do sistema seja seguro.

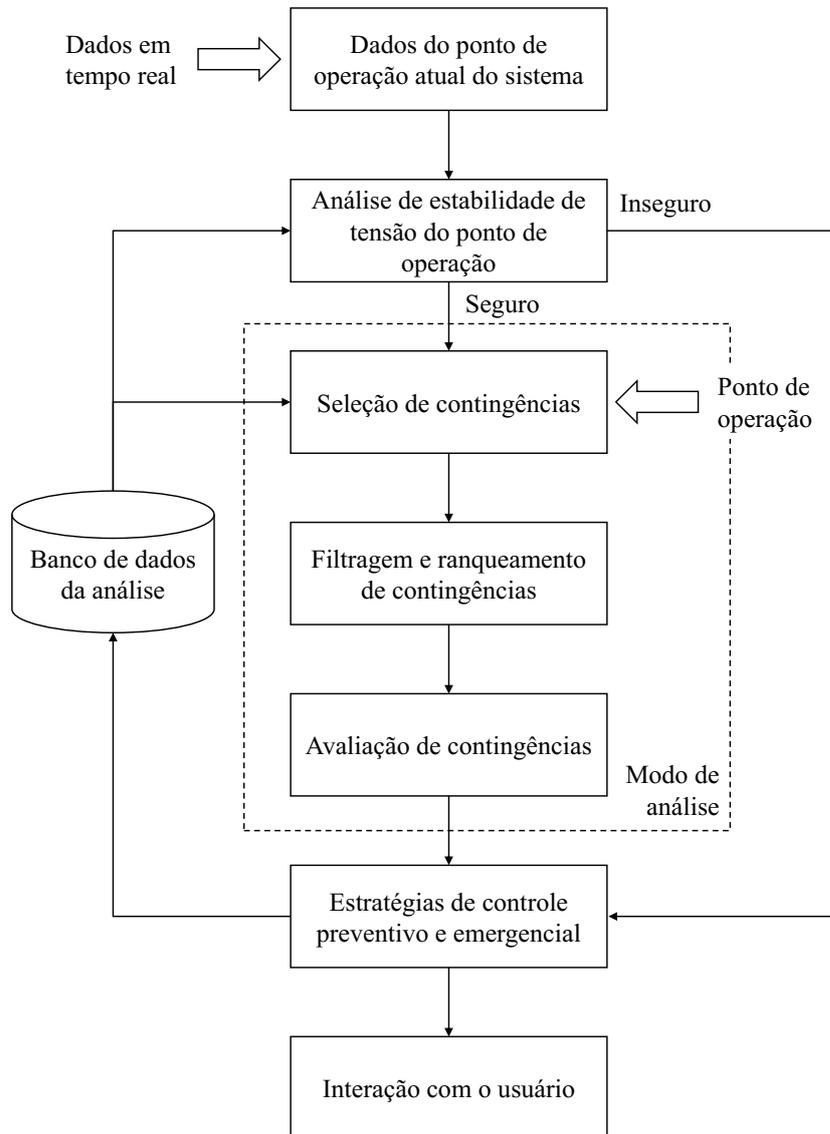
Um dos índices observados, a fim de manter a segurança do ponto de vista da estabilidade de tensão, é a margem de estabilidade de tensão (MET). Esse indicador mede a distância operacional do sistema ao ponto de colapso, em termos de potência ativa. O carregamento máximo do sistema é encontrado no ponto de colapso, e a margem de estabilidade é o percentual referente ao aumento de potência ativa que separa o ponto de operação atual do ponto de colapso (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020b).

Caso o ponto de operação do sistema seja avaliado como inseguro, estratégias de controle preventivo ou emergencial devem ser sugeridas, antes que se inicie a análise de contingências. Uma vez que o estado do sistema base seja classificado como seguro, inicia-se o modo de análise.

A análise de contingências apresentada em Ejebe *et al.* (1995) é dividida em três etapas: (i) seleção de contingências; (ii) filtragem e classificação de contingências; (iii) avaliação das contingências. A seleção das contingências diz respeito aos tipos de contingências que serão consideradas (de linha, barra, gerador) e ao critério de contingências simultâneas que será adotado, podendo ser considerada somente a ocorrência de uma contingência por vez (critério N-1), ou de mais contingências simultâneas. Como os casos contingenciados representam o sistema no seu ponto de operação atual, porém com a retirada de algum elemento do sistema, essa parte do estudo deve ser atualizada toda vez que o ponto de operação do sistema completo for alterado.

Pensando na avaliação das contingências, a determinação da MET para análise de contingência em tempo real pode demandar esforços computacionais incompatíveis com o

Figura 1.1: Análise de segurança de tensão e as etapas da análise de contingências.



Fonte: Adaptado de Ejebe *et al.* (1995).

horizonte de tempo da análise, dependendo das dimensões do sistema (EJEBE *et al.*, 1995). Portanto, a análise de contingências deve ter uma estratégia de filtragem que separe os casos menos severos dos casos mais severos. Isso possibilita que estudos mais minuciosos a respeito da MET não precisem ser aplicados a todas as contingências. Desse modo, técnicas simplificadas e de aproximação se destinam a classificar as contingências, levando a estudos mais rigorosos somente os casos considerados mais severos (EJEBE *et al.*, 1995).

Mesmo com o avanço da capacidade de processamento dos computadores, o tempo de cálculo e análise de contingências para sistemas grandes e complexos, ainda é uma preocupação (WANG; CHIANG, 2020), visto que a análise de estabilidade estática envolve o cálculo de

um grande conjunto de equações algébricas não-lineares paramétricas (CHIANG *et al.*, 2009). Assim, a seleção e filtragem de contingências não só é uma estratégia reconhecida (CHIANG *et al.*, 2009), mas deve ser feita de maneira adequada e eficiente, identificando, a baixos custos computacionais, as contingências que não levarão o sistema à instabilidade, levando a análises mais precisas e custosas somente as contingências mais severas (EJEBE *et al.*, 1995).

Destaca-se os trabalhos de Ejebe *et al.* (1995) e Chiang *et al.* (1997), que apresentaram o método *look-ahead* como um estudo preliminar cujo custo computacional é menor, se comparado às técnicas convencionais de continuação. Para este trabalho, não serão consideradas análises deste tipo, embora a ideia é que a ferramenta proposta também possa ser integrada a este tipo de estudo, a fim de uma estratégia mais ampla de classificação e análise de contingências. Portanto, para uma validação mais direta dos resultados, optou-se por focar na metodologia proposta e não abordar o método *look-ahead* como parte da ferramenta proposta.

Tendo em vista que as ferramentas utilizadas na análise em tempo real devem sempre visar respostas rápidas, isto é no horizonte de minutos (WANG; CHIANG, 2019; WANG; CHIANG, 2020), atreladas a soluções de baixo custo computacional, a triagem das contingências, ou a análise preliminar deve se utilizar de ferramentas menos dispendiosas computacionalmente. Aproximações diretas da MET, que utilizam técnicas de otimização e não dependem de uma solução continuada também são utilizadas para a triagem de contingências (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998). No entanto, esses tipos de técnicas não serão abordadas neste trabalho.

Além do modo de análise, executado para o conjunto de contingências pré-selecionado, a Figura 1.1 ainda aponta uma última etapa de análise de estratégias de controle preventivo e emergencial. Esta etapa visa adequar não só o conjunto de contingências estudado, mas também o caso base. As ações de controle propostas alimentam o banco de dados da análise, a fim de atualizar qual seria o ponto de operação do sistema após as ações de controle, e também podem ser lidas e analisadas pelo usuário, ou operador que estiver realizando o estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Como mostram as etapas apresentadas por Ejebe *et al.* (1995) na Figura 1.1, a análise de estabilidade não se restringe somente ao estudo do ponto de operação pré e pós perturbação, mas também propõe estratégias e ações de controle. Assim, a junção de todas as etapas de análise em uma única ferramenta, como pretende este trabalho, é adequada no sentido de análise de estabilidade de tensão.

Dessa forma, visto que as análises em tempo real também devem sugerir estratégias de controle (EJEBE *et al.*, 1995), é interessante que os índices de estabilidade previamente obtidos na triagem e avaliação das contingências possam ser reaproveitados quando da análise da estratégia de controle. Desse modo, não seria necessário o processamento de novas análises especificamente voltadas para a análise de ações preventivas e corretivas de controle.

Ao considerar que a análise de estabilidade também deva sugerir ações de controle, é interessante que esta análise não busque informações somente a respeito do tamanho da margem de estabilidade, ou da distância que o sistema se encontra da instabilidade, mas que também se preocupe em trazer informações a respeito dos mecanismos aos quais a instabilidade está atrelada (AJJARAPU, 2006).

Assim, buscando uma ferramenta que infira sobre a estabilidade de tensão, mas que também possa alimentar estratégias de controle de maneira rápida e eficiente, é proveitoso também utilizar índices de estabilidade que não necessariamente atestem diretamente sobre a MET, mas que também tragam outras informações úteis a respeito do sistema (AJJARAPU, 2006).

Nesse sentido, o tipo de análise aplicada neste trabalho, além do fluxo de potência continuado (FPC), é a análise modal, que será apresentada na seção 2.2.2. De uma maneira geral, essa análise propicia o cálculo de índices que fornecem informações sobre quão próximo o sistema elétrico está da instabilidade e como os mecanismos do sistema se relacionam com ela (GAO *et al.*, 1992).

Este tipo de análise não infere sobre a instabilidade do sistema de um ponto de vista global, mas a estratifica em diferentes modos. Cada um desses modos pode ser individualmente analisado, fornecendo informações sobre como cada elemento do sistema participa em cada modo de instabilidade (GAO *et al.*, 1992).

Ainda vale apontar que os índices resultantes da análise modal não estabelecem uma relação direta, ou linear, com a instabilidade do sistema (GAO *et al.*, 1992), assim faz parte dos desafios deste trabalho estabelecer uma ferramenta que seja capaz de interpretar tais índices a fim de inferir, com uma precisão adequada, a respeito da estabilidade do sistema.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia de análise de segurança estática de tensão. O método proposto se divide em duas etapas: um algoritmo de análise e filtragem de contingências e um algoritmo de análise de ações de controle preventivo e emergencial.

A fim de atingir o objetivo principal, propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- propor e implementar método de filtragem e análise de contingências;
- validar o método de filtragem de contingências proposto, comparando com métodos já estabelecidos na literatura;
- propor e implementar método de análise de ações de controle preventivo e emergencial;
- analisar o desempenho do método de análise de ações de controle.

Embora o intuito da metodologia proposta seja obter um método de análise de segurança estática de tensão com uma complexidade computacional que permita a aplicação em tempo real, o foco desta pesquisa é a validação da metodologia que utiliza a análise modal como índice para inferir a respeito da estabilidade de tensão e sugerir ações de controle. Tal validação será feita comparando o desempenho da metodologia de classificação de contingências via análise modal com a classificação feita via cálculo da MET, através do fluxo de potência continuado e outros índices de estabilidade de tensão, já estabelecidos na literatura, utilizados na análise de contingência. A validação, ou discussão, das ações de controle propostas pela metodologia será feita através de análises quantitativas e qualitativas de cenários simulados, observando o impacto das ações propostas no sistema e se as estratégias sugeridas levam o SEP a um estado seguro.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para apresentar a fundamentação teórica e a metodologia desenvolvida neste trabalho, esta dissertação é dividida em capítulos, da seguinte maneira.

Capítulo 2: apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da metodologia. Ao final desse capítulo um breve enquadramento no estado da arte também é feito.

Capítulo 3: apresenta o método de análise de segurança estática de tensão proposto no trabalho.

Capítulo 4: apresenta os resultados da ferramenta proposta, assim como sua validação e as discussões a respeito de seu desempenho.

Capítulo 5: apresenta as conclusões e perspectivas para o prosseguimento desta pesquisa.

2 FUNDAMENTOS SOBRE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO

O objetivo deste capítulo é a apresentação de conceitos básicos de estabilidade estática de tensão, além de técnicas consolidadas na literatura no que diz respeito à análise de contingências aplicada ao problema da estabilidade de tensão. A apresentação desses conceitos basilares servirá como apoio para o desenvolvimento do método de análise de estabilidade de tensão e contingências, assim como do método de análise de ações de controle preventivo e emergencial. Após o estabelecimento dos conceitos e equacionamentos necessários para a compreensão da metodologia proposta no capítulo 3, será feito um enquadramento no estado da arte do trabalho aqui proposto.

Este capítulo é dividido da seguinte maneira: primeiro será apresentada a formulação clássica do problema de estabilidade de tensão, definindo os aspectos principais do sistema que interferem na estabilidade de tensão, a saber a geração, o sistema de transmissão e a carga. Será também apresentado o conceito do ponto de máximo carregamento (PMC), assim como as definições necessárias para a compreensão da bifurcação abordada neste trabalho. A seção seguinte se dedica aos métodos de solução para a análise de estabilidade de tensão que são utilizadas no capítulo 3, o que engloba o método de continuação com parametrização local e os índices gerados pela análise modal. A terceira seção do capítulo apresenta técnicas consolidadas na literatura que são utilizadas na análise de contingências. Finalmente, apresenta-se o enquadramento no estado da arte.

2.1 FORMULAÇÃO CLÁSSICA DO PROBLEMA DE ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO

O problema da instabilidade de tensão surge da relação de três principais elementos do sistema de potência: a carga, a transmissão e a geração. Quando a capacidade de fornecimento de potência ativa dos sistemas de transmissão e geração é exaurida, a carga, e seu comportamento característico, demandam do sistema mais do que pode ser entregue, originando um cenário de instabilidade de tensão (EJEBE *et al.*, 1995). Embora a descrição de instabilidade

de tensão seja associada à capacidade de transmissão e geração da potência ativa e o respectivo comportamento da carga, a potência reativa também faz parte do problema de instabilidade de tensão (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

A instabilidade de tensão está associada à capacidade de transmissão de potência ativa e reativa do sistema de transmissão, que é inversamente proporcional aos parâmetros série ($Z = R + jX_L$, onde R é a resistência e X_L a reatância indutiva) da linha. Os parâmetros série da linha são diretamente proporcionais ao comprimento da linha. Assim, um fator limitante da estabilidade tensão é a estrutura de transmissão da própria rede e o que norteia a dinâmica do fenômeno de instabilidade é a própria dinâmica da carga. Logo a instabilidade de tensão está intimamente ligada com a dinâmica das cargas do sistema, sendo fortemente observada e estudada nesses tipos de barramentos (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

De uma maneira prática, a instabilidade é caracterizada pela perda de controle da tensão nas barras do sistema. Para um sistema estável a magnitude de tensão em uma barra aumenta diante de uma injeção de potência (ativa ou reativa) nessa barra. Quando o sistema atinge o ponto de instabilidade, a magnitude de tensão diminui diante de uma injeção de potência, deixando de responder a qualquer ação de controle e entrando em um cenário onde não é mais possível controlar essa grandeza (GAO *et al.*, 1992; KUNDUR, 1994). Em termos práticos, a consequência da instabilidade de tensão é o declínio progressivo e incontrolável da tensão nas barras do sistema (KUNDUR, 1994).

Do ponto de vista matemático, os sistemas elétricos de potência são sistemas dinâmicos não-lineares, os quais podem ser modelados através de equações algébrico-diferenciais. Logo, esses sistemas apresentam múltiplos pontos de equilíbrio, estáveis e instáveis. Do ponto de vista prático, os sistemas de potência só podem operar em pontos de equilíbrio estáveis (PEE). Assim, a instabilidade em um ponto de operação é caracterizada por um ponto de equilíbrio instável como solução das equações de estado do sistema, onde as variáveis são as tensões fasoriais nas barras. O ponto onde ocorre a transição da estabilidade para a instabilidade é um ponto de bifurcação, como será explicado na seção 2.1.4.2. Como este fenômeno está intimamente associado ao carregamento do sistema, é essencial que se conheça qual o ponto de operação que corresponde ao carregamento máximo.

A fim de compreender os conceitos associados às bifurcações e o ponto de máximo carregamento, são apresentados conceitos básicos de estabilidade estática de tensão, dividindo o problema nos seus três principais aspectos.

2.1.1 ASPECTOS DA GERAÇÃO

Para a análise em questão, serão considerados somente aspectos dos geradores síncronos, caracterizando a participação de grandes usinas térmicas, ou hidrelétricas no problema da estabilidade de tensão.

Por serem uma fonte primária de potência reativa, geradores síncronos são considerados um dos grandes responsáveis por manter um perfil de tensão adequado em um SEP. Conseqüentemente, suas características e limitações são de grande importância para a análise de estabilidade de tensão (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

Como o interesse desta modelagem é somente o problema da estabilidade estática de tensão, a modelagem dos geradores síncronos terá em vista esse tipo de análise. Assim, os aspectos dinâmicos das máquinas síncronas serão desprezados, mas podem ser verificados em Kundur (1994), Van Cutsem e Vournas (1998).

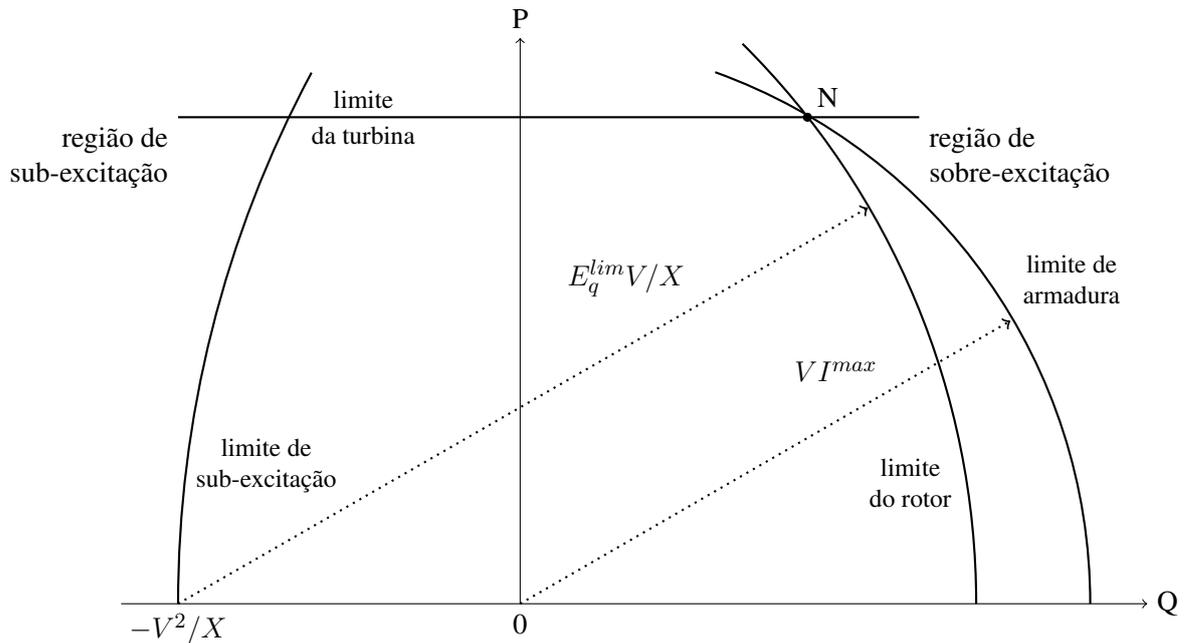
Uma máquina síncrona possui um rotor (parte móvel) e um estator (parte fixa). Em um gerador convencional trifásico, o rotor é formado pelos enrolamentos da excitatriz, responsável por gerar um campo magnético a partir de uma corrente contínua, que irá induzir tensões alternadas nos enrolamentos do estator, ou armadura. As três fases dos enrolamentos da armadura possuem uma defasagem espacial de 120° entre si, de modo que uma rotação uniforme do campo magnético gerado no rotor implique em três fases de tensões defasadas no tempo em 120° no estator (KUNDUR, 1994).

Tanto os enrolamentos do rotor, como do estator apresentam limites de operação, assim como o próprio eixo da turbina apresenta limites mecânicos de operação. Assim, para o desenvolvimento dos conceitos necessários, consideram-se os limites operacionais já apresentados em termos de potência ativa e reativa, em função da tensão terminal do estator (V) e da corrente de armadura da máquina (I), como podem ser obtidos das curvas de capacidade, como mostra a Figura 2.1.

A Figura 2.1 mostra as curvas de limite de operação de uma máquina síncrona: o limite térmico de potência imposto pela corrente de armadura, sob uma tensão constante, é um círculo centrado na origem, cujo raio é VI^{max} , sendo I^{max} a máxima corrente de armadura (KUNDUR, 1994). Como mostra a Figura 2.1, o ponto no qual a máquina irá operar dependerá do fator de potência. Nesse caso a máquina poderá estar sub, ou sobre-excitada.

O limite térmico imposto pelo rotor é dado por um círculo centrado no ponto $(-V^2/X, 0)$, cujo raio é $E_q^{lim}V/X$, sendo X a reatância que representa tanto X_d , a reatância de eixo direto, como X_q , a reatância do eixo de quadratura, aqui consideradas iguais, para

Figura 2.1: Curva de capacidade de um gerador desconsiderando saliência e saturação.



Fonte: Adaptado de Van Cutsem e Vournas (1998).

simplificação, e E_q^{lim} a tensão interna gerada da máquina, que é diretamente proporcional à corrente de campo I_f (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

A Figura 2.1 ainda apresenta os limites mecânicos impostos pela turbina, como uma reta e a curva referente ao limite de sub-excitação, associada aos efeitos térmicos e de campo resultantes da operação sub-excitada (KUNDUR, 1994). O ponto N coincide com o ponto de operação do gerador, definindo a potência nominal aparente e o fator de potência na tensão nominal da máquina. Nem sempre haverá um ponto de interseção exato das três curvas (limite do estator, rotor e turbina), embora elas fiquem próximas entre si na região do ponto N.

Para estudos estáticos, como os aqui propostos, simplifica-se a curva de capacidade, adotando uma área retangular que represente os limites operativos do gerador somente em termos de potência ativa e reativa, impondo ao gerador, ou à máquina equivalente um valor máximo e mínimo de geração de potência reativa, e um valor máximo de geração de potência ativa (TAYLOR, 1994). Existem também casos onde um gerador possui um limite mínimo de geração de potência ativa, o que é comum na operação de usinas térmicas.

O controle automático de tensão e demais mecanismos de regulação do gerador serão representados estaticamente somente pelos tipos de barra do sistema: PV, onde a potência ativa e a tensão na barra são constantes, PQ, onde a potência ativa e reativa na barra são constantes. Em

termos de controle, as barras PV representam geradores com reserva reativa que são capazes de controlar a tensão terminal. Já as barras PQ representam barras de carga, onde não há controle da tensão, e se conhece o consumo da carga, ou barras de geração que já não possuem reserva reativa, perdendo a capacidade de controle da tensão (TAYLOR, 1994).

2.1.2 ASPECTOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

A instabilidade de tensão está associada a uma demanda de carga que excede os limites do sistema de transmissão e/ou geração (KUNDUR, 1994). Desse modo, no restante da análise deve-se observar qual o ponto de máxima transferência de potência do sistema de transmissão e qual a sua relação com o comportamento característico das cargas.

Os aspectos da carga serão tratados na seção 2.1.3. Logo, esta seção trata do ponto de máxima transferência de potência e, brevemente, do efeito que a compensação reativa pode ter na capacidade de transferir potência das linhas do sistema.

É comum obter informações a respeito da máxima transferência de potência em termos da relação entre a tensão em uma barra e a potência (KUNDUR, 1994). Variando a potência ativa em um sentido de carregamento, verifica-se o comportamento da tensão, obtendo-se uma curva de tensão pela potência do carregamento do sistema. De maneira similar, é possível variar a tensão e verificar a resposta da potência reativa, através da inserção de um condensador síncrono virtual na barra em questão. Na primeira análise, tem-se como resposta uma curva PV, que mostra a relação entre o carregamento do sistema em termos de potência ativa e a tensão nas barras. Na segunda análise, como a tensão é a variável independente, é usual colocá-la no eixo das abcissas, produzindo nesse caso uma curva VQ, que traz informações a respeito da relação da tensão na barra e da compensação *shunt*.

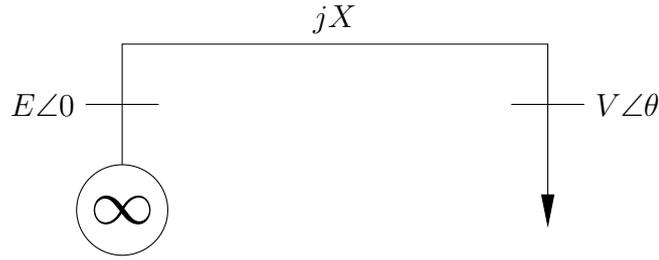
As equações de fluxo de potência ativo e reativo têm como variáveis a magnitude e o ângulo da tensão nas barras. Esse sistema de equações não-lineares só pode ser resolvido analiticamente para sistemas mais simples, como é o caso do sistema de uma carga alimentada por um barramento infinito da Figura 2.2 apresentado em Van Cutsem e Vournas (1998). Para sistemas de maior complexidade, a solução se dá através de métodos numéricos.

Para o sistema da Figura 2.2, a corrente que flui entre as duas barras é dada por \mathbf{I} e a tensão fasorial da barra de carga $\mathbf{V} = V \angle \theta$ é dada por:

$$\mathbf{V} = \mathbf{E} - jX\mathbf{I}, \quad (2.1)$$

onde $\mathbf{E} = E \angle 0$ é a tensão fasorial no barramento infinito e X é a reatância da linha de

Figura 2.2: Sistema de uma carga contra um barramento infinito.



Fonte: Adaptado de Van Cutsem e Vournas (1998).

transmissão. A potência aparente \mathbf{S} absorvida pela carga é dada por:

$$\mathbf{S} = \mathbf{VI}^* = \frac{j}{X}(EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2), \quad (2.2)$$

que decompondo nas partes real (P) e imaginária (Q), chega-se às equações:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta, \quad (2.3)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta. \quad (2.4)$$

Eliminando θ da equação (2.4), chega-se a:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0. \quad (2.5)$$

Solucionando essa equação analiticamente, chega-se à condição da equação (2.6) para que exista pelo menos uma solução das equações de fluxo de potência (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

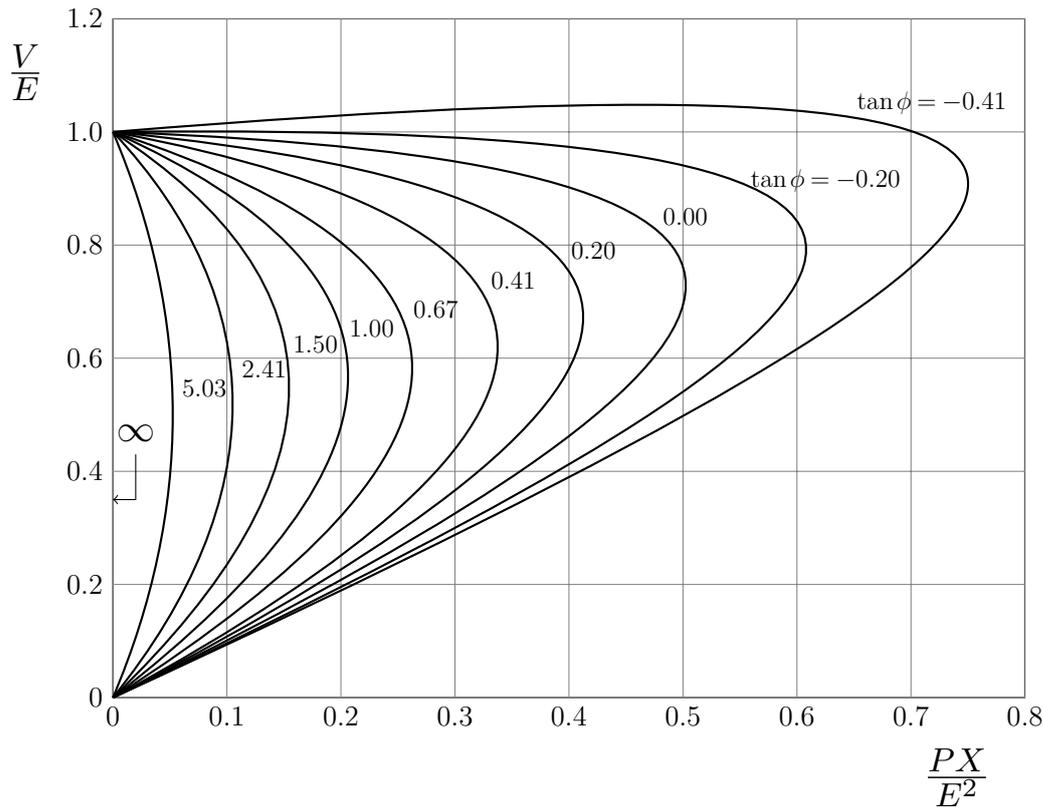
$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0. \quad (2.6)$$

Assim, para as potências P e Q que fazem parte do domínio das equações de fluxo de potência e atendem à desigualdade (2.6), existem duas soluções para cada combinação de P e Q . Quando a igualdade de (2.6) é atendida, existe somente uma solução para o conjunto de equações. Essa parábola é representada o conjunto de bifurcações de cada par P e Q , onde os pontos de equilíbrio resultantes das duas soluções encontradas na região interna da parábola de (2.6) coalescem e desaparecem (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998), como será explicado na

seção 2.1.4.2.

A Figura 2.3 traz um exemplo das curvas PV para o sistema simplificado e sem perdas da Figura 2.2, onde é possível verificar a relação da tensão com a potência ativa, agregando também os efeitos da potência reativa, refletidos nos fatores de potência do carregamento ($\tan \phi$).

Figura 2.3: Curvas PV de um sistema ilustrativo.



Fonte: Adaptado de Van Cutsem e Vournas (1998).

Neste caso V é a magnitude de tensão na barra analisada, E é a magnitude de tensão do gerador. A reatância equivalente da linha é dada por X e P representa a potência ativa da carga, dada pelo componente real da potência aparente $S \cos \phi$. Analisando as curvas da Figura 2.3 conclui-se que:

- Para um carregamento inferior ao máximo, existem duas soluções de tensão: uma de maior magnitude, que implica em uma menor corrente, e outra de menor magnitude de tensão, e maior corrente. A operação normal corresponde ao primeiro caso, onde a tensão da barra é mais próxima à tensão do gerador E . Em termos de operação, a curva inferior é inaceitável (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

- Conforme a compensação na carga aumenta ($\tan \phi$ é menor), maior é a potência máxima transferível. No entanto, também ocorre um aumento da tensão no ponto de máxima transferência. O problema desta condição são níveis de tensão aceitáveis, do ponto de vista operativo, que podem estar muito próximos do ponto de máxima transferência de potência e, conseqüentemente da instabilidade (KUNDUR, 1994).
- Para casos extremos de sobre-compensação (quando $\tan \phi < 0$) existe uma porção da curva PV onde a tensão aumenta conforme existe aumento do carregamento. Isso é explicado pelo fato da potência reativa ser entregue pela carga conforme ocorre o aumento da potência ativa e isso é evidenciado nos cenários de baixo carregamento (P). De maneira direta, quanto mais negativo for o valor de $\tan \phi$, maior será a porção da curva PV onde ocorre esse aumento de tensão.

Analisando as características das curvas PV e como a compensação pode não só deslocar o ponto de máximo carregamento, mas também causar reações adversas no sistema, é essencial prever, por exemplo, bancos de capacitores, ou injeções de reativo na rede através de geradores ou condensadores síncronos adequados para cada sistema, levando em conta não só os limites operativos desses equipamentos e da rede, mas também os limites associados à estabilidade de tensão.

