



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de ilha solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Fluxo de Carga Continuado Considerando o Controle de
Intercâmbio Entre Áreas”

HEBERT AVILA CARHUALLANQUI

Orientador: Prof. Dr. Dilson Amancio Alves

Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia - UNESP - Campus
de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para
a obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
Agosto/2012



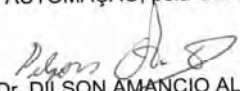
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

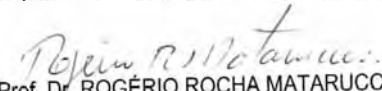
TÍTULO: Fluxo de Carga Continuado Considerando o Controle de Intercâmbio Entre Áreas

AUTOR: HEBERT AVILA CARHUALLANQUI
ORIENTADOR: Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ROGÉRIO ROCHA MATARUCCO
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Centro Universitário de Votuporanga

Data da realização: 18 de agosto de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação

Avila Carhuallanqui, Hebert.

A958f Fluxo de carga continuado considerando o controle de intercâmbio entre áreas / Hebert Avila Carhuallanqui. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2012
125 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2012

Orientador: Dilson Amancio Alves

Inclui bibliografia

1. Controle de intercâmbio entre áreas. 2. Método da continuação.
3. Múltiplas barras de folga. 4. Máxima transferência de potência.

Dedico este trabalho aos meus pais, Lucho e Estela; e aos meus irmãos, Gladys, Ruth, Luis e Ronald.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado força e sabedoria para superar as dificuldades encontradas em todos os caminhos que percorri.

Ao meu orientador, o professor Dr. Dilson Amâncio Alves, pela oportunidade, paciência, disposição, compreensão e orientação ao longo do mestrado.

Ao Prof. Dr. Rubén Romero cuja ajuda foi fundamental para a realização deste objetivo.

Aos meus amigos e companheiros de Laboratório de Pesquisa, Alfredo Bonini Neto e Elisabete de Mello Magalhães, pela amizade e colaboração ao longo do trabalho.

À Universidade Estadual Paulista - UNESP pela infraestrutura oferecida, a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Também agradeço aos colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), por terem me apoiado todos estes anos.

Aos meus companheiros de casa, que são minha família no Brasil.

Finalmente, aos meus companheiros, amigos e minha Família no PERÚ, ainda que distantes, têm-me prestado apoio.

“Se você pensar que pode ou que não pode, de
qualquer forma, você estará certo”

Henry Ford

O cálculo da capacidade de transferência de potência em sistemas interligados é calculado considerando o sistema como uma única área e uma única barra de folga. A máxima potência ativa que poderia ser transferida pelas linhas de intercâmbio, sem problemas relacionados com a estabilidade estática de tensão, é obtida efetuando-se a soma dos correspondentes fluxos nas linhas de intercâmbio no ponto de operação correspondente a máxima potência ativa. Cabe ressaltar que neste caso, o sistema de equações não inclui as equações do controle de intercâmbio entre áreas (CIA). Neste trabalho propõe-se a inclusão do CIA no fluxo de carga continuado de forma a possibilitar com isso a obtenção da capacidade de transferência de potência entre as diversas áreas, considerando múltiplas barras folga por área. Cada área atua como um sistema independente controlando seu intercâmbio no processo de carregamento do sistema. O objetivo é o de mostrar os efeitos resultantes desta inclusão sobre a capacidade de transferência de potência dentro de uma mesma área ou entre as diversas áreas. Utilizando-se o fluxo de carga continuado proposto, apresentam-se os resultados obtidos para os sistemas de IEEE de 9 barras, o New England 30 barras e o IEEE de 118 barras, os quais foram divididos em áreas com o objetivo de evidenciar as diferenças entre as margens de carregamento e de transferência de potência obtidas sem e com as restrições impostas pelo CIA. Foram realizados estudos sobre a capacidade de transferência de potência considerando-se duas formas distintas de carregamento e contingências de ramos do sistema. Dos resultados obtidos se constata a importância da consideração das equações do CIA nas análises relacionadas com a estabilidade estática de tensão, as quais podem conduzir, dependendo do caso e do sistema em análise, ou a um aumento ou a uma redução da capacidade de transferência de potência ativa. As análises também possibilitam uma melhor compreensão dos efeitos do fluxo de circulação, que são fluxos não desejados pelas áreas que não estão envolvidas no processo de transferência de potência, os quais ocorrem devido aos caminhos paralelos existentes.

Palavras chave: Controle de intercâmbio entre áreas. Método da continuação. Múltiplas barras de folga. Planejamento de sistema de potência. Máxima transferência de potência.

ABSTRACT

The calculation of power transfer capability of interconnected systems is calculated considering the system as a single area and a single bus slack. The maximum power active that could be transferred through the tie lines, without the problems related with the static voltage stability is obtained by making the sum of the corresponding flows the tie lines in operation point corresponding the maximum power active. In this case, the system of equations does not include equations of area interchange control (AIC). This work proposes the inclusion of AIC in continuation power flow, with this is possible to obtain the power transfer capacity between different areas, and multiple slacks buses per area. Each area acts as an independent system controlling its exchange in the process of loading system. The objective is to show the effects of this inclusion on power transfer capability within the same area or between different areas. Using the proposed continuation power flow, shows the results obtained in the IEEE 9 buses, New England 30 buses and IEEE 118 buses systems, which were divided in areas with the objective of evidencing the differences between the margins of loading and transfer power obtained with and without the restrictions imposed by the AIC. We realize studies about power transfer capacity considering two different ways of loading the system and branches contingencies of the system. The results obtained show the importance the consideration equations of AIC in the analysis related to the static voltage stability, which may lead, in each case and the system in analysis, an increase or decrease active power transfer capability. The analysis also enables a better understanding of the effects of the loop flow, that are flows unwanted by the areas that are not involved in the process of power transfer due to parallel paths exists.

Keywords— Area interchange control. Continuation power flow. Multiple slack buses. Planning of power systems. Maximum power transfer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Exemplo de um sistema elétrico com n áreas.	24
Figura 2 -	Sistema de 11 barras e 3 áreas, considerando apenas uma barra de folga em cada área (1 e 3).....	26
Figura 3-	Sistema de 11 barras e 3 áreas, considerando 2 barras de folga nas áreas 1 e 3 ...	39
Figure 4-	Convergência para os 3 métodos (a) tensão das barras (b) ângulos das barras. ...	44
Figura 5-	Curva P-V –Regiões de operação	52
Figura 6-	Curva P-V Pós-falta.	53
Figura 7-	Curva Q-V genérica.	54
Figura 8-	Comparação entre os preditores tangente e secante.....	55
Figura 9-	Curva P-V usando λ , V ou θ como parâmetro no passo corretor.	56
Figura 10-	Diagrama Unifilar do Sistema IEEE-9 Barras dividido em 3 áreas.....	69
Figura 11-	Comparação entre as curvas λ - da barra 8 (parâmetro), sem e com o CIA.	70
Figura 12:	(a) Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição. (b) Comparação das variações das potências geradas nas barras folga das áreas 1 e 3 com a variação das perdas das respectivas áreas.	70
Figura 13-	Comparação dos intercâmbios entre áreas, (a) sem controle, (b) com controle. ..	71
Figura 14-	Comparação entre as potências de geração, (a) sem controle de intercâmbio, (b) com controle de intercâmbio entre áreas.....	72
Figura 15-	Comparação da variação da potência gerada na barra slack com a soma das variações das perdas das respectivas áreas.	72
Figura 16-	Representação do sistema New England de 30 barras com a divisão arbitrária das áreas, (a) diagrama unifilar, (b) representação simplificada.	73
Figura 17-	Comparação entre as curvas λ -V da barra 15 sem e com o CIA	74
Figura 18-	Comparação entre os intercâmbios da área 1, sem e com o CIA.....	74
Figura 19-	Comparação entre as potências geradas nas barras de folga, sem e com o CIA...75	
Figura 20-	Comparação das variações das potências geradas nas barras folga das áreas 1 e 2 com a variação das perdas das respectivas áreas.	75
Figura 21-	Comparação da variação da potência gerada na barra slack com a soma das variações das perdas das respectivas áreas.	75
Figura 22-	Diagrama Unifilar do sistema IEEE-9 Barras dividido em 2 áreas	76
Figura 23-	Curvas λ -V da barra 5, sem e com o CIA.	78

Figura 24-	Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.....	78
Figura 25-	Soma das variações de potência ativa geradas pelas barras de folga da área 2. ...	79
Figura 26-	Efeito da transferência de potência ativa na variação da potência gerada pelas barras de folga da área 2.	79
Figura 27-	Comparação da variação de potência ativa gerada na barra de folga da área 1 (barra 1) com a variação da perda total de potência ativa da área 1.	80
Figura 28-	Variação do intercâmbio da área 1, sem e com o CIA.....	80
Figura 29-	Variação das potências ativas dos geradores, sem o CIA.	80
Figura 30-	Representação do sistema New England de 30 barras com a divisão arbitrária das áreas.	81
Figura 31-	(a) intercâmbios entre as áreas e (b) curvas λ -V da barra 15, sem e com o CIA..	83
Figura 32-	Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.....	83
Figura 33-	Comparação entre a variação da potência gerada pela barra slack 30 e a variação das perdas ativas da área 1.	84
Figura 34-	Variações das potências ativas geradas pelas barras folga área 2, com o CIA.	84
Figura 35-	Efeito da transferência de potência ativa na variação da potência gerada pelas barras de folga da área 2.	84
Figura 36-	Comparação entre a potência gerada da barra de folga 19, 20 e 23 sem controle	85
Figura 37-	Efeito da transferência de potência ativa na variação da potência gerada pela barra de folga da área 2: (a) caso 1 e (b) caso 2.	87
Figura 38-	Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição: (a) caso 1 e (b) caso 2.....	87
Figura 39-	Comparação entre as curvas λ -V da barra 5 com os dois casos.....	89
Figura 40-	Curvas dos geradores (2 e 3) para o caso 1: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.	89
Figura 41-	Curvas dos geradores (2 e 3) para o caso 2: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.	90
Figura 42-	Comparação entre as curvas λ -V da barra 15 com os dois casos estabelecidos considerando o CIA.	91
Figura 43-	Comparação entre as duas formas de carregamento da barra de carga 27. (a) caso 1 e (b) caso2	92
Figura 44-	Curvas dos geradores (19, 20, 22 e 23) para o caso 1: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.	93
Figura 45-	Curvas dos geradores (19, 20, 22 e 23) para o caso 2: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.	94

Figura 46-	Representação do sistema IEEE de 118 barras com a divisão arbitrária das áreas, (a) diagrama unifilar, (b) representação simplificada.	95
Figura 47-	Curvas $V-\lambda$ da barra 82: com e sem o CIA.	97
Figura 48-	Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.	98
Figura 49-	Variação do intercâmbio das áreas com o CIA.	98
Figura 50-	Soma dos incrementos de potência ativa geradas pelas barras da área 2.	98
Figura 51-	Comparação da variação de potência ativa gerada na barra de folga da área 1 e 2 com a variação da perda total de potência ativa da área 1 e 2.	99
Figura 52-	Soma das variações de potência ativa geradas pelas barras de folga da área 3. ...	99
Figura 53-	Variação da potência ativa do gerador 69 (referência), sem o CIA.	99
Figura 54-	Curvas $V-\lambda$ da barra 82: com o CIA para os dois casos.	100
Figura 55-	Comparação entre as contingências internas (a) área 1 (b) área 2 e 3.	102
Figura 56-	Comparação entre as contingências das linhas de intercâmbio.	102
Figura 57-	Curvas $V-\lambda$ da barra 82: com e sem o controle de intercâmbio entre áreas.	104
Figura 58-	Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.	104
Figura 59-	Variação do intercâmbio das áreas com o controle de intercâmbio entre áreas.	105
Figura 60-	Comparação da variação de potência ativa gerada na barra de folga da área 1 e 2 com a variação da perda total de potência ativa da área 1 e 2.	105
Figura 61-	Soma das variações de potência ativa geradas pelas barras de folga da área 3. .	105
Figura 62-	Variação da potência ativa do gerador 69 (referência): sem o controle de intercâmbio entre áreas.	106
Figura 63-	Curvas $V-\lambda$ da barra 95: com o controle de intercâmbio entre áreas para os dois casos.	107
Figura 64-	Contingência no linhas do sistema.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.	42
Tabela 2-	Intercâmbios líquidos, considerando uma barra de folga por Área.	43
Tabela 3-	Trajetória de convergência em p.u. do sistema utilizando as três metodologias e considerando apenas uma barra folga por área	43
Tabela 4-	Intercâmbios líquidos, considerando duas barras de folga por Área.	45
Tabela 5-	Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.	45
Tabela 6-	Fluxos de potência nas linhas de intercâmbio do sistema.....	46
Tabela 7-	Intercâmbios líquidos, considerando os limites de geração de potência ativa.	47
Tabela 8-	Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.	47
Tabela 9-	Fluxos de potência nas linhas de intercâmbio do sistema.....	47
Tabela 10-	Intercâmbios líquidos, considerando os limites de geração de potência ativa.	48
Tabela 11-	Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.	49
Tabela 12-	Fluxos de potência nas linhas de intercâmbio do sistema.....	49
Tabela 13-	Carga base das barras escolhidas para o incremento das cargas.....	91
Tabela 14-	Potência reativa dos geradores para ambos casos, com mesmo fator de carregamento e considerando o caso 2 próximo ao PMC.....	93
Tabela 15-	Potência reativa dos geradores para caso 1 próximo ao PMC.	93
Tabela 16-	Carga base das barras escolhidas para se incrementar as cargas.	100
Tabela 17-	Carga base das barras escolhidas para se incrementar as cargas.	106
Tabela 18-	Dados de barra do sistema de 9 barras.....	116
Tabela 19-	Dados de linha do sistema de 9 barras	116
Tabela 20-	Dados de barra do sistema de 11 barras.....	117
Tabela 21-	Dados de linha do sistema de 11 barras	117
Tabela 22-	Dados de barra do sistema de 30 barras.....	118
Tabela 23-	Dados de linha do sistema de 30 barras	119
Tabela 24-	Dados de barra do sistema de 118 barras.....	120
Tabela 25-	Dados de linha do sistema IEEE-118 barras	122

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	vetor ângulo das tensões nodais;
V	vetor magnitude das tensões nodais;
λ	fator de carregamento;
G	parte real da matriz de admitância;
B	parte imaginaria da matriz de admitância;
J	matriz Jacobiana;
g	condutância serie da linha de transmissão;
b	susceptância serie da linha de transmissão;
$P+jQ$	potência complexa de injeção nas barras;
$P^{esp}+jQ^{esp}$	potência complexa especificada;
$P_{km}+jQ_{km}$	fluxo de potência complexa no ramo k-m;
PI^{calc}	potência de intercâmbio da área, calculada a cada iteração;
PI^{esp}	potência especificada de intercâmbio da área;
$\Delta\theta$	vetor de correção de ângulo da tensão;
ΔV	vetor de correção de magnitude da tensão;
ΔP	vetor de resíduos de potência ativa;
ΔQ	vetor de resíduos de potência reativa.

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

PMC	ponto de máximo carregamento;
FC	fluxo de carga convencional;
FCC	fluxo de carga continuado;
CIA	controle de intercâmbio entre áreas;
PM	ponto de medição;
SEE	Sistema Elétrico de Potência;
p.u.	por unidade;
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	Introdução Geral	17
1.2	Objetivos do Trabalho.....	20
1.3	Estrutura do Trabalho	20
2.	CONTROLE DE INTERCÂMBIO ENTRE ÁREAS.....	22
2.1	Introdução.....	22
2.2	Considerações Iniciais	23
2.3	Metodologia Utilizando a Técnica de Ajuste Alternados (STAGG; EL-ABIAD, 1968)	25
2.3.1	Exemplo Ilustrativo da Técnica de Ajuste Alternados	26
2.4	Metodologia Descrita em (MONTICELLI, 1983)	29
2.4.1	Exemplo Ilustrativo da Metodologia Descrita em Monticelli	31
2.5	Metodologia Descrita em (DOS SANTOS et al., 2004)	33
2.5.1	Uma Barra de Folga por Área.....	33
2.5.1.1	Exemplo Ilustrativo da Metodologia Proposta por Dos Santos.....	35
2.5.2	Múltiplas Barras de Folga Numa mesma Área.....	37
2.5.2.1	Exemplo Ilustrativo Considerando Múltiplas Barras de Folga Numa mesma Área	38
2.6	Consideração dos Limites de Geração de Potência Ativa das Barras Folga	41
2.7	Comparação Entre as Metodologias para Controle de Intercâmbio Entre Áreas no Problema de Fluxo de Carga.	41
2.7.1	Uma Barra de Folga por Área Considerando o CIA.	42
2.7.2	Múltiplas Barras de Folga por Área Considerando o CIA.	45
2.7.2.1	Múltiplas Barras de Folga por Área, Considerando os Limites de Geração de Potência Ativa das Barras 1 e 7.....	46
2.7.2.2	Múltiplas barras de Folga por Área, Considerando os Limites de Geração de Potência Ativa das Barras 1 e 4.....	48
3.	ANÁLISE DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO	50
3.1	Introdução.....	50
3.2	Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência	50

3.3	Curva P-V.....	51
3.4	Curva Q-V	53
3.5	Fluxo de Carga Associado ao Método da Continuação	54
3.5.1	Passo Preditor	54
3.5.2	Preditor Polinomial de Ordem Zero	55
3.5.3	Passo Corretor	56
4.	CÁLCULO DOS LIMITES DE INTERCÂMBIO ENTRE ÁREAS	57
4.1	Introdução.....	57
4.2	Cálculo dos Limites de Intercâmbio entre Áreas.....	58
4.2.1	Considerando o Incremento de Cargas só de Potência Ativa.....	58
4.2.1.1	Fluxo de Carga Continuado.....	60
4.2.2	Considerando o Incremento de Carga de Potência Ativa e Reativa com Fator de Potência Constante	
4.2.2.1	Fluxo de Carga Continuado.....	62
4.2.3	Técnica de Parametrização Adotada.....	62
4.2.3.1	Parametrização pelo Fator de Carregamento (λ).....	62
4.2.3.2	Parametrização pela Magnitude de Tensão de uma Barra k Qualquer (V_k).....	63
4.3	Fluxo de Carga Continuado Considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas	64
4.3.1	Considerando só o Incremento de Potência Ativa.....	64
4.3.2	Considerando o Incremento da Potência Ativa e Reativa das Cargas, com Fator de Potência Constante.	65
4.3.3	Técnica de Parametrização Adotada.....	65
4.3.3.1	Parametrização pelo Fator de Carregamento (λ).....	65
4.3.3.2	Parametrização pela Magnitude de Tensão de uma Barra k Qualquer (V_k).....	66
5.	TESTES E RESULTADOS	67
5.1	Introdução.....	67
5.2	Comparação do Fluxo de Carga Continuado com e sem o CIA.....	67

5.2.1	Sistema IEEE- 9 barras Considerando Apenas uma Barra de Folga por Área.....	68
5.2.2	Sistema New England Considerando Apenas uma Barra de Folga por Área.....	73
5.2.3	Sistema IEEE-9 Barras Considerando Múltiplas Barras de Folga numa Mesma Área.	76
5.2.4	Sistema New England Considerando Múltiplas Barras de Folga por Área.....	81
5.3	Comparação do Fluxo de Carga Continuado com o CIA para Duas Formas Distintas de Carregamento do Sistema.....	85
5.3.1	Sistema IEEE-9 barras.....	85
5.3.2	Sistema New England.....	90
5.4	Sistema IEEE-118 Barras.....	94
5.4.1	Cenário 1.	96
5.4.1.1	Cenário 1: Avaliando as Contingências.	100
5.4.2	Cenário 2.	103
5.4.2.1	Cenário 2: Avaliando as Contingências.	107
6.	CONCLUSÕES GERAIS E CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	108
6.1	Conclusão Geral	108
6.2	Continuidade do Trabalho	109
	REFERÊNCIAS	110
	APÊNDICE A	113
A1.	Fluxo de Potencia em Coordenadas Polares Utilizando o Método de Newton-Raphson	113
	APÊNDICE B.....	116
B1.	Dados dos sistemas testados	116
	APÊNDICE C	125
A1.	Publicações	125
A1.	Artigos Aceitos	125

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

O crescimento em complexidade e tamanho dos atuais Sistemas Elétricos de Potência é uma consequência natural entre outras do aumento da sua demanda, das construções de novas instalações e da necessidade que as empresas têm em reduzir seus custos, mantendo a confiabilidade de seu sistema e a qualidade da energia elétrica entregue. Isto também resulta num aumento do número de interligações entre os sistemas visto que estas interligações permitem que haja entre os subsistemas, um maior ganho energético e um melhor aproveitamento hidrológico das bacias existente, através da realização da compra e venda de energia entre os sistemas, bem como proporcionam meios para a prestação de auxílio mútuo.

Muitas vezes, em consequência do crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência e do aumento da demanda de energia elétrica, uma empresa numa determinada área é incapaz de atender o crescimento de sua demanda, ou está interessada em reduzir seus custos comprando energia de outra área. Portanto, uma área poderá ou recorrer à importação de energia de outras áreas vizinhas, ou aumentar o suprimento por parte de seus geradores visando atender a demanda de outra área. Nestes casos, a potência ativa deverá então ser transferida do vendedor ao comprador através de linhas de intercâmbio existentes entre as áreas. Surge com isso a necessidade de se avaliar os limites de intercâmbio para os diversos cenários energéticos, patamares de carga e configurações topológicas. Nestas avaliações, o sistema elétrico de potência normalmente é dividido em múltiplas áreas com linhas de intercâmbio entre elas.

Atualmente, o cálculo dos limites de intercâmbio consiste num processo de aumento sistemático dos intercâmbios de forma a estressar ao máximo o fluxo de potência nos circuitos

envolvidos até que determinados critérios econômicos e/ou de segurança predefinidos para a operação sejam atingidos. No entanto, em certas condições, o fluxo de potência é restrito por problemas de instabilidades de tensão, onde o principal objetivo é evitar que o sistema seja levado a operar próximo a uma condição onde um pequeno aumento de carga ou uma súbita contingência possam causar um colapso de tensão. O fluxo de carga continuado é uma ferramenta muito utilizada nas avaliações da estabilidade estática de tensão de um sistema de potência, sendo empregada entre outras, para a obtenção da margem de carregamento de um sistema elétrico de potência (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; SEYDEL, 1994). Esta ferramenta também é utilizada para encontrar o máximo fluxo de intercâmbio (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL – WSCC, 1998).

A garantia de uma condição de operação segura para os sistemas elétricos visando diminuir os riscos de blecautes exige um planejamento detalhado que cumpra os requisitos de qualidade e segurança. Para isso, é essencial o desenvolvimento de ferramentas computacionais avançadas que facilitem a análise em regime permanente. O método da continuação possibilita avaliar as condições de operações do sistema e de sua margem de estabilidade. Esta margem de estabilidade estática é definida como o maior aumento de carga que o sistema pode ter, sem provocar colapso de tensão.

Nos estudos de estabilidade estática de tensão recomenda-se o levantamento do perfil de tensão que pode ser realizada a partir da obtenção das curvas P-V e Q-V das barras em função de seu fator de carregamento (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL – WSCC, 1998). Estas curvas permitem avaliar a condição de operação durante todo o processo de carregamento do sistema. A curva P-V é considerada a metodologia mais adequada para a determinação das margens de estabilidade, a curva Q-V possibilita a avaliação das margens de potência reativa, enquanto que a análise modal fornece informações para a determinação de locais mais apropriados para o reforço do sistema (GAO, 1992; AMORIM, 2011). Por se tratar de uma análise linear, deve-se proceder a análise modal nos pontos mais próximos do ponto de máximo carregamento (PMC).

A obtenção dos pontos de operação do sistema é feita através do método de Newton-Raphson, onde mediante a solução das equações de fluxo de carga, se calculam as magnitudes e ângulos de fase das tensões das barras, as injeções de potência ativa e reativa, e os fluxos de potências nas linhas de transmissão, (MONTICELLI, 1983). Neste estudo o comportamento dinâmico não é considerado. Tradicionalmente o traçado da curva P-V é feito através da obtenção da solução do fluxo de carga convencional para sucessivos incrementos do fator de

carregamento do sistema, até que o processo iterativo deixe de convergir. Este ponto é representado pela singularidade da matriz Jacobiana, e que representa o PMC do sistema como também o limite para a região de operação estável. Por outro lado, o método da continuação possibilita o traçado completo do perfil de tensão por meio de uma parametrização adequada, que próximo ao PMC, elimina a singularidade da matriz Jacobiana. Em geral, as técnicas de parametrização são muito variadas e são realizadas mediante a incorporação de equações parametrizadas (ALVES et al., 2003; BONINI, 2011). Neste trabalho se empregada o preditor de ordem zero que considera a solução atual e um incremento fixo num parâmetro escolhido como uma estimativa para a próxima solução. Para a obtenção dos pontos de operação da curva P-V, inicia-se com a parametrização por λ e através de sua variação determina-se todos os pontos da curva até as proximidades do PMC, onde de forma a se superar a singularidade da matriz Jacobiana e completar o traçado da curva P-V, efetua-se a troca de parâmetro para uma magnitude de tensão de uma barra.

Três métodos são utilizados para o CIA: o primeiro conhecido como método de ajustes alternados (STAGG; EL-ABIAD, 1968) onde o controle é feito externamente da matriz Jacobiana; o segundo método é descrito em (MONTICELLI, 1983) no qual as variáveis de estado consideradas para CIA são ângulos de tensão das barras de folga; e o terceiro método é descrito em (SANTOS et al., 2004), onde as variáveis de estado consideradas são as potências geradas pelas barras de folga. Este último é mais flexível em comparação com os outros dois já que permite a modelagem de múltiplas barras folga numa mesma área, o que adquire maior importância quando são considerados os limites de geração das barras de folga.

Em (IBSAIS; AJJARAPU, 1996) é proposto o método da continuação para o cálculo da máxima transferência de potência entre áreas, porém não são incluídas as equações de controle de intercâmbio e se considera o sistema operando como uma única área. Neste caso, são escolhidos determinados geradores de uma região, os quais aumentarão sua geração visando suprir as cargas de uma região dentro de outra região, e que serão aumentadas proporcionalmente aos seus valores do caso base. O método descrito por (SANTOS et al., 2004), por ser o mais flexível em comparação com os demais métodos, é o incorporado ao fluxo de carga continuado. Com isso, o método proposto possibilita a não só a obtenção da capacidade de transferência de potência entre as diversas áreas considerando múltiplas barras folga por área, como também os limites das potências geradas das barras de folga. Além da inclusão do controle de intercâmbio entre áreas, este estudo também mostra a comparação entre os resultados obtidos considerando duas formas de carregamento do sistema. Na

primeira considera-se só incremento da potência ativa das barras de carga mantendo a potência reativa constante no processo de carregamento do sistema e na outra, considera-se o incremento da potência ativa e reativas das barras de carga com fator de potência constante como indica (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL – WSCC, 1998)

1.2 Objetivos do Trabalho

Os principais objetivos do trabalho são:

- Apresentar uma idéia geral do estudo da estabilidade de tensão com relação ao trabalho desenvolvido.
- Dar mais flexibilidade ao método da continuação com a inclusão do controle de intercâmbio entre áreas.
- Apresentar a forte restrição imposta pelo fluxo de reativo na máxima transferência de potência.
- Analisar o efeito do fluxo de circulação sobre as áreas do sistema.
- Comparar pela metodologia proposta os resultados obtidos sem e com a consideração do controle de intercâmbio entre áreas.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos os quais buscam fornecer um bom entendimento da proposta central.

No Capítulo 2 serão apresentadas as diferentes metodologias para a realização do CIA, esclarecendo os pontos fortes de cada método, como também suas debilidades, e fazer uma comparação entre eles para um melhor entendimento.

No Capítulo 3 é feita uma revisão literária do estudo da estabilidade estática de tensão em sistemas elétricos, com o objetivo de dar uma melhor compreensão da estabilidade de tensão em sistemas elétricos.

O Capítulo 4 tem por finalidade apresentar o fluxo de carga continuado considerando a inclusão do controle de intercâmbio entre áreas, as técnicas de parametrização de ordem zero usadas para o traçado completo da curva P-V e também, as formas de carregamento do sistema utilizadas para o cálculo de máxima transferência de potência entre áreas.

O Capítulo 5 tem por finalidade apresentar os resultados obtidos pela aplicação do método proposto no cálculo dos limites de intercâmbio em diferentes cenários dos sistemas IEEE-9 barras, New England de 30 barras, e IEEE-118 barras.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões gerais deste trabalho, bem como as recomendações para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

CONTROLE DE INTERCÂMBIO ENTRE ÁREAS

2.1 Introdução

O aumento da competição e as privatizações das empresas do setor elétrico em geral, iniciadas com a desregulamentação, e o rápido desenvolvimento de diferentes equipamentos para compensação e controle de fluxos de potência (FACTS: Flexible AC Transmission Systems), têm exigido por parte das empresas de energia elétrica, o desenvolvimento de novos modelos e de novas metodologias para a análise de fluxo de potência em regime permanente (FUERTE-ESQUIVEL; ACHA, 1997; KAZEMI; JADID; ANDAMI, 2007).