Além das curvas PV, faz parte dos estudos de estabilidade de tensão a interação dessas curvas com o comportamento da carga, como será mostrado na próxima seção.

2.1.3 ASPECTOS DA CARGA

A dinâmica de resposta das cargas é um fator extremamente importante na instabilidade de tensão, guiando a evolução da dinâmica das tensões, podendo em casos extremos levar ao colapso de tensão (KUNDUR, 1994). Logo, a obtenção de modelos matemáticos que refletem adequadamente as características das cargas constituem um ponto importantíssimo no contexto de análise de estabilidade de tensão e, além disso, representam um desafio aos engenheiros.

O desafio da modelagem de cargas reside no fato de que a carga de um sistema é um agregado de diversos equipamentos, que não só varia em magnitude, mas na sua composição ao longo do tempo (KUNDUR, 1994).

A potência consumida pelas cargas pode variar de acordo com a tensão e a frequência do sistema. A análise estática aqui considerada levará em conta somente variações na tensão.

Essa dependência pode ser permanente, nesse caso a carga é considerada estática, ou pode variar com o tempo, o que indica uma carga dinâmica (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

Assim, a potência ativa e reativa que é consumida por uma carga será função da tensão (V) e de uma variável independente z (adimensional, sendo $z \in \mathbb{R} : z \geq 0$) que corresponderá à demanda da carga propriamente dita (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

A fim de explicar o comportamento da carga do sistema combinado ao comportamento do sistema de transmissão, apresenta-se o modelo exponencial de carga expresso para as potências ativa e reativa, nas equações (2.7) e (2.8), respectivamente:

$$P = P(V, z) = z P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha, \quad (2.7)$$

$$Q = Q(V, z) = z Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta, \quad (2.8)$$

onde V_0 é a tensão de referência, e as potências P_0 e Q_0 são as potências ativa e reativa, respectivamente, para um consumo de referência $z = 1$. Os expoentes $\alpha, \beta \in \mathbb{R} : \alpha, \beta \geq 0$ variam conforme a composição da carga, sendo destacadas como composições notáveis (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998):

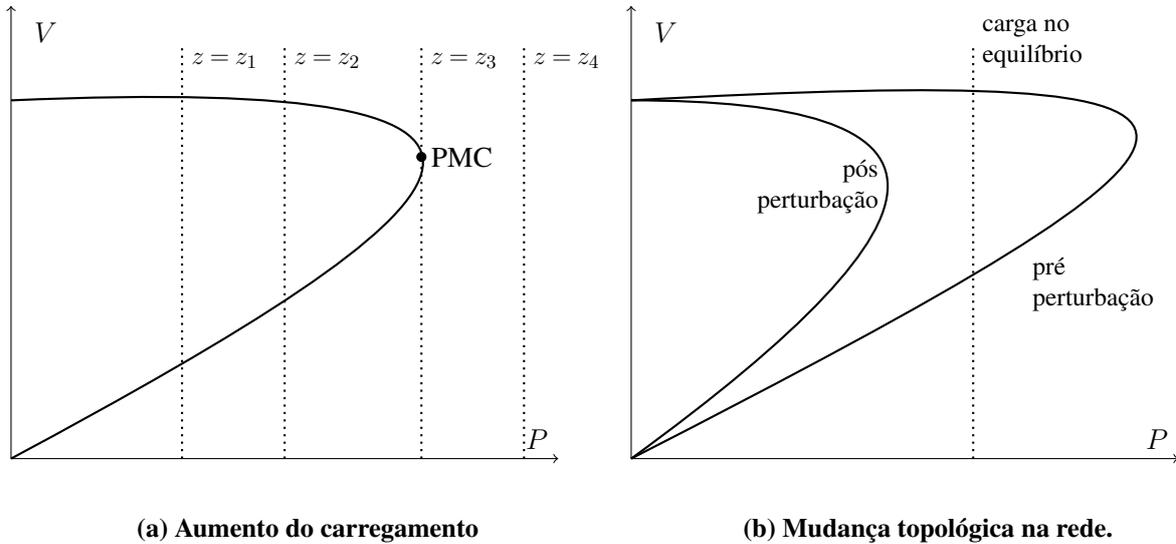
- $\alpha = \beta = 2$: impedância constante (denominada Z);
- $\alpha = \beta = 1$: corrente constante (denominada I);
- $\alpha = \beta = 0$: potência constante (denominada P).

Dadas as curvas de comportamento de carga e da rede, o pré-requisito para uma operação estável é a existência de um equilíbrio dado pela interseção das duas características (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

A Figura 2.4 apresenta em traço cheio a curva de comportamento da rede e em tracejado a curva de comportamento da carga, que tem como característica $\alpha = \beta = 0$. Na Figura 2.4a o mecanismo de instabilidade é explorado a partir do aumento do carregamento do sistema (z), que desloca a curva de carga para a direita até que finalmente não intersepta mais a curva da rede.

A Figura 2.4b representa uma grande perturbação (como a perda de uma linha, ou gerador), onde o cenário de instabilidade chega a partir de uma mudança topológica na rede, que encolhe drasticamente a curva PV da rede, de tal modo que a curva pós perturbação

Figura 2.4: Curvas PV da rede e da carga ($\alpha = \beta = 0$).

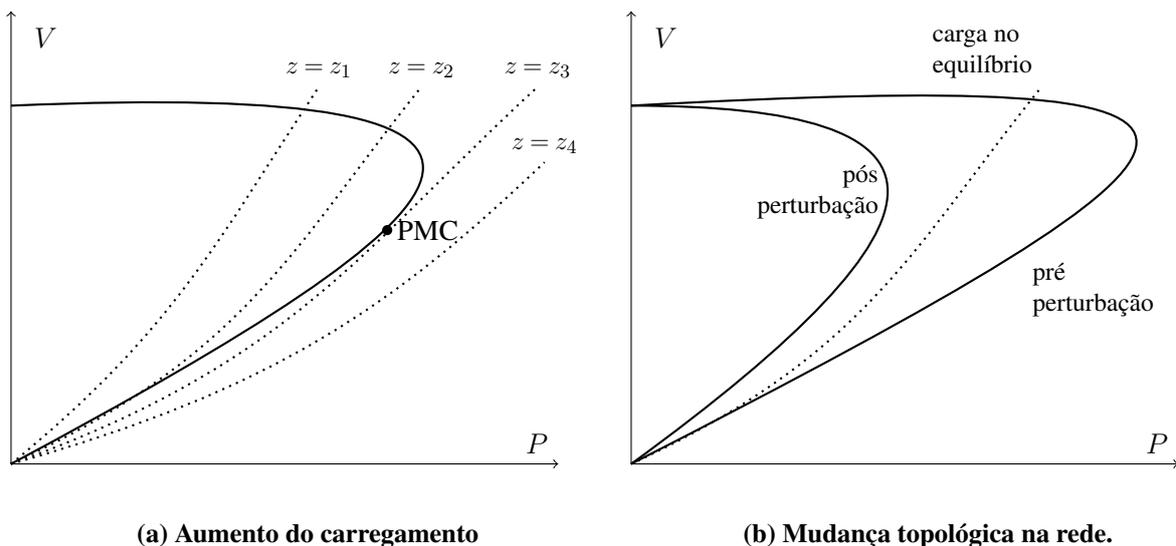


Fonte: Adaptado de Van Cutsem e Vournas (1998).

não intersepta a curva da carga, que nesse cenário permaneceu a mesma (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

A Figura 2.5 é análoga à Figura 2.4, porém com uma carga cuja composição é dada por $\alpha = \beta = 0,7$ (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

Figura 2.5: Curvas PV da rede e da carga ($\alpha = \beta = 0,7$).



Fonte: Adaptado de Van Cutsem e Vournas (1998).

Assumindo um cenário onde o aumento da carga das Figuras 2.4a e 2.5a ocorre de maneira suave, o ponto de máximo carregamento é definido pelos respectivos pontos onde as curvas de carga tangenciam as curvas de característica da rede (VAN CUTSEM; VOURNAS,

1998).

Vale salientar que o ponto PMC, onde a curva de carga z_3 tangencia a curva PV da rede na Figura 2.4a coincide com o ponto de máxima transferência de potência da rede, devido à característica de potência constante da carga, enquanto na Figura 2.5a o ponto PMC ocorre após o ponto de máxima transferência de potência da rede, na parte inferior da curva (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

Como a variável de interesse é o ponto de máximo carregamento, ou seja, o ponto onde a demanda atinge seu valor máximo (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998), adota-se a carga como potência constante, restringindo o cálculo do ponto de máximo carregamento ao nariz da curva PV da rede, ou o ponto de máxima transferência de potência.

2.1.4 PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO

A fim de inferir a respeito da estabilidade de tensão do sistema, serão consideradas as curvas PV do sistema de transmissão e a relação dessas curvas com o comportamento da carga como potência constante, fornecendo informações a respeito do ponto de máximo carregamento do sistema.

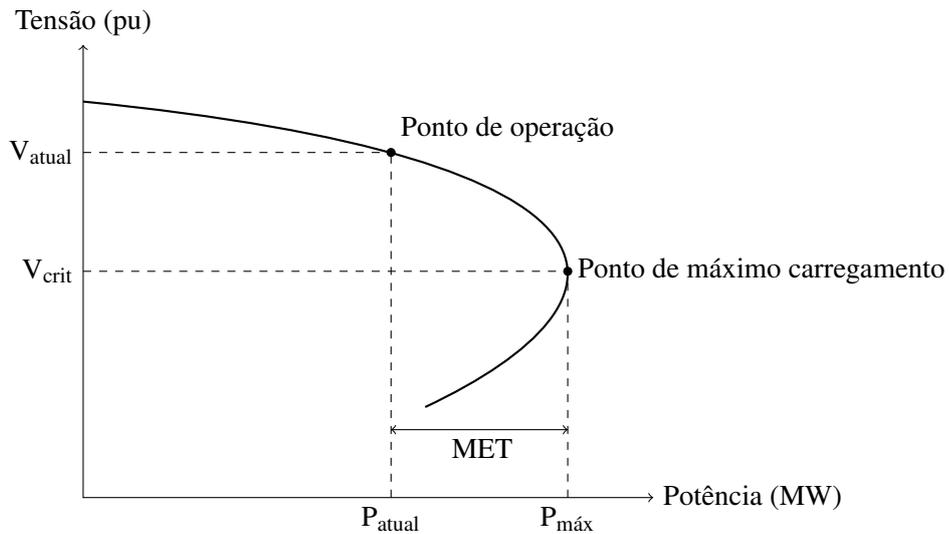
De um ponto de vista prático o ponto de máximo carregamento é utilizado como um índice de estabilidade, sendo utilizado no cálculo da MET. De um ponto de vista matemático o ponto de máximo carregamento é uma bifurcação (KUNDUR, 1994). A fim de melhor entender suas aplicações e selecionar as ferramentas matemáticas adequadas para a solução do problema, apresenta-se brevemente esses dois fundamentos básicos.

2.1.4.1 MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Como ilustra a Figura 2.6, a margem de estabilidade de tensão é um indicador que mede a distância operacional que o sistema se encontra do ponto de colapso, em termos de potência ativa. O ponto de colapso do sistema corresponde ao máximo carregamento, enquanto a margem de estabilidade, ou de segurança é o percentual referente ao aumento da demanda de potência ativa que separa o ponto de operação atual do ponto de colapso (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020b).

Para o Sistema Interligado Nacional (SIN) a margem de estabilidade mínima aceitável varia entre 7% para estados operativos normais e 4% para estados operativos contingenciais (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020b). Para que o ponto de operação em análise seja considerado seguro, a MET mínima aceitável deve ser observada.

Figura 2.6: Ilustração da margem de estabilidade de tensão.



Fonte: Autoria própria.

2.1.4.2 BIFURCAÇÕES E O PONTO DE MÁXIMO CARREGAMENTO

Considere um sistema de potência definido pelo sistema de equações algébrico-diferenciais (2.9) e (2.10), onde o vetor \mathbf{y} é referente às variáveis de estado, o vetor \mathbf{x} às variáveis algébricas e p é um parâmetro qualquer, que posteriormente será particularizado como o próprio carregamento do sistema (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998):

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p), \quad (2.9)$$

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p). \quad (2.10)$$

Nesse sistema as equações diferenciais (2.9) representam as dinâmicas do sistema, enquanto a representação algébrica (2.10) diz respeito às respostas consideradas instantâneas no sistema, ou seja a rede. É possível encontrar os pontos de equilíbrio deste sistema, para um p específico, através da solução do sistema das equações (2.11) e (2.12) (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998):

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) = 0; \quad (2.11)$$

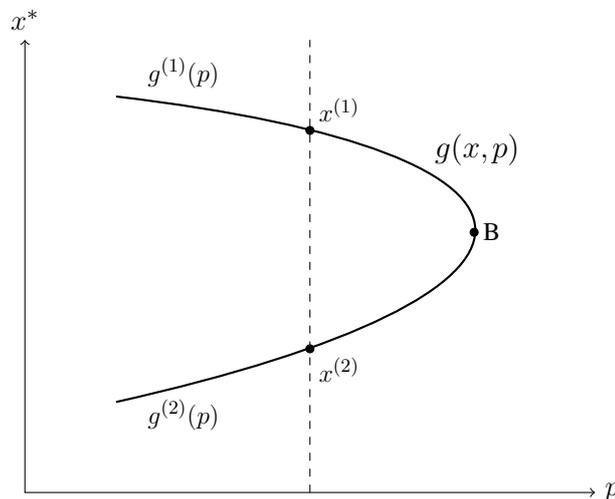
$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, p) = 0. \quad (2.12)$$

Assumindo o equilíbrio das dinâmicas temporais do sistema, o que implica em desprezar as dinâmicas compreendidas pelo vetor y e pela equação f , encontra-se uma representação da resposta instantânea do sistema que, por desprezar dinâmicas temporais é dita estática e é representada pelos elementos da rede (vetor x). Esta representação estática é identificada aqui como o mesmo vetor de equações g , a fim de evitar confusões futuras no equacionamento. No entanto, a representação somente dos elementos de rede, representados em (2.13) difere da representação geral em (2.12). Desta forma, os pontos de equilíbrio do sistema são encontrados a partir da solução da equação algébrica não-linear (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998)

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, p) = 0. \quad (2.13)$$

Supondo que o parâmetro p represente o carregamento do sistema, ao variar esse parâmetro dentro de um domínio específico, a saber o intervalo entre o carregamento inicial e o carregamento máximo do sistema, encontrando sucessivamente os pontos de equilíbrios associados a cada valor de p , obtêm-se trajetórias de equilíbrio associadas à variação do parâmetro p , como ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7: Exemplo de trajetórias de equilíbrio e ponto de bifurcação.



Fonte: Adaptado de Van Cutsem e Vournas (1998).

Ao estudar os pontos de equilíbrio (\mathbf{x}^*) de um sistema algébrico de características não-lineares, como é o caso de um SEP, encontra-se pontos de equilíbrio estáveis ($x^{(1)}$) e instáveis ($x^{(2)}$). Ao variar um parâmetro específico do sistema, é possível encontrar as trajetórias dos

pontos de equilíbrio, que podem também ser estáveis ($g^{(1)}(p)$) ou instáveis ($g^{(2)}(p)$)¹. O ponto onde mais de uma trajetória se encontra (B) é chamado de ponto de bifurcação do sistema. A bifurcação é caracterizada por mudanças repentinas no sistema resultantes de uma variação suave e contínua de algum parâmetro p (KHALIL, 1996).

Em outras palavras uma bifurcação ocorre em qualquer ponto do espaço paramétrico onde uma mudança na estabilidade estrutural do sistema acontece diante de uma pequena variação de parâmetro. Em termos práticos, se existe uma mudança na quantidade de pontos de equilíbrio do sistema em um determinado ponto, isso já constitui uma mudança estrutural na estabilidade do sistema (KHALIL, 1996). Mais detalhes acerca da estabilidade estrutural podem ser encontrados em Pai *et al.* (1995).

A bifurcação sela-nó (BSN) é o caso específico onde duas trajetórias de equilíbrio se encontram, satisfazendo as condições necessárias de equilíbrio (2.14) e singularidade (2.15) e as condições suficientes de equilíbrio (2.14), inflexão (2.16) e transversalidade (2.17), (2.18). Consequentemente, neste caso, dois pontos de equilíbrio, um estável e um instável, se encontram, coalescem e desaparecem (AJJARAPU, 2006):

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}^*, p) = 0; \quad (2.14)$$

$$\det \left(\frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x}^*, p)}{\partial \mathbf{x}} \right) = \det \mathbf{g}_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*, p) = 0. \quad (2.15)$$

O ponto de bifurcação é um ponto de equilíbrio do sistema, o que é assegurado pela condição da equação (2.13). Além disso, a jacobiana com relação às variáveis \mathbf{x} , aqui definida como $\mathbf{g}_{\mathbf{x}}$, deve ser singular, o que é assegurado pela equação (2.15). Para ilustrar a natureza das demais condições de suficiência, Van Cutsem e Vournas (1998) se utiliza de um sistema escalar, onde $g(x^*, p) = 0$. Assim

¹ A estabilidade das trajetórias $g^{(1)}(p)$ e $g^{(2)}(p)$ pode ser verificada a partir de análises de autovalores. Fazendo uma verificação prática no caso das trajetórias de um SEP, onde \mathbf{x} representa a tensão nas barras do sistema, fica evidente que a trajetória inferior ($g^{(2)}(p)$) é instável, uma vez que o decremento do carregamento (considerando qualquer ponto p antes da bifurcação B) implicaria em uma queda nos valores de tensão, caracterizando a perda do controle da tensão

$$\frac{\partial g}{\partial x} = 0, \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial g}{\partial p} \neq 0, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2} \neq 0. \quad (2.18)$$

O ponto de inflexão da trajetória de x , dado por $p_0 = x_0^* = 0$, é garantido por (2.16). A equação (2.17) garante que p seja localmente suave no ponto de bifurcação (p_0, x_0^*) e a condição da equação (2.18) garante que a trajetória de equilíbrio do sistema permaneça em apenas um lado da linha $p = p_0$ (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

Para encontrar o ponto de máximo de carregamento podem ser utilizados métodos de continuação, onde a trajetória das variáveis de estado do sistema é obtida através de sucessivas soluções do sistema, variando-se parâmetros do equacionamento (carregamento, ou a tensão em uma barra). O ponto de máximo carregamento também pode ser estimado através de métodos diretos sem a necessidade da solução da trajetória, utilizando métodos de otimização (AJJARAPU, 2006).

Para fins de simulação, nesta pesquisa a obtenção dos pontos de máximo carregamento será feita sempre utilizando o método de continuação, o que fornece de maneira precisa um índice de margem de estabilidade do sistema.

Aponta-se ainda que para fins de análise de segurança estática de tensão, a perturbação considerada neste trabalho será o aumento sistêmico da carga, isto é, o aumento da carga em todas as barras do sistema, de maneira a respeitar os fatores de aumento de carga de cada barra, previamente estabelecidos. Quando da análise de contingências, o estudo do aumento sistêmico de carga para esses cenários irá considerar que o transitório resultante das retiradas de linhas ou transformadores já tenha sido estabilizado, inicializando o problema de um ponto de operação estático pós contingência, caso este exista. Buscando o equilíbrio do SEP ante esse aumento sistêmico da carga, estratégias de controle preventivo e emergencial são propostas, utilizando bancos de capacitores, e excitando máquinas síncronas, levando em consideração as reservas de bancos de capacitor disponíveis e os limites de excitação das máquinas e de tensão nas barras do sistema.

2.2 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Esta seção apresenta a fundamentação dos dois métodos de solução que serão utilizados na metodologia proposta, a saber o método de continuação para obtenção da trajetória de soluções do sistema, conforme o aumento de carregamento, e a análise modal como ferramenta de análise de instabilidade de tensão no sistema.

2.2.1 MÉTODO DE CONTINUAÇÃO

O método de continuação é uma ferramenta matemática utilizada para a solução de equações não-lineares que se baseia na obtenção de uma trajetória de solução obtida passo a passo (AJJARAPU, 2006).

Para a obtenção do ponto de máximo carregamento, o fluxo de potência continuado se baseia nesta técnica de trajetória de soluções, utilizando um método previsor-corretor que adota técnicas de continuação com uma parametrização local a fim de traçar as sucessivas soluções de fluxo de potência, a partir da variação de um parâmetro (AJJARAPU, 2006).

A seção 2.2.1.1 apresenta a modelagem matemática desta técnica de parametrização local, enquanto a seção 2.2.1.2 traz a aplicação desta técnica na solução do fluxo de potência continuado.

Salienta-se que para as análises tratadas nesta pesquisa, o sistema é estável do ponto de vista das dinâmicas temporais, sendo estudada a estabilidade do sistema considerando os elementos da rede após a obtenção da estabilidade do ponto de vista das dinâmicas temporais. A modelagem da carga é feita como potência constante e reflete o cenário mais conservador em termos de estabilidade de tensão (TUAN *et al.*, 1994).

2.2.1.1 PARAMETRIZAÇÃO LOCAL

Dado um sistema de equações algébricas não-lineares definido por $\mathbf{f}(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, o vetor de variáveis de estado \mathbf{x} , de dimensão n , que satisfaça a equação $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = 0$ representa um ponto de equilíbrio. Para obter a solução de tal sistema não-linear, recorre-se a um método previsor-corretor, onde o ponto de previsão (\mathbf{x}^k) pode ser dado por um ponto de solução anterior, um valor inicial previamente convencionado para as variáveis de estado, ou mesmo uma previsão obtida a partir de métodos da tangente, ou da secante (KUNDUR, 1994).

O índice $k \in \mathbb{N}$ representa as iterações do método previsor-corretor até que $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ seja menor que um valor de erro previamente estipulado ε . Como método de correção, expande-se

$\mathbf{f}(\mathbf{x})$ em uma série de Taylor, truncando-a no primeiro termo, obtendo a aproximação linearizada

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}(\mathbf{x})\Delta\mathbf{x}, \quad (2.19)$$

onde $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ é a matriz jacobiana de \mathbf{f} com relação a \mathbf{x} e o vetor $\Delta\mathbf{x}$ é a correção a ser aplicada. Resolvendo o sistema linear para $\Delta\mathbf{x}$, corrige-se o ponto previsto (\mathbf{x}^k) conforme a equação (2.20):

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta\mathbf{x}. \quad (2.20)$$

Dado um parâmetro $p \in \mathbb{R}^1$ que varia de maneira contínua e suave no intervalo $p_{min} \leq p \leq p_{max}$, o método de continuação permite conhecer o campo de solução das variáveis de estado $\mathbf{x}(p) \in \mathbb{R}^n$, tal que $\mathbf{x}(p_{min}) = \mathbf{x}^0$. Supondo que a continuação busque o resultado de um ponto específico \mathbf{x}^* , associado ao valor máximo do parâmetro p , calcula-se o campo $\mathbf{x} : [p_{min}, p_{max}] \rightarrow \mathbb{R}^n$ até encontrar o valor $\mathbf{x}(p_{max}) = \mathbf{x}^*$. Assim, o parâmetro p é embutido em uma equação paramétrica $\mathbf{g}(\mathbf{x}, p) : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^1 \rightarrow \mathbb{R}^n$ (RHEINBOLDT, 1980).

A adição do parâmetro como uma variável do sistema faz necessária a inclusão de mais uma equação para obtenção de uma jacobiana invertível. Assim, concatena-se um vetor $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{n+1}$ tal que a jacobiana aumentada

$$\mathbf{J}_{\text{aum}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{u}^T \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (2.21)$$

seja quadrada e não-singular na vizinhança de um ponto específico, aqui denominado \mathbf{x}^j (neste caso o ponto de interesse é o último calculado do campo de solução).

Como provado em Rheinboldt (1980), existe para qualquer \mathbf{x} pertencente ao conjunto do domínio válido da função $\mathcal{R}(\mathbf{f}) = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \text{rank}(J(\mathbf{x})) = n\} \neq \emptyset$ um vetor $\mathbf{u} = T\mathbf{x}^j$ que satisfaz as condições de não singularidade da jacobiana expandida, tal que:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{u} = 0, \quad \|\mathbf{u}\|_2 = 1, \quad \det \begin{pmatrix} \mathbf{J}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{u}^T \end{pmatrix} > 0. \quad (2.22)$$

Neste caso T é uma função definida em $\mathcal{R}(\mathbf{f}) \rightarrow \mathbb{R}^{n+1}$ que resolve a equação autônoma $\mathbf{x}' = T\mathbf{x}$, ou seja, $T\mathbf{x}^j$ é o vetor tangente do último ponto que se tem solução \mathbf{x}^j . Na definição, $\|\cdot\|_2$ é a norma Euclidiana em \mathbb{R}^{n+1} e $\text{rank}(\cdot)$ é o posto de uma matriz. O problema apontado por Rheinboldt (1980) com a escolha de um vetor $\mathbf{u} = T\mathbf{x}^j$ é a possibilidade do vetor \mathbf{u}

apresentar várias componentes não nulas, o que torna a linha final da jacobiana expandida cheia, mesmo quando $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ é esparsa, trazendo prejuízo ao condicionamento numérico (ou número de condição) do problema. Assim, opta-se por um vetor \mathbf{u} derivado da fixação do valor de uma das variáveis (x_i). Desse modo $\mathbf{u} = \mathbf{e}^i$ atende a equação (2.22), onde \mathbf{e}^i é um vetor da base canônica de \mathbb{R}^{n+1} , ou seja, um vetor nulo, cujo i -ésimo elemento é unitário (RHEINBOLDT, 1980).

Por fim, escreve-se a função expandida:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ (\mathbf{e}^i)^T \mathbf{x} - \eta \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

onde η é o valor no qual a variável x_i é fixada. Rheinboldt (1980) ainda aponta que o parâmetro i deve ser escolhido tal que a tangente desta i -ésima variável, $|\mathbf{T}\mathbf{x}^T \mathbf{e}^i|$, seja a maior possível.

2.2.1.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO AO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA

Escreve-se o equacionamento apresentado na seção 2.2.1.1 em termos das equações de fluxo de potência e do carregamento do sistema (KUNDUR, 1994; AJJARAPU, 2006) da seguinte maneira:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \\ (e_i)^T \mathbf{x} - \eta \end{bmatrix} = 0. \quad (2.24)$$

O vetor \mathbf{x} ,

$$\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta} \quad \mathbf{V} \quad \lambda]^T, \quad (2.25)$$

é composto pelos vetores dos ângulos ($\boldsymbol{\theta}$) e das magnitudes da tensão desconhecidos nas barras (\mathbf{V}). Logo, $\boldsymbol{\theta}$ possui dimensão $NPV + NPQ$ e \mathbf{V} possui dimensão NPQ (MONTICELLI, 1983). O parâmetro λ é um escalar e representa o carregamento do sistema (KUNDUR, 1994; AJJARAPU, 2006). O carregamento λ também pode ser uma variável, nos casos onde uma das magnitudes de tensão for escolhida como parâmetro.

Os vetores $\Delta \mathbf{P}$ e $\Delta \mathbf{Q}$ representam as equações de balanços de potência ativa e reativa

conhecidos em cada barra k do sistema e são apresentados respectivamente por

$$\Delta P_k = P_{Gk}(\lambda) - P_{Lk}(\lambda) - P_{Tk}(\theta, V) = 0 \quad (2.26)$$

e

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk}(\lambda) - Q_{Tk}(\theta, V) = 0, \quad (2.27)$$

sendo:

$P_{Gk}(\lambda)$ a potência ativa gerada;

$P_{Lk}(\lambda)$ a potência ativa consumida pela carga;

$P_{Tk}(\theta, V)$ a injeção de potência ativa na barra;

Q_{Gk} a potência reativa gerada;

$Q_{Lk}(\lambda)$ a potência reativa demandada pela carga;

$Q_{Tk}(\theta, V)$ a injeção de potência reativa na barra.

Logo o vetor $\Delta \mathbf{P}$ apresenta os balanços das barras PV e PQ, tendo tal dimensão $(NPV + NPQ)$, enquanto o vetor $\Delta \mathbf{Q}$ apresenta o balanço somente das barras PQ, tendo como dimensão NPQ .

Como apresentado em Ajjarapu (2006), a potência ativa gerada (P_{Gk}),

$$P_{Gk}(\lambda) = P_{Gk0}[1 + (\lambda - \lambda_0)FP_{Gk}], \quad (2.28)$$

e a potência ativa consumida pela carga (P_{Lk}),

$$P_{Lk}(\lambda) = P_{Lk0} + (\lambda - \lambda_0)[FP_{Lk}S_{\Delta BASE} \cos \varphi_k], \quad (2.29)$$

são dependentes do parâmetro de carregamento (λ). E são descritas pelas equações (2.28) e (2.29).

Nessas equações:

P_{Gk0} é a potência ativa gerada inicial no estudo;

λ é o parâmetro de carregamento, sendo $\lambda \geq \lambda_0$;

λ_0 é o carregamento base do sistema;

FP_{Gk} representa o fator de participação de geração ativa de cada barra PV;

P_{Lk0} é a configuração inicial de cada barra de potência ativa consumida pela carga;

FP_{Lk} é o fator de participação de aumento de carga em cada barra;

$S_{\Delta BASE}$ é a potência base do sistema e

φ_k o ângulo do fator de potência da carga em cada barra.

A potência reativa demandada pela carga (Q_{Lk}),

$$Q_{Lk}(\lambda) = P_{Lk0} \tan \varphi_k [1 + FP_{Lk}], \quad (2.30)$$

acompanha o fator de potência das cargas em cada barra, e pode ser escrita conforme a equação (2.30). A potência reativa gerada,

$$Q_{Gk} = Q_{Lk}(\lambda) + Q_{Tk}, \quad (2.31)$$

não é previamente conhecida nas barras PV, somente nas barras PQ, onde é previamente estabelecida. Após a convergência do fluxo de potência, essa potência é obtida. As injeções de potência ativa (P_{Tk}) e reativa (Q_{Tk}) nas barras do sistema ($k, m \in \mathbb{N}$) são apresentadas nas equações (2.32) e (2.33), como apresentado em Monticelli (1983):

$$P_{Tk} = V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)), \quad (2.32)$$

$$Q_{Tk} = V_k \sum_{m \in \kappa} V_m (G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)), \quad (2.33)$$

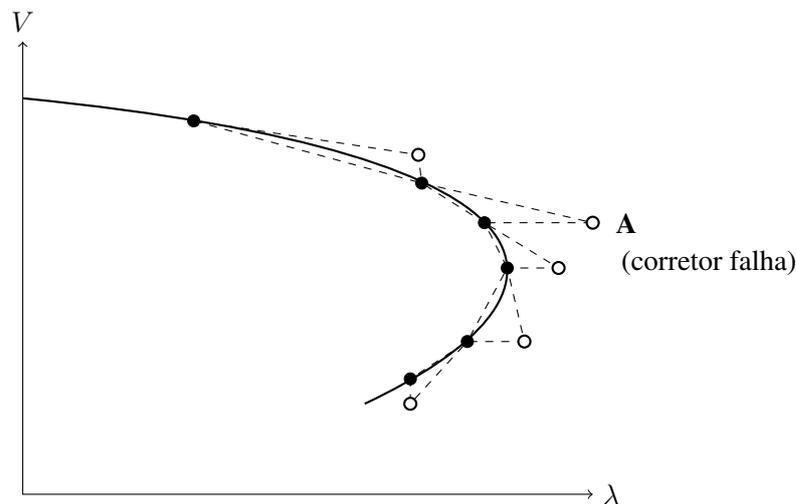
Sendo V_k e V_m , elementos do vetor \mathbf{V} da equação (2.25), a magnitude da tensão nas barras k e m , respectivamente, θ_k e θ_m , elementos do vetor $\boldsymbol{\theta}$ da equação (2.25), o ângulo da tensão nas barras k e m , respectivamente, κ o conjunto de todas as barras do sistema, G_{km} o elemento km da matriz de condutância G e B_{km} o elemento km da matriz de susceptância B . A jacobiana expandida pode ser escrita como:

$$\mathbf{J}_{\text{aum}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} & \mathbf{J}_{P\lambda} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} & \mathbf{J}_{Q\lambda} \\ (e_i)^T & & \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{P}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}} & \frac{\partial \Delta \mathbf{Q}}{\partial \lambda} \\ (e_i)^T & & \end{bmatrix}. \quad (2.34)$$

Aplicando o método predictor-corretor apresentado no início da seção 2.2.1.1 com o equacionamento descrito nesta seção, é possível resolver o problema da continuação, obtendo a trajetória dos pontos de equilíbrio do sistema, incluindo os instáveis. Os incrementos de carga ($\Delta\lambda$), ou decrementos de tensão (ΔV) são aplicados no ponto da solução anterior e η assume o valor do parâmetro escolhido.

A escolha de qual parâmetro será utilizado (carregamento ou tensão) é feita a partir do valor máximo absoluto das variáveis de tensão e carregamento do sistema do vetor tangente de cada ponto de operação obtido ($T\mathbf{x}_i$), ou é feita a partir de avaliações da convergência do sistema, como mostra a Figura 2.8, onde os círculos abertos representam a solução do predictor e os círculos preenchidos a solução do corretor.

Figura 2.8: Transição do parâmetro de continuação no método da parametrização local.



Fonte: Adaptado de Kundur (1994).

A Figura 2.8 mostra que ao encontrar problemas com a utilização do carregamento como parâmetro de continuação, o método deixa de convergir no ponto A. Nessa solução é feita a transição do parâmetro de continuação (de carga para a tensão na barra de maior variação). Obtidos os pontos do campo de solução, é possível verificar qual ponto de operação corresponde ao maior λ , ou seja, ao ponto de máximo carregamento, como demonstrado na Figura 2.8. Ressalta-se que as soluções encontradas acima do nariz da curva representam o conjunto de soluções, ou pontos de equilíbrio, estáveis, enquanto as soluções abaixo do nariz da curva representam os pontos de equilíbrio instáveis do sistema.

Mesmo sabendo qual é o ponto de equilíbrio do sistema onde ocorre a bifurcação, em termos de análise de segurança e estabilidade de tensão não é suficiente conhecer o ponto crítico

de operação. É importante estudar como esse ponto crítico pode ser afetado por mudanças nas condições do sistema. Em termos operativos, é importante saber quais ações de controle terão maior eficácia no objetivo de manter a estabilidade de tensão (AJJARAPU, 2006).

Nesse sentido, surge a aplicação da análise de sensibilidade para estabilidade de tensão. Muitos índices foram propostos visando este tipo de análise que relaciona, em um determinado ponto de operação, qual a sensibilidade das variáveis do sistema (neste caso a magnitude de tensão) diante de uma variação de um parâmetro específico (AJJARAPU, 2006).

Neste trabalho optou-se pela utilização da análise modal e os fatores de participação nas barras e linhas do sistema decorrentes desta decomposição algébrica, uma vez que este tipo de análise fornece informações a respeito da *proximidade* do sistema à instabilidade e do *mecanismo* do sistema que está associado à instabilidade analisada (GAO *et al.*, 1992).

2.2.2 ANÁLISE MODAL

Tendo em vista que a estabilidade de tensão está relacionada à resposta de tensão diante das variações de potência ativa e reativa, pode-se utilizar a análise dos autovalores e autovetores da matriz que relaciona as alterações incrementais de potência ativa e reativa com os incrementos de ângulo e magnitude da tensão nas barras (GAO *et al.*, 1992), como mostra a equação (2.35):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{P\theta} & \mathbf{J}_{PV} \\ \mathbf{J}_{Q\theta} & \mathbf{J}_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}. \quad (2.35)$$

Essa matriz pode ser a própria jacobiana do fluxo de potência, mas também pode considerar a modelagem de outros equipamentos do sistema, sendo uma matriz modificada que difere da jacobiana convencional (GAO *et al.*, 1992).

Os autovalores são os indicadores do sistema referentes à *proximidade* da instabilidade. Diferentemente da análise modal do ângulo do rotor a pequenas perturbações, na análise modal aplicada à estabilidade de tensão autovalores positivos estão associados à estabilidade. Se um autovalor se torna nulo, o sistema atingiu a singularidade, o que caracteriza uma bifurcação. Devido à característica da BSN, o sistema não é mais estável quando atinge o ponto de bifurcação. Quando pelo menos um autovalor se torna negativo o sistema atingiu a instabilidade (GAO *et al.*, 1992).

Embora Gao *et al.* (1992) apresente a formulação da decomposição em autovalores diretamente para o problema reativo, considerando uma matriz jacobiana reduzida, obtida a

partir do complemento de Schur de \mathbf{J}_{QV} e da Silva *et al.* (2000) presente o equivalente para o problema ativo, via matriz jacobiana reduzida a partir do complemento de Schur de $\mathbf{J}_{P\theta}$, neste trabalho a abordagem utilizada considerará a jacobiana completa \mathbf{J} da equação (2.35), como apresentado em da Silva *et al.* (2000), da Silva *et al.* (2002), Affonso *et al.* (2004). Esta escolha se dá devido às vantagens da esparsidade dessa matriz e da possibilidade de representação dos autovetores mesmo em pontos de solução distantes da bifurcação (DA SILVA *et al.*, 2000).

A decomposição da matriz \mathbf{J} proposta em Affonso *et al.* (2004) é apresentada como:

$$\mathbf{J}_{2NPQ+NPV} = \Theta \cdot \Lambda \cdot \Gamma, \quad (2.36)$$

onde Λ é a matriz diagonal dos autovalores de \mathbf{J} . As matrizes Θ e Γ são os respectivos autovetores pela direita e pela esquerda de \mathbf{J} .

Cada autovalor λ_i define o i -ésimo modo de instabilidade de tensão do sistema. A magnitude de cada autovalor λ_i determina quão fraco é o modo de instabilidade correspondente: quão menor for a magnitude, mais fraco será esse modo, ou seja, mais próximo da instabilidade. Dessa maneira, ao aplicar uma ação de controle no sistema a fim de melhorar o índice de estabilidade de tensão, busca-se a barra do sistema que irá impactar mais o modo mais fraco, ou mais próximo da instabilidade (GAO *et al.*, 1992).

2.2.2.1 FATORES DE PARTICIPAÇÃO DE BARRA

Para cada autovalor λ_i é possível associar os mecanismos de estabilidade com os respectivos autovetores pela direita (u_i) e pela esquerda (v_i). A matriz formada, coluna a coluna, pelos autovetores pela direita é representada por Θ . De maneira análoga a matriz formada, linha a linha, pelos autovetores pela esquerda é representada por Γ . O autovalor de interesse para o estudo de estabilidade é o mais crítico, ou seja, o mais próximo de zero, chamado aqui de λ_{crit} .

Affonso *et al.* (2004) apontam que os primeiros ($NPQ + NPV$) elementos dos autovetores pela direita e pela esquerda associados com o autovalor crítico λ_{crit} definem os fatores de participação ativa (APF) das barras do sistema. Os APFs referentes às barras PV dão informações acerca dos geradores do sistema, enquanto os APFs referentes às barras PQ dão informações sobre as melhores barras candidatas a cortes de carga. Vale ressaltar que a relação θP , ou mesmo os APFs, que derivam desta relação, são válidos como análise do impacto da potência ativa nas próprias magnitudes de tensão, como apontando em da Silva *et al.* (2002).

De maneira análoga aos APFs, os últimos (NPQ) elementos dos autovetores

associados ao autovalor crítico definem os fatores de participação reativa (RPF), sendo aplicável somente às barras PQ do sistema. Gao *et al.* (1992) propõem uma formulação para os fatores de participação (ativa e reativa) das barras do sistema associados a cada modo λ_i de instabilidade (APF_{ki} e RPF_{ki} , respectivamente). Esta formulação é dada pelo conjunto de equações (2.37):

$$\begin{cases} APF_{ki} = u_{ik} v_{ki}, & 1 \leq k \leq (NPQ + NPV), \quad k \in \mathbb{N} \\ RPF_{ki} = u_{ik} v_{ki}, & (NPQ + NPV) < k \leq (2NPQ + NPV), \quad k \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (2.37)$$

Kopcak *et al.* (2003) apontam que a análise acerca dos mecanismos de instabilidade de cada barra do sistema associados a um autovalor podem ser feitos analisando diretamente os autovetores pela esquerda, ou pela direita. No entanto, a formulação apresentada na equação 2.37 representa melhor a participação das barras em cada modo de instabilidade.

Para o ponto de máximo carregamento os fatores de participação calculados via jacobianas reduzidas (seja \mathbf{J}_{QV} ou $\mathbf{J}_{P\theta}$) coincidem com os obtidos via matriz não reduzida. Observa-se, no entanto uma diferença algébrica entre a decomposição em autovalores das jacobianas reduzidas e da completa, uma vez que \mathbf{J} possui uma característica levemente assimétrica. Isso implica em autovalores com parte imaginária diferente de zero, como já foi apontado em da Silva (2001). No entanto, a leve assimetria da matriz jacobiana permite que a parte imaginária da decomposição em autovalores e autovetores seja desprezada (DA SILVA, 2001).

Por fim, salienta-se que esses fatores de participação oriundos do produto dos autovetores pela esquerda e pela direita (APFs e RPFs) são completamente distintos dos fatores de participação de geração e carga (FP_{Lk} e FP_{Gk}), previamente arbitrados e atribuídos a cada barra k no cálculo das potências dependentes do carregamento λ .

2.3 ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS

Nesta seção apresentam-se os conceitos necessários para a compreensão da construção da parte da metodologia referente à análise de contingências. Salienta-se que será considerada a análise voltada para o problema da estabilidade de tensão, realizando-se o estudo para as contingências de linha, segundo o critério N-1.

Inicialmente será apresentada a técnica utilizada na metodologia para a identificação de ramos críticos do sistema, após isso serão apresentadas técnicas de ranqueamento de contingências consolidadas na literatura, pontuando suas diferenças ante o modelo que será

proposto na seção 3.1.3. Finalmente, será apresentada a técnica utilizada na metodologia para o cálculo do Limite de Operação Segura (LOS), que indica a contingência de linha do sistema que implica na menor MET após a contingência.

2.3.1 IDENTIFICAÇÃO DE RAMOS CRÍTICOS

Do ponto de vista da análise de contingências, os ramos que implicam em ilhamento são identificados como as contingências mais críticas do sistema. A fim de identificar esses ramos críticos utiliza-se um método grafo-algébrico proposto em Theodoro *et al.* (2012).

A partir da matriz de incidência barra-ramo \mathbf{H} do sistema elétrico analisado, cuja dimensão é dada por $n \times m$, onde n é a quantidade de barras do sistema e m a quantidade de ramos, obtém-se a matriz \mathbf{H}_F através da fatoração triangular da matriz \mathbf{H} . Theodoro *et al.* (2012) apontam que a matriz \mathbf{H}_F assume a forma

$$\mathbf{H}_F = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{R} \\ \mathbf{N}_1 & \mathbf{N}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.38)$$

se o sistema em questão for conexo, ou em casos onde não existem ilhas no sistema. Na equação (2.38) a matriz \mathbf{I} é a matriz identidade de dimensão $n - 1$ e a matriz \mathbf{R} é a matriz de redundância de ramos, de dimensão $(n - 1) \times q$, sendo $q = [m - (n - 1)]$. Os dois vetores-linha nulos \mathbf{N}_1 e \mathbf{N}_2 , de dimensão $1 \times (n - 1)$ e $1 \times q$, respectivamente, completam a matriz \mathbf{H}_F , de maneira que sua dimensão seja $n \times m$, assim como a matriz \mathbf{H} .

Desse modo, após a fatoração triangular de \mathbf{H} em \mathbf{H}_F , é possível identificar os ramos onde não há redundância, verificando as linhas da matriz que possuem somente um elemento não-nulo. Associando as colunas onde os elementos não-nulos se encontram com os respectivos ramos do sistema, encontra-se os ramos críticos (THEODORO *et al.*, 2012).

Atenta-se para o fato de que durante o processo de fatoração, caso ocorram permutações das colunas da matriz, deve-se manter o registro de associação entre as colunas da matriz fatorada com os respectivos ramos do sistema.

2.3.2 RANQUEAMENTO DE CONTINGÊNCIAS

A primeira ferramenta de ranqueamento foi apresentada por Ejebe e Wollenberg (1979), fundamentada em índices de performance (PI) de tensão. Índices de performance de tensão, mensuram o desvio da tensão em cada barra, ponderando a severidade do desvio de acordo com um limite de tensão nas barras previamente estabelecido. No entanto, não indicam

a proximidade da contingência da instabilidade de tensão, apenas o desvio de tensão nas barras.

Jasmon e Lee (1993) propuseram uma ferramenta de ranqueamento baseada em um índice de instabilidade das linhas do sistema (índice L), fundamentado na redução do sistema em um equivalente de duas barras e uma linha. Musirin e Abdul Rahman (2002) propuseram um índice rápido de estabilidade de tensão (FVSI), que é uma adaptação feita sobre as premissas do índice L a fim de simplificar o processo de cálculo dos índices de cada linha, eliminando a necessidade de redução da rede.

Assim, apresenta-se o equacionamento do FVSI proposto por Musirin e Abdul Rahman (2002) como um método de ranqueamento estabelecido na literatura que será utilizado para fins de comparação de desempenho do método proposto no capítulo 3.

Musirin e Abdul Rahman (2002) partem da generalização do equacionamento quadrático da tensão na barra de destino de uma linha simples, similar ao desenvolvido na equação (2.5). Considerando que o critério para a estabilidade de tensão é que o discriminante² da equação quadrática seja positivo, chega-se à equação do FVSI, sendo os índices k e m referentes às barras de origem e destino da linha em questão:

$$FVSI_{km} = \frac{4Z^2 Q_{km}}{V_k^2 X}, \quad (2.39)$$

sendo Z o módulo da impedância da linha km e X a reatância, Q_{km} o fluxo de potência reativa que flui da barra k para barra m e V_k o módulo da tensão na barra k . Os índices são calculados para o sistema completo, de modo que $FVSI_{km}$ atesta a respeito da contingência de linha km . Ressalta-se ainda que Musirin e Abdul Rahman (2002) mantêm a convenção dos dados de linha do sistema ao definir qual a barra de destino e origem, uma vez que $FVSI_{km}$ seria diferente de $FVSI_{mk}$, devido às perdas reativas em cada linha.

O valor de $FVSI_{km}$ é avaliado no intervalo $[0, 1]$, sendo $FVSI_{km} = 1,0$ o índice que representa instabilidade e 0 o índice que representa estabilidade. Desse modo, o ranqueamento das contingências é feito de maneira decrescente. Quanto menor o FVSI, menor é a tendência de instabilidade da linha, ou menos crítica é considerada a contingência.

2.3.3 LIMITE DE OPERAÇÃO SEGURA

Dada uma tendência de carregamento do sistema, define-se limite de operação segura como o ponto de operação mais carregado do sistema tal que dada a ocorrência de uma

²Em uma equação do segundo grau dada por $ax^2 + bx + c$, o discriminante é dado por $\Delta = b^2 - 4ac$.

contingência, o ponto de operação dessa contingência exista e seja estável (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

O conjunto de contingências a ser considerado na determinação do LOS depende do estudo a ser realizado, podendo ser somente uma contingência, ou várias. O método para encontrar o LOS pode analisar diretamente as contingências a serem estudadas, calculando suas margens de estabilidade de tensão e verificando qual contingência apresenta a menor. No entanto, essa extensa busca implica em diversos fluxos de potência continuados.

O método utilizado neste trabalho considera diferentes carregamentos no sistema completo, verificando a convergência das contingências estudadas para cada um desses carregamentos. A fim de reduzir os cálculos de fluxo de potência, ao invés da continuação de soluções, utiliza-se um método de busca binária apresentado em Van Cutsem e Vournas (1998).

No processo da busca binária, o ponto de busca é sempre o ponto médio do intervalo analisado. Conforme o resultado da simulação de cada ponto, descarta-se uma das metades remanescentes. No caso da busca do limite de operação segura, o ponto inicial a ser testado é o carregamento máximo, para que, a partir daí os intervalos sejam divididos pela metade.

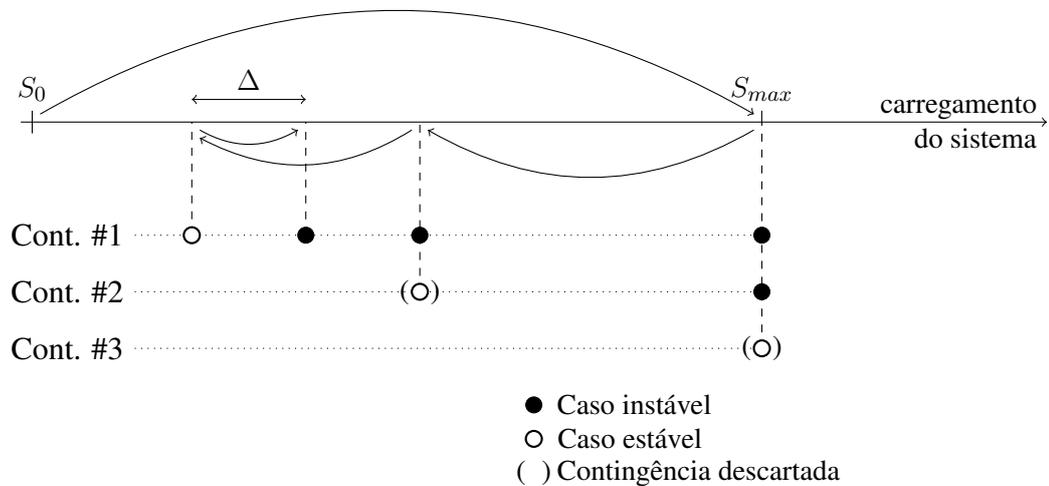
Assim, caso todas as contingências sejam convergentes, sabe-se que o ponto analisado pode ser ainda mais carregado, assim descarta-se a metade anterior a esse ponto na busca. De maneira similar, caso exista pelo menos uma contingência não convergente, entende-se que o ponto de limite de operação segura, pode estar aquém do atual ponto analisado. Assim, descarta-se a metade posterior ao carregamento em questão, prosseguindo com o algoritmo de busca binária, até que o intervalo restante da busca seja inferior a um valor mínimo de tolerância.

Além de reduzir a quantidade de soluções de fluxo de potência requerida também reduz o conjunto de contingências a ser estudado conforme suas convergências, ou não, uma vez que o foco do método é encontrar somente a contingência mais crítica em termos de MET. A Figura 2.9 apresenta como se dá a manipulação do conjunto de contingências no processo da busca binária.

O processo de busca binária é executado normalmente, sempre buscando o ponto médio do universo de busca e reduzindo esse universo iterativamente, até a convergência de um Δ mínimo. Ao chegar nesse limite, verifica-se qual é a contingência com a menor margem de estabilidade, no caso do exemplo da Figura 2.9, é a primeira contingência.

Analisando a busca ilustrada na Figura 2.9, percebe-se como a cada iteração da busca, as contingências que convergem (pontos brancos) podem ser descartadas do conjunto de busca se estiverem acompanhadas de contingências com soluções instáveis (pontos pretos), uma

Figura 2.9: Análise e descarte das contingências na busca binária do LOS.



Fonte: Adaptado de Van Cutsem e Vournas (1998).

vez que elas não irão delimitar o LOS. Vale ressaltar ainda que outras informações podem ser extraídas conforme contingências são descartadas, ou caracterizadas como instáveis em determinadas margens de carregamento (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998).

Por fim, aponta-se que o tempo de processamento dessa busca pode variar dependendo da distribuição das soluções estáveis e instáveis para cada contingência dentro do intervalo $[S_0, S_{max}]$ (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998), assim como pode variar dependendo de um pré-condicionamento inicial dos valores de S_0 e S_{max} .

2.4 ENQUADRAMENTO NO ESTADO DA ARTE

Tendo em vista a técnica de análise modal aplicada à avaliação de estabilidade de tensão apresentada neste capítulo, esta última seção destina-se a enquadrar este trabalho no estado da arte. A abrangência deste enquadramento se limita aos trabalhos relevantes e reconhecidos na literatura que versem sobre a aplicação da análise modal, que pode ser agregada a outras técnicas, na área da análise de segurança estática de tensão.

O primeiro trabalho a apresentar a aplicação da análise modal em estudos de estabilidade de tensão foi proposto por Gao *et al.* (1992). Nesse trabalho, a análise foi feita com base no complemento de Schur referente à relação V-Q da matriz jacobiana, dando origem ao que se denomina análise modal V-Q. Desde então a análise modal V-Q e outras variantes vêm sendo aplicada de diversas formas. Os trabalhos mais relevantes que partiram da ferramenta

proposta por Gao *et al.* (1992) serão apresentados nas próximas subseções.

Assim, esta seção é subdividida nos dois tipos de aplicação verificados: a análise e proposta de ações de controle preventivo e corretivo; e índices de estabilidade de tensão aplicados à análise de contingências. Na seção final o enquadramento deste trabalho é feito, com relação às contribuições aqui apresentadas.

2.4.1 ANÁLISE E PROPOSTA DE AÇÕES DE CONTROLE

Vários trabalhos relevantes surgiram propondo ferramentas de gerenciamento da geração como forma de controle preventivo, aliadas a técnicas de corte de carga como forma de controle corretivo. Dentre esses trabalhos, pode-se citar da Silva *et al.* (2000), da Silva *et al.* (2002), que utilizam o conceito de APFs e RPFs, indo além da relação V-Q proposta por Gao *et al.* (1992), e decompondo toda a matriz jacobiana em autovalores e autovetores, fazendo uso da relação entre potência ativa e tensão (através do quadrante θ -P da matriz jacobiana). De maneira específica, o trabalho de da Silva *et al.* (2002) apresenta resultados para redespachos ativos e reativos, baseados nos APFs e RPFs, respectivamente, como estratégia para o aumento da MET.

Também como ferramenta de análise e proposta de ações de controle preventivo e corretivo, destaca-se o trabalho de Affonso *et al.* (2004), onde também é proposto ferramentas de redespacho, porém aplicando os fatores de participação (APFs e RPFs) como índices de penalização de uma função objetivo em um problema de otimização. O artigo também apresenta uma ferramenta que não é fundamentada em técnicas de otimização, mas, através de um processo iterativo, utiliza os APFs das barras do tipo PQ como índice de distribuição do corte de carga. A iteração passo a passo apresentada no artigo é feita a fim de encontrar a magnitude do corte, sendo somente a distribuição do mesmo indicada pelos APFs.

Aplicado somente ao redespacho reativo, o trabalho de Arya *et al.* (2005) também aplica a análise modal em um problema de otimização, porém sem utilizar os fatores de participação. Nesse trabalho o índice que entra como parte da restrição de igualdade é o autovalor mínimo do complemento de Schur do quadrante V-Q da matriz jacobiana, de tal maneira que cada nova iteração da otimização incorra em um aumento desse autovalor e não sua redução, o que leva o sistema sempre a um ponto mais estável, do ponto de vista da estabilidade de tensão.

Jeyanthi e Devaraj (2010) apresentaram um método de despacho reativo voltado para o aumento da estabilidade de tensão, que insere os autovalores da análise modal V-Q da matriz

jacobiana como função objetivo do problema, buscando sua maximização. Aliado a isso a função objetivo também busca a minimização das perdas ativas.

O trabalho de Maram e Amjady (2015) apresenta ferramentas para ações de controle preventivo, feitas em uma primeira etapa, e de controle corretivo, feitas posteriormente. O controle preventivo, engloba a configuração de *taps* de transformadores, de tensões terminais de geradores e de compensadores *shunt*. Essa análise é feita em um estado de pré contingência, considerando o caso base do sistema. Caso a MET seja menor que um patamar específico, o problema multi-objetivo é aplicado sobre o sistema. Os objetivos específicos da modelagem se baseiam no autovalor mínimo da análise modal V-Q (referente ao complemento de Schur do quadrante V-Q da jacobiana), na sobrecarga das linhas e na violação dos limites de tensão.

De maneira similar, as ações corretivas, aplicadas em um cenário pós contingência, são feitas através de cortes de carga. A magnitude do corte de carga é definida a partir da mesma função objetivo do problema de controle preventivo, porém considerando também a minimização do corte. Já a distribuição desse corte de carga é feito a partir dos fatores de participação da análise modal V-Q.

Os trabalhos apresentados em Arief *et al.* (2010), Arief (2014), Chou e Butler-Purry (2014) aplicam a análise modal à alocação de geração distribuída na rede. Arief *et al.* (2010) propõem a alocação de geração distribuída com base nos fatores de participação da análise V-Q. Chou e Butler-Purry (2014) ainda propõe uma análise similar, porém para redes trifásicas desbalanceadas.

Arief (2014) apresenta uma nova análise modal, que toma como base um complemento de Schur modificado referente à relação V-P da matriz jacobiana. Obviamente, tal ferramenta só pode ser aplicada a sistemas que não possuam barras do tipo PV, para que o cálculo do complemento de Schur modificado seja algebricamente viável. Deste modo, a aplicação da relação V-P proposta em Arief (2014) é muito restrita, e acaba sendo menos aplicável do que os APFs (referentes à relação θ -P) propostos por da Silva *et al.* (2000), da Silva *et al.* (2002).

Muitos trabalhos focados somente nas ações corretivas foram propostos, além da ferramenta de corte de carga proposta por Affonso *et al.* (2004), feita com base em APFs, e da ferramenta em dois estágios, feita com base na análise modal V-Q, proposta em Maram e Amjady (2015). Dos trabalhos que apresentaram ferramentas de corte de carga, vale destacar Danish *et al.* (2014) e Jalilzadeh *et al.* (2010), ambas modeladas via fatores de participação da análise modal V-Q.

O trabalho proposto por Jalilzadeh *et al.* (2010) ainda modela a configuração dos *taps*

de transformadores e da magnitude do corte de carga via otimização por enxame de partículas. Neste sentido, a função objetivo visa a maximização da MET, assim como um perfil adequado de tensão nas barras do sistema.

Por fim, vale apresentar o trabalho proposto por Affonso e da Silva (2010), que trata do gerenciamento pelo lado da demanda, como ação de controle preventivo, diferentemente de todas as ferramentas de corte de carga, caracterizadas como ações emergenciais. Como já apresentado por Affonso *et al.* (2004), o gerenciamento é feito com base nos APFs das barras de carga. Deste modo, os autores sugerem a realocação da demanda de áreas sobrecarregadas, em resposta do preço, durante períodos de pico.

Neste trabalho, a análise modal é aplicada utilizando as informações de APF e RPF a fim de analisar: (i) ações de controle preventivo, a partir da comutação de bancos de capacitores e do aumento do despacho reativo, a partir da excitação das máquinas síncronas, e; (ii) ações de controle emergencial, a partir do corte de carga.

2.4.2 RANQUEAMENTO DE CONTINGÊNCIAS E ÍNDICES DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Para fins deste enquadramento no estado da arte, considera-se um índice de estabilidade de tensão como uma métrica que infira sobre a proximidade do sistema da instabilidade, sem, necessariamente, o uso do fluxo de potência continuado. Tais índices nem sempre atestam diretamente acerca da MET, mas podem ser fundamentados em cálculos e informações menos complexas do sistema, como desvios de tensão, ou análises simplificadas da topologia, ou de parte da topologia da rede. Sua principal função é fornecer subsídios para a triagem e classificação de contingências, mas seu objetivo é sempre capturar a proximidade do sistema à instabilidade.

Destaca-se inicialmente o índice L e FVSI, desenvolvidos por Jasmon e Lee (1993) e Musirin e Abdul Rahman (2002), respectivamente, que apresentam índices de estabilidade referentes às linhas do sistema. Esses índices, fundamentados na topologia do sistema, nem sempre atestam com precisão acerca da proximidade de cada contingência à instabilidade. Assim, um ranqueamento de contingências feito com base nos índices L e FVSI terá divergências importantes, se comparado a um ranqueamento feito com base no cálculo da MET.

Agregando a análise modal ao estudo de estabilidade, além dos primeiros artigos apresentados (GAO *et al.*, 1992; GAO; MORISON, 1993), onde foi desenvolvida uma ferramenta para uma análise mais completa, porém subjetiva da estabilidade de tensão, vale salientar outro trabalho da área de avaliação ou estimação, proposto por Djari *et al.* (2017).

Nesse trabalho a sensibilidade V-Q do sistema é aliada aos fatores de participação obtidos a partir da análise modal V-Q. Esta contribuição apresentou uma ferramenta para a identificação da barra mais fraca do sistema a partir da utilização destes dois índices (sensibilidade e análise modal), no entanto esses trabalhos não são aplicados especificamente em uma ferramenta de ranqueamento de contingências.

Doroudi *et al.* (2018) e Bulat *et al.* (2021) agregam a uma ferramenta de ranqueamento de contingências de linha a análise modal. Ainda assim, os índices de instabilidade obtidos por meio dessa abordagem não representam a proximidade que cada contingência se encontra da instabilidade de tensão de maneira precisa, se comparado à margem de estabilidade de cada sistema contingenciado. O resultado dos ranqueamentos obtidos pelos métodos propostos por Doroudi *et al.* (2018) e Bulat *et al.* (2021) são similares aos obtidos via índice L e FVSI e, portanto, possuem desempenhos semelhantes.

Neste trabalho, propõe-se uma nova metodologia de ranqueamento de contingências fundamentada na análise modal, a fim de identificar a contingência mais crítica e passível de análises mais precisas. Do mesmo modo, a partir da definição dessa contingência mais crítica, as análises de ações de controle preventivo e emergencial são conduzidas.

2.4.3 ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

Partindo do estado da arte apresentado nesta seção, o presente trabalho se enquadra como um método de avaliação da estabilidade de tensão, aliado a uma metodologia de análise e proposta de ações de controle preventivo e corretivo. A junção das duas funcionalidades em um só método não é apresentada em nenhum dos trabalhos revistos neste enquadramento da arte.

Ressalta-se ainda que diferentemente do que foi proposto em Affonso *et al.* (2004), Arya *et al.* (2005), Maram e Amjady (2015) não serão utilizadas técnicas de otimização. Deste modo, métodos menos dispendiosos computacionalmente são preferidos em detrimento à obtenção de pontos ótimos de operação, obtidos a altos custos computacionais. Assim, o método proposto visa processamentos computacionais adequados às demandas da análise em tempo real, ainda assim podendo ser aplicados a estudos de planejamento a longo prazo.

Assim, a metodologia proposta utiliza os índices provenientes da análise modal tanto na etapa de ranqueamento de contingências, como na etapa de análise de ações de controle. Ao longo da metodologia, são também usados recursos de cálculo de fluxo de potência, cálculo de LOS via busca binária, identificação de ramos críticos e inclusive cálculo de MET via fluxo de potência continuado, para o caso base e a contingência identificada como a mais crítica.

Ainda aponta-se que em termos de modelagem os limites de geração ativa e reativa não são considerados e a carga é modelada como potência constante. Desse modo, o ponto de máximo carregamento do sistema de transmissão define o ponto de colapso do sistema.

Ressalta-se que os índices de estabilidade de tensão comentados e apresentados ao longo deste capítulo (índice L, FVSI) são utilizados apenas para fins de comparação, não fazendo parte da metodologia proposta.