Entre as diversas atividades necessárias para a operação segura dos atuais sistemas elétricos de potência estão o Controle de Intercâmbio de Áreas (CIA) e o cálculo dos limites de transferência de potência entre regiões. Para realizar as diversas atividades é necessário que as ferramentas computacionais disponham de modelos matemáticos cada vez melhores de forma a fornecerem resultados mais precisos e mais próximos da do sistema real; que apresentem alta velocidade de execução mesmo para redes de grandes dimensões de forma a possibilitar uma rápida avaliação das condições de regime permanente; exijam pequeno espaço de memória para redes de grandes dimensões; sejam confiáveis para análises de contingências ou aplicações em tempo real; sejam flexíveis para incorporação de novas características especiais como os diferentes controles.

O CIA é estabelecido através de contratos entre as concessionárias de energia elétrica, de acordo com os cenários de carga e geração entre as empresas que conformam as diferentes áreas do sistema, dependendo de vários fatores como crescimento da demanda, excesso ou déficit de recursos energéticos por área, custo de produção de energia das centrais geradoras (SANTOS et al., 2004). Neste capítulo serão apresentados e comparados três métodos para o estudo do CIA em regime permanente: o primeiro conhecido como método de ajustes alternados (STAGG; EL-ABIAD, 1968; CASTRO, 2009), no qual o intercâmbio é controlado externamente a matriz Jacobiana, razão pela qual a convergência é mais lenta, variando diretamente as potências das barras de folga das áreas conforme os resíduos dos intercâmbios

controlados, até atingir as tolerâncias correspondentes das potências ativa, reativa e do intercâmbio; o segundo, que é o método descrito em (MONTICELLI, 1983), onde as equações do CIA, na sua forma linearizada, são incorporadas à matriz Jacobiana, sendo os ângulos de tensão das barras de folga as novas variáveis de estado; e o terceiro, que é o método descrito em

(SANTOS et al., 2004) e que é muito mais robusto computacionalmente, onde as novas variáveis de estado consideradas para o CIA são as potências ativas geradas pelas barras de folga. Esta metodologia é muito mais flexível porque permite a modelagem de múltiplas barras de folga numa mesma área, bem como a consideração dos limites de geração de potência ativa destas barras.

2.2 Considerações Iniciais

Um sistema elétrico de potência é normalmente dividido em múltiplas áreas com linhas de intercâmbio que interligam as áreas que compõem o sistema. Estas interligações elétricas permitem que diferentes regiões permutem energia entre si, possibilitando a otimização energética entre as áreas aproveitando com isso, a diversidade hidrológica existente entre as diferentes áreas. Por este fato, é necessário que sejam controlados os intercâmbios (fluxo de potência ativa nas linhas de interligação entre as áreas) entre todas as áreas que compõem o sistema. Num sistema com n áreas, é necessário controlar os intercâmbios de $n-1$ áreas, uma vez que o intercâmbio da área restante fica automaticamente definido pelas demais (primeira lei de Kirchhoff).

O intercâmbio líquido de uma área é definido como a soma algébrica dos fluxos de potência ativa das linhas de intercâmbio que interligam essa área com as demais. Os fluxos das linhas de intercâmbio são considerados positivos se são exportações e negativos se são importações.

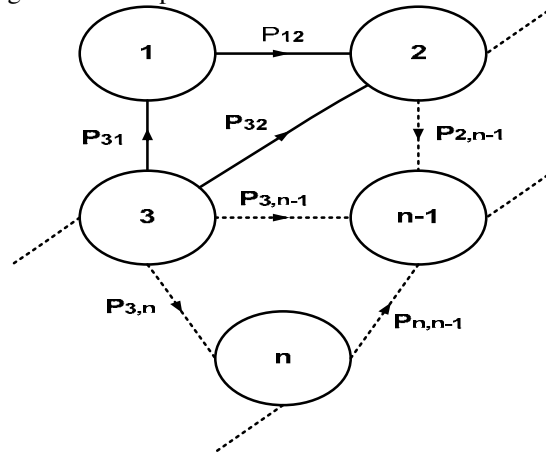
No problema de fluxo de potência, a soma de geração em todas as barras do sistema deve ser igual à carga total do sistema mais as perdas ôhmicas. Como estas não são conhecidas antes da solução do fluxo de potência, é necessário prover a geração em pelo menos uma barra de folga, de forma a acomodá-las para o balanço geral.

O objetivo do CIA é o de regular o intercâmbio total de cada área, ou seja, as injeções de potência ativa das barras de folga são ajustadas para manter os intercâmbios líquidos das áreas nos seus respectivos valores especificados. Isto é obtido através da não especificação de

geração ativa em pelo menos uma das barras do sistema que recebe o nome de barra de folga e são classificadas como do tipo V, onde somente os módulos das tensões nodais são especificados (exceto a área de referência que é classificado como tipo $V\theta$ e que vai exercer o papel de referência angular do sistema, já que a medição de um ângulo só faz sentido quando está em relação a uma referência). Caso uma ou mais áreas não possuam barras de folga, o intercâmbio líquido não poderão ser controlado nessa área.

A figura 1 ilustra um sistema elétrico composto por n áreas.

Figura 1- Exemplo de um sistema elétrico com n áreas.



Fonte: Santos (2002)

Considere um sistema com n áreas e seja a área n a área de referência, tem-se que os intercâmbios líquidos das áreas restantes são dados por:

$$\begin{aligned}
 PI_1 &= P_{12} - P_{31} \\
 PI_2 &= -P_{12} - P_{32} + \dots + P_{2,n-1} \\
 PI_3 &= P_{31} + P_{32} + \dots + P_{3,n-1} + P_{3,n} \\
 &\vdots \\
 PI_{n-1} &= -P_{2,n-1} - P_{3,n-1} + P_{n,n-1} + \dots
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

No caso da área restante n, o intercâmbio líquido pode ser obtido ou pela primeira lei de Kirchhoff, ou pelo somatório dos intercâmbios com as áreas a ela conectadas:

$$PI_n = -P_{3,n} + P_{n,n-1} \pm \dots = -PI_1 - PI_2 - PI_3 - PI_{n-1} \dots \tag{2.2}$$

2.3 Metodologia Utilizando a Técnica de Ajuste Alternados (STAGG; EL-ABIAD, 1968)

Considere um valor de intercâmbio líquido especificado para a área i (PI_i^{esp}) que se deseja controlar o intercâmbio, o objetivo desta metodologia é regular o intercâmbio líquido desta área, variando as injeções de potência ativa das barras de folga que são ajustadas para manter o intercâmbio líquido da área no seu valor especificado. Observa-se que todo o controle realizado por esta metodologia é feito externamente à matriz Jacobiana.

Após cada iteração (h) do fluxo de potência, mediante o método de Newton-Raphson, atualizam-se os ângulos e as magnitudes das tensões de barras ($\theta^{(h)}$ e $V^{(h)}$), conforme a equação (A.10) do Apêndice A. A seguir, calcula-se o intercâmbio líquido de cada área que se deseja controlar o intercâmbio mediante a equação:

$$PI_i^{calc(h)} = \sum_{\substack{m \in \Omega_k \\ m \neq i}} P_{km}^{(h)} \quad (2.3)$$

onde k é a barra de intercâmbio da área i , Ω_k é o conjunto de barras diretamente conectadas à barra k , porém não pertencente à área i . A expressão para o fluxo de potência ativa na linha de intercâmbio situada entre as barras k e m é dada pela equação:

$$P_{km}(\theta, V) = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.4)$$

Após calcular-se o intercâmbio líquido da área i ($PI_i^{calc(h)}$) mediante as equações (2.3) e (2.4), calcula-se o resíduo de intercâmbio da área i na iteração (h) mediante a equação (2.5):

$$\Delta PI_i^{(h)} = PI_i^{esp} - PI_i^{calc(h)} \quad (2.5)$$

O resíduo de intercâmbio da área i ($\Delta PI_i^{(h)}$) pode ser atribuído aos geradores das barras de folga da área i de acordo com algum critério preestabelecido, como p. ex., o que será estudado no item 2.4.2 (múltiplas barras de folga por área). No momento só se abordará o uso de uma barra de folga por área. Sendo f a única barra de folga da área i , a potência ativa gerada da mesma será dada pela equação:

$$P_{Gf}^{(h+1)} = P_{Gf}^{(h)} + \Delta PI_i^{calc(h)} \quad (2.6)$$

O processo iterativo continuará até que o valor absoluto máximo dos resíduos de intercâmbio das áreas $|\Delta PI|$ seja menor que uma tolerância (TOL) pré-especificada, bem

como também o valor máximo dos resíduos de potência ativa e reativa $|\Delta P|$ e $|\Delta Q|$ seja menor que a tolerância preestabelecida (TOLPQ).

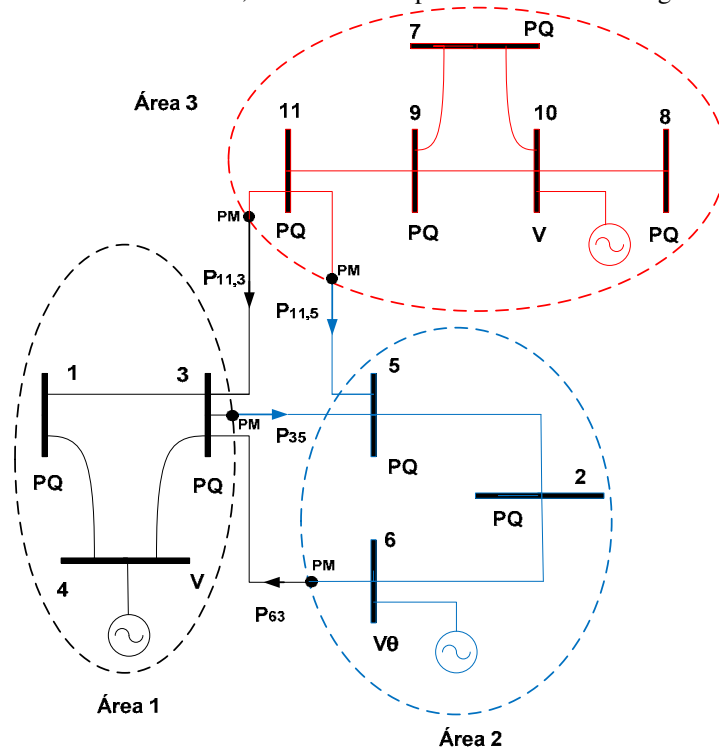
$$\begin{aligned} \max |\Delta P| &\leq \text{TOL} \\ \max |\Delta P| \text{ e } \max |\Delta Q| &\leq \text{TOLPQ} \end{aligned} \quad (2.7)$$

No resultado final, o sinal negativo representa importação e o positivo representa exportação, conforme já mencionado anteriormente.

2.3.1 Exemplo Ilustrativo da Técnica de Ajuste Alternados

A figura 2 representa um sistema de 11 barras e 3 áreas (SANTOS et al., 2004). As barras 4 e 10 são as barras de folga (tipo V) das áreas 1 e 3, respectivamente. A área 2 é a área de referência e a barra 6 a barra de referência (tipo $V\theta$). Os sentidos arbitrários dos intercâmbios inicialmente escolhidos estão representados pelas setas.

Figura 2 - Sistema de 11 barras e 3 áreas, considerando apenas uma barra de folga em cada área (1 e 3).



Fonte: Santos (2002)

Os pontos de medição, representados na figura 2 como **PM**, indicam o alcance de cada área. Só existe um ponto de medição por linha de intercâmbio e, dependendo da área onde se encontra o ponto de medição, as perdas da correspondente linha de intercâmbio serão assumidas pela área a qual ela pertence, o que é indicado por meio das cores das linhas de

intercâmbio que fazem referência à área que representam. Por exemplo, as perdas nas linhas de intercâmbio entre as barras 3 e 5 (P_{35}) e as barras 11 e 5 ($P_{11,5}$) são assumidas pela área 2, enquanto que as entre as barras 6 e 3 e 11 e 3 (P_{63} e $P_{11,3}$) são assumidas pela área 1.

A equação (2.8) representa o sistema de equações a ser resolvido a cada iteração no problema geral de fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson. As barras de geração 4 e 10, são representadas como barras de folga.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_7 \\ \Delta P_8 \\ \Delta P_9 \\ \Delta P_{10} \\ \Delta P_{11} \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta Q_7 \\ \Delta Q_8 \\ \Delta Q_9 \\ \Delta Q_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{17} & H_{18} & H_{19} & H_{1,10} & H_{1,11} & N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{15} & N_{17} & N_{18} & N_{19} & N_{1,11} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{27} & H_{28} & H_{29} & H_{2,10} & H_{2,11} & N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{25} & N_{27} & N_{28} & N_{29} & N_{2,11} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{37} & H_{38} & H_{39} & H_{3,10} & H_{3,11} & N_{31} & N_{32} & N_{33} & N_{35} & N_{37} & N_{38} & N_{39} & N_{3,11} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{47} & H_{48} & H_{49} & H_{4,10} & H_{4,11} & N_{41} & N_{42} & N_{43} & N_{45} & N_{47} & N_{48} & N_{49} & N_{4,11} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{57} & H_{58} & H_{59} & H_{5,10} & H_{5,11} & N_{51} & N_{52} & N_{53} & N_{55} & N_{57} & N_{58} & N_{59} & N_{5,11} \\ H_{71} & H_{72} & H_{73} & H_{74} & H_{75} & H_{77} & H_{78} & H_{79} & H_{7,10} & H_{7,11} & N_{71} & N_{72} & N_{73} & N_{75} & N_{77} & N_{78} & N_{79} & N_{7,11} \\ H_{81} & H_{82} & H_{83} & H_{84} & H_{85} & H_{87} & H_{88} & H_{89} & H_{8,10} & H_{8,11} & N_{81} & N_{82} & N_{83} & N_{85} & N_{87} & N_{88} & N_{89} & N_{8,11} \\ H_{91} & H_{92} & H_{93} & H_{94} & H_{95} & H_{97} & H_{98} & H_{99} & H_{9,10} & H_{9,11} & N_{91} & N_{92} & N_{93} & N_{95} & N_{97} & N_{98} & N_{99} & N_{9,11} \\ H_{10,1} & H_{10,2} & H_{10,3} & H_{10,4} & H_{10,5} & H_{10,7} & H_{10,8} & H_{10,9} & H_{10,10} & H_{10,11} & N_{10,1} & N_{10,2} & N_{10,3} & N_{10,5} & N_{10,7} & N_{10,8} & N_{10,9} & N_{10,11} \\ H_{11,1} & H_{11,2} & H_{11,3} & H_{11,4} & H_{11,5} & H_{11,7} & H_{11,8} & H_{11,9} & H_{11,10} & H_{11,11} & N_{11,1} & N_{11,2} & N_{11,3} & N_{11,5} & N_{11,7} & N_{11,8} & N_{11,9} & N_{11,11} \\ M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{17} & M_{18} & M_{19} & M_{1,10} & M_{1,11} & L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{15} & L_{17} & L_{18} & L_{19} & L_{1,11} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{27} & M_{28} & M_{29} & M_{2,10} & M_{2,11} & L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{25} & L_{27} & L_{28} & L_{29} & L_{2,11} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{37} & M_{38} & M_{39} & M_{3,10} & M_{3,11} & L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{35} & L_{37} & L_{38} & L_{39} & L_{3,11} \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} & M_{57} & M_{58} & M_{59} & M_{5,10} & M_{5,11} & L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{55} & L_{57} & L_{58} & L_{59} & L_{5,11} \\ M_{71} & M_{72} & M_{73} & M_{74} & M_{75} & M_{77} & M_{78} & M_{79} & M_{7,10} & M_{7,11} & L_{71} & L_{72} & L_{73} & L_{75} & L_{77} & L_{78} & L_{79} & L_{7,11} \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & M_{84} & M_{85} & M_{87} & M_{88} & M_{89} & M_{8,10} & M_{8,11} & L_{81} & L_{82} & L_{83} & L_{85} & L_{87} & L_{88} & L_{89} & L_{8,11} \\ M_{91} & M_{92} & M_{93} & M_{94} & M_{95} & M_{97} & M_{98} & M_{99} & M_{9,10} & M_{9,11} & L_{91} & L_{92} & L_{93} & L_{95} & L_{97} & L_{98} & L_{99} & L_{9,11} \\ M_{11,1} & M_{11,2} & M_{11,3} & M_{11,4} & M_{11,5} & M_{11,7} & M_{11,8} & M_{11,9} & M_{11,10} & M_{11,11} & L_{11,1} & L_{11,2} & L_{11,3} & L_{11,5} & L_{11,7} & L_{11,8} & L_{11,9} & L_{11,11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_7 \\ \Delta \theta_8 \\ \Delta \theta_9 \\ \Delta \theta_{10} \\ \Delta \theta_{11} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_9 \\ \Delta V_{11} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