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS E AÇÕES DE CONTROLE

Propõe-se neste trabalho um método de análise de estabilidade de tensão e contingências. O fluxograma geral do método é apresentado na Figura 3.1 e pode ser dividido em quatro etapas:

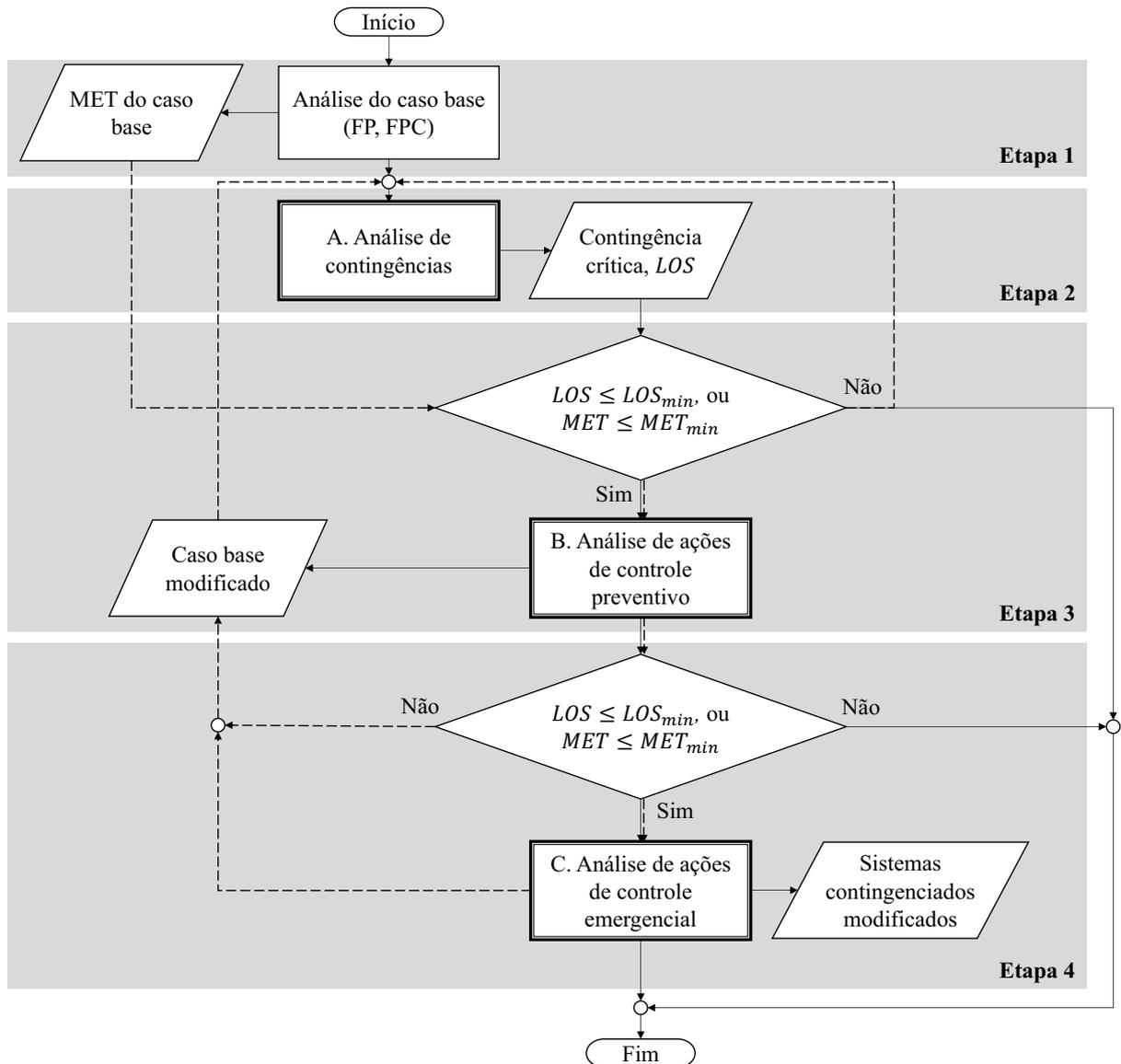
- Etapa 1 - Análise de estabilidade do caso base;
- Etapa 2 - Análise de estabilidade e de contingências (representada pelo bloco A, que tem por objetivo identificar a contingência mais crítica do sistema);
- Etapa 3 - Análise de ações de controle preventivo (representada pelo bloco B, que tem por objetivo analisar ações de controle pré-contingência no caso base, a fim de adequar, de maneira preventiva, casos contingenciados que não atendam os limites mínimos de MET, ou LOS);
- Etapa 4 - Análise de ações de controle emergencial (representada pelo bloco C, que tem por objetivo analisar ações de controle pós-contingência nos casos contingenciados, a fim de adequar contingências que não atendam limites mínimos de MET).

O algoritmo de análise de segurança e estabilidade de tensão inicialmente verifica o ponto de operação para o carregamento inicial, sem nenhuma contingência, aqui chamado de caso base.

Para os sistemas aqui estudados o caso base é sempre aceitável do ponto de vista da estabilidade e dos limites de tensão, uma vez que o foco das análises é o estudo dos casos contingenciados. Ainda assim, essa etapa de análise do caso base faz parte do algoritmo proposto. Após a obtenção do PEE do caso base, faz-se a análise de estabilidade desse sistema, através do fluxo de potência continuado. Isso indica a MET do caso base, atestando acerca da estabilidade do sistema e servindo como base para análises posteriores.

Em situações onde o caso base não atenda aos critérios de margem mínima (MET_{min}), ações de controle preventivo e, se necessário, corretivo são implementadas nesse sistema. As

Figura 3.1: Fluxograma geral do algoritmo proposto.



Fonte: Autoria própria.

linhas tracejadas da Figura 3.1 se referem exclusivamente a essas ações de controle orientadas ao caso base, devendo ser executadas somente nesses casos onde os critérios mínimos de MET não são atendidos. Feitas as ações de controle, nos casos onde se faz necessário, ou somente após a análise do caso base, o algoritmo avança ao bloco A, iniciando a etapa de análise de contingências.

As ações de controle preventivo são implementadas no caso base, pré-contingência, e visam a adequação do LOS considerando os sistemas contingenciados pelo critério N-1. Já as ações de controle emergencial são analisadas para cada sistema contingenciado em um regime pós-contingência.

Salienta-se o fato de que a execução da etapa de análise de ações de controle preventivo é dependente da existência de um conjunto de contingências que violem o LOS mínimo previamente estabelecido. De maneira análoga, a execução da etapa de análise de ações de controle emergencial é dependente da existência de um conjunto de contingências que permanecem violando o LOS mínimo após o esgotamento das ações de controle preventivo disponíveis. Cada uma das três etapas, representadas pelos blocos destacados na Figura 3.1, é descrita ao longo das seções 3.1 e 3.2.

3.1 ALGORITMO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE E CONTINGÊNCIAS

A parte da metodologia destinada à análise de estabilidade de tensão das contingências é apresentada nesta seção e corresponde ao bloco A do fluxograma da Figura 3.1. Os processos executados dentro dessa parte do algoritmo são subdivididos e apresentados no fluxograma da Figura 3.2, sendo cada um desses processos explicado nas subseções 3.1.1 a 3.1.4.

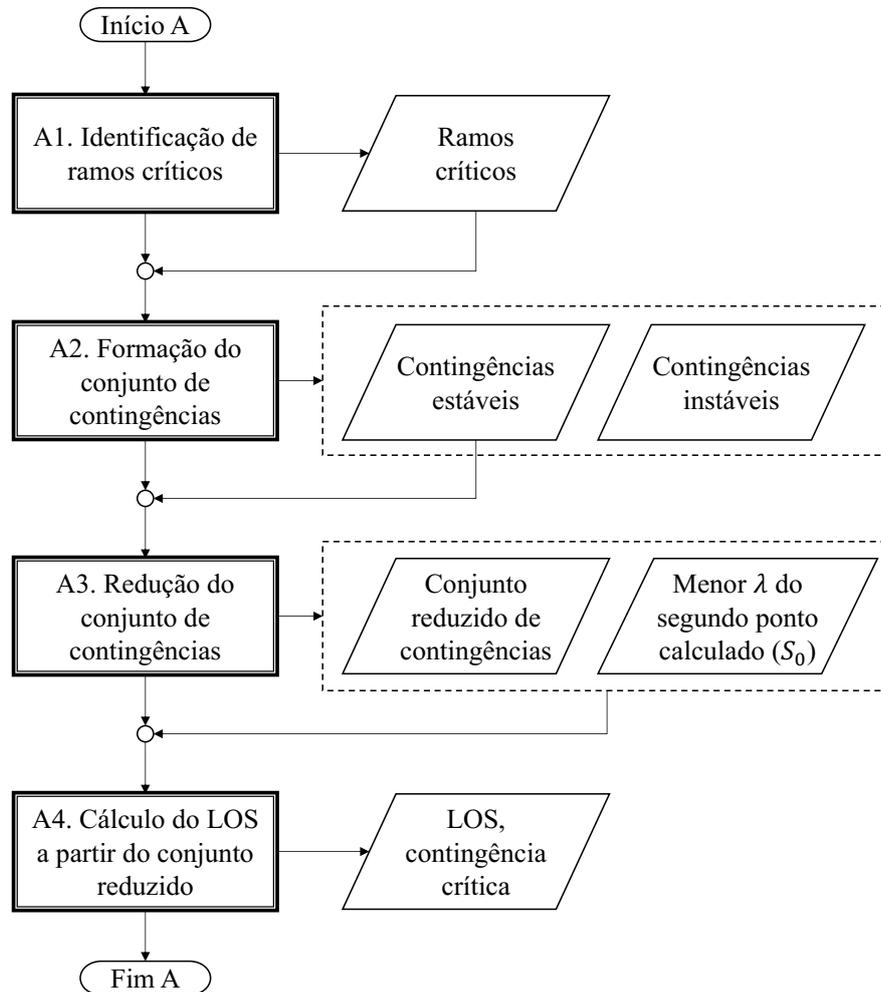
Verificada a estabilidade do sistema para o caso base, parte-se para a etapa de análise de contingências, que considera somente as contingências de linha, atendendo ao critério N-1. Antes mesmo da modelagem dos casos contingenciados a serem analisados pelo modelo algébrico não-linear, faz-se uma primeira exclusão dos casos onde a contingência leva o sistema a um ilhamento, no bloco A1.

Após isso, o conjunto de contingências a ser estudado é gerado, já excluindo os ramos críticos desse conjunto, no bloco A2. Como as contingências referentes aos ramos críticos não são analisadas, a triagem entre as contingências estáveis e instáveis é feita diretamente a partir da convergência do fluxo de potência de cada caso. As situações onde o fluxo de potência não converge são casos onde a contingência leva o sistema à instabilidade. De outro modo, se o fluxo de potência de uma contingência converge, esta é estável, embora possa estar violando os critérios de margem mínima de estabilidade de tensão.

No bloco A3 é executado o método de isolamento da pior contingência em um conjunto de menor tamanho. Este método é baseado na autoanálise da matriz Jacobiana e é uma das contribuições deste trabalho.

Por fim, é feito o cálculo do LOS, como apresentado na seção 2.3.3, porém considerando como universo de contingências a ser analisada na busca binária o conjunto reduzido resultante do processamento do bloco A3, o que reduz de maneira considerável o custo computacional para o cálculo do LOS. O resultado do bloco A de análise de contingências fornece, sem a necessidade de extensivos cálculos de fluxo de potência continuado, ou de uma

Figura 3.2: Fluxograma do algoritmo de análise de contingências.



Fonte: Autoria própria.

busca binária extensiva entre todas as contingências do conjunto de estudo, o LOS do sistema, juntamente com a identificação da contingência mais crítica associada a este limite. A seguir, tem-se mais detalhes sobre as sub-rotinas que compõem a Etapa A.

3.1.1 IDENTIFICAÇÃO DE RAMOS CRÍTICOS

A identificação de ramos críticos é feita segundo o método apresentado na seção 2.3.1. Para esta metodologia, uma contingência que implica em ilhamento é classificada como extremamente crítica, não sendo passível de nenhuma ação do ponto de vista da operação.

Desse modo o processo do bloco A1 identifica os ramos críticos do problema, e tem como saída a lista atualizada de contingências a serem analisadas, já excluindo deste conjunto os ramos críticos.

3.1.2 FORMAÇÃO DO CONJUNTO DE CONTINGÊNCIAS

Com a lista de contingências analisáveis fornecidas pelo bloco A1 – todas as contingências, excetuando-se os ramos críticos –, os casos contingenciados deste conjunto são modelados, e seus respectivos fluxos de potência são executados, a fim de encontrar o ponto de operação do sistema após a ocorrência de cada contingência.

Os casos contingenciados não convergentes também são sinalizados como críticos, uma vez que levam o sistema à instabilidade, caso nenhuma ação de controle seja implementada. Neste caso, diferentemente das contingências de ramo crítico, que levam ao ilhamento, para o escopo deste trabalho, seria possível prever ações de controle a serem acionadas após a ocorrência da contingência, para que o sistema opere em um ponto de equilíbrio estável e adequado. No entanto, a fim de nortear corretamente essas ações de controle, seriam necessárias outras técnicas de análise para encontrar o PEE mais próximo de um sistema instável, como a inserção de compensadores síncronos virtuais associado à análise de curvas VQ, ou somente a análise do valor de erro para o qual as equações de balanço de fluxo convergem, sugerindo a injeção de potência que poderia ser injetada na barra a fim de obter um ponto convergente (VAN CUTSEM; VOURNAS, 1998). Tais técnicas não são abordadas neste trabalho, logo a análise de contingências para os casos instáveis não é feita.

Assim, a saída do bloco A2 que alimenta o bloco A3 é somente a lista dos pontos de equilíbrio estáveis de cada caso contingenciado.

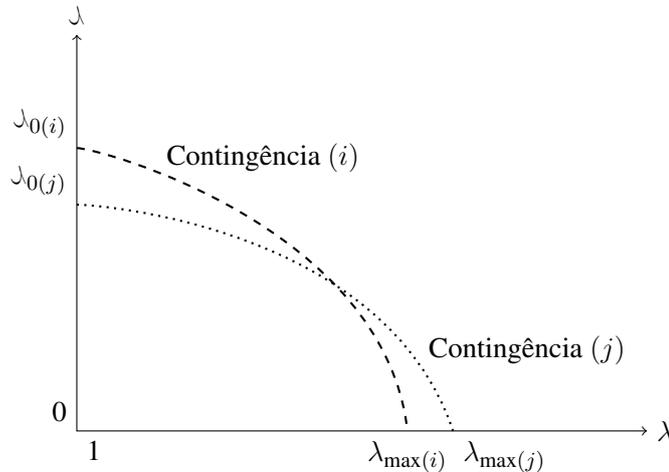
3.1.3 REDUÇÃO DO CONJUNTO DE CONTINGÊNCIAS VIA ANÁLISE MODAL

O método proposto para redução do conjunto de contingências em um conjunto menor e mais relevante, do ponto de vista da análise de estabilidade de tensão, é baseado nos conceitos de análise modal.

Independentemente da característica do modo de instabilidade predominante, ou mais relevante, de cada contingência, sabe-se que no ponto de máximo carregamento um autovalor deixará de ser positivo, indicando a instabilidade do sistema.

Fazendo a autoanálise para cada solução de uma trajetória continuada, através da decomposição apresentada na equação (2.36) para a matriz jacobiana em cada solução do sistema, observa-se que a progressão dos autovalores conforme o aumento do carregamento do sistema não se dá de forma linear. Assim, o autovalor crítico de uma determinada contingência pode possuir um valor inicial maior, porém decair mais rapidamente que a trajetória do autovalor crítico de outra contingência, como ilustra a Figura 3.3.

Figura 3.3: Exemplo de trajetórias dos autovalores críticos de duas contingências diferentes.



Fonte: Autoria própria.

Fica claro que somente a análise dos modos críticos de instabilidade para o carregamento base do sistema, ou para o carregamento base dos casos contingenciados não fornece uma informação precisa acerca da contingência mais crítica no sentido da MET, ou em outras palavras, acerca do LOS. Em termos práticos, a magnitude dos valores iniciais ($\lambda_{0(i)}$ e $\lambda_{0(j)}$) dos autovalores críticos na trajetória apresentada na Figura 3.3 não fornece, objetiva ou subjetivamente, uma avaliação acurada a respeito de qual contingência apresenta a menor MET.

Pensando na aplicação em tempo real, a estimação da MET via fluxo de potência continuado, ou mesmo métodos aproximados, como o *look-ahead*, pode ser aplicada, mas após uma filtragem, ou ranqueamento inicial das contingências.

O método de redução do conjunto de contingências é proposto como uma dessas etapas iniciais de filtragem, ou ranqueamento. Através deste método, espera-se que a pior contingência possa ser encontrada dentre um conjunto reduzido que representa somente 10% dos casos contingenciados. A porção de 10% foi definida de maneira empírica, podendo ser adaptada para diferentes necessidades de análise. Salienta-se ainda que esse conjunto reduzido pode servir como universo de busca ao implementar o método da busca binária para cálculo do LOS, por exemplo.

3.1.3.1 EXTRAPOLAÇÃO LINEAR DA TRAJETÓRIA DE AUTOVALORES

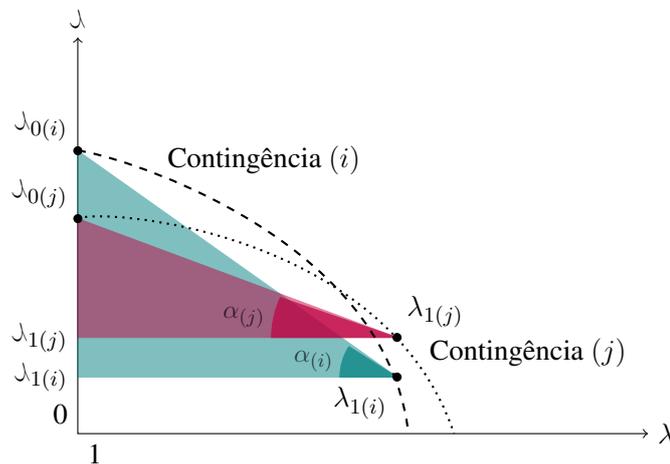
A fim de encontrar a pior contingência, parte-se de uma aproximação da MET, feita com base em uma extrapolação linear das curvas apresentadas na Figura 3.3. Salienta-

se que esse cálculo aproximado da MET não serve como estimativa real da magnitude da margem de estabilidade, mas somente como índice aproximado para a comparação e posterior ranqueamento das contingências.

Desse modo, o método não se baseia somente nos autovalores das primeiras soluções, mas demanda uma solução adicional para cada contingência, diferindo de um fluxo continuado convencional, mas ainda assim, estressando o sistema a fim de encontrar um ponto de equilíbrio estável adicional para cada contingência.

Como mostra a Figura 3.4, o método propõe uma quantificação das margens de estabilidade, a fim de ranquear as contingências, a partir da extrapolação linear feita com base no segundo ponto de equilíbrio estável encontrado via fluxo de potência.

Figura 3.4: Ilustração do método de extrapolação linear.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente, um segundo ponto de equilíbrio estável é obtido para cada contingência. O processo para encontrar um ponto convergente é feito a partir de um novo valor de carregamento $\lambda_{1(i)} = \lambda_{0(i)} + \Delta\lambda_{(i)}$, onde $\Delta\lambda_{(i)}$ é a variação de carregamento a ser aplicada no caso base. Essa variação é previamente determinada, e é iterativamente reduzida, caso não haja convergência para o carregamento $\lambda_{1(i)}$.

A variação inicial de carregamento é previamente definida, dependendo da etapa em que o método de ranqueamento é aplicado:

1. Se o método está sendo aplicado somente como ferramenta de análise, considera-se como primeira tentativa a própria MET do caso base, obtida via fluxo continuado antes da análise de contingências, como apresentado no início da seção 3.1;

2. Se o método está sendo aplicado dentro do algoritmo recursivo de controle, a ser apresentado na seção 3.2, considera-se como primeira tentativa o LOS do sistema antes da implementação das últimas ações de controle.

Caso o carregamento imposto não resulte em um ponto de equilíbrio, a próxima variação de carregamento a ser testada é obtida a partir do quociente $\Delta\lambda_{(i)}^{k+1} = \Delta\lambda_{(i)}^k/5$, sendo $k \in \mathbb{N}$ a iteração da tentativa de convergência.

Vale notar que no primeiro caso a aproximação inicial de $\Delta\lambda_{(i)}$ é mais dispendiosa do ponto de vista computacional, uma vez que é sugerido o carregamento máximo do caso base, o que sempre será maior que o carregamento máximo dos casos contingenciados, devido à redução da capacidade de transmitir potência do sistema. Ainda assim, essa aproximação inicial é melhor do que o uso de um valor arbitrário.

Por outro lado, no segundo caso, a aproximação é mais conservadora e geralmente garante a convergência do caso contingenciado na primeira tentativa, uma vez que parte-se do carregamento máximo da contingência mais crítica antes de uma ação de controle preventivo. Ou seja, é esperado que o LOS pós ação de controle seja maior que o pré ação de controle. Logo, considerar o LOS como carregamento do sistema para encontrar o segundo ponto estável é não só uma abordagem acertada do ponto de vista da análise do sistema, mas também implica em um custo computacional bem menor, se comparado ao primeiro caso.

Desse desempenho observado, excetuam-se as contingências que não possuíam pontos de equilíbrio estáveis antes das ações de controle e após as ações se tornam estáveis, porém com uma MET menor que o LOS pré ação de controle. Nesses casos ao se considerar o LOS pré ação de controle como $\Delta\lambda_{(i)}$ pode implicar em um caso não convergente se a contingência, antes instável, apresentar uma MET ainda menor que a contingência observada como a mais crítica na iteração anterior do algoritmo de controle preventivo.

Feitas as considerações acerca da determinação do carregamento para obtenção do segundo PEE, continua-se a apresentação do método. A partir do segundo ponto de equilíbrio encontrado, faz-se a análise modal, encontrando para cada contingência estável (que apresenta solução do fluxo de potência) autovalores críticos ($\lambda_{1(i)}$) através da decomposição da equação (2.36), o que permite o cálculo da inclinação do decaimento linear desse autovalor, dado pelo ângulo α , sendo:

$$\alpha_{(i)} = \arctan \left(\frac{\lambda_{0(i)} - \lambda_{1(i)}}{\lambda_{1(i)} - \lambda_{0(i)}} \right). \quad (3.1)$$

Nesse caso, sabe-se que o ponto inicial da trajetória dos autovalores críticos corresponde ao carregamento do caso base ($\lambda_{0(i)}$). Para casos convencionais de simulação, esse carregamento corresponde a $\lambda_{0(i)} = 1, 0$.

Sabe-se que somente o autovalor crítico no carregamento base do sistema não é um bom indicativo da proximidade de cada contingência à instabilidade. Assim, pondera-se esse ponto inicial com a inclinação da reta obtida a partir de um segundo ponto, buscando informações mais sólidas a respeito do ranqueamento das contingências via MET.

Assim, a partir do ponto inicial do autovalor crítico de cada contingência ($\lambda_{0(i)}$) e de sua inclinação α , é possível calcular a margem estimada via extrapolação linear para cada uma das contingências estáveis do sistema. Sabendo que no ponto onde cada contingência atinge o ponto de máximo carregamento, o autovalor crítico é nulo, faz-se a extrapolação linear, a fim de ranquear as contingências a partir da margem de estabilidade extrapolada linearmente (MET_{lin}):

$$MET_{lin(i)} = \frac{\tan \alpha(i)}{\lambda_{0(i)}}. \quad (3.2)$$

Ao prolongar as retas que unem os dois autovalores encontrados para cada uma das contingências i e j , é possível perceber como a extrapolação linear apresentada em (3.2) possibilita a captura não só do ponto inicial de cada contingência do sistema, mas também do comportamento de decaimento desses autovalores, sem a necessidade de executar um fluxo de potência continuado para cada contingência.

Erros na ordem do ranqueamento são inerentes a esta extrapolação linear, dado o comportamento não-linear das curvas. No entanto, um pouco da característica do comportamento dos autovalores críticos de cada contingência é capturado pela extrapolação. Para os sistemas testados neste trabalho foi possível ranquear a pior contingência com uma margem de precisão de 10% da dimensão total do conjunto de contingências.

Ou seja, tomando como exemplo um sistema que possui 100 linhas e, conseqüentemente um conjunto de contingência de linhas de dimensão $N = 100$, para os sistemas simulados, o método conseguiu isolar a pior contingência em um conjunto reduzido de dimensão $N_r = 0,10 \cdot N$. Assim, para os sistemas simulados na análise estatística do método, sabe-se que a pior contingência do sistema será encontrada dentre as 10 piores contingências identificadas pela extrapolação linear. Para alguns cenários de simulação, inclusive sistemas menores, o método foi capaz de encontrar de fato a pior contingência do sistema, uma vez que o conjunto reduzido de dimensão $N_r = 0,10 \cdot N$ para $N \leq 10$ pode ser aproximado como sendo

$N_r = 1$.

A fim de validar o método de redução do conjunto de contingências via análise modal como uma metodologia que possibilita encontrar a contingência mais crítica (do ponto de vista da MET), propõe-se no próximo capítulo, na seção 4.1, uma análise estatística que ateste acerca da precisão do conjunto reduzido como detentor da contingência mais crítica.

3.1.4 CÁLCULO DO LIMITE DE OPERAÇÃO SEGURA A PARTIR DO CONJUNTO REDUZIDO DE CONTINGÊNCIAS

A determinação do LOS é feita a partir do que foi apresentado na seção 2.3.3. Utiliza-se como conjunto de contingências a serem analisadas durante a busca binária somente o conjunto reduzido obtido a partir do método de extrapolação linear apresentado na seção 3.1.3. Desse modo, reduz-se consideravelmente o universo da busca e, conseqüentemente, o esforço computacional, se comparado a uma busca binária feita com todas as contingências de linha do tipo N-1.

Além disso, reduz-se ao máximo o intervalo de busca $[S_0, S_{max}]$, utilizando informações já obtidas, ou resultantes de etapas anteriores do algoritmo. Desse modo, S_0 não é considerado o λ inicial do sistema em estudo, mas pode ser considerado como o menor valor de $\lambda_{1(i)}$ encontrado durante a etapa de extrapolação linear. Desse modo, garante-se um ponto mais adiantado, em termos de carregamento, onde tem-se certeza que existe convergência para todas as contingências estudadas.

Como o cálculo do LOS é feito antes e durante as etapas recursivas de controle, opta-se por uma escolha mais conservadora de S_{max} para que não se corra o risco de sugerir um carregamento máximo que o sistema seja capaz de superar devido a ações de controle preventivas implementadas no sistema base. Assim, o S_{max} é sempre limitado pela MET do caso base, sabendo-se que qualquer contingência terá uma margem inferior.

A partir do processo de busca binária do LOS extrai-se também a lista de contingências que possuem MET aquém do limite mínimo estabelecido. Assim, todas as contingências que apresentam soluções instáveis para margens de estabilidade $MET \leq MET_{min}$ (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020b) são alocadas em um conjunto de contingências consideradas emergenciais.

A ideia é que o algoritmo de análise de contingências apresentado seja executado novamente após ações de controle preventivo que redefinem o caso base. Reforça-se a ideia de que após essas ações de controle, o algoritmo de análise de contingências pode encontrar um

novo LOS, assim como um novo conjunto de contingências críticas, uma vez que as ações de controle podem não só melhorar os casos contingenciados, mas trazer casos instáveis à estabilidade.

3.2 ALGORITMO DE ANÁLISE DE AÇÕES DE CONTROLE PREVENTIVO E EMERGENCIAL

O algoritmo de análise de ações de controle é dividido em duas etapas diferentes. As ações de controle preventivo são propostas para um cenário pré-contingência, enquanto as ações de controle emergencial são propostas já para os casos contingenciados, sendo, portanto, aplicáveis em cenários pós-contingência.

A execução dessas duas etapas é apresentada na Figura 3.1. O algoritmo de análise de ações de controle preventivo, representado pelo bloco B é apresentado na seção 3.2.1 e o algoritmo de controle emergencial, representado pelo bloco C, é apresentado na seção 3.2.2.

Uma diferença entre esses dois algoritmos está no sistema para o qual as ações de controle são sugeridas. As ações de controle preventivas são executadas no caso base (pré-contingência), enquanto as ações emergenciais são executadas no próprio caso contingenciado em questão.

Outra diferença está nas estratégias e dispositivos disponíveis para as ações de controle. As estratégias de ação de controle preventivo são sugeridas na seguinte ordem: (i) chaveamento de bancos de capacitores; (ii) ajuste da tensão terminal das máquinas síncronas através do controle automático de tensão. As estratégias de controle emergencial consistem somente no corte de carga, uma vez que nesse algoritmo o controle emergencial só é acionado quando já foram exauridas as demais reservas de controle relevantes para o modo de instabilidade avaliado, a saber bancos de capacitores e excitação das máquinas.

Como ilustrado na Figura 3.1, reforça-se o fato de que a execução dos dois algoritmos é dependente da existência de um conjunto de contingências inadequadas, ou seja, contingências cuja MET é inferior ao limite mínimo permitido. A análise de ações emergenciais de controle é feita somente se existem contingências que permanecem com a margem de estabilidade aquém do limite mínimo após a etapa de controle preventivo, como mostra a saída do bloco B no fluxograma.

Ambos os algoritmos de análise de ações de controle são executados de maneira recursiva, onde as ações de controle vão sendo implementadas e testadas no sistema de maneira gradativa, sendo possível, ao fim de uma ação, executar novamente a mesma função de controle,

caso se deseje mais um passo de atuação de um determinado dispositivo ou estratégia de controle, ou executar a função de controle seguindo para a estratégia seguinte de controle na ordem de prioridades previamente definidas no algoritmo. A maneira com que os dois algoritmos foram estruturados permite a inserção futura de outras estratégias de controle (sendo possível adicioná-las ao algoritmo em qualquer configuração de prioridade de execução), como comutação de *taps*, dispositivos FACTS e até mesmo cenários de redespacho de potência ativa, em casos emergenciais onde o corte de carga deve ser evitado a todo custo.

3.2.1 ANÁLISE DE AÇÕES DE CONTROLE PREVENTIVO

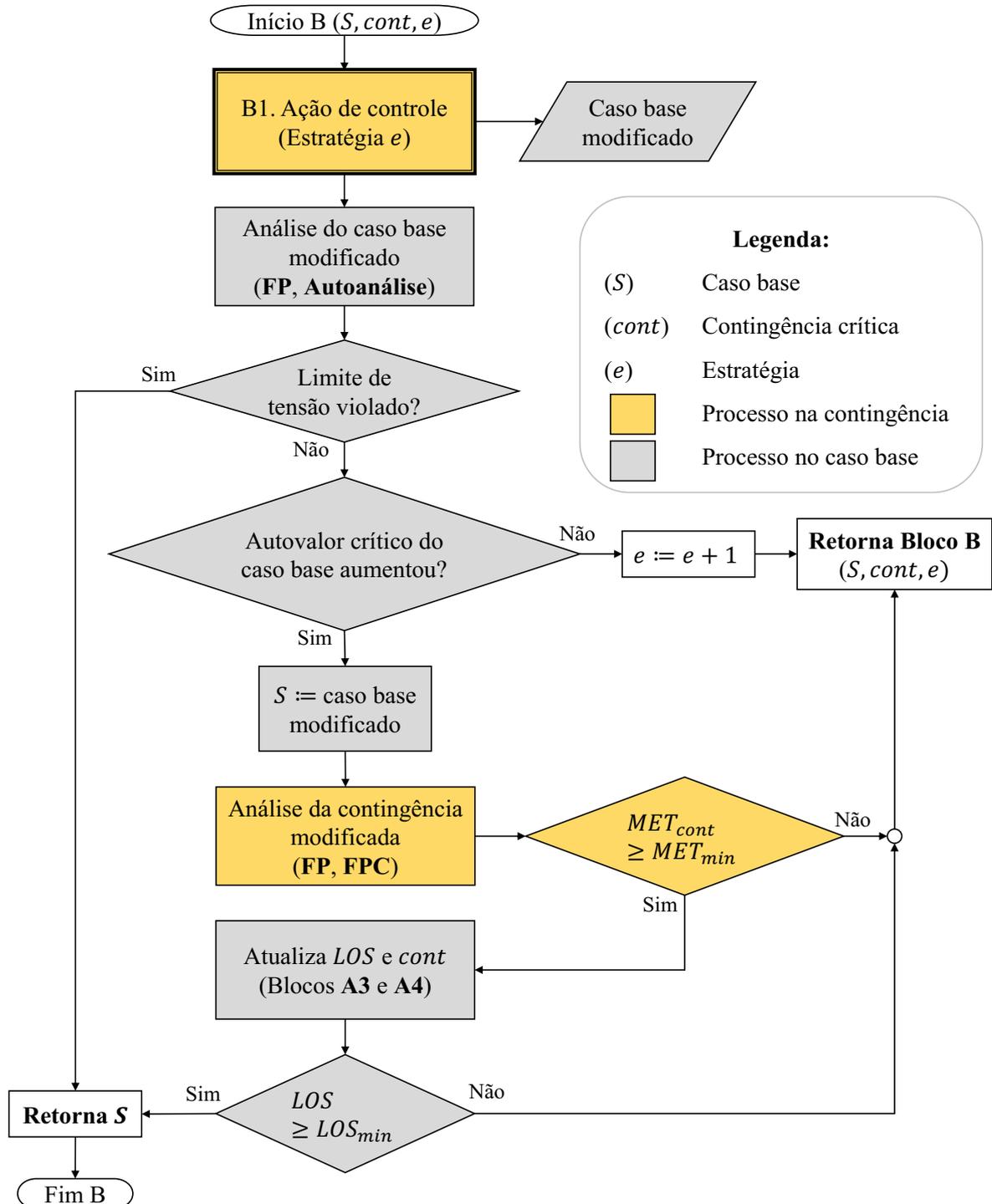
Como já foi comentado, a rotina de análise de ações de controle é feita através de uma função recursiva. A Figura 3.5 apresenta essa função. Os blocos destacados com textos de retorno em negrito são os pontos de retorno da função, que podem implicar em mais uma iteração de recursividade, ou no retorno do resultado que, no caso do controle preventivo é o caso base sem contingência com as alterações de controle propostas implementadas. Os blocos destacados em cinza e amarelo são processos realizados no caso base e nos casos contingenciados, respectivamente.

O algoritmo inicia com a rotina que analisa a contingência crítica e propõe uma iteração de ação de controle com base na estratégia de controle e que está sendo utilizada (bloco B1). Essa estratégia pode ser definida a partir de um parâmetro utilizado como entrada da função. Caso não especificado o parâmetro, o algoritmo sempre inicia a sua execução com a estratégia de controle prioritária ($e = 1$), de acordo com critérios previamente definidos. As estratégias de controle representadas pelo bloco B1 são apresentadas na seção 3.2.1.1.

A saída do bloco B1 fornece um caso base modificado com as ações preventivas de controle. A partir daí, executam-se verificações a fim de garantir que nenhuma barra excedeu o limite superior de tensão (o que pode acontecer devido à compensação de reativos no sistema proporcionada pelas ações de controle) e garantir que o caso base está se afastando do ponto de instabilidade, e não o contrário. Essa última verificação é feita através da comparação do autovalor crítico do sistema modificado com o sistema de entrada da função.

Caso haja violação de tensão das barras, desprezam-se as ações de controle realizadas pelo bloco B1, e termina-se a execução do algoritmo, retornando o sistema S sem modificações como resultado. Obviamente, caso a execução do bloco B já tenha implementado alguma iteração recursiva, o sistema S que será retornado é o sistema modificado da última iteração executada completamente sem violações de tensão e autovalor crítico.

Figura 3.5: Fluxograma do algoritmo de análise de ações de controle preventivo.



Fonte: Autoria própria.

Caso haja uma diminuição do autovalor crítico, entende-se que o curso de ação de controle proposto pela estratégia e não está contribuindo para a estabilidade de tensão. Assim, incrementa-se o ponteiro de estratégias ($e := e + 1$) e executa-se novamente a função de ações

de controle preventivo, agora sob uma nova estratégia. Outras circunstâncias onde o ponteiro de estratégia e pode ser incrementado ocorrem dentro do bloco B1, quando alguma estratégia de controle chega ao fim de sua reserva, como será mostrado na seção 3.2.1.1.

Caso haja um aumento no autovalor crítico, o algoritmo reconhece o sistema modificado como aceitável e prossegue para as análises do caso contingenciado em estudo. A partir de um fluxo de potência continuado a MET da contingência é conhecida. A condição para que as ações de controle orientadas a essa contingência sejam satisfatórias é que a MET seja superior ao limite mínimo previamente determinado (LOS_{min}). Caso contrário, continua-se a execução do bloco B até que as condições sejam satisfeitas, ou que não hajam mais reservas para a atuação das ações de controle.

Uma vez que a MET da contingência crítica satisfaz as restrições, parte-se para uma verificação mais ampla da eficácia das ações de controle, verificando o LOS do caso base após as ações preventivas. Essa verificação executa novamente os blocos A3 e A4 do algoritmo de análise.

Nesta etapa, caso a pior contingência do sistema seja a contingência crítica que acabou de ser estudada, o LOS será correspondente à própria MET da contingência e o algoritmo terá atingido seu objetivo. No entanto, quando o caso base em análise possuir contingências instáveis (mais críticas do que a contingência em análise), essas contingências instáveis podem passar a ser estáveis, apresentando margens de estabilidade não adequadas. Nesse caso, o LOS vai continuar violando o limite mínimo imposto, devido ao surgimento dessas novas contingências estáveis no conjunto de contingências passíveis de análise e ações de controle preventivo. Nessas situações, é necessário que o algoritmo de controle do bloco B continue sua execução até que atinja algum dos critérios de parada já explicados.

3.2.1.1 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Para as três estratégias de controle propostas a ordem de ação adotada é conforme ao definido nos critérios para operação do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020c). A primeira estratégia de controle preventivo que é executada é o chaveamento de bancos de capacitores. A sequência dos passos dessa estratégia de controle é apresentada no Algoritmo 1.

As barras relevantes para a injeção de potência reativa via banco de capacitores são determinadas pelo fator de participação reativa da contingência crítica, uma vez que as barras com maior RPF_k são aquelas cujo impacto no modo de instabilidade em questão será maior (DA SILVA, 2001).

Algoritmo 1: Estratégia de controle: chaveamento de bancos de capacitor

Entrada: $S, cont$
Saída: Caso base modificado

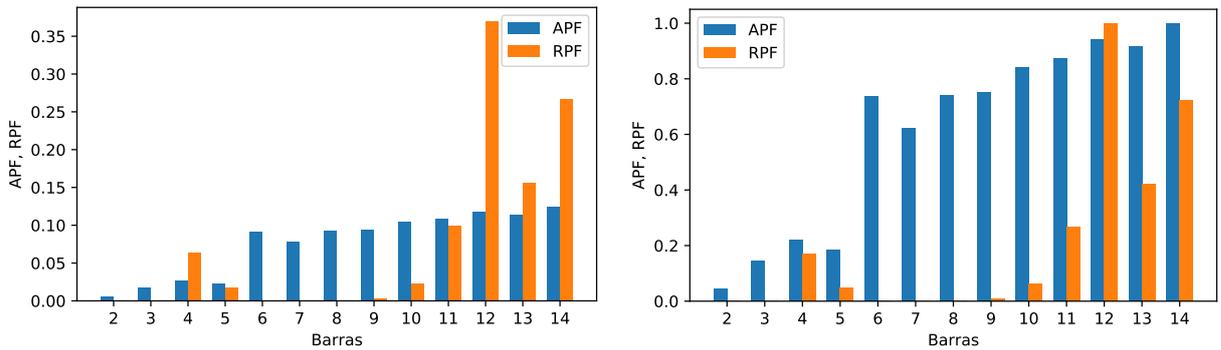
- 1 **início**
- 2 calcula o RPF da contingência para as barras PQ (Análise Modal);
- 3 **para cada** $RPF_k \geq 0,5$ **faça**
- 4 a barra k é relevante para esta ação de controle;
- 5 **fim para cada**
- 6 **para cada** barra relevante que possui bancos de capacitores com reservas **faça**
- 7 chaveamento para a inserção total de bancos disponíveis na barra;
- 8 **fim para cada**
- 9 atualiza os dados de barra do caso base modificado;
- 10 **se não existem mais barras relevantes com reserva disponível então**
- 11 $e := e + 1$;
- 12 $S :=$ caso base modificado;
- 13 **retorna** bloco $B(S, cont, e)$
- 14 **fim se**
- 15 **fim**

Partindo da equação (2.37), sendo APF_k e RPF_k os fatores de participação ativo e reativo da barra k no modo crítico de instabilidade, normalizam-se os valores de APF e RPF de modo que $\sum_k^{NPV+NPQ} APF_k = 1$ e $\sum_k^{NPQ} RPF_k = 1$.

Em um sistema, o modo de instabilidade analisado pode ser caracterizado pela participação majoritária de várias barras, sendo nesse caso um modo local associado a uma área específica da rede, ou pode estar associado a uma única barra. Em qualquer uma dessas situações, os fatores de participação da barra mais relevante, ou das barras que compõem a área de relevância no modo de instabilidade possuem valores consideravelmente mais altos que as barras irrelevantes para aquele modo de instabilidade. Mesmo que a soma desses fatores de participação relevantes não fique tão próxima a 1, esses fatores possuem uma ordem de grandeza semelhante. Assim, se uma nova normalização for feita, considerando que o maior APF ou RPF assume o valor 1 e os demais fatores assumem valores proporcionais entre 0 e 1, será verificado que as barras relevantes possuirão valores mais próximos a 1, enquanto as barras irrelevantes assumirão valores mais próximos a 0. A Figura 3.6 exemplifica essa diferença entre as normalizações para o modo de instabilidade crítico do sistema 14 barras.

Assim, para a verificação realizada nesta etapa do algoritmo, os valores de APF e RPF são normalizados novamente de modo que assumam valores entre 0 e 1, sendo 1 o valor referente ao maior APF_k ou RPF_k , respectivamente, dependendo da análise. Portanto, partindo dessa nova normalização, arbitra-se que uma barra com $RPF_k \geq 0,5$ é caracterizada

Figura 3.6: Comparação dos fatores de participação e as diferentes normalizações.



(a) Sistema IEEE 14 barras: normalização pela soma.

(b) Sistema IEEE 14 barras: normalização pelo valor máximo.

Fonte: Autoria própria.

como relevante para o modo de estabilidade em estudo.

Desse modo, as barras que possuem reservas disponíveis em bancos de capacitores e são relevantes do ponto de vista da análise modal são chaveadas, de maneira a conectar a sua capacidade máxima instalada de capacitores à rede. Caso não existam mais reservas dessa ação de controle, parte-se para a próxima estratégia, incrementando o ponteiro e .

A segunda estratégia de controle a ser executada é o aumento da tensão das máquinas síncronas conectadas às barras PV, através do aumento da excitação, como apresentado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: Estratégia de controle: excitação das máquinas síncronas

Entrada: $S, cont$

Saída: Caso base modificado

```

1 início
2   calcula o APF da contingência para as barras PV (Análise Modal);
3   para cada  $APF_k \leq 0,5$  faça
4     a barra  $k$  é relevante para esta ação de controle;
5   fim para cada
6   para cada barra relevante que não atingiu a tensão máxima ( $V_{max}$ ) faça
7      $V := V + \Delta V$ , sendo  $\Delta V := \min\{0,02pu; V_{max} - V\}$ ;
8   fim para cada
9   atualiza os dados de barra do caso base modificado;
10  se não existem mais barras relevantes com  $V < V_{max}$  então
11     $S :=$  caso base modificado;
12  retorna  $S$ 
13 fim se
14 fim

```

Embora a excitação das máquinas síncronas esteja diretamente relacionada com a

injeção de potência reativa na rede, o estudo de relevância do ponto de vista da análise modal é feito utilizando os fatores de participação ativa. Apesar da relação entre o APF e a excitação das máquinas ser indireta, o fator de participação ativa é a única ferramenta disponível para a análise, uma vez que o RPF é uma métrica somente para as barras PQ, enquanto o APF atesta a respeito das barras PQ e PV.

A relação entre o APF e a injeção de reativo a partir das máquinas síncronas é válida. Em termos de potência ativa o APF indica qual o impacto da injeção de potência ativa na instabilidade do sistema. Uma máquina com um alto APF aumentará a margem de estabilidade do sistema caso assuma potência ativa de máquinas com APFs menores (DA SILVA, 2001).

Por outro lado, pode-se entender essa relação como o custo operativo de cada máquina em termos de potência reativa. Máquinas com maiores APFs possuem um custo reativo menor e, conseqüentemente, ao injetarem potência ativa no sistema demandam que menos potência ativa seja consumida, causando pouco impacto na margem de estabilidade. Máquinas com APFs menores possuem um custo reativo maior, logo, quando injetam potência ativa fazem com que o sistema seja mais sobrecarregado reativamente, o que impacta negativamente na margem de estabilidade (DA SILVA, 2001).

Assim, da Silva (2001) apresenta a excitação de máquinas síncronas com baixo APF como uma compensação do custo reativo feita pelo próprio gerador a fim de não onerar a rede com tal perda. Além disso, a excitação da máquina, efetuada através do aumento da tensão naquela barra PV, implica em um aumento do APF, melhorando o impacto que aquele gerador tem na instabilidade do sistema (DA SILVA, 2001).

Portanto, a seleção das barras relevantes para a ação de controle no caso desta estratégia é feita considerando as barras de menor APF, como mostra o Algoritmo 2. Desse modo, para as barras relevantes que ainda não atingiram a tensão máxima previamente estabelecida, executa-se a excitação da máquina na forma de incremento de tensão das barras PV. Os passos de incremento são de $\Delta V = 0,02pu$, ou algum valor inferior (porém positivo), caso a diferença entre o limite da tensão e a tensão na barra seja menor que a própria variação ΔV .

Caso não existam barras relevantes segundo o critério adotado na linha 3 do Algoritmo 2, executa-se a ação de excitação das máquinas mesmo para as barras cujo $APF_k > 0,5$, uma vez que a injeção de reativo no sistema auxiliará no aumento do LOS. Desse modo, a ação prioritária de controle da estratégia 2 é para as máquinas com baixo APF, mas caso o sistema ainda necessite de ações de controle preventivo a fim de aumentar o LOS, efetua-se a estratégia do Algoritmo 2 com o relaxamento da condição de relevância.

Por fim, de maneira análoga à primeira estratégia, verifica-se o fim das reservas de controle. Neste caso, no entanto, como não existem mais estratégias de controle a serem executadas, a função retorna o próprio sistema modificado e não a chamada recursiva da própria função sob uma nova estratégia de controle preventivo.

3.2.2 ANÁLISE DE AÇÕES DE CONTROLE EMERGENCIAL

O algoritmo de análise de ações de controle emergencial conta somente com uma estratégia de controle, a saber o corte de carga, e de maneira similar ao algoritmo de análise de ações de controle preventivo, é feita de maneira recursiva, até que a contingência em análise chegue a uma MET adequada. Assim como para as ações preventivas, a análise de ações emergenciais de controle está sujeita à existência de uma ou mais contingências que possuam MET abaixo do mínimo permitido, como mostra o fluxograma geral da Figura 3.1.

Para a análise de ações de controle emergencial, representada pelo bloco C da Figura 3.1, executa-se a estratégia de controle de maneira recursiva, como mostra a Figura 3.7. Como a análise modal e a implementação das ações de controle são todas feitas sobre o mesmo sistema contingenciado, a função de controle é mais simples do que a do controle preventivo, apresentada na Figura 3.5.

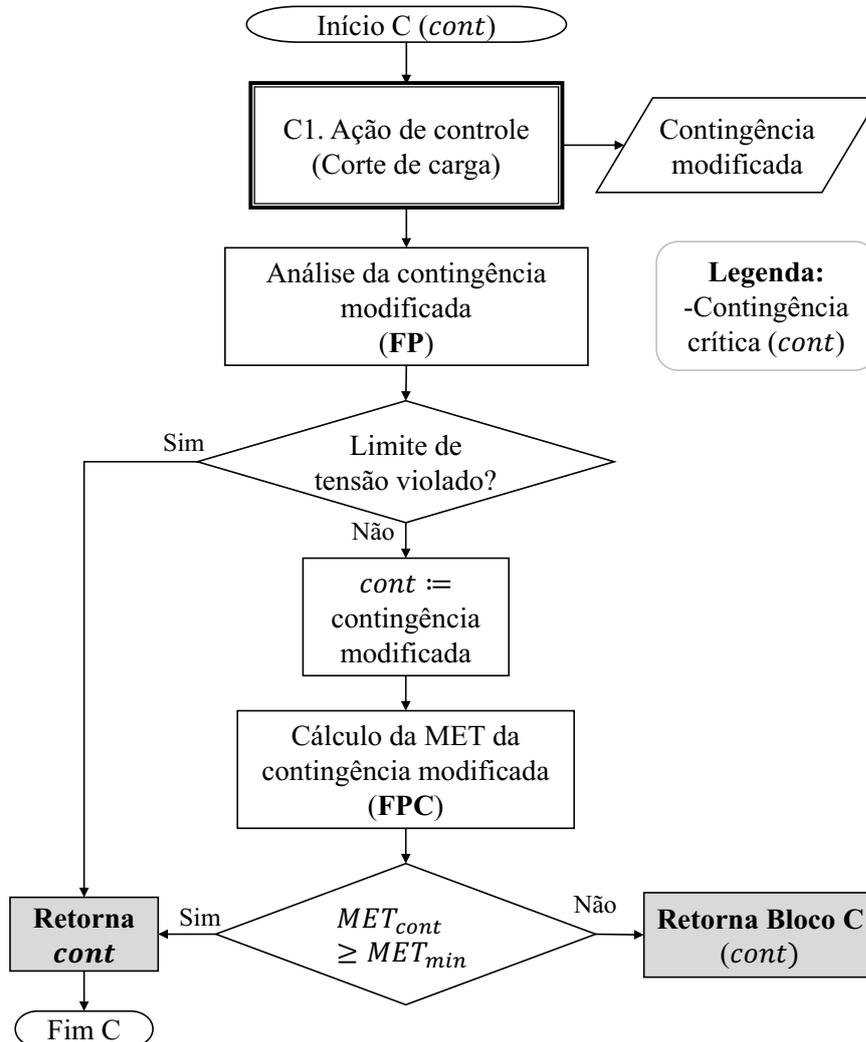
A cada recursão, a metodologia sempre realiza o mesmo corte de carga no sistema, distribuindo-o conforme os APFs calculados naquela iteração. Caso o corte de carga viole o limite superior de tensão, rejeita-se a ação de controle efetuada, retornando a contingência sem modificações e finalizando o bloco C.

Caso não ocorram violações de tensão, calcula-se a MET da contingência modificada, a partir de um fluxo de potência continuado. Caso as ações de controle não sejam suficientes para levar a MET da contingência a valores adequados, a função retorna ela mesma, inserindo como parâmetro de entrada a própria contingência modificada. Desse modo, o novo corte de carga é feito em cima da contingência modificada com o corte de carga da iteração anterior.

Uma vez que a MET do sistema contingenciado tenha atingido os requisitos mínimos previamente estabelecidos, a função de controle retorna a contingência modificada, partindo para a análise de ações de controle emergencial da próxima contingência cuja MET não atenda às restrições, ou encerrando o algoritmo de análise de ações de controle, caso todas as contingências estáveis tenham sido estudadas.

Os critérios de distribuição do corte de carga, assim como a estratégia de controle emergencial, executados no bloco C1, são apresentados no Algoritmo 3.

Figura 3.7: Fluxograma do algoritmo de análise de ações de controle emergencial.



Fonte: Autoria própria.

De maneira similar à estratégia de chaveamento de bancos de capacitores, as barras relevantes para as ações de controle são aquelas cujo $APF_k \geq 0,5$. Para essas barras relevantes, os APFs são ponderados de maneira que a soma dos fatores de participação de todas as barras relevantes seja 1.

Assim, para cada barra relevante, calcula-se a parcela de corte de carga a ser implementada $\Delta P_{corte,k}$ como o fator de participação ponderado da barra $APF_{k,p}$, com relação a todas as barras que sofrerão corte de carga, multiplicado pelo corte total que será implementado no sistema Δp .

Desse modo, a magnitude total a ser cortada (Δp) é ponderada de acordo com os fatores de participação das barras que participarão da ação emergencial de controle. Feito o corte de

Algoritmo 3: Estratégia de controle: corte de carga

Entrada: *cont*
Saída: sistema contingenciado modificado

- 1 **início**
- 2 calcula o APF da contingência para as barras PQ (Análise Modal);
- 3 **para cada** $APF_k \geq 0,5$ **faça**
- 4 a barra k é relevante para esta ação de controle;
- 5 $APF_{k,p} := APF_k / \sum_k APF_k$;
- 6 **fim para cada**
- 7 **para cada barra relevante que ainda possui carga faça**
- 8 $\Delta P_{corte,k} := APF_{k,p} \cdot \Delta p$;
- 9 $P_{Lk} := P_{Lk} - \Delta P_{corte,k}$;
- 10 $Q_{Lk} := P_{Lk} \tan \varphi_k$;
- 11 **fim para cada**
- 12 atualiza os dados de barra do sistema contingenciado modificado;
- 13 **se não existem mais barras relevantes com carga a ser cortada então**
- 14 $cont :=$ sistema contingenciado modificado;
- 15 **retorna** *cont*
- 16 **fim se**
- 17 **fim**

carga de potência ativa, atualiza-se a potência reativa, de modo que o fator de potência da barra, representado por $\tan \varphi_k$, seja mantido.

Caso a carga de todas as barras relevantes já tenha sido cortada completamente, considera-se que o sistema chegou ao fim das reservas de corte de carga que poderiam ser feitas com o auxílio do algoritmo de controle.

Para a metodologia aqui proposta, isso encerra o algoritmo de controle emergencial. No entanto, para um sistema real, ações de controle ainda podem ser planejadas, tendo como base outros índices, ou mesmo diretrizes do operador do sistema.

Um exemplo de outros estudos que podem ser feitos é a identificação dos ramos críticos associada à probabilidade de ocorrência dessas contingências propondo ações de planejamento na rede. No entanto, não é este o foco do algoritmo apresentado.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta na seção 4.1 a análise estatística do método de ranqueamento via extrapolação linear proposto e na seção 4.2 os resultados da metodologia de análise de contingências e análise de ações de controle estratificados de acordo com as etapas do Capítulo 3. Posteriormente, é apresentado na seção 4.3 a comparação do método de ranqueamento proposto via extrapolação linear com um método fundamentado somente na análise dos autovalores mínimos de um único ponto de operação, além do método FVSI e um ranqueamento de referência, feito com base no cálculo da MET de cada contingência.

O algoritmo de análise de contingências e ações de controle, assim como a análise estatística do método foram implementados em Python, com auxílio das bibliotecas NumPy (HARRIS *et al.*, 2020), pandas (MCKINNEY, 2010; The pandas development team, 2020) e Matplotlib (HUNTER, 2007).

Os sistemas-teste utilizados para a análise estatística, apresentação e comparação dos resultados obtidos são os sistemas IEEE 14, 30 e 57 barras (University of Washington, 1999), descritos no Apêndice A. Não são considerados limites de geração de potência ativa e reativa das máquinas síncronas. Ao efetuar as ações de controle considera-se como restrição operativa somente o limite superior da tensão nas barras como sendo $V_{max} = 1,05pu$, sendo este também o limite de excitação permitido nas barras das máquinas síncronas. O limite inferior para o critério de segurança é dado pelo LOS mínimo ($LOS_{min} = 4\%$), conforme estabelecido em (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020b).

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO MÉTODO DE REDUÇÃO DO CONJUNTO DE CONTINGÊNCIAS

A análise é feita a partir de uma Simulação de Monte Carlo, tendo como critério de convergência um coeficiente de variação $\beta \leq 0,05$, sendo este coeficiente dado por

(RUBINSTEIN; KROESE, 2008):

$$\beta = \frac{\sqrt{V(G)}}{E(G)}, \quad (4.1)$$

onde $E(G)$ é a esperança matemática, ou média, do desempenho da função teste $G \in \{0, 1\}$ que representa a assertividade do método. O desvio padrão $\sqrt{V(G)}$ representa a medida de dispersão da distribuição em torno da média e é dado pela raiz quadrada da variância $V(G)$ (RUBINSTEIN; KROESE, 2008):

$$V(G) = E(G^2) - (E(G))^2, \quad (4.2)$$

sendo a esperança matemática (RUBINSTEIN; KROESE, 2008):

$$E(G) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G(S_{L_i}). \quad (4.3)$$

Aqui, n é a quantidade de amostras, e G , a função teste, é função da carga do sistema, dada por S_{L_i} . A carga é randomizada de maneira que ela possa variar, tanto na parte ativa como reativa, entre $\pm 20\%$ do carregamento base em cada barra k , sujeito à restrição de um fator de potência $\cos \varphi_k \geq 0,8$, tanto capacitivo, quanto indutivo.

Desse modo, considerando que a contingência mais crítica é dada por C_{crit} e o conjunto reduzido resultante do método, cuja dimensão é $N_r = 0,10 \cdot N$, é C_r , sendo N a quantidade de contingências, que nesse caso é o número de linhas do sistema. A função teste G é dada por:

$$\begin{cases} G(S_{L_i}) = 1, & \text{se } C_{\text{crit}} \in C_r \\ G(S_{L_i}) = 0, & \text{se } C_{\text{crit}} \notin C_r. \end{cases} \quad (4.4)$$

Assim, considerando como critério de convergência da simulação de Monte Carlo o mínimo de $n = 200$ amostras e um coeficiente de variação $\beta \leq 0,05$, apresenta-se na Tabela 4.1 o desempenho do método, considerando um conjunto de dimensão 10% do total de contingências de linha para os sistemas-teste 14, 30 e 57 barras do IEEE (University of Washington, 1999).

O resultado de $E(G) = 100\%$ para os três sistemas simulados significa que o método isolou corretamente a pior contingência no conjunto reduzido N_r para todas as amostras simuladas. Como nenhuma simulação resultou em um isolamento incorreto da parte do método, os coeficientes de variação para esses casos foram nulos.

Além dos resultados observados na Tabela 4.1, deseja-se validar o sistema

Tabela 4.1: Precisão do método de extrapolação linear calculado via simulação de Monte Carlo.

	Precisão do conjunto reduzido, $E(G)$	Coefficiente de variação, β	Amostras simuladas, n
14 barras	100%	0	200
30 barras	100%	0	200
57 barras	100%	0	200

Fonte: Autoria própria.

considerando diferentes patamares de carga. Diferentemente da variação individual de carga em cada barra do sistema, que possibilita não só diferentes carregamentos, mas também diferentes fatores de potência de carga para cada barra, o patamar de carga do sistema é definido de maneira sistêmica.

Desse modo, sendo o carregamento $\lambda = 1$ o carregamento convencional de um sistema-teste, define-se este como sendo o patamar de carga média. Aliviando esse carregamento para valores $\lambda < 1$, define-se um patamar de carga leve e, de maneira análoga, valores de $\lambda > 1$ definem patamares de carga pesada. Destaca-se que o sistema 57 barras é exceção: o seu carregamento base $\lambda = 1$ representa o patamar de carga pesada, uma vez que este sistema é caracterizado por um cenário de maior sobrecarga que o deixa mais próximo da instabilidade, se comparado aos sistemas 14 e 30 barras.

Assim, como cada sistema possui limitações e características próprias, não foi definida uma única métrica para os três sistemas analisados, mas empiricamente encontrou-se valores de λ para os três patamares de carga de cada um dos sistemas, de modo que ainda existissem pontos de equilíbrio estáveis para os casos contingenciados que possibilitassem a análise e ranqueamento de contingências. De maneira intencional, buscou-se como patamar de carga pesada um carregamento que ficasse além do LOS do carregamento base, eliminando uma ou até mais contingências da análise. Ou seja, o próprio conjunto das contingências é alterado, diversificando ainda mais os cenários de simulação a fim de validar a metodologia. Os valores arbitrados para cada um dos patamares em cada um dos sistemas se encontra no Quadro 4.1.

Quadro 4.1: Parâmetros utilizados em cada patamar de carga.

Sistema	Carga leve	Carga média	Carga pesada
14 barras	$\lambda = 0,8$	$\lambda = 1,0$	$\lambda = 1,6$
30 barras	$\lambda = 0,9$	$\lambda = 1,0$	$\lambda = 1,3$
57 barras	$\lambda = 0,95$	$\lambda = 0,97$	$\lambda = 1,0$

Fonte: Autoria própria.

Aponta-se que os sistemas-teste utilizados possuem carregamentos base consideravelmente altos, infringindo limites inferiores de tensão mesmo para $\lambda = 1,0$. Ainda assim, optou-se por utilizar esse carregamento base como o patamar médio de carga.

Destaca-se do Quadro 4.1 o caso do sistema 57 barras onde esse carregamento pesado é mais característico, tornando a janela de carregamentos possíveis menos ampla, devido à complexidade característica do sistema. Neste caso, considera-se que o carregamento base do sistema já é o patamar de carga pesada, sendo os patamares de carga leve e média menos distantes do caso base, em termos do carregamento relativo λ .

Ao optar por um sistema de característica mais carregada, ou mais próximo do ponto de colapso, tanto para os sistemas 14 e 30 barras, como para o sistema 57 barras, entende-se que o processo de análise estatística é feito de maneira mais conservadora.

A Tabela 4.2 apresenta a precisão do método de extrapolação linear para os três patamares de carga dos três sistemas. Para todos os casos a quantidade de amostras simuladas n foi 200.

Tabela 4.2: Precisão do método de extrapolação linear calculada via simulação de Monte Carlo para diferentes patamares de carga.

	Precisão do conjunto reduzido, $E(G)$	Coefficiente de variação, β
14 barras - Leve	100%	0
14 barras - Média	100%	0
14 barras - Pesada	94,03%	0,01777
30 barras - Leve	100%	0
30 barras - Média	100%	0
30 barras - Pesada	100%	0
57 barras - Leve	100%	0
57 barras - Média	100%	0
57 barras - Pesada	100%	0

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que para a situação de carga pesada do sistema 14 barras o método nem sempre identifica corretamente a pior contingência em todos os casos. Ainda assim, obtém uma precisão razoável, sobretudo considerando que o sistema em questão está sobrecarregado em mais de 50% do seu carregamento base.

Salienta-se que os critérios para a determinação do patamar de carga pesada não foram pautados em estudos mais aprofundados de perfil de consumo, ou mesmo limites operativos,

mas sim critérios mínimos de convergência a fim de viabilizar a análise de contingências. Assim, pode-se considerar que os patamares pesados aqui apresentados são cenários extremos utilizados para fins de análise estatística e que é possível que o desempenho do método quando aplicado em cenários reais, para distintos patamares de carga, seja melhor do que o apresentado na Tabela 4.2.