De acordo com as equações do Apêndice A (A.9), tem-se os valores das submatrizes:

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & \cdots & H_{1,11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{11,1} & \cdots & H_{11,11} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

sendo:

$$H_{11} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1}, H_{12} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2}, H_{13} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_3}, \dots \quad (2.10)$$

$$N = \begin{bmatrix} N_{11} & \cdots & N_{1,11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{11,1} & \cdots & N_{11,11} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

sendo:

$$N_{11} = \frac{\partial P_1}{\partial V_1}, N_{12} = \frac{\partial P_1}{\partial V_2}, N_{13} = \frac{\partial P_1}{\partial V_3}, \dots \quad (2.12)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{1,11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{11,1} & \dots & M_{11,11} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

sendo:

$$M_{11} = \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1}, M_{12} = \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2}, M_{13} = \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_3}, \dots \quad (2.14)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & \dots & L_{1,11} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{11,1} & \dots & L_{11,11} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

sendo:

$$L_{11} = \frac{\partial Q_1}{\partial V_1}, L_{12} = \frac{\partial Q_1}{\partial V_2}, L_{13} = \frac{\partial Q_1}{\partial V_3}, \dots \quad (2.16)$$

Após a resolução do sistema de equações numa certa iteração, são atualizados os ângulos e as magnitudes das tensões nodais. Os intercâmbios líquidos das áreas 1 e 3 são calculados através da equação:

$$\begin{aligned} PI_1 &= -P_{11,3} + P_{35} - P_{63} \\ PI_3 &= P_{11,3} + P_{11,5} \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde os fluxos de potência das linhas de intercâmbio são dados por:

$$\begin{aligned} P_{35} &= V_3^2 g_{35} - V_3 V_5 (g_{35} \cos \theta_{35} + b_{35} \sin \theta_{35}) \\ P_{63} &= V_6^2 g_{63} - V_6 V_3 (g_{63} \cos \theta_{63} + b_{63} \sin \theta_{63}) \\ P_{11,3} &= V_{11}^2 g_{11,3} - V_{11} V_3 (g_{11,3} \cos \theta_{11,3} + b_{11,3} \sin \theta_{11,3}) \\ P_{11,5} &= V_{11}^2 g_{11,5} - V_{11} V_5 (g_{11,5} \cos \theta_{11,5} + b_{11,5} \sin \theta_{11,5}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Os resíduos dos intercâmbios líquidos das áreas 1 e 3 são calculados através seguintes equações:

$$\begin{aligned} \Delta PI_1^{(h)} &= PI_1^{\text{esp}} - PI_1^{\text{calc}(h)} \\ \Delta PI_3^{(h)} &= PI_3^{\text{esp}} - PI_3^{\text{calc}(h)} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Esses resíduos de intercâmbio são atribuídos aos geradores das barras de folga 4 e 10 das respectivas áreas 1 e 3 da seguinte forma:

$$\begin{aligned} P_{G4}^{(h+1)} &= P_{G4}^{(h)} + \Delta PI_1^{(h)} \\ P_{G10}^{(h+1)} &= P_{G10}^{(h)} + \Delta PI_3^{(h)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

O processo iterativo continua até que sejam atingidas as tolerâncias preestabelecidas, de acordo com a equação (2.7).

2.4 Metodologia Descrita em (MONTICELLI, 1983)

O objetivo desta metodologia é regular o intercâmbio líquido de cada área por meio da variação da injeção de potência ativa da respectiva barra de folga a ela associada, no caso, há uma barra de folga para cada área. Com exceção da barra de folga do sistema, as injeções de potência ativa das barras de folga são ajustadas para manter os intercâmbios líquidos das áreas nos seus valores especificados. Assim, o CIA é efetuado através da incorporação na matriz Jacobiana, das equações de resíduos de intercâmbio (2.19) na forma linearizada. O número de equações de controle intercâmbio entre áreas é igual ao número de áreas menos uma. As barras de folga de todas as áreas menos uma são classificadas como sendo do tipo V, i.e., somente a magnitude de tensão é especificada.

As novas variáveis de estado neste caso são os ângulos das tensões das barras de folga θ_f , as quais são atualizadas a cada iteração, até que o intercâmbio líquido de cada área seja atendido ao final do processo iterativo.

Seja i uma área cujo intercâmbio líquido deve ser mantido no seu valor especificado. O resíduo do intercâmbio líquido da área i é definido pela equação (2.21):

$$\Delta PI(\theta, V)_i = PI_i^{esp} - PI(\theta, V)_i^{calc} \quad (2.21)$$

Reescrevendo a equação acima na forma linearizada, para a inclusão das equações na matriz Jacobiana, obtém-se:

$$\Delta PI_i = \left(\frac{\partial PI_i}{\partial \theta} \right)^T \cdot \Delta \theta + \left(\frac{\partial PI_i}{\partial V} \right)^T \cdot \Delta V \quad (2.22)$$

Uma vez que as injeções de potência ativa dessas barras de folga deixam de ser especificadas, as equações dos seus respectivos resíduos (ΔP_f) e que são representados por:

$$\Delta P_f = \left(\frac{\partial P_f}{\partial \theta} \right)^T \cdot \Delta \theta + \left(\frac{\partial P_f}{\partial V} \right)^T \cdot \Delta V \quad (2.23)$$

são retiradas do sistema de equações geral do fluxo de potência.

O sistema de equações aumentado a ser resolvido a cada iteração no problema geral de fluxo de potência, é representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & -\frac{\partial \Delta P}{\partial \theta_F} \\ M & L & -\frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta_F} \\ \frac{\partial PI}{\partial \theta} & \frac{\partial PI}{\partial V} & -\frac{\partial \Delta PI}{\partial \theta_F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \theta_F \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

onde: ΔP , ΔQ , H , N , M , L , $\Delta \theta$ e ΔV encontram-se definidos no Apêndice A.

ΔPI é o vetor dos resíduos relativos aos intercâmbios líquidos.

$\partial PI/\partial \theta$ e $\partial PI/\partial V$ são os respectivos vetores das derivadas dos intercâmbios líquidos em relação aos ângulos e módulos das tensões.

$\Delta \theta_F$ é vetor de correção das variáveis de estado do controle de intercâmbio entre áreas.

$\partial P/\partial \theta_F$ e $\partial Q/\partial \theta_F$ são os respectivos vetores das derivadas de potência ativa e reativa injetadas em relação as variáveis de estado do controle de intercâmbio entre áreas.

$\partial PI/\partial \theta_F$ são os vetores das derivadas dos intercâmbios líquidos em relação às variáveis de estado, do controle de intercâmbio entre áreas. Neste caso, podem não ser nulas quando as barras de folga fizerem parte de um ou mais intercâmbios.

As equações dos novos componentes da matriz Jacobiana são as seguintes:

As derivadas dos intercâmbios líquidos em relação aos ângulos das tensões $\partial PI/\partial \theta$:

$$I_{ik} = \frac{\partial PI_i}{\partial \theta_k} = \frac{\partial \sum_{\substack{m \in \Omega_k \\ m \neq i}} P_{km}}{\partial \theta_k}, \text{ onde :}$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = V_k V_m (g_{km} \text{sen} \theta_{km} - b_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (2.25)$$

$$I_{im} = \frac{\partial PI_i}{\partial \theta_m} = \frac{\partial \sum_{\substack{m \in \Omega_k \\ m \neq i}} P_{km}}{\partial \theta_m}, \text{ onde :}$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = V_k V_m (-g_{km} \text{sen} \theta_{km} + b_{km} \text{cos} \theta_{km})$$

As derivadas dos intercâmbios líquidos em relação aos módulos das tensões $\partial PI/\partial V$:

$$J_{ik} = \frac{\partial PI_i}{\partial V_k} = \frac{\partial \sum_{\substack{m \in \Omega_k \\ m \neq i}} P_{km}}{\partial V_k}, \text{ onde :}$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2V_k g_{km} - V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.26)$$

$$J_{im} = \frac{\partial PI_i}{\partial V_m} = \frac{\partial \sum_{\substack{m \in \Omega_k \\ m \neq i}} P_{km}}{\partial V_m}, \text{ onde :}$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -V_k (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km})$$

As derivadas dos intercâmbios líquidos em relação aos ângulos das tensões das barras de folga $\partial PI/\partial \theta_f$ são mostradas no sistema de equações em (2.25).

As equações das derivadas de P e Q em relação a θ_f , são mostradas no sistema de equações do Apêndice (A.9), já que são as mesmas derivadas de H e M, só que avaliadas para a barra de folga.

A cada iteração, o ângulo de tensão de cada barra de folga f é atualizado como mostra a equação (2.27):

$$\theta_f^{(h+1)} = \theta_f^{(h)} + \Delta \theta_f^{(h)} \quad (2.27)$$

2.4.1 Exemplo Ilustrativo da Metodologia Descrita em Monticelli

Considere o mesmo sistema de 11 barras e 3 áreas representados na figura 2.

A equação (2.28) representa o sistema aumentado a ser resolvido a cada iteração pelo método de Newton-Raphson.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_7 \\ \Delta P_8 \\ \Delta P_9 \\ \Delta P_{11} \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta Q_7 \\ \Delta Q_8 \\ \Delta Q_9 \\ \Delta Q_{11} \\ \Delta PI_1 \\ \Delta PI_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{15} & H_{17} & H_{18} & H_{19} & H_{1,11} & N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{15} & N_{17} & N_{18} & N_{19} & N_{1,11} & N_{14} & 0 \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{25} & H_{27} & H_{28} & H_{29} & H_{2,11} & N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{25} & N_{27} & N_{28} & N_{29} & N_{2,11} & 0 & 0 \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{35} & H_{37} & H_{38} & H_{39} & H_{3,11} & N_{31} & N_{32} & N_{33} & N_{35} & N_{37} & N_{38} & N_{39} & N_{3,11} & N_{34} & 0 \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{55} & H_{57} & H_{58} & H_{59} & H_{5,11} & N_{51} & N_{52} & N_{53} & N_{55} & N_{57} & N_{58} & N_{59} & N_{5,11} & 0 & 0 \\ H_{71} & H_{72} & H_{73} & H_{75} & H_{77} & H_{78} & H_{79} & H_{7,11} & N_{71} & N_{72} & N_{73} & N_{75} & N_{77} & N_{78} & N_{79} & N_{7,11} & 0 & N_{7,10} \\ H_{81} & H_{82} & H_{83} & H_{85} & H_{87} & H_{88} & H_{89} & H_{8,11} & N_{81} & N_{82} & N_{83} & N_{85} & N_{87} & N_{88} & N_{89} & N_{8,11} & 0 & N_{8,10} \\ H_{91} & H_{92} & H_{93} & H_{95} & H_{97} & H_{98} & H_{99} & H_{9,11} & N_{91} & N_{92} & N_{93} & N_{95} & N_{97} & N_{98} & N_{99} & N_{9,11} & 0 & N_{9,10} \\ H_{11,1} & H_{11,2} & H_{11,3} & H_{11,5} & H_{11,7} & H_{11,8} & H_{11,9} & H_{11,11} & N_{11,1} & N_{11,2} & N_{11,3} & N_{11,5} & N_{11,7} & N_{11,8} & N_{11,9} & N_{11,11} & 0 & N_{11,10} \\ M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{15} & M_{17} & M_{18} & M_{19} & M_{1,11} & L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{15} & L_{17} & L_{18} & L_{19} & L_{1,11} & L_{14} & 0 \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{25} & M_{27} & M_{28} & M_{29} & M_{2,11} & L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{25} & L_{27} & L_{28} & L_{29} & L_{2,11} & 0 & 0 \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{35} & M_{37} & M_{38} & M_{39} & M_{3,11} & L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{35} & L_{37} & L_{38} & L_{39} & L_{3,11} & L_{34} & 0 \\ M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{55} & M_{57} & M_{58} & M_{59} & M_{5,11} & L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{55} & L_{57} & L_{58} & L_{59} & L_{5,11} & 0 & 0 \\ M_{71} & M_{72} & M_{73} & M_{75} & M_{77} & M_{78} & M_{79} & M_{7,11} & L_{71} & L_{72} & L_{73} & L_{75} & L_{77} & L_{78} & L_{79} & L_{7,11} & 0 & L_{7,10} \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & M_{85} & M_{87} & M_{88} & M_{89} & M_{8,11} & L_{81} & L_{82} & L_{83} & L_{85} & L_{87} & L_{88} & L_{89} & L_{8,11} & 0 & L_{8,10} \\ M_{91} & M_{92} & M_{93} & M_{95} & M_{97} & M_{98} & M_{99} & M_{9,11} & L_{91} & L_{92} & L_{93} & L_{95} & L_{97} & L_{98} & L_{99} & L_{9,11} & 0 & L_{9,10} \\ M_{11,1} & M_{11,2} & M_{11,3} & M_{11,5} & M_{11,7} & M_{11,8} & M_{11,9} & M_{11,11} & L_{11,1} & L_{11,2} & L_{11,3} & L_{11,5} & L_{11,7} & L_{11,8} & L_{11,9} & L_{11,11} & 0 & L_{11,10} \\ I_{1,1} & I_{1,2} & I_{1,3} & I_{1,5} & I_{1,7} & I_{1,8} & I_{1,9} & I_{1,11} & J_{1,1} & J_{1,2} & J_{1,3} & J_{1,5} & J_{1,7} & J_{1,8} & J_{1,9} & J_{1,11} & 0 & 0 \\ I_{3,1} & I_{3,2} & I_{3,3} & I_{3,5} & I_{3,7} & I_{3,8} & I_{3,9} & I_{3,11} & J_{3,1} & J_{3,2} & J_{3,3} & J_{3,5} & J_{3,7} & J_{3,8} & J_{3,9} & J_{3,11} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_7 \\ \Delta \theta_8 \\ \Delta \theta_9 \\ \Delta \theta_{11} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_9 \\ \Delta V_{11} \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_{10} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Com a incorporação das equações de controle de intercâmbio entre áreas, aparecem novos elementos na matriz Jacobiana, onde:

$\frac{\partial P}{\partial \theta_F}$ e $\frac{\partial Q}{\partial \theta_F}$ são calculados mediante as equações (A.9) do Apêndice A, onde se tem:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_F} = \begin{bmatrix} H_{1,4} & H_{1,10} \\ \vdots & \vdots \\ H_{11,4} & H_{11,10} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

onde:

$$H_{1,4} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_4}, H_{1,10} = \frac{\partial P_1}{\partial \theta_{10}}, H_{2,4} = \frac{\partial P_2}{\partial \theta_4}, H_{2,10} = \frac{\partial P_2}{\partial \theta_{10}}, \dots \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta_F} = \begin{bmatrix} M_{1,4} & M_{1,10} \\ \vdots & \vdots \\ M_{11,4} & M_{11,10} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

onde:

$$M_{1,4} = \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_4}, M_{1,10} = \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_{10}}, M_{2,4} = \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_4}, M_{2,10} = \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_{10}}, \dots \quad (2.32)$$

Os elementos de $\frac{\partial PI}{\partial \theta}$ e $\frac{\partial PI}{\partial \theta_F}$ são calculados mediante as equações em (2.25)

$$\frac{\partial \text{PI}}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} I_{11} & \dots & I_{1,11} \\ I_{31} & \dots & I_{3,11} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

onde:

$$I_{11} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial \theta_1} = 0, \quad I_{12} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial \theta_2} = 0, \quad (2.34)$$

$$I_{13} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial \theta_3} = V_{11} V_3 (-g_{11,3} \text{sen}\theta_{11,3} + b_{11,3} \text{cos}\theta_{11,3}) + V_3 V_5 (g_{35} \text{sen}\theta_{35} - b_{35} \text{cos}\theta_{35}) + \\ + V_6 V_3 (-g_{63} \text{sen}\theta_{63} + b_{63} \text{cos}\theta_{63}), \dots$$

$$\frac{\partial \text{PI}}{\partial \theta_F} = \begin{bmatrix} I_{14} & I_{1,10} \\ I_{3,4} & I_{3,10} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

onde:

$$I_{14} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial \theta_4} = 0, \quad I_{1,10} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial \theta_{10}} = 0, \quad I_{34} = \frac{\partial \text{PI}_3}{\partial \theta_4} = 0, \quad I_{3,10} = \frac{\partial \text{PI}_3}{\partial \theta_{10}} = 0 \quad (2.36)$$

Os elementos de $\frac{\partial \text{PI}}{\partial V}$ são calculados mediante as equações (2.26).

$$\frac{\partial \text{PI}}{\partial V} = \begin{bmatrix} J_{11} & \dots & J_{1,11} \\ J_{31} & \dots & J_{3,11} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

onde:

$$J_{11} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial V_1} = 0, \quad J_{12} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial V_2} = 0, \quad (2.38)$$

$$J_{13} = \frac{\partial \text{PI}_1}{\partial V_3} = V_{11} (g_{11,3} \text{cos}\theta_{11,3} + b_{11,3} \text{sen}\theta_{11,3}) + 2V_3 g_{35} - V_5 (g_{35} \text{cos}\theta_{35} + b_{35} \text{sen}\theta_{35}) - \\ + V_6 (g_{63} \text{cos}\theta_{63} + b_{63} \text{sen}\theta_{63}), \dots$$

2.5 Metodologia Descrita em (SANTOS et al., 2004)

2.5.1 Uma Barra de Folga por Área

O objetivo desta metodologia é regular o intercâmbio líquido de cada área, variando as injeções de potência ativa das barras de folga que são ajustadas para manter os intercâmbios líquidos das áreas nos seus valores especificados. Este procedimento é feito através da linearização e inserção das equações de controle entre áreas na matriz Jacobiana. Com isso,

tem-se um novo sistema de equações aumentado, cuja dimensão depende do número de áreas com controle de intercâmbio e do número de barras folga de cada área.

Nesse método as novas variáveis de estado são as potências ativas geradas pelas barras de folga (P_{Gf}) que são atualizadas a cada iteração, até que o intercâmbio líquido de cada área seja atendido ao final do processo iterativo. Esta metodologia está mais próxima do controle real do sistema, visto que se atua ajustando diretamente a potência ativa do gerador escolhido como barra de folga para se controlar o intercâmbio da área. Ao contrário da metodologia apresentada em (MONTICELLI, 1983), nesta metodologia as equações de potência ativa das barras de folga são mantidas, o que mantém a matriz Jacobiana original inalterada.

O sistema de equações aumentado a ser resolvido a cada iteração no problema geral de fluxo de potência passa a ser representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & -\frac{\partial \Delta P}{\partial P_G} \\ M & L & -\frac{\partial \Delta Q}{\partial P_G} \\ \frac{\partial PI}{\partial \theta} & \frac{\partial PI}{\partial V} & -\frac{\partial \Delta PI}{\partial P_G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

onde: ΔP_G é vetor de correção das variáveis de estado referentes ao controle de intercâmbio entre áreas, que são representadas pelos incrementos de geração de potência ativa das barras de folga.

$\partial P / \partial P_G$ é o vetor das derivadas das potências ativas injetadas em relação às variáveis de estado do controle de intercâmbio entre áreas.

$\partial Q / \partial P_G$ é o vetor das derivadas das potências reativas injetadas em relação às variáveis de estado do controle de intercâmbio entre áreas.

$\partial PI / \partial P_G$ é o vetor das derivadas dos intercâmbios líquidos em relação às variáveis de estado do controle de intercâmbio entre áreas, e que neste caso, são sempre nulas, pois os intercâmbios são funções apenas dos fluxos de potência ativa nas linhas.

Sendo f a barra de folga da área i , $\Delta P_f^{(h)}$, que representa o resíduo de potência da barra de folga a cada iteração, é dado por:

$$\Delta P_f^{(h)}(\theta, V, P_{Gf}) = P_{Gf}^{(h)} - P_{Lf}^{esp} - P_f^{(h)}(\theta, V) \quad (2.40)$$

onde:

$P_{Gf}^{(h)}$: Potência ativa gerada pela barra f na iteração h.

P_{Lf}^{esp} : Potência ativa da carga da barra de folga f.

$P_f^{(h)}$: Potência ativa líquida injetada na barra de folga f calculada na iteração h.

Reescrevendo a equação (2.40) na forma linearizada, para a inclusão na matriz Jacobiana, obtém-se:

$$\Delta P_f = \Delta P_{Gf} - \left(\frac{\partial P_f}{\partial \theta} \right)^T \cdot \Delta \theta - \left(\frac{\partial P_f}{\partial V} \right)^T \cdot \Delta V \quad (2.41)$$

A cada iteração, a potência ativa gerada na barra de folga ($P_{Gf}^{(h+1)}$) é atualizada conforme mostra a equação a seguir:

$$P_{Gf}^{(h+1)} = P_{Gf}^{(h)} + \Delta P_{Gf}^{(h)} \quad (2.42)$$

Os elementos das colunas adicionais do sistema aumentado são todos nulos, exceto nas posições correspondentes às injeções de potência ativa das barras de folga, onde as derivadas são iguais a -1, conforme a equação (2.41) de onde se obtém:

$$-\frac{\partial \Delta P_f^{(h)}(\theta, V, P_{Gf})}{\partial P_{Gf}} = -1 \quad (2.43)$$

2.5.1.1 Exemplo Ilustrativo da Metodologia Proposta por Dos Santos

Considere o mesmo sistema de 11 barras e 3 áreas, representados na figura 2.

Observe que nesta metodologia as equações de potência ativa das barras de folga são mantidas na formulação.

A equação (2.44) representa o sistema aumentado a ser resolvido a cada iteração pelo método de Newton-Raphson.

$$\begin{array}{c}
\Delta P_1 \\
\Delta P_2 \\
\Delta P_3 \\
\Delta P_4 \\
\Delta P_5 \\
\Delta P_7 \\
\Delta P_8 \\
\Delta P_9 \\
\Delta P_{10} \\
\Delta P_{11} \\
\Delta Q_1 \\
\Delta Q_2 \\
\Delta Q_3 \\
\Delta Q_5 \\
\Delta Q_7 \\
\Delta Q_8 \\
\Delta Q_9 \\
\Delta Q_{11} \\
\Delta P_{G4} \\
\Delta P_{G10}
\end{array}
=
\begin{array}{cc}
H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{17} & H_{18} & H_{19} & H_{1,10} & H_{1,11} & N_{11} & N_{12} & N_{13} & N_{15} & N_{17} & N_{18} & N_{19} & N_{1,11} & 0 & 0 \\
H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{27} & H_{28} & H_{29} & H_{2,10} & H_{2,11} & N_{21} & N_{22} & N_{23} & N_{25} & N_{27} & N_{28} & N_{29} & N_{2,11} & 0 & 0 \\
H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{37} & H_{38} & H_{39} & H_{3,10} & H_{3,11} & N_{31} & N_{32} & N_{33} & N_{35} & N_{37} & N_{38} & N_{39} & N_{3,11} & 0 & 0 \\
H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{47} & H_{48} & H_{49} & H_{4,10} & H_{4,11} & N_{41} & N_{42} & N_{43} & N_{45} & N_{47} & N_{48} & N_{49} & N_{4,11} & N_{4,12} & 0 \\
H_{51} & H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{57} & H_{58} & H_{59} & H_{5,10} & H_{5,11} & N_{51} & N_{52} & N_{53} & N_{55} & N_{57} & N_{58} & N_{59} & N_{5,11} & 0 & 0 \\
H_{71} & H_{72} & H_{73} & H_{74} & H_{75} & H_{77} & H_{78} & H_{79} & H_{7,10} & H_{7,11} & N_{71} & N_{72} & N_{73} & N_{75} & N_{77} & N_{78} & N_{79} & N_{7,11} & 0 & 0 \\
H_{81} & H_{82} & H_{83} & H_{84} & H_{85} & H_{87} & H_{88} & H_{89} & H_{8,10} & H_{8,11} & N_{81} & N_{82} & N_{83} & N_{85} & N_{87} & N_{88} & N_{89} & N_{8,11} & 0 & 0 \\
H_{91} & H_{92} & H_{93} & H_{94} & H_{95} & H_{97} & H_{98} & H_{99} & H_{9,10} & H_{9,11} & N_{91} & N_{92} & N_{93} & N_{95} & N_{97} & N_{98} & N_{99} & N_{9,11} & 0 & 0 \\
H_{10,1} & H_{10,2} & H_{10,3} & H_{10,4} & H_{10,5} & H_{10,7} & H_{10,8} & H_{10,9} & H_{10,10} & H_{10,11} & N_{10,1} & N_{10,2} & N_{10,3} & N_{10,5} & N_{10,7} & N_{10,8} & N_{10,9} & N_{10,11} & 0 & N_{10,13} \\
H_{11,1} & H_{11,2} & H_{11,3} & H_{11,4} & H_{11,5} & H_{11,7} & H_{11,8} & H_{11,9} & H_{11,10} & H_{11,11} & N_{11,1} & N_{11,2} & N_{11,3} & N_{11,5} & N_{11,7} & N_{11,8} & N_{11,9} & N_{11,11} & 0 & 0 \\
M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{17} & M_{18} & M_{19} & M_{1,10} & M_{1,11} & L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{15} & L_{17} & L_{18} & L_{19} & L_{1,11} & 0 & 0 \\
M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{27} & M_{28} & M_{29} & M_{2,10} & M_{2,11} & L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{25} & L_{27} & L_{28} & L_{29} & L_{2,11} & 0 & 0 \\
M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{37} & M_{38} & M_{39} & M_{3,10} & M_{3,11} & L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{35} & L_{37} & L_{38} & L_{39} & L_{3,11} & 0 & 0 \\
M_{51} & M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{55} & M_{57} & M_{58} & M_{59} & M_{5,10} & M_{5,11} & L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{55} & L_{57} & L_{58} & L_{59} & L_{5,11} & 0 & 0 \\
M_{71} & M_{72} & M_{73} & M_{74} & M_{75} & M_{77} & M_{78} & M_{79} & M_{7,10} & M_{7,11} & L_{71} & L_{72} & L_{73} & L_{75} & L_{77} & L_{78} & L_{79} & L_{7,11} & 0 & 0 \\
M_{81} & M_{82} & M_{83} & M_{84} & M_{85} & M_{87} & M_{88} & M_{89} & M_{8,10} & M_{8,11} & L_{81} & L_{82} & L_{83} & L_{85} & L_{87} & L_{88} & L_{89} & L_{8,11} & 0 & 0 \\
M_{91} & M_{92} & M_{93} & M_{94} & M_{95} & M_{97} & M_{98} & M_{99} & M_{9,10} & M_{9,11} & L_{91} & L_{92} & L_{93} & L_{95} & L_{97} & L_{98} & L_{99} & L_{9,11} & 0 & 0 \\
M_{11,1} & M_{11,2} & M_{11,3} & M_{11,4} & M_{11,5} & M_{11,7} & M_{11,8} & M_{11,9} & M_{11,10} & M_{11,11} & L_{11,1} & L_{11,2} & L_{11,3} & L_{11,5} & L_{11,7} & L_{11,8} & L_{11,9} & L_{11,11} & 0 & 0 \\
I_{1,1} & I_{1,2} & I_{1,3} & I_{1,4} & I_{1,5} & I_{1,7} & I_{1,8} & I_{1,9} & I_{1,10} & I_{1,11} & J_{1,1} & J_{1,2} & J_{1,3} & J_{1,5} & J_{1,7} & J_{1,8} & J_{1,9} & J_{1,11} & 0 & 0 \\
I_{3,1} & I_{3,2} & I_{3,3} & I_{3,4} & I_{3,5} & I_{3,7} & I_{3,8} & I_{3,9} & I_{3,10} & I_{3,11} & J_{3,1} & J_{3,2} & J_{3,3} & J_{3,5} & J_{3,7} & J_{3,8} & J_{3,9} & J_{3,11} & 0 & 0
\end{array}
\begin{array}{c}
\Delta \theta_1 \\
\Delta \theta_2 \\
\Delta \theta_3 \\
\Delta \theta_4 \\
\Delta \theta_5 \\
\Delta \theta_7 \\
\Delta \theta_8 \\
\Delta \theta_9 \\
\Delta \theta_{10} \\
\Delta \theta_{11} \\
\Delta V_1 \\
\Delta V_2 \\
\Delta V_3 \\
\Delta V_5 \\
\Delta V_7 \\
\Delta V_8 \\
\Delta V_9 \\
\Delta V_{11} \\
\Delta P_{G4} \\
\Delta P_{G10}
\end{array}$$

(2.44)

Com a incorporação das equações de controle de intercâmbio de áreas, aparecem novos elementos na matriz Jacobiana. Os elementos referentes às colunas adicionais da equação geral (2.44), de acordo com a equação (2.43), são dados por:

$$\begin{aligned}
N_{4,12} &= -\frac{\partial \Delta P_4}{\partial P_{G4}} = -1 \\
N_{4,13} &= -\frac{\partial \Delta P_{10}}{\partial P_{G10}} = -1
\end{aligned}
\tag{2.45}$$

Ao final de cada iteração h do processo de solução, as potências ativas geradas das barras de folga 4 e 10 são atualizadas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
P_{G4}^{(h+1)} &= P_{G4}^{(h)} + \Delta P_{G4}^{(h)} \\
P_{G10}^{(h+1)} &= P_{G10}^{(h)} + \Delta P_{G10}^{(h)}
\end{aligned}
\tag{2.46}$$

O processo iterativo continua até que sejam atingidas as tolerâncias correspondentes das equações (2.7).