Paralelamente ao método de extrapolação linear, a simulação de Monte Carlo também abrangeu outros cenários. Testou-se o desempenho do método para identificar a pior contingência de maneira direta, garantindo que ela está na primeira posição do ranqueamento obtido pelo método e não somente no conjunto reduzido de 10% das contingências.

Além disso, também foi testado o desempenho do autovalor crítico de cada contingência sem o cálculo do segundo PEE e da extrapolação linear. Utilizando somente o que seriam os pontos λ_0 na Figura 3.4. O desempenho do método direto também foi testado considerando o conjunto reduzido de 10% e a identificação da pior contingência como primeira posição do ranqueamento do método. Denomina-se cada um desses índices como:

- $E_F(G)$: precisão do método de extrapolação linear ao identificar a contingência mais crítica como a primeira contingência ranqueada pelo método;
- β_F : coeficiente de variação referente ao $E_F(G)$;
- $E_{\lambda_0}(G)$: precisão do método direto de autovalor crítico ao identificar a contingência mais crítica dentro do conjunto de 10% das piores contingências ranqueadas pelo método;
- β_{λ_0} : coeficiente de variação referente ao $E_{\lambda_0}(G)$;
- $E_{F\lambda_0}(G)$: precisão do método direto de autovalor crítico ao identificar a contingência mais crítica como a primeira contingência ranqueada pelo método;
- $\beta_{F\lambda_0}$: coeficiente de variação referente ao $E_{F\lambda_0}(G)$.

Inicialmente, destaca-se o fato de que a simulação de Monte Carlo conduzida teve como prioridade de convergência o coeficiente de variação dos métodos de extrapolação linear e do autovalor crítico λ_0 para a identificação da pior contingência dentre o conjunto de 10% do ranqueamento, a saber, os coeficientes β e β_{λ_0} . Desse modo, por mais que sejam apresentados os resultados para os demais casos, eles não são o foco desta pesquisa e, conseqüentemente possuem coeficientes de variação mais relaxados.

Comparando os resultados da Tabela 4.2 com os da Tabela 4.3, comprova-se a melhor eficácia do método de extrapolação linear proposto, justificando-se a sua escolha. Ainda

Tabela 4.3: Precisão dos demais métodos calculada via simulação de Monte Carlo para diferentes patamares de carga.

	$E_F(G)$	β_F	$E_{\mathcal{J}_0}(G)$	$\beta_{\mathcal{J}_0}$	$E_{F\mathcal{J}_0}(G)$	$\beta_{F\mathcal{J}_0}$
14 barras - Leve	49,75%	0,0709	100%	0	31,84%	0,1032
14 barras - Média	94,53%	0,0170	100%	0	92,04%	0,0207
14 barras - Pesada	79,10%	0,0362	60,70%	0,0568	39,80%	0,0867
30 barras - Leve	91,54%	0,0214	100%	0	0%	-
30 barras - Média	99,00%	0,0071	100%	0	1,49%	0,5730
30 barras - Pesada	85,07%	0,0295	100%	0	86,57%	0,0278
57 barras - Leve	98,01%	0,0100	100%	0	100%	0
57 barras - Média	100%	0	39,80%	0,0867	39,80%	0,0867
57 barras - Pesada	93,03%	0,0193	100%	0	60,70%	0,0568

Fonte: Autoria própria.

ressalta-se que embora o método proposto seja capaz até de ranquear corretamente a pior contingência em alguns patamares de carga dos sistemas simulados, para fins de análise estatística, o método proposto garantiu com uma maior precisão isolar a pior contingência no conjunto de 10% das contingências de linha ranqueadas como as mais críticas.

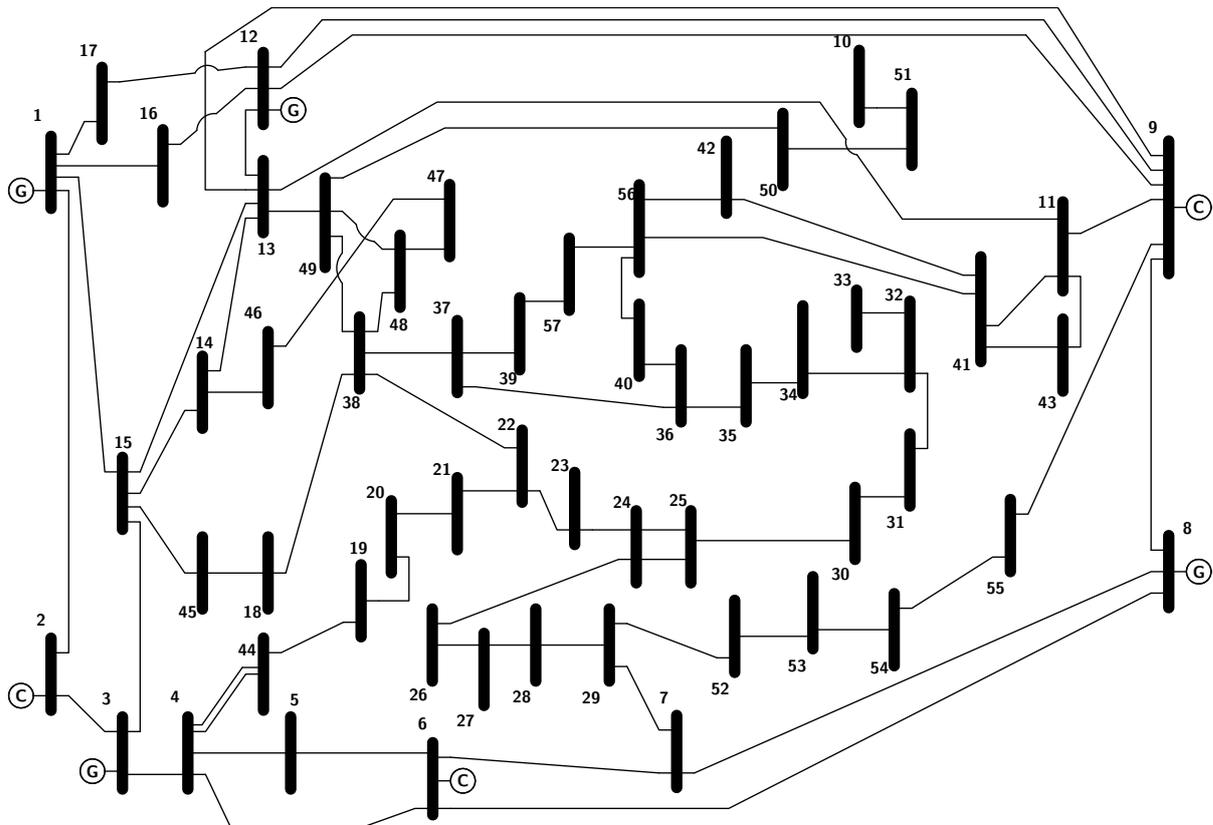
4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O SISTEMA 57 BARRAS

O sistema utilizado para a simulação do algoritmo de controle e obtenção de resultados é o 57 barras, por ser um sistema de característica mais carregada e por apresentar uma quantidade suficiente de máquinas síncronas e barras com bancos de capacitores para testar o algoritmo proposto. O diagrama unifilar do sistema 57 barras é apresentado na Figura 4.1. Os geradores e compensadores síncronos são denotados pelos círculos com os símbolos **G** e **C**, respectivamente.

Salienta-se que o algoritmo não analisa ações de planejamento. Desse modo, o chaveamento de bancos de capacitores só pode ocorrer em barras que já possuem esses equipamentos, não sendo possível a inserção de capacitores, mas somente o seu chaveamento. A Tabela A.5 do Apêndice A apresenta os dados adicionais do sistema-teste, que determinam o passo de chaveamento dos bancos de capacitores, assim como a capacidade máxima instalada do banco.

As demais ações de controle, a saber a excitação das máquinas e o corte de carga, são feitas de maneira incremental, como descrito na seção 3.2, estando sujeitas somente ao limite superior de tensão $V_{max} = 1,05pu$ e ao limite inferior de carregamento $P_{min}, Q_{min} = 0pu$.

Figura 4.1: Sistema 57 barras.



Fonte: Autoria própria.

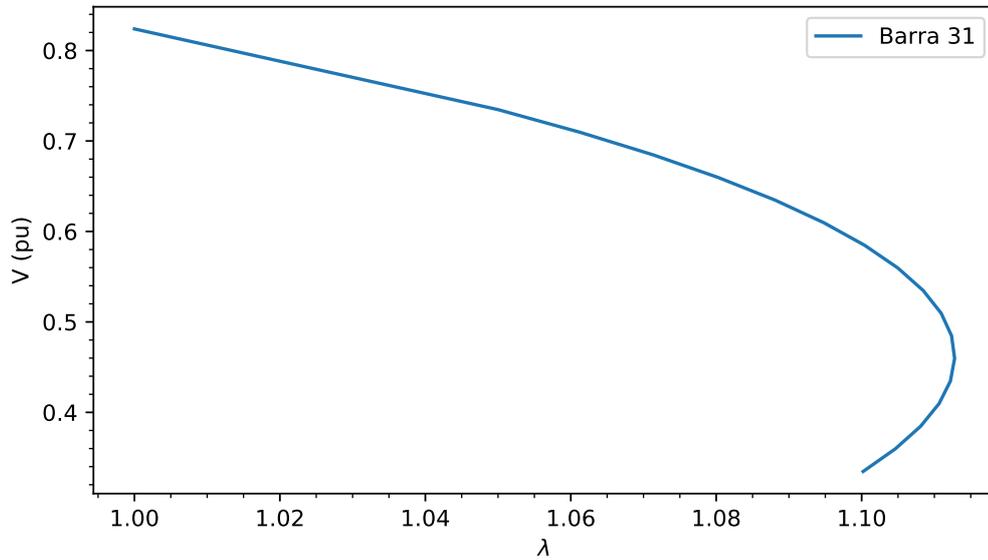
Ressalta-se que os limites inferiores de MET e LOS são 7% e 4%, respectivamente.

4.2.1 RESULTADOS DA ETAPA 1: ANÁLISE DO CASO BASE

Conforme delimitado nas etapas do fluxograma geral da Figura 3.1, inicialmente é feita a análise de estabilidade de tensão para o caso base. A Figura 4.2 apresenta a curva PV da barra 31 do sistema sem contingências.

A barra 31 apresenta a magnitude mais baixa de tensão do sistema, além de um comportamento sensível em relação ao aumento de carregamento do sistema. Portanto, escolheu-se essa barra para ilustrar a MET inicial do caso base, representada pelo carregamento $\lambda = 1,1128$. Uma vez que essa margem é superior ao valor mínimo de 7%, a execução da metodologia segue para a etapa seguinte de análise de contingências.

Figura 4.2: Margem de estabilidade do caso base.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 RESULTADOS DA ETAPA 2: ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS

A execução de cada um dos blocos da análise de contingências apresentados no fluxograma da Figura 3.2 tem como resultado:

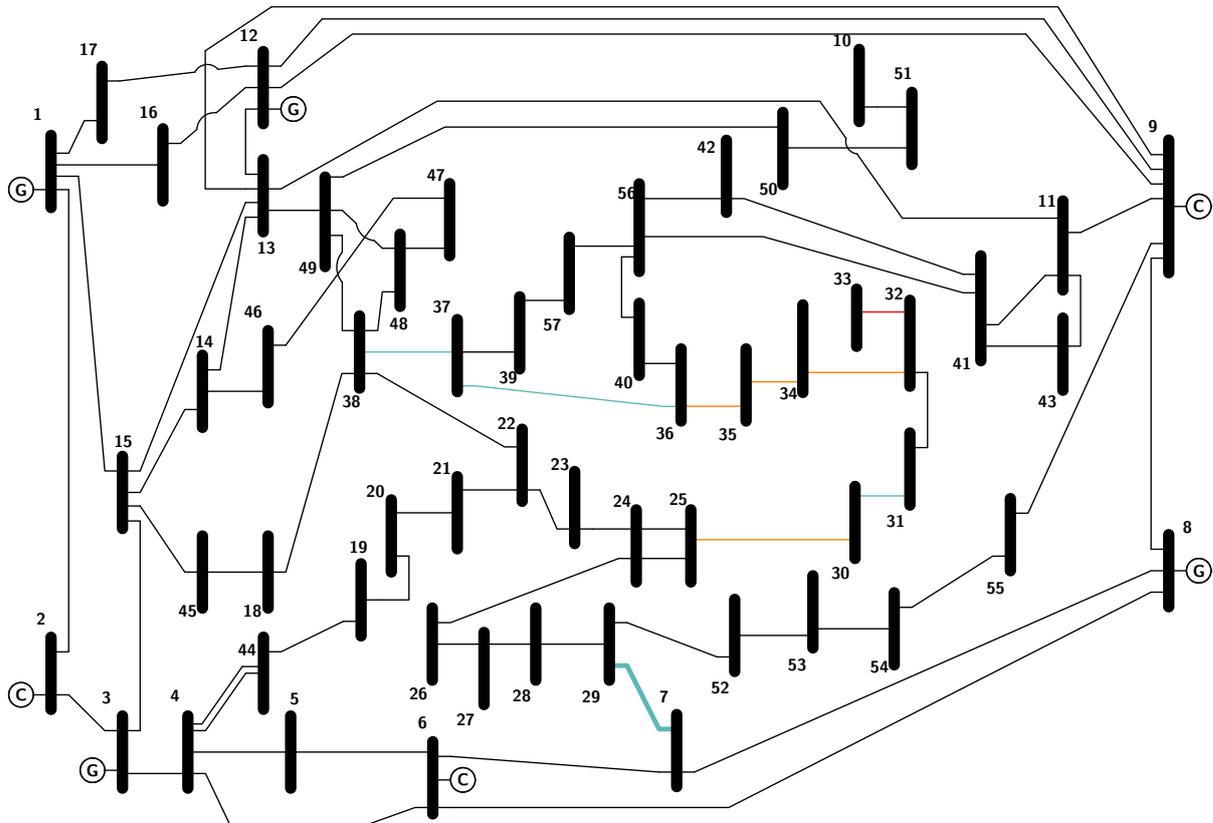
- A1. Ramos críticos: L45;
- A2. Contingências estáveis: todas, com as exceções L42, L46, L47 e L48;
- A3. Conjunto reduzido de contingências: $C_r = \{L41, L50, L49, L43, L40, L39, L35 \text{ e } L36\}$;
- A4. Contingência crítica: $C_{crit} = L41$ e $LOS = 1,0075$.

A representação dos ramos críticos é dada pela cor vermelha na Figura 4.3, as contingências instáveis pela cor alaranjada e as contingências estáveis, porém inadequadas pela cor azulada, sendo a contingência crítica destacada em um traço mais forte.

Destaca-se ainda que a contingência crítica não só foi isolada no conjunto reduzido de contingências, mas como o método a ranqueou corretamente como a contingência mais próxima da instabilidade.

Como o LOS do sistema é inferior ao limite mínimo de 4%, executa-se a etapa 2, tendo como entrada a contingência identificada como a mais crítica, L41. A lista completa de contingências com MET inadequada (L41, L50, L49, L43) é obtida durante o processo de

Figura 4.3: Resultado da análise de contingências para o sistema 57 barras.



Fonte: Autoria própria.

cálculo do LOS. Embora essa lista não seja um argumento de entrada para a etapa 3, uma vez que considera-se uma contingência crítica por vez no algoritmo de controle preventivo, essa lista é sempre extraída durante o processo de cálculo do LOS, pois ela serve como entrada para a etapa 4.

4.2.3 RESULTADOS DA ETAPA 3: ANÁLISE DE AÇÕES DE CONTROLE PREVENTIVO

Por se tratar de um algoritmo de análise de ações de controle preventivo, é importante sempre considerar e monitorar o ponto de operação do caso base a cada nova iteração de controle pré-contingência, executada no bloco B1. Assim, a cada iteração de controle, verifica-se se a estabilidade do caso base de fato melhora e se a tensão das barras viola o limite superior permitido.

A Tabela 4.4 apresenta o autovalor crítico e a MET do caso base após cada iteração de ação de controle implementada.

A progressão da MET e do autovalor crítico apresentados na Tabela 4.4 mostra que as

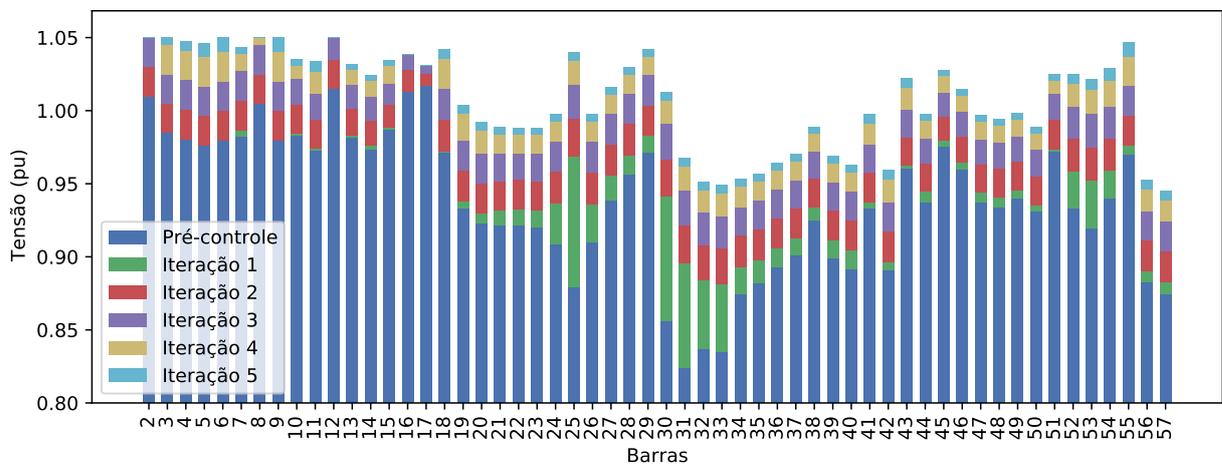
Tabela 4.4: Resposta da margem de estabilidade de tensão e autovalor crítico do caso base a cada iteração de controle preventivo.

Iteração	MET	λ_{crit}
Caso base	1,1128	0,1841
Iteração 1	1,1291	0,1897
Iteração 2	1,1398	0,1968
Iteração 3	1,1502	0,2033
Iteração 4	1,1572	0,2077
Iteração 5	1,1600	0,2093

Fonte: Autoria própria.

ações de controle preventivo de chaveamento de bancos de capacitores e excitação das máquinas síncronas auxiliam na estabilidade do caso base. A Figura 4.4 apresenta a resposta da tensão nas barras a cada iteração de controle preventivo, ilustrando a variação de tensão causada por cada nova ação de controle implementada.

Figura 4.4: Evolução da tensão nas barras do sistema a cada iteração do algoritmo de controle preventivo.

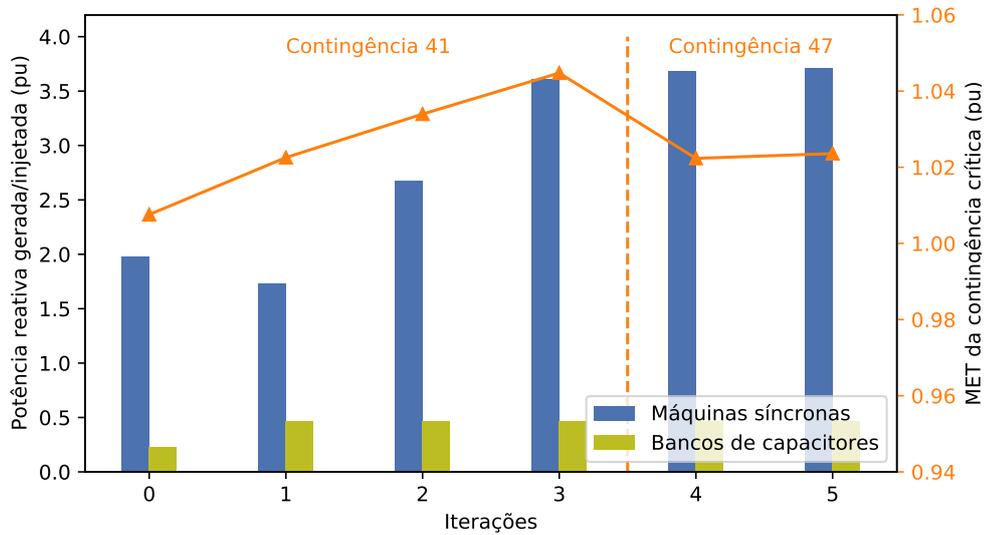


Fonte: Autoria própria.

As ações de controle implementadas em cada uma das iterações são apresentadas na Figura 4.5. As barras representam a geração reativa das máquinas síncronas e a injeção de reativo através dos bancos de capacitores. Os triângulos representam a MET da contingência crítica do sistema em estudo. A iteração 0 é referente ao caso base, antes de qualquer ação de controle preventivo.

Tanto para o caso base, como para as iterações 1, 2 e 3 de controle a contingência crítica é a L41. Após as primeiras ações de controle preventivo duas contingências passam da instabilidade para a estabilidade, porém violando novamente o LOS do sistema. Assim, para as

Figura 4.5: Evolução da MET da contingência crítica e das ações de controle a cada iteração do algoritmo de controle preventivo.



Fonte: Autoria própria.

últimas duas iterações a contingência crítica é a L47. O Quadro 4.2 apresenta as contingências inadequadas e instáveis ao longo da execução do algoritmo de análise de ações de controle preventivo.

Quadro 4.2: Contingências inadequadas e instáveis ao fim das recursões do algoritmo de controle preventivo.

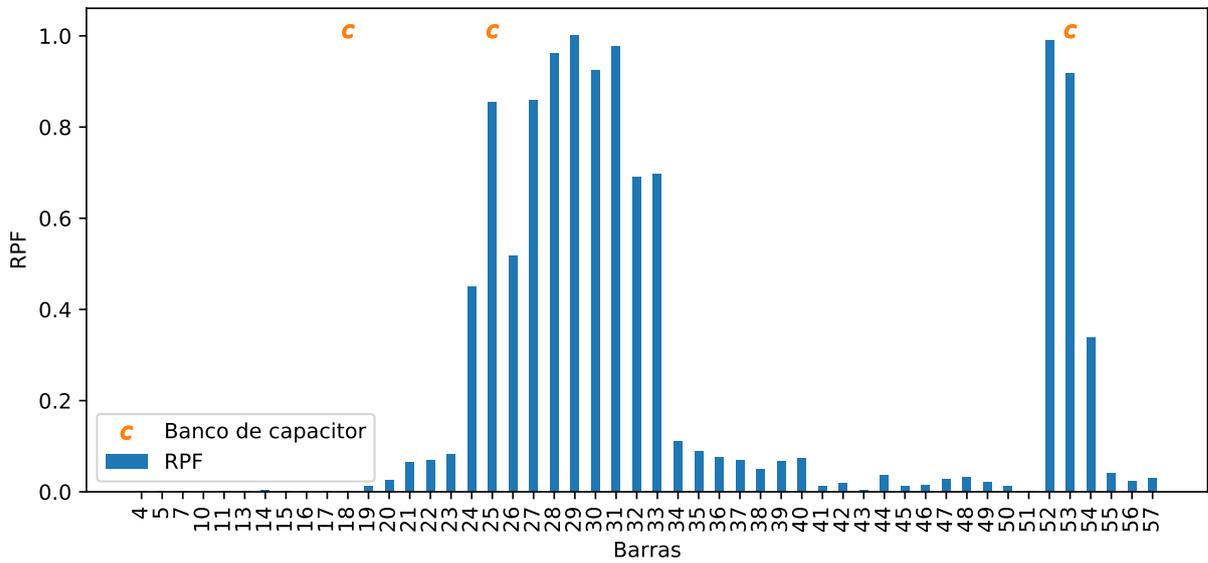
Ponto de operação	Sistema base	Recursão n° 1	Recursão n° 2
Iterações implementadas	-	1, 2 e 3	4 e 5
Cont. MET inadequada	L41, L50, L49, L43	L47, L46	L47, L46
Cont. instáveis	L42, L46, L47, L48	L42, L48	L42, L48
$MET_{C_{crit}}$	$MET_{L41} = 1,0075$	$MET_{L41} = 1,0447$	$MET_{L47} = 1,0236$

Fonte: Autoria própria.

A primeira iteração é caracterizada pelo chaveamento dos bancos de capacitores das barras 25 e 53. A Figura 4.6 mostra os RPFs do sistema contingenciado para essa iteração.

Como o $RPF_k \geq 0,5$ para as barras 25 e 53, o controle é implementado, chaveando os bancos de capacitores para o máximo instalado nas respectivas barras. Desse modo a susceptância *shunt* referente ao banco de capacitor na barra 25 vai de $b_{sh,0}^{25} = 0,059pu$ para $b_{sh,1}^{25} = 0,177pu$. Quanto à barra 53, a ação de controle leva a susceptância de $b_{sh,0}^{53} = 0,063pu$ para $b_{sh,1}^{53} = 0,189pu$. O chaveamento dos bancos de capacitores é evidenciado na resposta da iteração 1 no módulo de tensão das barras da Figura 4.4, principalmente na barra 25 e nas barras vizinhas (23, 24, 26 30, 31 e 32). Vale lembrar que além dos dados de linha fornecidos na

Figura 4.6: Fatores de participação reativa para o sistema contingenciado L41 e a indicação das barras com bancos de capacitor.

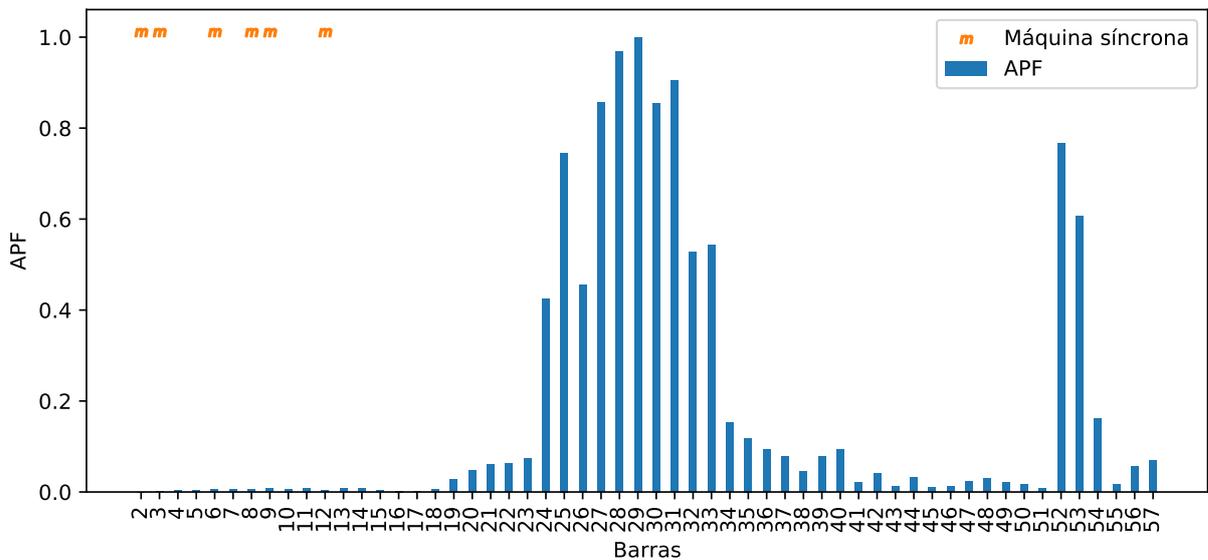


Fonte: Autoria própria.

Tabela A.6, é possível inspecionar visualmente o sistema 57 barras a partir do diagrama unifilar apresentado na Figura 4.1.

Percebe-se pelo comportamento das barras de potência reativa da Figura 4.5 que a injeção dos bancos de capacitores na primeira iteração reduz levemente a necessidade de geração de potência reativa da parte das máquinas síncronas.

Figura 4.7: Fatores de participação ativa para o sistema contingenciado L41 e a indicação das barras com máquinas síncronas.



Fonte: Autoria própria.

Após a implementação da ação de controle da iteração 1, não existem mais barras relevantes para a primeira estratégia de controle preventivo, uma vez que o RPF_{18} apresentado na Figura 4.6 não varia significativamente após as ações de controle da primeira iteração. Desse modo, a iteração 2 é caracterizada pela segunda estratégia de controle, a saber a excitação das máquinas síncronas. A Figura 4.7 apresenta os APFs referentes à contingência L41 após as ações de controle da primeira iteração.

Uma vez que os APFs das barras com máquinas síncronas é baixíssimo, todas as barras PV são consideradas relevantes para a ação de controle de excitação das máquinas. Tanto para a iteração 2, como para a iteração 3 os fatores de participação são semelhantes. No entanto, como esperado, verifica-se um leve aumento de APF_k ao analisar as barras que receberam ação de controle nas iterações 2 e 3, como mostra a Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Aumento do APF após iteração de controle de excitação das máquinas.

Barras	APF - Iteração 2	APF - Iteração 3
2	0,0001	0,0002
3	0,0022	0,0039
6	0,0047	0,0084
8	0,0061	0,0107
9	0,0077	0,0133
12	0,0042	0,0074

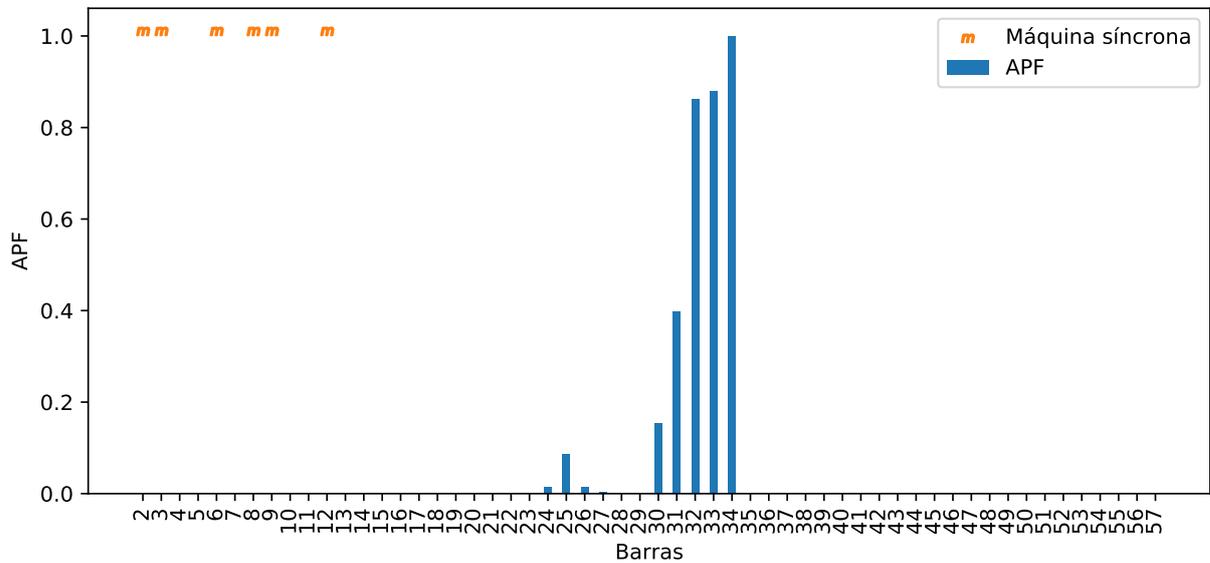
Fonte: Autoria própria.

Como mostra a Figura 4.5 e o Quadro 4.2, ao final da terceira iteração a MET da contingência crítica L41 chega ao valor desejado $MET \geq 1,04$, finalizando a primeira recursão da simulação. Ao calcular o LOS do sistema novamente, encontra-se um valor inadequado, devido às contingências que vieram da instabilidade para a estabilidade, em resposta às ações preventivas de controle.