2.5.2 Múltiplas Barras de Folga Numa mesma Área

A metodologia proposta por Dos Santos (SANTOS et al., 2004) é muito flexível, pois permite a consideração de mais de uma barra de folga por área. Este fato é importante na manutenção dos intercâmbios quando são considerados os limites de geração de potência ativas das barras de folga. Além da inclusão das equações de controles de intercâmbio entre áreas na matriz Jacobiana, agora também se faz a inclusão de equações de controle adicionais correspondentes às relações de geração de potência ativa entre as múltiplas barras de folga (MODELO, 200-).

Seja i uma área composta por nf barras de folga. A contribuição de geração de potência ativa de cada barra de folga é dada pelo seu fator de participação (ger_i) que podem ser escolhidos pelo usuário e geralmente são associados ao custo de geração que são obtidos dos dados de planejamento do sistema (CASTRO, 2007; LO; ZHANG, 1993). Neste trabalho, as relações dos fatores de participação das barras de folga são calculadas através das seguintes expressões:

$$\begin{aligned}\alpha_{12} &= ger_1 / ger_2 = P_{G10} / P_{G20} \\ \alpha_{23} &= ger_2 / ger_3 = P_{G20} / P_{G30} \\ &\vdots \\ \alpha_{(nf-1)nf} &= ger_{(nf-1)} / ger_{nf} = P_{G(nf-1)0} / P_{Gnf0}\end{aligned}\quad (2.47)$$

e as relações entre as contribuições de geração de potência ativa das barras de folga (P_{Gf}) são calculados por:

$$\begin{aligned}P_{G1} &= \alpha_{12} P_{G2} \\ P_{G2} &= \alpha_{23} P_{G3} \\ &\vdots \\ P_{G(nf-1)} &= \alpha_{(nf-1)nf} P_{Gnf}\end{aligned}\quad (2.48)$$

Reescrevendo o sistema de equações acima se calcula os resíduos do controle das múltiplas barras de folga (Δg_f), e que representam a diferença de geração de potência ativa com respeito a sua subsequente barra de folga:

$$\begin{aligned}\Delta g_1 &= P_{G1} - \alpha_{12} \cdot P_{G2} \\ \Delta g_2 &= P_{G2} - \alpha_{23} \cdot P_{G3} \\ &\vdots \\ \Delta g_{(nf-1)} &= P_{G(nf-1)} - \alpha_{(nf-1)nf} \cdot P_{Gnf}\end{aligned}\quad (2.49)$$

Para se incluir na matriz Jacobiana, o sistema de equações acima é colocado na seguinte forma linearizada:

$$\begin{aligned}
 \Delta g_1 &= \Delta P_{G1} - \alpha_{12} \cdot \Delta P_{G2} \\
 \Delta g_2 &= \Delta P_{G2} - \alpha_{23} \cdot \Delta P_{G3} \\
 &\vdots \\
 \Delta g_{(nf-1)} &= \Delta P_{G(nf-1)} - \alpha_{(nf-1)nf} \cdot \Delta P_{Gnf}
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

onde ΔP_G são os incrementos de potência ativa geradas nas barras de folga. O sistema de equações aumentado a ser resolvido a cada iteração (v) no problema geral de fluxo de potência é representado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \\ \Delta g \end{bmatrix}^v = \begin{bmatrix} H & N & -\frac{\partial \Delta P}{\partial P_G} \\ M & L & -\frac{\partial \Delta Q}{\partial P_G} \\ \frac{\partial PI}{\partial \theta} & \frac{\partial PI}{\partial V} & -\frac{\partial \Delta PI}{\partial P_G} \\ -\frac{\partial \Delta g}{\partial \theta} & -\frac{\partial \Delta g}{\partial V} & -\frac{\partial \Delta g}{\partial P_G} \end{bmatrix}^v \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \end{bmatrix}^v \tag{2.51}$$

As atualizações das potências ativas geradas das barras de folga são obtidas por meio da equação (2.42).

2.5.2.1 Exemplo Ilustrativo Considerando Múltiplas Barras de Folga Numa mesma Área

Considere a figura 3 que representa um sistema de 11 barras, 3 áreas e 2 barras de folga nas áreas 1 (barras 1 e 4) e na área 3 (barras 7 e 10).

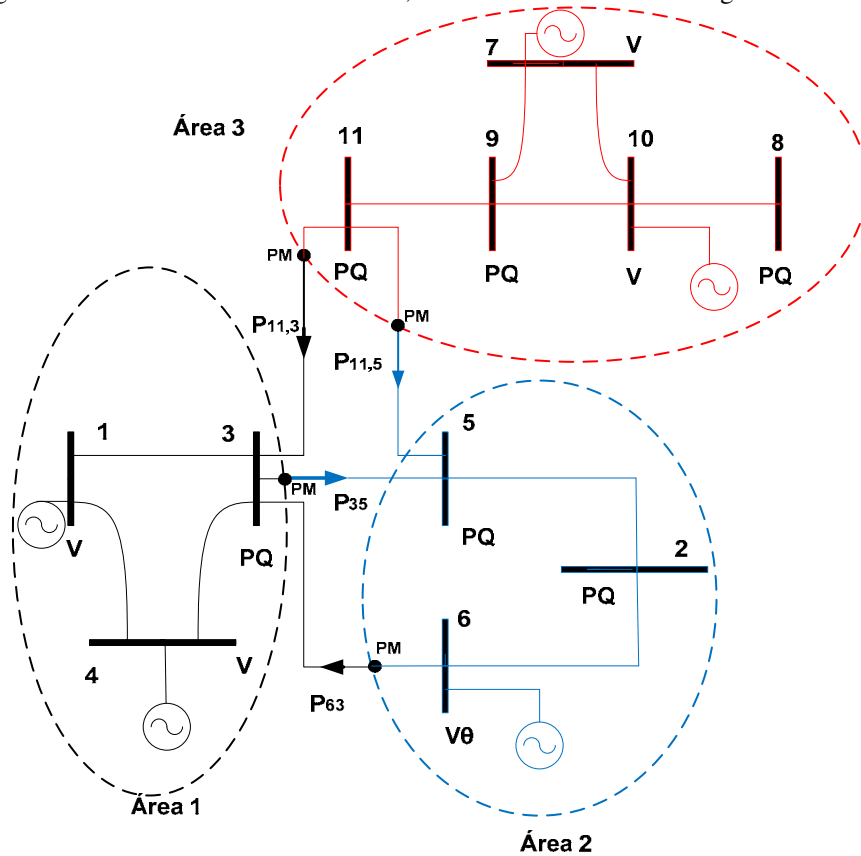
As novas equações de controle das múltiplas barras de folga são:

$$\begin{aligned}
 \Delta g_1 &= P_{G1} - \alpha_{14} \cdot P_{G4} \\
 \Delta g_2 &= P_{G7} - \alpha_{7,10} \cdot P_{G10}
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

Reescrevendo o sistema de equações acima na forma linearizada, de forma a incluí-lo na matriz Jacobiana, obtém-se:

$$\begin{aligned}\Delta g_1 &= \Delta P_{G1} - \alpha_{14} \cdot \Delta P_{G4} \\ \Delta g_2 &= \Delta P_{G7} - \alpha_{7,10} \cdot \Delta P_{G10}\end{aligned}\quad (2.53)$$

Figura 3- Sistema de 11 barras e 3 áreas, considerando 2 barras de folga nas áreas 1 e 3



Fonte: Santos (2002)

O sistema aumentado a ser resolvido a cada iteração pelo método de Newton-Raphson é dado pela seguinte equação:

ΔP_1	=	H_{11}	H_{12}	H_{13}	H_{14}	H_{15}	H_{17}	H_{18}	H_{19}	$H_{1,10}$	$H_{1,11}$	N_{12}	N_{13}	N_{15}	N_{18}	N_{19}	$N_{1,11}$	$N_{1,12}$	0	0	0	$\Delta \theta_1$
ΔP_2		H_{21}	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	H_{27}	H_{28}	H_{29}	$H_{2,10}$	$H_{2,11}$	N_{22}	N_{23}	N_{25}	N_{28}	N_{29}	$N_{2,11}$	0	0	0	$\Delta \theta_2$	
ΔP_3		H_{31}	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	H_{37}	H_{38}	H_{39}	$H_{3,10}$	$H_{3,11}$	N_{32}	N_{33}	N_{35}	N_{38}	N_{39}	$N_{3,11}$	0	0	0	$\Delta \theta_3$	
ΔP_4		H_{41}	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	H_{47}	H_{48}	H_{49}	$H_{4,10}$	$H_{4,11}$	N_{42}	N_{43}	N_{45}	N_{48}	N_{49}	$N_{4,11}$	0	0	$N_{4,14}$	0	$\Delta \theta_4$
ΔP_5		H_{51}	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	H_{57}	H_{58}	H_{59}	$H_{5,10}$	$H_{5,11}$	N_{52}	N_{53}	N_{55}	N_{58}	N_{59}	$N_{5,11}$	0	0	0	$\Delta \theta_5$	
ΔP_7		H_{71}	H_{72}	H_{73}	H_{74}	H_{75}	H_{77}	H_{78}	H_{79}	$H_{7,10}$	$H_{7,11}$	N_{72}	N_{73}	N_{75}	N_{78}	N_{79}	$N_{7,11}$	0	$N_{7,13}$	0	0	$\Delta \theta_7$
ΔP_8		H_{81}	H_{82}	H_{83}	H_{84}	H_{85}	H_{87}	H_{88}	H_{89}	$H_{8,10}$	$H_{8,11}$	N_{82}	N_{83}	N_{85}	N_{88}	N_{89}	$N_{8,11}$	0	0	0	$\Delta \theta_8$	
ΔP_9		H_{91}	H_{92}	H_{93}	H_{94}	H_{95}	H_{97}	H_{98}	H_{99}	$H_{9,10}$	$H_{9,11}$	N_{92}	N_{93}	N_{95}	N_{98}	N_{99}	$N_{9,11}$	0	0	0	$\Delta \theta_9$	
ΔP_{10}		$H_{10,1}$	$H_{10,2}$	$H_{10,3}$	$H_{10,4}$	$H_{10,5}$	$H_{10,7}$	$H_{10,8}$	$H_{10,9}$	$H_{10,10}$	$H_{10,11}$	$N_{10,2}$	$N_{10,3}$	$N_{10,5}$	$N_{10,8}$	$N_{10,9}$	$N_{10,11}$	0	0	0	$N_{10,15}$	$\Delta \theta_{10}$
ΔP_{11}		$H_{11,1}$	$H_{11,2}$	$H_{11,3}$	$H_{11,4}$	$H_{11,5}$	$H_{11,7}$	$H_{11,8}$	$H_{11,9}$	$H_{11,10}$	$H_{11,11}$	$N_{11,2}$	$N_{11,3}$	$N_{11,5}$	$N_{11,8}$	$N_{11,9}$	$N_{11,11}$	0	0	0	0	$\Delta \theta_{11}$
ΔQ_2		M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}	M_{27}	M_{28}	M_{29}	$M_{2,10}$	$M_{2,11}$	L_{22}	L_{23}	L_{25}	L_{28}	L_{29}	$L_{2,11}$	0	0	0	0	ΔV_2
ΔQ_3		M_{31}	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	M_{37}	M_{38}	M_{39}	$M_{3,10}$	$M_{3,11}$	L_{32}	L_{33}	L_{35}	L_{38}	L_{39}	$L_{3,11}$	0	0	0	0	ΔV_3
ΔQ_5		M_{51}	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	M_{57}	M_{58}	M_{59}	$M_{5,10}$	$M_{5,11}$	L_{52}	L_{53}	L_{55}	L_{58}	L_{59}	$L_{5,11}$	0	0	0	0	ΔV_5
ΔQ_8		M_{81}	M_{82}	M_{83}	M_{84}	M_{85}	M_{87}	M_{88}	M_{89}	$M_{8,10}$	$M_{8,11}$	L_{82}	L_{83}	L_{85}	L_{88}	L_{89}	$L_{8,11}$	0	0	0	0	ΔV_8
ΔQ_9		M_{91}	M_{92}	M_{93}	M_{94}	M_{95}	M_{97}	M_{98}	M_{99}	$M_{9,10}$	$M_{9,11}$	L_{92}	L_{93}	L_{95}	L_{98}	L_{99}	$L_{9,11}$	0	0	0	0	ΔV_9
ΔQ_{11}		$M_{11,1}$	$M_{11,2}$	$M_{11,3}$	$M_{11,4}$	$M_{11,5}$	$M_{11,7}$	$M_{11,8}$	$M_{11,9}$	$M_{11,10}$	$M_{11,11}$	$L_{11,2}$	$L_{11,3}$	$L_{11,5}$	$L_{11,8}$	$L_{11,9}$	$L_{11,11}$	0	0	0	0	ΔV_{11}
ΔP_{I1}		$I_{1,1}$	$I_{1,2}$	$I_{1,3}$	$I_{1,4}$	$I_{1,5}$	$I_{1,7}$	$I_{1,8}$	$I_{1,9}$	$I_{1,10}$	$I_{1,11}$	$J_{1,2}$	$J_{1,3}$	$J_{1,5}$	$J_{1,8}$	$J_{1,9}$	$J_{1,11}$	0	0	0	0	ΔP_{G1}
ΔP_{I3}		$I_{3,1}$	$I_{3,2}$	$I_{3,3}$	$I_{3,4}$	$I_{3,5}$	$I_{3,7}$	$I_{3,8}$	$I_{3,9}$	$I_{3,10}$	$I_{3,11}$	$J_{3,2}$	$J_{3,3}$	$J_{3,5}$	$J_{3,8}$	$J_{3,9}$	$J_{3,11}$	0	0	0	0	ΔP_{G7}
$\Delta g1$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$L_{1,12}$	0	$L_{1,14}$	0	ΔP_{G4}
$\Delta g2$		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$L_{2,13}$	0	$L_{2,15}$	ΔP_{G10}

(2.54)

Os elementos referentes às colunas adicionais da equação (2.54), de acordo com a equação (2.43), são dados por:

$$\begin{aligned}
 N_{1,12} &= -\frac{\partial \Delta P_1}{\partial P_{G1}} = -1 \\
 N_{4,14} &= -\frac{\partial \Delta P_4}{\partial P_{G4}} = -1 \\
 N_{4,12} &= -\frac{\partial \Delta P_7}{\partial P_{G7}} = -1 \\
 N_{10,15} &= -\frac{\partial \Delta P_{10}}{\partial P_{G10}} = -1
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

Os demais elementos, de acordo com as equações (2.50) e (2.51), são dados por:

$$\begin{aligned}
 L_{1,12} &= -1 \\
 L_{1,14} &= \alpha_{14} \\
 L_{2,13} &= -1 \\
 L_{2,15} &= \alpha_{7,10}
 \end{aligned}
 \tag{2.56}$$

2.6 Consideração dos Limites de Geração de Potência Ativa das Barras Folga

De acordo a curva de capacidade dos geradores, a injeção de potência ativa das barras de folga tem um limite especificado. Assim, quando estas barras de folga violam seus respectivos limites, estas deixam de ser barra de folga (tipo V) e passam a ser barra do tipo PV, com uma geração de potência ativa especificada em seu limite violado.

Se uma área do sistema possui apenas uma barra de folga e se a mesma viola seu limite de geração de potência ativa, esta área não mais poderá controlar seu intercâmbio, i.e., mantê-lo no seu valor especificado. Por outro lado, se uma área possui mais de uma barra de folga e só uma delas viola seu limite de geração de potência ativa, o intercâmbio líquido desta área fica controlado pelas barras de folgas restantes nesta área, e que não violaram seus limites de injeção de potência ativa.

2.7 Comparação Entre as Metodologias para Controle de Intercâmbio Entre Áreas no Problema de Fluxo de Carga.

Neste item são apresentados os resultados obtidos pelas simulações feitas no ambiente MATLAB usando as três metodologias de CIA:

1. Metodologia de ajuste alternado (STAGG; EL-ABIAD, 1968).
2. Metodologia descrita em (MONTICELLI, 1983).
3. Metodologia descrita em (SANTOS et al., 2004).

Foi analisado um sistema de pequeno porte de 11 barras e 14 linhas. O resíduo máximo de potência ativa e reativa considerado na resolução das equações do fluxo de potência devem ser menores que a tolerância 10^{-5} p.u., enquanto que os resíduos do CIA devem ser menores que a tolerância 0,1 p.u. A potência base é de 100 MVA. Além disto, foram considerados dois cenários distintos para a análise do sistema, sendo:

1. Uma barra de folga por área, considerando o CIA.
2. Múltiplas barras de folga por área, considerando o CIA.

2.7.1 Uma Barra de Folga por Área Considerando o CIA.

A figura 2 representa o sistema a ser avaliado usando os métodos de controle de intercâmbio entre áreas. A solução do sistema considerando o controle de intercâmbio entre áreas é apresentada na tabela 1.

Tabela 1- Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.

Número da Barra	V (p.u.)	θ (graus)	Injeção		Geração		Carga	
			(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
1	0,9789	12,291	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000
2	0,9836	-1,6597	-15,000	8,000	-0,000	-0,000	15,000	-8,000
3	0,9742	7,4238	-25,000	-1,000	0,000	0,000	25,000	1,000
4	1,0000	17,8564	54,780	2,578	64,780	2,578	10,000	0,000
5	0,9667	2,5156	-10,000	9,000	0,000	0,000	10,000	-9,000
6	1,0000	0,0000	-20,386	9,771	4,614	9,771	25,000	0,000
7	0,9861	23,0959	-3,000	-1,000	-0,000	0,000	3,000	1,000
8	0,9554	22,4927	-15,000	-5,000	0,000	0,000	15,000	5,000
9	0,9835	20,2657	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000
10	1,0000	26,6942	49,833	7,162	51,833	7,162	2,000	0,000
11	0,9909	11,7681	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000

Onde os intercâmbios nas linhas do sistema são:

$$\begin{aligned}
 P_{35} &= -P_{53} = 15,908\text{MW} \\
 P_{65} &= -P_{63} = -22,898\text{MW} \\
 P_{11,3} &= -P_{11,3} = 14,806\text{MW} \\
 P_{11,5} &= -P_{5,11} = 9,194\text{MW}
 \end{aligned}
 \tag{2.57}$$

Os intercâmbios líquidos das áreas 1 e 3 são, respectivamente:

$$\begin{aligned}
 PI_1 &= -P_{11,3} + P_{35} - P_{63} = 24\text{MW} \\
 PI_3 &= P_{11,3} + P_{11,5} = 24\text{MW}
 \end{aligned}
 \tag{2.58}$$

O intercâmbio líquido da área 2 pode ser obtido tanto pela primeira lei de Kirchhoff quanto pelo somatório dos intercâmbios que conectam essa área com as áreas 1 e 3.

$$PI_2 = -P_{11,5} - P_{35} + P_{63} = -48\text{MW}
 \tag{2.59}$$

A tabela 2 mostra alguns resultados por área deste sistema.

Tabela 2- Intercâmbios líquidos, considerando uma barra de folga por Área.

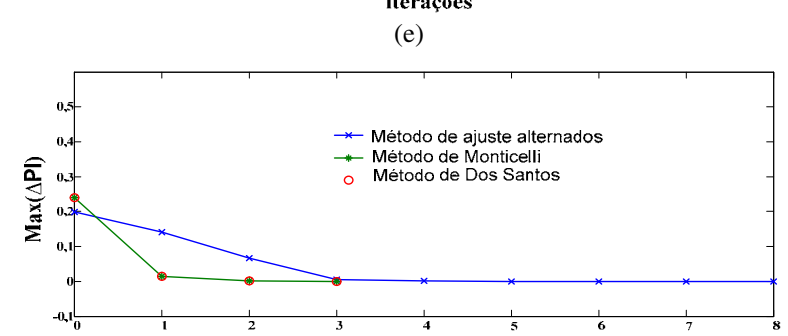
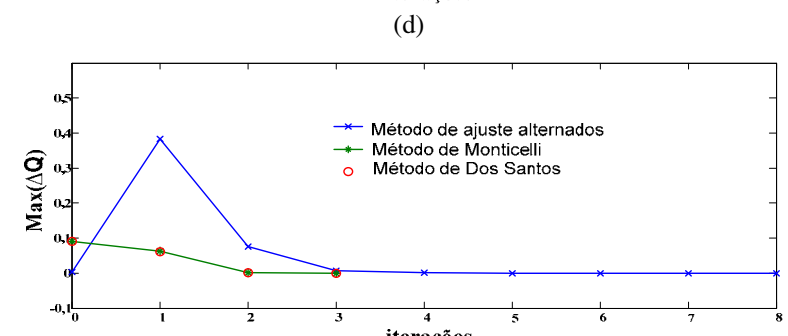
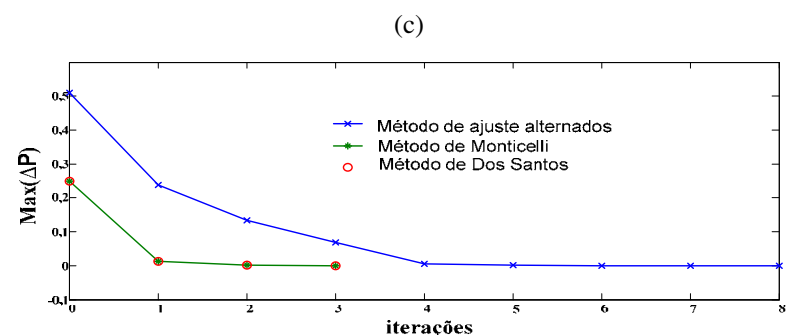
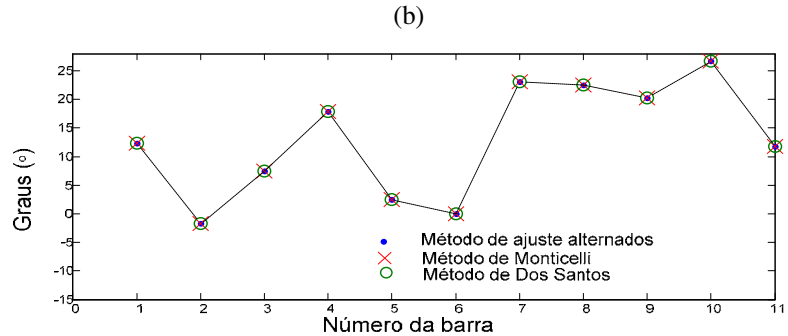
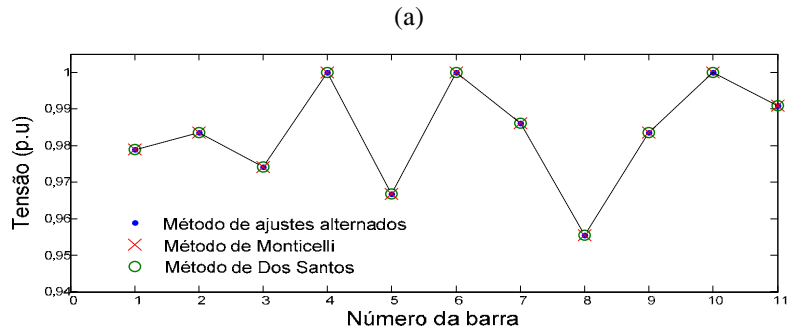
Área	Barra de Folga	Intercâmbio Líquido (MW)
1	4	24
2	6	-48
3	10	24

A tabela 3 mostra uma comparação entre as trajetórias de convergência dos métodos testados, onde se pode ver que pelo método de Ajuste Alternado o problema converge em 8 iterações, e em 3 iterações para os métodos descrito em Monticelli e proposto por Dos Santos. As figuras 4 (a) e 4(b) mostram os valores finais das convergências para os 3 métodos.

Tabela 3- Trajetória de convergência em p.u. do sistema utilizando as três metodologias e considerando apenas uma barra folga por área

Iteração	Método de Ajustes Alternados			Método de Monticelli			Método de Marcelo Dos Santos		
	Max ΔP	Max ΔQ	Max ΔPI	Max ΔP	Max ΔQ	Max ΔPI	Max ΔP	Max ΔQ	Max ΔPI
0	0,5146	0,0028	0,1994	0,25	0,09	0,24	0,25	0,09	0,24
1	0,2367	0,3829	0,1407	0,013	0,0622	0,0143	0,0133	0,0605	0,0149
2	0,1331	0,0767	0,0658	0,001	0,0013	0,0011	0,0006	0,0010	0,0007
3	0,0676	0,0065	0,0046	1E-06	1,3E-06	1,8E-05	5,8E-07	5,6E-07	9,6E-06
4	0,0047	0,0021	0,0012	--	--	--	--	--	--
5	0,0012	1,6E-05	0,0002	--	--	--	--	--	--
6	0,0002	9,2E-7	2,6E-05	--	--	--	--	--	--
7	2,6E-5	1,6E-8	3,3E-06	--	--	--	--	--	--
8	3,3E-6	2,8E-10	4,2E-07	--	--	--	--	--	--

Figure 4- Convergência para os 3 métodos (a) tensão das barras (b) ângulos das barras.



Fonte: Avila (2012)

2.7.2 Múltiplas Barras de Folga por Área Considerando o CIA.

A figura 3 representa o sistema a ser avaliado, o sistema convergiu em 3 iterações utilizando a metodologia descrita em (SANTOS et al., 2004). A tabela 4 mostra os intercâmbios líquidos e as potências ativas geradas pelas barras de folga consideradas.

Tabela 4- Intercâmbios líquidos, considerando duas barras de folga por Área.

Área	Barra de Folga	Fator de Participação (%)	Potência Ativa Gerada (MW)	Intercâmbio Líquido (MW)
1	1	30	19,259	24
	4	70	44,939	
2	6	--	--	-48
3	7	60	31,009	24
	10	40	20,673	

A solução do sistema é mostrada na tabela 5 e 6.

Tabela 5- Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.

Número de Barra	V (p.u)	θ (graus)	Injeção		Geração		Carga	
			(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
1	1,000	13,761	16,259	1,768	19,259	2,768	3,000	1,000
2	0,987	-1,806	-15,000	8,000	0,000	0,000	15,000	-8,000
3	0,982	7,216	-25,000	-1,000	0,000	0,000	25,000	1,000
4	1,000	15,618	34,939	-1,141	44,939	-1,141	10,000	0,000
5	0,972	2,366	-10,000	9,000	0,000	0,000	10,000	-9,000
6	1,000	0,000	-20,415	7,754	4,585	7,754	25,000	0,000
7	1,000	25,637	28,009	-2,589	31,009	-1,589	3,000	1,000
8	0,955	18,994	15,000	-5,000	-0,000	0,000	15,000	5,000
9	0,991	19,843	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000
10	1,000	23,195	18,673	8,029	20,673	8,029	2,000	0,000
11	0,998	11,474	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000

Tabela 6- Fluxos de potência nas linhas de intercâmbio do sistema.