Não tendo uma barra relevante para a primeira estratégia de chaveamento de bancos de capacitores, a segunda recursão do problema, que visa adequar a contingência L47, inicia executando a estratégia de excitação das máquinas. Os APFs e as respectivas barras que possuem máquinas síncronas passíveis de controle são apresentados na Figura 4.8.

De maneira similar à contingência L41, a característica do modo crítico de instabilidade da contingência L47 apresenta baixos APFs nas barras PV. Desse modo, a excitação das máquinas é implementada nas iterações 4 e 5. A execução do algoritmo de análise de ações de controle preventivo é interrompida quando a reserva de controle é exaurida, o que é caracterizado pela tensão de todas as barras PV atingindo o limite superior de $1,05pu$.

Figura 4.8: Fatores de participação ativa para o sistema contingenciado L47 e a indicação das barras com máquinas síncronas.



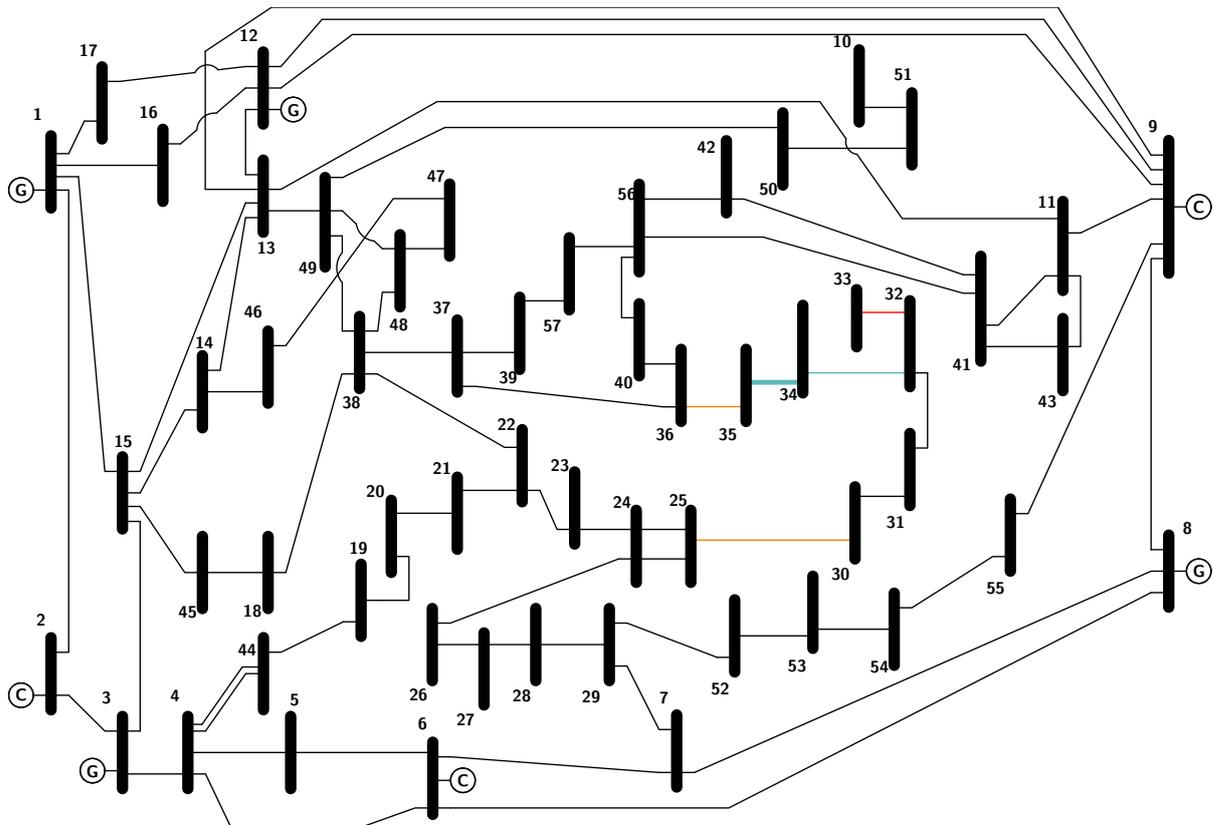
Fonte: Autoria própria.

Mesmo sendo possíveis poucas iterações de ações preventivas de controle, devido aos limites do próprio sistema, verifica-se que o método de controle preventivo é eficaz quando é feito com base na análise modal do sistema contingenciado crítico e aplicado ao caso base. Foi verificado no sistema simulado que não só o ponto de operação do sistema contingenciado foi levado para uma condição mais segura, mas a segurança e estabilidade do próprio caso base sem contingências foi favorecida.

Como mostra o Quadro 4.2, ao fim da simulação o LOS do sistema permaneceu inadequado, com a MET das contingências L46 e L47 abaixo do limite mínimo. Essas duas contingências com margens inadequadas são dados de entrada para a execução do algoritmo de controle emergencial.

As alterações nas contingências do sistema podem ser observadas na Figura 4.9. O ramo crítico não se altera (cor vermelha), assim como a situação de instabilidade das contingências L42 e L48 (cor alaranjada), no entanto contingências instáveis L46 e L47 passam à estabilidade, no entanto com METs inadequadas (cor azulada) e o conjunto de contingências inadequadas no cenário pré ações de controle preventivo passa a assumir METs adequadas.

Figura 4.9: Resultado pós ações preventivas de controle para o sistema 57 barras.



Fonte: Autoria própria.

4.2.4 RESULTADOS DA ETAPA 4: ANÁLISE DE AÇÕES DE CONTROLE EMERGENCIAL

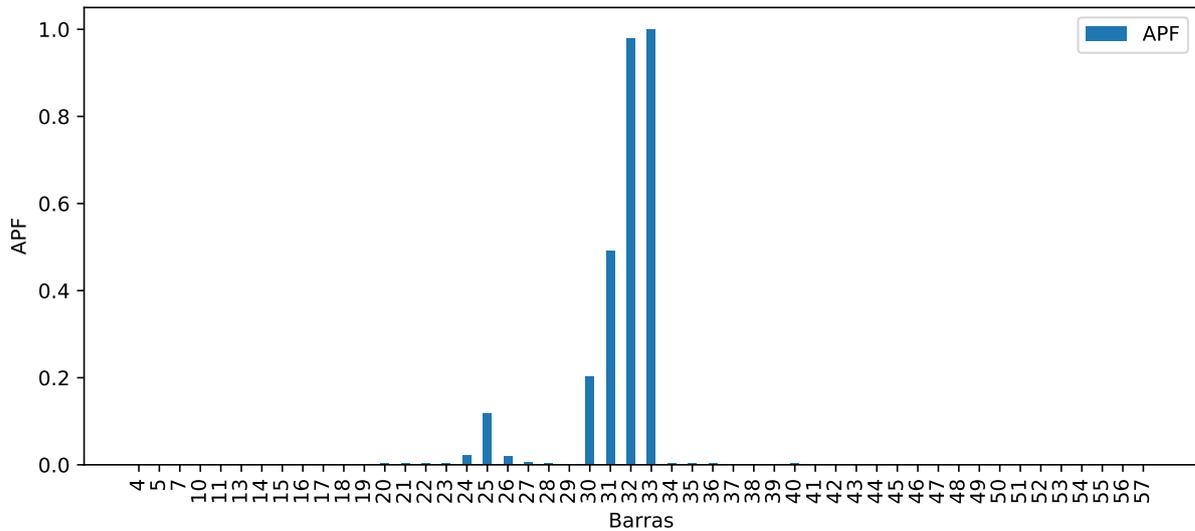
Assim, tendo como entrada as contingências L46 e L47, a análise de ações de controle emergencial é feita. Inicia-se pela contingência L46, cuja margem inicial é $MET_{L46} = 1,0236$. Os APFs das barras PQ desse sistema são apresentados na Figura 4.10.

Percebe-se que o modo de instabilidade crítico da contingência L46 tem como característica uma participação localizada das barras de carga. Com base no critério previamente estabelecido de barra relevante para corte de carga, o corte de $2MW$ é distribuído entre as barras 32 e 33, com uma participação de 49,46% e 50,54%, respectivamente.

Após as ações de controle implementadas a margem da contingência 46 vai para $MET_{L46} = 1,0435$, encerrando a análise das ações de controle emergencial para esse caso. A variação da tensão nas barras para o sistema contingenciado pré e pós ações de controle emergencial é apresentada na Figura 4.11.

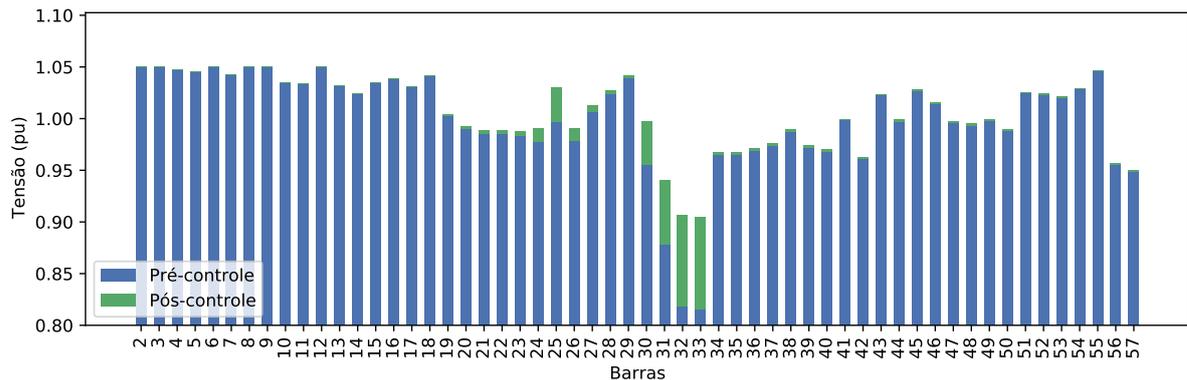
Como a característica do modo de instabilidade é restrito às barras 32 e 33, majoritariamente, as ações de corte de carga, que possuem um efeito local no sistema, são

Figura 4.10: Fatores de participação ativa para as barras de carga do sistema contingenciado L46.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.11: Tensão nas barras pré e pós corte de carga para o sistema contingenciado L46.



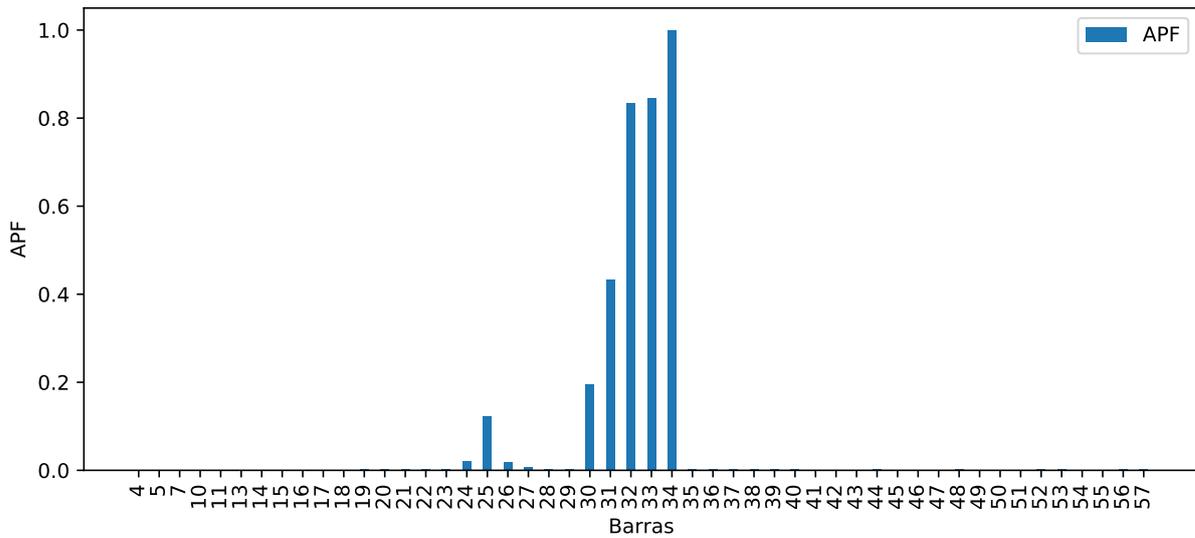
Fonte: Autoria própria.

eficazes para aumentar a MET do sistema e melhorar o perfil de tensão nas barras.

De maneira análoga, a análise é feita para a contingência L47. A margem inicial do sistema é $MET_{L47} = 1,0236$ e para esse caso são necessárias duas iterações de corte de carga para que o sistema chegue a condições aceitáveis de segurança. Assim, o corte total ao final da análise é de $4MW$. Analisando os APFs para esse sistema contingenciado, que são apresentados na Figura 4.12, percebe-se também um característica local do modo de instabilidade, porém agora abrangendo também a barra 34 além das barras 32 e 33.

Assim, conforme os critérios de relevância estabelecidos, o primeiro corte de carga de $2MW$ é distribuído entre as barras 32, 33 e 34 segundo as participações 31,30%, 31,89% e 36,81%, respectivamente. Ao final desse primeiro corte a margem da contingência é $MET_{L47} = 1.0362$.

Figura 4.12: Fatores de participação ativa para as barras de carga do sistema contingenciado L47.

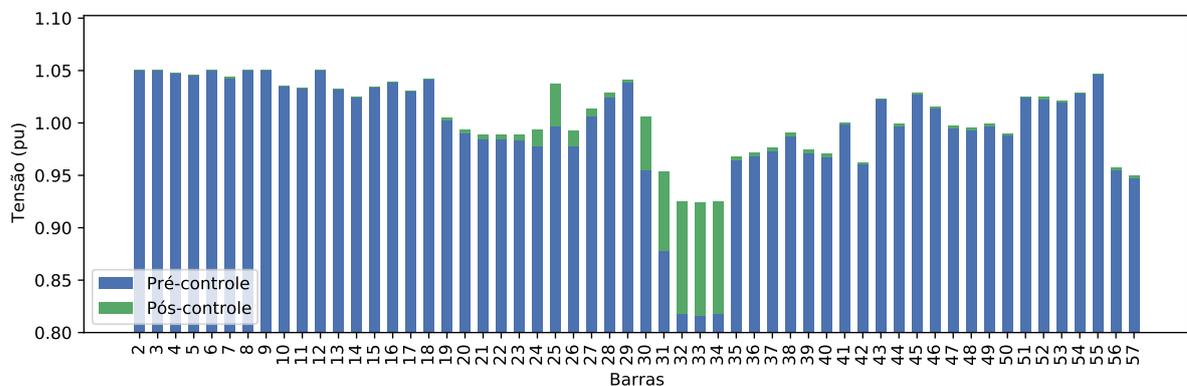


Fonte: Autoria própria.

Como os APFs para a contingência L47 não variam de maneira significativa após o primeiro corte de carga, a segunda iteração de corte, também de magnitude $2MW$ é distribuída entre as barras 32, 33 e 34 conforme as participações de 31,11%, 31,55% e 37,34%, respectivamente. Após essa segunda iteração de corte a margem do sistema passa a ser $MET_{L47} = 1,0485$, encerrando a análise de ações de controle emergencial para a contingência L47 e para todo o sistema. A variação da tensão nas barras do sistema para o sistema contingenciado antes das ações de controle e após as duas iterações que totalizam $4MW$ de corte de carga é apresentada na Figura 4.13.

De maneira similar à contingência L46 a ação local do corte de carga nas barras com alta participação no modo de instabilidade é eficaz. Assim, encontra-se na análise modal um

Figura 4.13: Tensão nas barras pré e pós corte de carga para o sistema contingenciado L47.



Fonte: Autoria própria.

método de baixa complexidade e alta eficácia para análise de ações emergenciais em sistemas contingenciados, uma vez as ações de controle refletem diretamente nas barras mais críticas do modo de instabilidade crítico do sistema, obtendo resultados oportunos e de rápida resposta computacional.

4.3 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE RANQUEAMENTO

Partindo para a comparação dos três ranqueamentos obtidos via método proposto de extrapolação linear, via autovalor mínimo e via FVSI, apresenta-se nas Tabelas 4.6 a 4.8 os resultados para os sistemas 14, 30 e 57 barras, respectivamente. Salienta-se que os carregamentos para essas simulações são os casos convencionais (University of Washington, 1999), apresentados nas Tabelas A.1, A.3 e A.5, no Apêndice A. O conjunto reduzido que representa os 10% mais críticos, ou próximos da instabilidade, do conjunto total de contingências é realçado em cinza em cada Tabela. A fim de comparar e analisar os resultados, apresentam-se somente trechos do ranqueamento das contingências. As Tabelas completas de comparação dos métodos de ranqueamento são apresentadas no Apêndice B.

As contingências são apresentadas em cada linha da Tabela, conforme a ordem do ranqueamento obtido por cada método, iniciando da contingência considerada mais crítica, seguindo em ordem até a contingência considerada menos crítica, como indica a coluna da esquerda. Os ranqueamentos das contingências obtidos por cada método são apresentados nas colunas subsequentes, sendo: a primeira coluna de resultados referente ao método proposto pela extrapolação linear dos dois PEE (Método Proposto); a segunda coluna referente a um resultado também feito com base do autovalor crítico da análise modal de cada contingência, no entanto considerando somente o primeiro PEE referente ao carregamento base de cada contingência (Autovalor Crítico); a terceira coluna o resultado do método FVSI consolidado na literatura (FVSI); e a quarta coluna apresenta os ranqueamentos de referência, obtidos via cálculo da MET. Além disso, na última coluna apresenta-se a MET calculada através do fluxo de potência continuado. Ressalta-se que cada valor de MET é referente à contingência apresentada pelo ranqueamento via cálculo da MET, na quarta coluna.

Tabela 4.6: Comparação de parte do ranqueamento obtido para o sistema 14 barras.

Posição Ranqueamento	Método Proposto	Autovalor Crítico	FVSI	Cálculo da MET	MET da contingência
1º (mais crítico)	L1	L1	L10	L1	1,5666
2º	L10	L10	L8	L10	1,6925

3 ^o	L7	L8	L9	L11	2,2924
4 ^o	L15	L2	L14	L15	2,3100
5 ^o	L13	L4	L1	L13	2,3692
...
15 ^o	L6	L6	L15	L6	2,8664
16 ^o	L20	L12	L16	L18	2,9151
17 ^o	L18	L18	L18	L9	2,9744
18 ^o	L9	L20	L19	L19	3,0703
19 ^o	L19	L19	L4	L7	3,0968
20 ^o (menos crítico)	-	-	L5	-	-

Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o conjunto reduzido destacado na Tabela 4.6, percebe-se como as duas contingências mais críticas do ponto de vista da MET (retirada das linhas L1 e L10, respectivamente) são encontradas tanto pelo método proposto, como a partir do ranqueamento que considera somente os autovalores mínimos de cada contingência. Já o método FVSI identifica a segunda contingência mais crítica (L10), no entanto a classifica como a mais crítica. Enquanto a contingência L1 é colocada em quinto lugar por esse método.

Destaca-se o fato de que os resultados do FVSI compreendem uma contingência a mais na análise. Isso se dá pelo fato de que a métrica FVSI é feita com base somente na topologia do sistema, calculando o índice linha a linha, enquanto os outros dois métodos e o valor de referência calculado via MET são executados somente para as contingências que possuem PEE. Assim, as contingências faltantes nas Tabelas 4.6 a 4.8 são referentes aos casos instáveis.

Para o método proposto, as contingências que incidem em ilhamento são consideradas as mais críticas e as que não possuem ponto de equilíbrio são a segunda categoria mais crítica. Assim, somente depois dessas duas classificações, entra o ranqueamento apresentado nas Tabelas 4.6 a 4.8, válidos somente para as contingências com PEE. Como as contingências que não possuem ponto de equilíbrio não são analisadas, não sendo possível compreender quão distantes elas estão de um ponto de equilíbrio estável, não são feitos ranqueamentos dessas contingências dentro do conjunto das contingências instáveis. Do mesmo modo, os ramos críticos que resultam em ilhamento não são ranqueados entre si e por isso não compõem as Tabelas de resultados apresentadas.

Para o sistema de 14 barras somente a contingência da linha L14 não possui PEE, devido ao ilhamento que ocorre na retirada dessa linha. Logo, considerando todos os casos

contingenciados, esse seria o mais crítico. Ainda assim, o método FVSI o identifica como a quarta pior contingência.

Para o sistema de 30 barras apresentado na Tabela 4.7 o método proposto continua identificando adequadamente as piores contingências do sistema, seguindo como janela de análise o conjunto reduzido que compõe os 10% das piores contingências do sistema, deixando de identificar somente a contingência L38 (a quarta pior) e ranqueando a contingência L37 nessa posição. No entanto, tendo como objetivo encontrar somente a pior contingência do sistema dentro do conjunto reduzido, o método proposto tem êxito.

Tabela 4.7: Comparação de parte do ranqueamento obtido para o sistema 30 barras.

Posição Ranqueamento	Método Proposto	Autovalor Crítico	FVSI	Cálculo da MET	MET da contingência
1 ^o (mais crítico)	L36	L1	L15	L36	1,2424
2 ^o	L1	L15	L11	L1	1,4146
3 ^o	L26	L36	L12	L37	1,5347
4 ^o	L37	L2	L13	L38	1,5793
5 ^o	L15	L4	L8	L15	1,7343
6 ^o	L14	L11	L36	L14	1,7437
7 ^o	L38	L6	L16	L35	1,7967
8 ^o	L25	L14	L34	L31	1,8023
9 ^o	L33	L7	L38	L33	1,8041
10 ^o	L10	L5	L1	L25	1,8178
...
35 ^o	L4	L32	L4	L20	1,9743
36 ^o	L21	L21	L35	L9	1,9759
37 ^o	L20	L20	L23	L23	1,9775
38 ^o	L23	L23	L40	L26	1,9821
39 ^o	-	-	L6	-	-
40 ^o	-	-	L29	-	-
41 ^o (menos crítico)	-	-	L41	-	-

Fonte: Autoria própria.

Para esse sistema-teste percebe-se que utilizar somente o autovalor crítico para o ponto de operação inicial das contingências não apresenta o mesmo desempenho do método proposto, mas ainda assim serve como método para a obtenção da pior contingência dentro do conjunto reduzido.

De maneira análoga ao sistema 14 barras, no sistema 30 barras existem casos de ilhamento e contingências que não possuem PEE e que não compõe o ranqueamento apresentado na Tabela 4.7, a não ser pelo ranqueamento via FVSI. Essas contingências são associadas a casos de ilhamento e são a L13, L16 e L34.

O método FVSI apresenta resultados bem discrepantes aos obtidos via cálculo da MET. Mesmo desconsiderando a classificação da contingência L13, tida como não convergente, e retirada dos outros ranqueamentos, ainda assim o método FVSI possui um desempenho pobre, se comparado aos outros métodos e à própria referência.

Para o sistema 57 barras apresentado na Tabela 4.8, o desempenho tanto do método proposto como do ranqueamento via autovalor crítico é similar, sendo que o método proposto estima um ranqueamento exatamente igual ao da referência via MET para o conjunto dos oito piores casos (10%).

Tabela 4.8: Comparação de parte do ranqueamento obtido para o sistema 57 barras.

Posição Ranqueamento	Método Proposto	Autovalor Crítico	FVSI	Cálculo da MET	MET da contingência
1º (mais crítico)	L41	L50	L11	L41	1,0075
2º	L50	L41	L46	L50	1,0151
3º	L49	L49	L54	L49	1,0240
4º	L43	L43	L66	L43	1,0304
5º	L40	L40	L35	L40	1,0471
6º	L39	L35	L36	L39	1,0648
7º	L35	L15	L25	L35	1,0673
8º	L36	L36	L64	L36	1,0701
9º	L11	L39	L55	L33	1,0737
10º	L33	L53	L15	L38	1,0801
...
70º	L19	L7	L61	L76	1,1136
71º	L15	L68	L53	L51	1,1136
72º	L21	L67	L28	L52	1,1136
73º	L7	L76	L16	L73	1,1136
74º	L9	L32	L37	L68	1,1136
75º	L63	L52	L31	L67	1,1142
76º	-	-	L51	-	-
77º	-	-	L33	-	-
78º	-	-	L52	-	-

79°	-	-	L32	-	-
80° (menos crítico)	-	-	L6	-	-

Fonte: Autoria própria.

Embora o ranqueamento feito somente com um autovalor crítico de cada contingência obtenha desempenhos semelhantes ao método da extrapolação linear aqui proposto, a análise estatística apresentada na seção 4.1 não apresenta bons resultados quando se utiliza somente um PEE. Desse modo, justifica-se o cálculo do PEE adicional na análise de contingências.

Novamente neste caso, o resultado obtido via FVSI não foi satisfatório, obtendo respostas muito diferentes do que é esperado em termos de menores margens de estabilidade de tensão. Para este sistema a linha crítica cuja retirada causa ilhamento é a L45 e as contingências instáveis são as L42, L46, L47 e L48. Desse modo, ressalta-se que na janela das piores contingências analisadas não existem grandes distorções causadas pelo ranqueamento desses casos instáveis da parte do FVSI, confirmando o desempenho inconsistente do método para a análise da proximidade da instabilidade pela MET.

Aqui, vale comentar que o índice FVSI possui um resultado muito similar ao índice L (JASMON; LEE, 1993) e também similar ao índice calculado com base nos fatores de participação de ramo da análise modal (DOROUDI *et al.*, 2018; BULAT *et al.*, 2021). Assim, fica evidente a contribuição do método desenvolvido neste trabalho, a saber o ranqueamento de contingências que apresenta resultados orientados à proximidade da instabilidade de tensão em termos de MET, diferentemente dos métodos consolidados na literatura citados neste trabalho.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia de análise de contingências e ações de controle aplicada ao estudo de segurança estática de tensão no contexto da análise em tempo real. Dentro da análise de contingências, propôs-se um método de ranqueamento de contingências fundamentado na análise modal dos sistemas contingenciados. Além de ranquear e classificar as contingências mais severas, a metodologia apresenta como sub-produtos os fatores de participação ativos e reativos das barras, que são reaproveitados para o método de análise de ações de controle preventivo e emergencial.

O método de ranqueamento de contingências proposto obteve resultados satisfatórios quando comparado com o ranqueamento feito via cálculo da MET, apresentando uma representação melhor da proximidade da instabilidade do que métodos/índices consolidados na literatura (L, FVSI, PI). Uma análise estatística feita através de uma simulação de Monte Carlo confirmou a eficácia do método para diferentes configurações de carregamento dos sistemas-teste estudados.

Os critérios de criticidade utilizados no algoritmo de ranqueamento consideraram somente aspectos de estabilidade de tensão associados à proximidade do ponto de máximo carregamento. Uma possível aplicação e desenvolvimento futuro do método proposto pode envolver a adição de modelagens de risco e probabilidade de ocorrência de contingências, a fim de melhor restringir os subconjuntos de contingências mais relevantes para análise, além de orientar as ações de controle preventivo por essas contingências de maior risco e impacto na instabilidade do sistema.

O algoritmo de análise de ações de controle utilizou as ferramentas apresentadas no trabalho, propondo de maneira eficaz, e sem o uso de técnicas de otimização, estratégias de controle preventivo e emergencial. Embora a análise de ações de controle feita de maneira iterativa, sugerindo ações de controle passo a passo e verificando o impacto dessas ações no sistema, não seja uma solução que busca um ponto ótimo, é uma alternativa adequada para a operação em tempo real devido ao rápido processamento e análise das estratégias de controle

disponíveis.

Para outros contextos operacionais e de análise, trabalhos futuros podem agregar a metodologia proposta neste trabalho, a modelagens e métodos de otimização, a fim de encontrar melhores resultados na etapa de análise de ações de controle. Nesse caso, os fatores de participação obtidos via análise modal, assim como os próprios autovalores da matriz jacobiana, podem servir como direcionadores da modelagem de otimização, a fim de acelerar a busca da solução ótima. Destaca-se, inclusive, a possibilidade de aplicação da metodologia proposta em análises de planejamento.

Além das possibilidades apresentadas para o desenvolvimento futuro deste trabalho, destaca-se a possibilidade de integração de outras ferramentas de ranqueamento e análise de contingências à metodologia proposta, como métodos diretos de obtenção da MET, ou métodos de cálculo aproximado, como o *look-ahead*. No algoritmo de análise de ações de controle, existe o potencial para explorar outras estratégias e dispositivos de controle agregados à rede, como *taps* de transformadores, redespacho de potência ativa como estratégia preventiva ou emergencial e dispositivos FACTS. Além disso, através de ferramentas de análise de sistemas instáveis, pode-se aplicar o método de análise de ações de controle emergencial para esses casos, propondo cortes de carga a serem implementados imediatamente após a ocorrência da contingência, a fim de que o sistema não chegue a perder sua estabilidade.

REFERÊNCIAS

- AFFONSO, C. M.; DA SILVA, L. C. P. Potential benefits of implementing load management to improve power system security. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Elsevier Ltd, v. 32, n. 6, p. 704–710, 2010. ISSN 01420615.
- AFFONSO, C. M.; DA SILVA, L. C. P.; LIMA, F. G.; SOARES, S. MW and MVar management on supply and demand side for meeting voltage stability margin criteria. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 3, p. 1538–1545, 2004. ISSN 08858950.
- AJJARAPU, V. **Computational Technique for Voltage Stability Assessment and Control**. [S.l.]: Springer, 2006. 256 p. ISBN 9780387260808.
- ARIEF, A. Optimal placement of distributed generations with modified P-V Modal Analysis. **Proceeding - 2014 Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics, MICEEI 2014**, IEEE, n. November, p. 200–204, 2014.
- ARIEF, A.; NAPPU, M. B.; DONG, Z. Y.; ARIEF, M. Under voltage load shedding incorporating bus participation factor. **2010 9th International Power and Energy Conference, IPEC 2010**, IEEE, p. 561–566, 2010.
- ARYA, L. D.; SAKRAVDIA, D. K.; KOTHARI, D. P. Corrective rescheduling for static voltage stability control. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 27, n. 1, p. 3–12, 2005. ISSN 01420615.
- BULAT, H.; FRANKOVIĆ, D.; VLAHINIĆ, S. Enhanced Contingency Analysis—A Power System Operator Tool. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 923, 2021. ISSN 19961073.
- CHIANG, H. D.; JIN, L.; VARGHESE, M.; GHOSH, S.; LI, H. Linear and nonlinear methods for contingency analysis in on-line voltage security assessments. **2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting, PES '09**, IEEE, p. 1–6, 2009.
- CHIANG, H. D.; WANG, C. S.; FLUECK, A. J. Look-ahead voltage and load margin contingency selection: Functions for large-scale power systems. **IEEE Power Engineering Review**, v. 17, n. 2, p. 54, 1997. ISSN 02721724.
- CHOU, H. M.; BUTLER-PURRY, K. L. Investigation of voltage stability in unbalanced distribution systems with DG using three-phase current injection based CPF. In: **2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition**. [S.l.]: IEEE, 2014. p. 1–5. ISBN 9781479959044. ISSN 19449933.
- DA SILVA, L. C. P. **Uma Expansão dos Métodos de Curvas-PV e de Análise Modal Estática para o Estudo da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica**. 143 p. Tese (Doutorado) — Unicamp - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2001.
- DA SILVA, L. C. P.; DA COSTA, V. F.; XU, W. Preliminary Results on Improving the Modal Analysis Technique for Voltage Stability Assessment. In: **2000 Power Engineering Society Summer Meeting**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 1689–1699. ISBN 9788578110796. ISSN 1098-6596.

DA SILVA, L. C. P.; WANG, Y.; DA COSTA, V. F.; XU, W. Assessment of generator impact on system power transfer capability using modal participation factors. v. 149, n. 5, 2002.

DANISH, M. S. S.; YONA, A.; SENJYU, T. Voltage stability assessment index for recognition of proper bus for load shedding. **Proceedings - 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, ISEEE 2014**, IEEE, v. 1, p. 636–639, 2014.

DJARI, M. A.; BENASLA, L.; RAHMOUNI, W. Voltage stability assessment using the V-Q sensitivity and modal analyses methods. **2017 5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes, ICEE-B 2017**, p. 1–6, 2017.

DOROUDI, A.; NASRABADI, A. M.; RAZANI, R. Two novel static and dynamic voltage stability based indexes for power system contingency ranking. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 12, n. 8, p. 1831–1837, 2018. ISSN 17518687.

EJEBE, G. C.; IRISARRI, G. D.; MOKHTARI, S.; OBADINA, O.; RISTANOVIC, P.; TONG, J. Methods for contingency screening and ranking for voltage stability analysis of power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 11, n. 1, p. 350–356, 1995. ISSN 08858950.

EJEBE, G. C.; WOLLENBERG, B. F. Automatic contingency selection. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-98, n. 1, p. 97–109, 1979. ISSN 00189510.

GAO, B.; MORISON, G. K.; KUNDUR, P. Voltage Stability Evaluation using Modal Analysis. **IEEE Power Engineering Review**, v. 12, n. 11, p. 41, 1992. ISSN 02721724.

GAO, B.; MORISON, M. I. G. R. Analysis for Increasing Voltage Stability Margins. **Modal Analysis**, 1993.

HARRIS, C. R. *et al.* Array programming with NumPy. **Nature**, Springer Science and Business Media LLC, v. 585, n. 7825, p. 357–362, set. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>>.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, IEEE COMPUTER SOC, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.

JALILZADEH, S.; HOSSEINI, S. H.; DERAFFSHIAN-MARAM, M. Optimal load shedding to prevent voltage instability based on multi-objective optimization using modal analysis and PSO. **2010 International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2010**, IEEE, p. 371–376, 2010.

JASMON, G. B.; LEE, L. H. New contingency ranking technique incorporating a voltage stability criterion. **IEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution**, v. 140, n. 2, p. 87–90, 1993. ISSN 01437046.

JEYANTHY, P. A.; DEVARAJ, D. Optimal Reactive Power Dispatch for Voltage Stability Enhancement Using Real Coded Genetic Algorithm. **International Journal of Computer and Electrical Engineering**, v. 2, n. 4, p. 734–740, 2010. ISSN 17938163.

KHALIL, H. K. **Nonlinear Systems**. 3. ed. New Jersey: Prentive Hall, 1996.

KOPCAK, I.; DA SILVA, L. C. P.; DA COSTA, V. F.; NATURESA, J. S. Transmission systems congestion management by using modal participation factors. **2003 IEEE Bologna PowerTech - Conference Proceedings**, v. 2, p. 6–11, 2003.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.

KUNDUR, P. *et al.* Definition and classification of power system stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, 2004. ISSN 08858950.

MARAM, M. D.; AMJADY, N. A new two-stage framework for voltage stability enhancement incorporating preventive and corrective control actions. **International transactions on electrical energy systems**, v. 25, p. 1492–1521, 2015. ISSN 03787796.

MCKINNEY Wes. Data Structures for Statistical Computing in Python. In: WALT Stéfan van der; MILLMAN Jarrod (Ed.). **Proceedings of the 9th Python in Science Conference**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 56 – 61.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

MUSIRIN, I.; ABDUL RAHMAN, T. K. On-line voltage stability based contingency ranking using fast voltage stability index (FVSI). **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference**, v. 2, n. ASIA PACIFIC, p. 1118–1123, 2002. ISSN 21608563.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Manual de procedimentos da operação: Referência Técnica. Conceitos e entendimento da Região de Segurança para uso em Tempo Real**. [S.l.], 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de rede: Submódulo 2.3 Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos**. [S.l.], 2020.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de rede: Submódulo 2.5 Critérios para operação**. [S.l.], 2020.

PAI, M. A.; SAUER, P. W.; LESIEUTRE, B. C.; ADAPA, R. Structural Stability in Power Systems - Effect of Load Models. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 1562–1572, 1995. ISSN 15582256.

RHEINBOLDT, W. C. . Solution Fields of Nonlinear Equations and Continuation Methods. **SIAM Journal on Numerical Analysis**, v. 17, n. 2, p. 221–237, 1980.

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. **Simulation and the Monte Carlo Method**. 2. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2008. ISBN 9780470230381.

TAYLOR, C. W. **Power System Voltage Stability**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994.

The pandas development team. **pandas-dev/pandas: Pandas**. Zenodo, fev. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>>.

THEODORO, E. A.; BENEDITO, R. A.; LONDON, J. B.; ALBERTO, L. F. Algebraic-graph method for identification of islanding in power system grids. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Elsevier Ltd, v. 35, n. 1, p. 171–179, 2012. ISSN 01420615.

TUAN, T. Q.; FANDINO, J.; HADJSAID, N.; SABONNADIÈRE, J. C.; VU, H. Emergency Load Shedding to Avoid Risks of Voltage Instability using Indicators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 1, p. 341–351, 1994. ISSN 1098-6596.

University of Washington. **Power Systems Test Case Archive**. [S.l.], 1999. Disponível em: <<http://labs.ece.uw.edu/pstca/>>.

VAN CUTSEM, T.; VOURNAS, C. **Voltage Stability of Electric Power Systems**. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 1998.

WANG, L.; CHIANG, H. D. Toward Look-ahead Line Switching for Enhancing Static Voltage Stability. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, v. 2019-August, p. 12–16, 2019. ISSN 19449933.

WANG, L.; CHIANG, H. D. Group-Based Line Switching for Enhancing Contingency-Constrained Static Voltage Stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 35, n. 2, p. 1489–1498, 2020. ISSN 15580679.

APÊNDICE A - SISTEMAS-TESTE

Os dados de barra e linhas dos sistemas-teste utilizados nas simulações são apresentados nas Tabelas A.1 a A.6. Os dados de tensão são dados em pu e graus, enquanto as potências ativas e reativas são dadas em MW e Mvar, respectivamente e as susceptâncias $shunt$ e os demais dados de linha são todos apresentados em pu .

Considera-se que o máximo de bancos de capacitores instalados e disponíveis nas barras é $b_{sh,max} = 3b_{sh}$. Assim, o passo de ação de controle de cada barra com bancos de capacitores é o próprio b_{sh} . O limite de excitação dos geradores é a tensão máxima de $1,05pu$, sendo os passos de ação de controle considerados $0,02pu$.

Tabela A.1: Dados de barra do sistema-teste 14 barras.

Barra	Tipo	V	θ	P_G	Q_G	P_L	Q_L	b_{sh}	FP_L	FP_G
1	θV	1,060	0,000	232,4	-16,5	0,0	0,0	0	0,000	0,000
2	PV	1,045	-4,983	40,0	43,6	21,7	12,7	0	0,091	0,091
3	PV	1,010	-12,725	0,0	25,1	94,2	19,0	0	0,091	0,091
4	PQ	1,018	-10,313	0,0	0,0	47,8	-3,9	0	0,091	0,091
5	PQ	1,020	-8,774	0,0	0,0	7,6	1,6	0	0,091	0,091
6	PV	1,070	-14,221	0,0	12,7	11,2	7,5	0	0,091	0,091
7	PQ	1,062	-13,360	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0,000
8	PV	1,090	-13,360	0,0	17,6	0,0	0,0	0	0,000	0,000
9	PQ	1,056	-14,939	0,0	0,0	29,5	16,6	0,19	0,091	0,091
10	PQ	1,051	-15,097	0,0	0,0	9,0	5,8	0	0,091	0,091
11	PQ	1,057	-14,791	0,0	0,0	3,5	1,8	0	0,091	0,091
12	PQ	1,055	-15,076	0,0	0,0	6,1	1,6	0	0,091	0,091
13	PQ	1,050	-15,156	0,0	0,0	13,5	5,8	0	0,091	0,091
14	PQ	1,036	-16,034	0,0	0,0	14,9	5,0	0	0,091	0,091

Fonte: Adaptado de University of Washington (1999).

Tabela A.2: Dados de linha do sistema-teste 14 barras.

Linha	Barra origem	Barra destino	Tap	R	X	b_{sh}^{km}
1	1	2	1	0,01938	0,05917	0,0528
2	1	5	1	0,05403	0,22304	0,0492
3	2	3	1	0,04699	0,19797	0,0438
4	2	4	1	0,05811	0,17632	0,034
5	2	5	1	0,05695	0,17388	0,0346
6	3	4	1	0,06701	0,17103	0,0128
7	4	5	1	0,01335	0,04211	0
8	4	7	0,978	0	0,20912	0
9	4	9	0,969	0	0,55618	0
10	5	6	0,932	0	0,25202	0
11	6	11	1	0,09498	0,1989	0
12	6	12	1	0,12291	0,25581	0
13	6	13	1	0,06615	0,13027	0
14	7	8	1	0	0,17615	0
15	7	9	1	0	0,11001	0
16	9	10	1	0,03181	0,0845	0
17	9	14	1	0,12711	0,27038	0
18	10	11	1	0,08205	0,19207	0
19	12	13	1	0,22092	0,19988	0
20	13	14	1	0,17093	0,34802	0

Fonte: Adaptado de University of Washington (1999).

Tabela A.3: Dados de barra do sistema-teste 30 barras.

Barra	Tipo	V	θ	P_G	Q_G	P_L	Q_L	b_{sh}	FP_L	FP_G
1	θV	1,060	0,000	260,95	-16,53	0,00	0,00	0	0,000	0,000
2	PV	1,043	-5,350	40,00	49,57	21,70	12,70	0	0,048	0,500
3	PQ	1,021	-7,532	0,00	0,00	2,40	1,20	0	0,048	0,000
4	PQ	1,012	-9,285	0,00	0,00	7,60	1,60	0	0,048	0,000
5	PV	1,010	-14,167	0,00	36,94	94,20	19,00	0	0,048	0,000
6	PQ	1,010	-11,065	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,000	0,000
7	PQ	1,002	-12,866	0,00	0,00	22,80	10,90	0	0,048	0,000
8	PV	1,010	-11,815	0,00	37,22	30,00	30,00	0	0,048	0,000
9	PQ	1,051	-14,110	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,000	0,000
10	PQ	1,045	-15,701	0,00	0,00	5,80	2,00	0,19	0,048	0,000

11	PV	1,082	-14,110	0,00	16,18	0,00	0,00	0	0,000	0,000
12	PQ	1,057	-14,944	0,00	0,00	11,20	7,50	0	0,048	0,000
13	PV	1,071	-14,944	0,00	10,63	0,00	0,00	0	0,000	0,000
14	PQ	1,042	-15,836	0,00	0,00	6,20	1,60	0	0,048	0,000
15	PQ	1,038	-15,928	0,00	0,00	8,20	2,50	0	0,048	0,000
16	PQ	1,044	-15,527	0,00	0,00	3,50	1,80	0	0,048	0,000
17	PQ	1,040	-15,862	0,00	0,00	9,00	5,80	0	0,048	0,000
18	PQ	1,028	-16,543	0,00	0,00	3,20	0,90	0	0,048	0,000
19	PQ	1,026	-16,716	0,00	0,00	9,50	3,40	0	0,048	0,000
20	PQ	1,030	-16,520	0,00	0,00	2,20	0,70	0	0,048	0,000
21	PQ	1,033	-16,143	0,00	0,00	17,50	11,20	0	0,048	0,000
22	PQ	1,033	-16,129	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,000	0,000
23	PQ	1,027	-16,319	0,00	0,00	3,20	1,60	0	0,048	0,000
24	PQ	1,022	-16,496	0,00	0,00	8,70	6,70	0,043	0,048	0,000
25	PQ	1,017	-16,068	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,000	0,000
26	PQ	1,000	-16,487	0,00	0,00	3,50	2,30	0	0,048	0,000
27	PQ	1,023	-15,543	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,000	0,000
28	PQ	1,007	-11,689	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,000	0,000
29	PQ	1,003	-16,773	0,00	0,00	2,40	0,90	0	0,048	0,000
30	PQ	0,992	-17,656	0,00	0,00	10,60	1,90	0	0,048	0,000

Fonte: Adaptado de University of Washington (1999).

Tabela A.4: Dados de linha do sistema-teste 30 barras.

Linha	Barra origem	Barra destino	Tap	R	X	b_{sh}^{km}
1	1	2	1	0,0192	0,0575	0,0528
2	1	3	1	0,0452	0,1652	0,0408
3	2	4	1	0,057	0,1737	0,0368
4	3	4	1	0,0132	0,0379	0,0084
5	2	5	1	0,0472	0,1983	0,0418
6	2	6	1	0,0581	0,1763	0,0374
7	4	6	1	0,0119	0,0414	0,009
8	5	7	1	0,046	0,116	0,0204
9	6	7	1	0,0267	0,082	0,017
10	6	8	1	0,012	0,042	0,009
11	6	9	0,978	0	0,208	0

12	6	10	0,969	0	0,556	0
13	9	11	1	0	0,208	0
14	9	10	1	0	0,11	0
15	4	12	0,932	0	0,256	0
16	12	13	1	0	0,14	0
17	12	14	1	0,1231	0,2559	0
18	12	15	1	0,0662	0,1304	0
19	12	16	1	0,0945	0,1987	0
20	14	15	1	0,221	0,1997	0
21	16	17	1	0,0524	0,1923	0
22	15	18	1	0,1073	0,2185	0
23	18	19	1	0,0639	0,1292	0
24	19	20	1	0,034	0,068	0
25	10	20	1	0,0936	0,209	0
26	10	17	1	0,0324	0,0845	0
27	10	21	1	0,0348	0,0749	0
28	10	22	1	0,0727	0,1499	0
29	21	22	1	0,0116	0,0236	0
30	15	23	1	0,1	0,202	0
31	22	24	1	0,115	0,179	0
32	23	24	1	0,132	0,27	0
33	24	25	1	0,1885	0,3292	0
34	25	26	1	0,2544	0,38	0
35	25	27	1	0,1093	0,2087	0
36	28	27	0,968	0	0,396	0
37	27	29	1	0,2198	0,4153	0
38	27	30	1	0,3202	0,6027	0
39	29	30	1	0,2399	0,4533	0
40	8	28	1	0,0636	0,2	0,0428
41	6	28	1	0,0169	0,0599	0,013

Fonte: Adaptado de University of Washington (1999).

Tabela A.5: Dados de barra do sistema-teste 57 barras.

Barra	Tipo	V	θ	P_G	Q_G	P_L	Q_L	b_{sh}	FP_L	FP_G
1	θV	1,040	0,000	479,4	129,5	55,0	17,0	0	0,024	0,25
2	PV	1,010	-1,196	0,0	-0,7	3,0	88,0	0	0,024	0
3	PV	0,985	-6,022	40,0	1,6	41,0	21,0	0	0,024	0,25
4	PQ	0,980	-7,388	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
5	PQ	0,976	-8,626	0,0	0,0	13,0	4,0	0	0,024	0
6	PV	0,980	-8,767	0,0	3,5	75,0	2,0	0	0,024	0
7	PQ	0,982	-7,711	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
8	PV	1,005	-4,557	450,0	65,1	150,0	22,0	0	0,024	0,25
9	PV	0,980	-9,625	0,0	1,2	121,0	26,0	0	0,024	0
10	PQ	0,983	-11,526	0,0	0,0	5,0	2,0	0	0,024	0
11	PQ	0,973	-10,223	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
12	PV	1,015	-10,483	310,0	126,5	377,0	24,0	0	0,024	0,25
13	PQ	0,982	-9,816	0,0	0,0	18,0	2,3	0	0,024	0
14	PQ	0,974	-9,335	0,0	0,0	10,5	5,3	0	0,024	0
15	PQ	0,987	-7,194	0,0	0,0	22,0	5,0	0	0,024	0
16	PQ	1,013	-8,867	0,0	0,0	43,0	3,0	0	0,024	0
17	PQ	1,017	-5,400	0,0	0,0	42,0	8,0	0	0,024	0
18	PQ	0,971	-12,096	0,0	0,0	27,2	9,8	0,10	0,024	0
19	PQ	0,933	-13,697	0,0	0,0	3,3	0,6	0	0,024	0
20	PQ	0,923	-13,935	0,0	0,0	2,3	1,0	0	0,024	0
21	PQ	0,921	-13,565	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
22	PQ	0,922	-13,501	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
23	PQ	0,920	-13,573	0,0	0,0	6,3	2,1	0	0,024	0
24	PQ	0,909	-13,893	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
25	PQ	0,879	-20,018	0,0	0,0	6,3	3,2	0,059	0,024	0
26	PQ	0,910	-13,533	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
27	PQ	0,938	-11,978	0,0	0,0	9,3	0,5	0	0,024	0
28	PQ	0,956	-10,874	0,0	0,0	4,6	2,3	0	0,024	0
29	PQ	0,971	-10,121	0,0	0,0	17,0	2,6	0	0,024	0
30	PQ	0,856	-20,721	0,0	0,0	3,6	1,8	0	0,024	0
31	PQ	0,824	-21,613	0,0	0,0	5,8	2,9	0	0,024	0
32	PQ	0,837	-20,556	0,0	0,0	1,6	0,8	0	0,024	0
33	PQ	0,834	-20,607	0,0	0,0	3,8	1,9	0	0,024	0
34	PQ	0,875	-15,137	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0

35	PQ	0,882	-14,858	0,0	0,0	6,0	3,0	0	0,024	0
36	PQ	0,893	-14,543	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
37	PQ	0,901	-14,277	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
38	PQ	0,925	-13,346	0,0	0,0	14,0	7,0	0	0,024	0
39	PQ	0,899	-14,333	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
40	PQ	0,891	-14,615	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
41	PQ	0,933	-14,930	0,0	0,0	6,3	3,0	0	0,024	0
42	PQ	0,891	-16,429	0,0	0,0	7,1	4,4	0	0,024	0
43	PQ	0,960	-11,597	0,0	0,0	2,0	1,0	0	0,024	0
44	PQ	0,937	-12,423	0,0	0,0	12,0	1,8	0	0,024	0
45	PQ	0,975	-9,693	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
46	PQ	0,960	-11,305	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
47	PQ	0,938	-12,943	0,0	0,0	29,7	11,6	0	0,024	0
48	PQ	0,934	-13,098	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	0
49	PQ	0,940	-13,332	0,0	0,0	18,0	8,5	0	0,024	0
50	PQ	0,931	-13,912	0,0	0,0	21,0	10,5	0	0,024	0
51	PQ	0,972	-12,873	0,0	0,0	18,0	5,3	0	0,024	0
52	PQ	0,933	-11,903	0,0	0,0	4,9	2,2	0	0,024	0
53	PQ	0,920	-12,682	0,0	0,0	20,0	10,0	0,063	0,024	0
54	PQ	0,940	-12,000	0,0	0,0	4,1	1,4	0	0,024	0
55	PQ	0,970	-10,920	0,0	0,0	6,8	3,4	0	0,024	0
56	PQ	0,883	-16,855	0,0	0,0	7,6	2,2	0	0,024	0
57	PQ	0,874	-17,472	0,0	0,0	6,7	2,0	0	0,024	0

Fonte: Adaptado de University of Washington (1999).

Tabela A.6: Dados de linha do sistema-teste 57 barras.

Linha	Barra origem	Barra destino	Tap	R	X	b_{sh}^{km}
1	1	2	1	0,0083	0,028	0,129
2	2	3	1	0,0298	0,085	0,0818
3	3	4	1	0,0112	0,0366	0,038
4	4	5	1	0,0625	0,132	0,0258
5	4	6	1	0,043	0,148	0,0348
6	6	7	1	0,02	0,102	0,0276
7	6	8	1	0,0339	0,173	0,047
8	8	9	1	0,0099	0,0505	0,0548

9	9	10	1	0,0369	0,1679	0,044
10	9	11	1	0,0258	0,0848	0,0218
11	9	12	1	0,0648	0,295	0,0772
12	9	13	1	0,0481	0,158	0,0406
13	13	14	1	0,0132	0,0434	0,011
14	13	15	1	0,0269	0,0869	0,023
15	1	15	1	0,0178	0,091	0,0988
16	1	16	1	0,0454	0,206	0,0546
17	1	17	1	0,0238	0,108	0,0286
18	3	15	1	0,0162	0,053	0,0544
19	4	18	1	0	0,555	0
20	4	18	1	0	0,43	0
21	5	6	1	0,0302	0,0641	0,0124
22	7	8	1	0,0139	0,0712	0,0194
23	10	12	1	0,0277	0,1262	0,0328
24	11	13	1	0,0223	0,0732	0,0188
25	12	13	1	0,0178	0,058	0,0604
26	12	16	1	0,018	0,0813	0,0216
27	12	17	1	0,0397	0,179	0,0476
28	14	15	1	0,0171	0,0547	0,0148
29	18	19	1	0,461	0,685	0
30	19	20	1	0,283	0,434	0
31	21	20	1	0	0,7767	0
32	21	22	1	0,0736	0,117	0
33	22	23	1	0,0099	0,0152	0
34	23	24	1	0,166	0,256	0,0084
35	24	25	1	0	1,182	0
36	24	25	1	0	1,23	0
37	24	26	1	0	0,0473	0
38	26	27	1	0,165	0,254	0
39	27	28	1	0,0618	0,0954	0
40	28	29	1	0,0418	0,0587	0
41	7	29	1	0	0,0648	0
42	25	30	1	0,135	0,202	0
43	30	31	1	0,326	0,497	0
44	31	32	1	0,507	0,755	0

45	32	33	1	0,0392	0,036	0
46	34	32	1	0	0,953	0
47	34	35	1	0,052	0,078	0,0032
48	35	36	1	0,043	0,0537	0,0016
49	36	37	1	0,029	0,0366	0
50	37	38	1	0,0651	0,1009	0,002
51	37	39	1	0,0239	0,0379	0
52	36	40	1	0,03	0,0466	0
53	22	38	1	0,0192	0,0295	0
54	11	41	1	0	0,749	0
55	41	42	1	0,207	0,352	0
56	41	43	1	0	0,412	0
57	38	44	1	0,0289	0,0585	0,002
58	15	45	1	0	0,1042	0
59	14	46	1	0	0,0735	0
60	46	47	1	0,023	0,068	0,0032
61	47	48	1	0,0182	0,0233	0
62	48	49	1	0,0834	0,129	0,0048
63	49	50	1	0,0801	0,128	0
64	50	51	1	0,1386	0,22	0
65	10	51	1	0	0,0712	0
66	13	49	1	0	0,191	0
67	29	52	1	0,1442	0,187	0
68	52	53	1	0,0762	0,0984	0
69	53	54	1	0,1878	0,232	0
70	54	55	1	0,1732	0,2265	0
71	11	43	1	0	0,153	0
72	44	45	1	0,0624	0,1242	0,004
73	40	56	1	0	1,195	0
74	56	41	1	0,553	0,549	0
75	56	42	1	0,2125	0,354	0
76	39	57	1	0	1,355	0
77	57	56	1	0,174	0,26	0
78	38	49	1	0,115	0,177	0,003
79	38	48	1	0,0312	0,0482	0
80	9	55	1	0	0,1205	0

Fonte: Adaptado de University of Washington (1999).

APÊNDICE B – RESULTADOS DO MÉTODO PROPOSTO

Os resultados referentes ao algoritmo de análise de contingência apresentados parcialmente na seção 4.3 são apresentados na íntegra nas Tabelas B.1 a B.3.

Tabela B.1: Comparação do ranqueamento obtido para o sistema 14 barras.

Posição Ranqueamento	Método Proposto	Autovalor Crítico	FVSI	Cálculo da MET	MET da contingência
1 ^o (mais crítico)	L1	L1	L10	L1	1,5666
2 ^o	L10	L10	L8	L10	1,6925
3 ^o	L7	L8	L9	L11	2,2924
4 ^o	L15	L2	L14	L15	2,3100
5 ^o	L13	L4	L1	L13	2,3692
6 ^o	L3	L15	L17	L20	2,5753
7 ^o	L11	L3	L13	L3	2,6046
8 ^o	L4	L5	L6	L16	2,6281
9 ^o	L5	L9	L2	L17	2,6480
10 ^o	L8	L16	L11	L8	2,6951
11 ^o	L16	L17	L7	L5	2,7194
12 ^o	L2	L13	L12	L4	2,7267
13 ^o	L17	L7	L20	L2	2,7904
14 ^o	L12	L11	L3	L12	2,8542
15 ^o	L6	L6	L15	L6	2,8664
16 ^o	L20	L12	L16	L18	2,9151
17 ^o	L18	L18	L18	L9	2,9744
18 ^o	L9	L20	L19	L19	3,0703
19 ^o	L19	L19	L4	L7	3,0968
20 ^o (menos crítico)	-	-	L5	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.2: Comparação do ranqueamento obtido para o sistema 30 barras.

Posição Ranqueamento	Método Proposto	Autovalor Crítico	FVSI	Cálculo da MET	MET da contingência
1 ^o (mais crítico)	L36	L1	L15	L36	1,2424
2 ^o	L1	L15	L11	L1	1,4146
3 ^o	L26	L36	L12	L37	1,5347
4 ^o	L37	L2	L13	L38	1,5793
5 ^o	L15	L4	L8	L15	1,7343
6 ^o	L14	L11	L36	L14	1,7437
7 ^o	L38	L6	L16	L35	1,7967
8 ^o	L25	L14	L34	L31	1,8023
9 ^o	L33	L7	L38	L33	1,8041
10 ^o	L10	L5	L1	L25	1,8178
11 ^o	L18	L3	L18	L18	1,8582
12 ^o	L31	L12	L25	L30	1,8615
13 ^o	L11	L41	L37	L41	1,8734
14 ^o	L5	L18	L33	L10	1,8845
15 ^o	L6	L8	L27	L11	1,9067
16 ^o	L30	L25	L28	L39	1,9250
17 ^o	L3	L37	L19	L27	1,9251
18 ^o	L35	L38	L31	L40	1,9279
19 ^o	L41	L35	L2	L5	1,9400
20 ^o	L27	L31	L7	L6	1,9403
21 ^o	L40	L9	L3	L12	1,9410
22 ^o	L22	L33	L30	L32	1,9451
23 ^o	L12	L30	L17	L3	1,9458
24 ^o	L24	L27	L14	L2	1,9463
25 ^o	L8	L22	L22	L19	1,9522
26 ^o	L7	L19	L32	L4	1,9538
27 ^o	L17	L17	L26	L22	1,9567
28 ^o	L19	L24	L10	L17	1,9567
29 ^o	L2	L10	L39	L8	1,9589
30 ^o	L28	L28	L5	L28	1,9613
31 ^o	L39	L26	L21	L24	1,9618
32 ^o	L32	L29	L20	L7	1,9688
33 ^o	L9	L40	L9	L29	1,9692

34 ^o	L29	L39	L24	L21	1,9715
35 ^o	L4	L32	L4	L20	1,9743
36 ^o	L21	L21	L35	L9	1,9759
37 ^o	L20	L20	L23	L23	1,9775
38 ^o	L23	L23	L40	L26	1,9821
39 ^o	-	-	L6	-	-
40 ^o	-	-	L29	-	-
41 ^o (menos crítico)	-	-	L41	-	-

Fonte: Autoria própria.

Tabela B.3: Comparação do ranqueamento obtido para o sistema 57 barras.

Posição Ranqueamento	Método Proposto	Autovalor Crítico	FVSI	Cálculo da MET	MET da contingência
1 ^o (mais crítico)	L41	L50	L11	L41	1,0075
2 ^o	L50	L41	L46	L50	1,0151
3 ^o	L49	L49	L54	L49	1,0240
4 ^o	L43	L43	L66	L43	1,0304
5 ^o	L40	L40	L35	L40	1,0471
6 ^o	L39	L35	L36	L39	1,0648
7 ^o	L35	L15	L25	L35	1,0673
8 ^o	L36	L36	L64	L36	1,0701
9 ^o	L11	L39	L55	L33	1,0737
10 ^o	L33	L53	L15	L38	1,0801
11 ^o	L32	L33	L23	L37	1,0801
12 ^o	L31	L1	L76	L44	1,0833
13 ^o	L37	L38	L43	L53	1,0844
14 ^o	L52	L2	L56	L34	1,0894
15 ^o	L76	L3	L29	L60	1,0919
16 ^o	L73	L37	L1	L59	1,0920
17 ^o	L68	L58	L74	L80	1,0934
18 ^o	L51	L34	L42	L72	1,0934
19 ^o	L67	L59	L70	L58	1,0936
20 ^o	L44	L72	L27	L79	1,0981
21 ^o	L60	L60	L67	L57	1,0982
22 ^o	L59	L79	L78	L66	1,0987

23°	L65	L57	L50	L65	1,1007
24°	L80	L17	L72	L71	1,1021
25°	L72	L61	L59	L55	1,1032
26°	L38	L16	L60	L61	1,1033
27°	L58	L66	L9	L8	1,1039
28°	L71	L71	L71	L25	1,1046
29°	L26	L65	L58	L56	1,1049
30°	L66	L29	L20	L22	1,1059
31°	L27	L56	L19	L15	1,1066
32°	L57	L55	L38	L64	1,1068
33°	L28	L25	L7	L29	1,1074
34°	L25	L27	L69	L54	1,1079
35°	L8	L80	L41	L78	1,1080
36°	L64	L44	L65	L74	1,1084
37°	L16	L78	L22	L10	1,1092
38°	L56	L28	L80	L28	1,1096
39°	L17	L64	L8	L77	1,1100
40°	L23	L22	L73	L70	1,1101
41°	L22	L54	L13	L3	1,1101
42°	L70	L8	L18	L13	1,1103
43°	L34	L74	L62	L30	1,1106
44°	L29	L26	L5	L18	1,1106
45°	L61	L77	L30	L23	1,1110
46°	L3	L30	L14	L75	1,1112
47°	L54	L51	L4	L62	1,1113
48°	L14	L10	L48	L69	1,1114
49°	L53	L18	L34	L20	1,1116
50°	L2	L23	L24	L6	1,1119
51°	L1	L70	L26	L17	1,1119
52°	L18	L13	L79	L12	1,1121
53°	L79	L62	L40	L16	1,1121
54°	L55	L6	L12	L19	1,1121
55°	L78	L14	L39	L14	1,1122
56°	L74	L75	L47	L1	1,1124
57°	L10	L63	L49	L27	1,1124
58°	L13	L24	L21	L2	1,1124

59°	L75	L20	L57	L26	1,1125
60°	L24	L5	L75	L24	1,1126
61°	L69	L69	L2	L9	1,1127
62°	L6	L12	L17	L5	1,1127
63°	L30	L4	L68	L7	1,1127
64°	L20	L19	L44	L4	1,1127
65°	L77	L11	L63	L63	1,1127
66°	L5	L31	L10	L21	1,1127
67°	L62	L21	L3	L11	1,1128
68°	L12	L73	L77	L32	1,1132
69°	L4	L9	L45	L31	1,1132
70°	L19	L7	L61	L76	1,1136
71°	L15	L68	L53	L51	1,1136
72°	L21	L67	L28	L52	1,1136
73°	L7	L76	L16	L73	1,1136
74°	L9	L32	L37	L68	1,1136
75°	L63	L52	L31	L67	1,1142
76°	-	-	L51	-	-
77°	-	-	L33	-	-
78°	-	-	L52	-	-
79°	-	-	L32	-	-
80° (menos crítico)	-	-	L6	-	-

Fonte: Autoria própria.