Da Barra	Para Barra	P (MW)	Q (Mvar)	Da Área	Para Área
3	5	16,005	-0,754	1	2
3	6	22,721	-9,735	1	2
3	11	-14,726	-0,873	1	3
5	3	-16,005	0,754	2	1
5	11	-9,274	10,845	2	3
6	3	-22,721	9,735	2	1
11	3	14,726	0,873	3	1
11	5	9,274	-10,845	3	2

Os respectivos intercâmbios líquidos das áreas 1 e 3 são:

$$PI_1 = -P_{11,3} + P_{35} - P_{63} = 24\text{MW} \quad (2.60)$$

$$PI_3 = P_{11,3} + P_{11,5} = 24\text{MW}$$

O intercâmbio líquido da área 2 pode ser obtido tanto pela primeira lei de Kirchhoff quanto pelo somatório dos intercâmbios que conectam essa área com as áreas 1 e 3.

$$PI_2 = -P_{11,5} - P_{35} + P_{63} = -48\text{MW} \quad (2.61)$$

2.7.2.1 Múltiplas Barras de Folga por Área, Considerando os Limites de Geração de Potência Ativa das Barras 1 e 7.

Considera-se o mesmo sistema de duas barras folga por área, só que a barra folga 1 tem limite de geração de **18 MW**, enquanto a barra folga 7 tem limite de geração de **28 MW**. Quando estes limites de geração são violados, estas barras vão passar a ser consideradas como barras PV, e as únicas barras que irão controlar o intercâmbio serão a barra folga 4 da área 1 e a barra folga 10 da área 3. Na tabela 7 apresentam-se os resultados do controle de intercâmbio.

Tabela 7- Intercâmbios líquidos, considerando os limites de geração de potência ativa.

Área	Barra de Folga	Fator de Participação (%)	Potência Ativa Gerada (MW)	Intercâmbio Líquido (MW)
1	1	28,03	18,000	24
	4	71,96	46,216	
2	6	--	--	-48
3	7	54,22	28,000	24
	10	45,77	23,637	

A solução do sistema é apresentada nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8- Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.

Número de Barra	V (p.u)	θ (graus)	Injeção		Geração		Carga	
			(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
1	1,000	13,636	15,000	2,003	18,000	3,003	3,000	1,000
2	0,987	-1,806	-15,000	8,000	0,000	0,000	15,000	-8,000
3	0,981	7,216	-25,000	-1,000	0,000	0,000	25,000	1,000
4	1,000	15,744	36,216	-1,300	46,216	-1,300	10,000	0,000
5	0,972	2,365	-10,000	9,000	0,000	0,000	10,000	9,000
6	1,000	0,000	-20,416	7,756	4,584	7,756	25,000	0,000
7	1,000	25,336	25,000	-2,181	28,000	-1,181	3,000	1,000
8	0,955	19,286	15,000	-5,000	0,000	0,000	15,000	5,000
9	0,991	19,840	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000
10	1,000	23,488	21,637	7,406	23,637	7,406	2,000	0,000
11	0,998	11,473	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000

Tabela 9- Fluxos de potência nas linhas de intercâmbio do sistema.

Da Barra	Para Barra	P (MW)	Q (Mvar)	Da Área	Para Área
3	5	16,004	-0,757	1	2
3	6	22,721	-9,736	1	2
3	11	-14,724	-0,881	1	3
5	3	-16,004	0,757	2	1
5	11	-9,276	10,843	2	3
6	3	-22,721	9,736	2	1
11	3	14,724	0,881	3	1
11	5	9,276	-10,843	3	2

Os intercâmbios líquidos das áreas 1 e 3 são, respectivamente:

$$\begin{aligned} PI_1 &= -P_{11,3} + P_{35} - P_{63} = 24\text{MW} \\ PI_3 &= P_{11,3} + P_{11,5} = 24\text{MW} \end{aligned} \quad (2.62)$$

O intercâmbio líquido da área 2 pode ser obtido tanto pela primeira lei de Kirchhoff quanto pelo somatório dos intercâmbios que conectam essa área com as áreas 1 e 3.

$$PI_2 = -P_{11,5} - P_{35} + P_{63} = -48\text{MW} \quad (2.63)$$

2.7.2.2 Múltiplas barras de Folga por Área, Considerando os Limites de Geração de Potência Ativa das Barras 1 e 4.

Considera-se o mesmo sistema de duas barras folga por área. Só que a barra folga 1 possui limite de geração de **18 MW**, enquanto que a barra folga 4 tem limite de geração de **43 MW**. Estas barras de folga são da área 1, quando estes limites de geração são violados estas barras vão passar a ser consideradas como barras PV, e como a área 1 já não tem mais barras folga para controlar o intercâmbio, esta área não vai poder controlar seu intercâmbio. A tabela 10 mostra os resultados do controle de intercâmbio.

Tabela 10- Intercâmbios líquidos, considerando os limites de geração de potência ativa.

Área	Barra de Folga	Fator de Participação (%)	Potência Ativa Gerada (MW)	Intercâmbio Líquido (MW)
1	1	29,5	18,000	21,08
	4	70,5	43,000	
2	6	--	--	-45,08
3	7	60,0	31,009	24,00
	10	40,0	20,673	

A solução do sistema é mostrada na tabela 11 e tabela 12.

Tabela 11- Solução do sistema considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas.

Número de Barra	V (p.u)	θ (graus)	Injeção		Geração		Carga	
			(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
1	1,000	12,5627	15,000	1,692	18,000	2,692	3,000	1,000
2	0,9854	-2,2574	-15,000	8,000	0,000	0,000	15,000	-8,000
3	0,9826	6,4569	-25,000	-1,000	0,000	0,000	25,000	1,000
4	1,000	14,3510	33,000	-1,160	43,000	-1,160	10,000	0,000
5	0,9728	1,7549	-10,000	9,000	0,000	0,000	10,000	-9,000
6	1,000	0,0000	-17,530	6,293	7,470	6,293	25,000	0,000
7	1,000	24,9103	28,009	-2,593	31,009	-1,593	3,000	1,000
8	0,9554	18,2670	-15,000	-5,000	-0,000	0,000	15,000	5,000
9	0,9909	19,1163	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000
10	1,000	2,2,685	18,673	8,025	20,673	8,025	2,000	0,000
11	0,9983	10,7474	-3,000	-1,000	0,000	0,000	3,000	1,000

Tabela 12- Fluxos de potência nas linhas de intercâmbio do sistema.

Da Barra	Para Barra	P (MW)	Q (Mvar)	Da Área	Para Área
3	5	15,563	-0,544	1	2
3	6	20,341	-8,795	1	2
3	11	-14,821	-0,719	1	3
5	3	-15,563	0,544	2	1
5	11	-9,179	10,697	2	3
6	3	-20,341	8,795	2	1
11	3	14,821	0,719	3	1
11	5	9,179	-10,697	3	2

Os intercâmbios líquidos das áreas 1 e 3 são, respectivamente:

$$PI_1 = -P_{11,3} + P_{35} - P_{63} = 21,08\text{MW}$$

$$PI_3 = P_{11,3} + P_{11,5} = 24\text{MW} \quad (2.64)$$

O intercâmbio líquido da área 2, pode ser obtido tanto pela primeira lei de Kirchhoff quanto pelo somatório dos intercâmbios que conectam essa área com as áreas 1 e 3.

$$PI_2 = -P_{11,5} - P_{35} + P_{63} = -45,08\text{MW} \quad (2.65)$$

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DA ESTABILIDADE ESTÁTICA DE TENSÃO

3.1 Introdução

A evolução dos sistemas elétricos de potência trouxe uma maior investigação dos problemas relacionados com a instabilidade de tensão, angular e de frequência. É importante estabelecer a distinção entre elas. Neste trabalho vamos fazer o estudo de estabilidade estática de tensão que está relacionado a sistemas elétricos que operam sob condições estressantes, com linhas de transmissão com carregamento elevado, fontes locais de potência reativa insuficientes, transmissão de potência através de grandes distâncias.

Um ponto de operação normal (ou ponto de equilíbrio) não deve ser entendido como um ponto estático, visto que o sistema é continuamente submetido a pequenas perturbações representadas pelas variações das cargas e pelas diversas ações de controle, ocorrência de contingências que por operarem próximo de seus limites operacionais estão sujeitos a ser vulneráveis a problemas de estabilidade e colapsos de tensão. Para prevenir tais acontecimentos, os planejadores e operadores de sistemas estão procurando por ferramentas que indiquem onde o sistema está operando com respeito ao ponto crítico.

3.2 Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência

A estabilidade de sistema de potência pode ser definida, em termos gerais, como sendo a propriedade dos sistemas que permite que eles permaneçam num estado de operação de equilíbrio sob condições normais de operação e atinjam um estado de equilíbrio aceitável após serem submetidos a um distúrbio pequeno ou grande (KUNDUR, 1993).

A instabilidade de tensão pode ocorrer após o sistema de potência ser submetido a uma contingência, ou a um aumento de carga, ou a alterações nas condições do sistema, que ocasiona uma progressiva e descontrolada queda nas tensões, e conduza-o a um blecaute, acarretando sérios problemas financeiros. Fator que causa a instabilidade e a incapacidade de

um sistema a responder à necessidade de potência reativa localmente, embora as suas consequências possam ser mais generalizadas.

Entre os principais fatores que influem na estabilidade de tensão, destacam-se:

- A capacidade de fornecimento de potência reativa dos geradores que é limitada.
- O comportamento da linha de transmissão em função de seu carregamento e de seu comprimento que são validadas pelas curvas de St. Clair, sendo as condições de alto carregamento a mais crítica sob o aspecto de estabilidade de tensão.
- O tipo das cargas que estão modeladas na barra da subestação, usualmente representadas por um modelo composto que considera parcelas de carga com diferentes comportamentos do tipo cargas industrial e residencial, sendo que o comportamento de algumas cargas são mais críticas sob aspecto de estabilidade de tensão.

Dentre as abordagens estáticas que são adotadas pela empresas, têm-se os métodos baseado na obtenção das curvas P-V e Q-V para uma barra de interesse no sistema, com modelos cada vez melhores e novos estudos para tornar-lo mais competitivo (AJJARAPU; CHRISTY, 1992; ALVES, 2000; CHIANG et al., 1995; CAÑIZARES et al., 1992; SHIN et al., 2002).

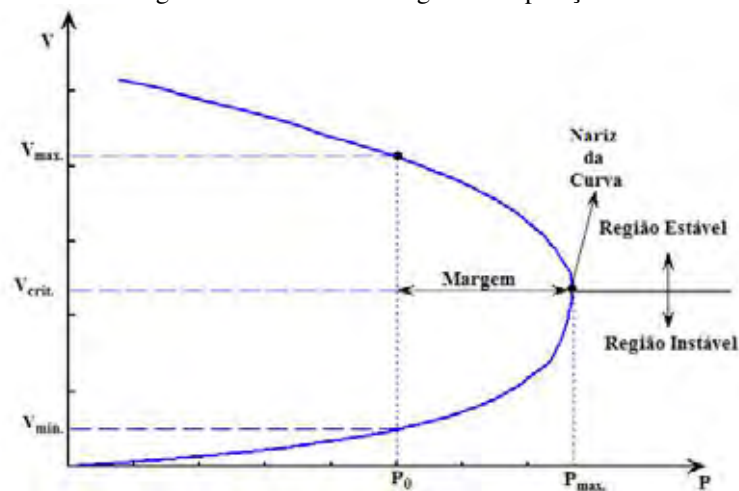
3.3 Curva P-V

O método da curva P-V consiste na obtenção da margem de estabilidade de tensão de um sistema elétrico de potência através das soluções do fluxo de potência para sucessivos incrementos de carga e geração, considerando um cenário energético que se deseja avaliar. A margem de estabilidade de tensão é medida pela distância entre o ponto de operação e o ponto de máximo carregamento (PMC), ou seja, é definida como o maior aumento de carga que o sistema pode ter a partir de um ponto de operação, sem provocar o colapso de tensão, mantendo um grau de segurança para o sistema. Assim, é importante dispor-se de meios eficientes para se calcular a distância de um ponto de operação do sistema ao ponto crítico, i.e., ao PMC.

Na figura 5 é mostrada a curva P-V de uma barra de um sistema. Para cada ponto de operação do sistema (P_o) existem duas soluções de magnitudes de tensão (V_{max} e V_{min}), como também uma margem de estabilidade que é definida como o maior aumento de carga que o

sistema pode ter sem provocar colapso de tensão ($\Delta P = P_{\max} - P_0$). A parte superior da curva representa a região estável e a parte inferior a região instável.

Figura 5- Curva P-V –Regiões de operação



Fonte: Amorim (2011)

No ponto de operação estável da curva, um aumento da demanda produzirá um aumento das perdas reativas nas linhas de transmissão, como também de motores de indução o que resulta diminuição da magnitude de tensão do sistema e que poderá provocar um colapso de tensão, a não ser que sejam efetuadas medidas corretivas tais como o ajuste nas magnitudes da tensão de geradores ou de *taps* de transformadores, a injeção de potência reativa ou a redução de carga.

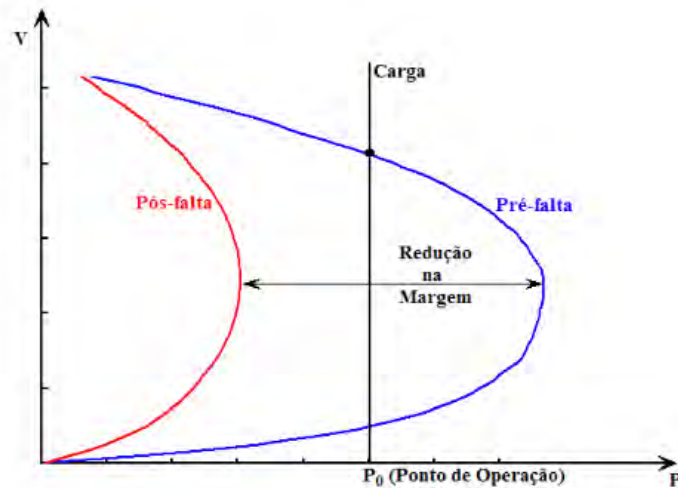
Uma vez obtida a curva P-V, deve-se constatar a existência de uma situação na qual a margem de estabilidade obtida é inferior à estabelecida pelos critérios estabelecidos pelos órgãos responsáveis tais como o *Western System Coordinating Council* (WSCC) que considera uma margem de estabilidade mínima de 5% considerando ao ocorrência de uma contingência simples, 2,5% para contingências duplas (perda simultânea de dois equipamentos ou linhas de transmissão da rede) e maiores do que zero para o caso de múltiplas contingências (perda simultânea de três ou mais equipamentos ou linhas de transmissão da rede) (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL – WSCC, 1998). De modo similar, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) recomenda o atendimento de uma margem de estabilidade mínima de 6% também para a ocorrência de contingências simples (ONS, 2001).

Para contingências mais severas como perdas linha de transmissão ou de transformadores, através da curva P-V pode-se examinar a estabilidade dos mesmos, como

indica a figura 6, onde a nova curva P-V pós-falta deve ter uma interseção com a característica de carga, para que o sistema tenha solução.

Figura 6- Curva P-V Pós-falta.

4



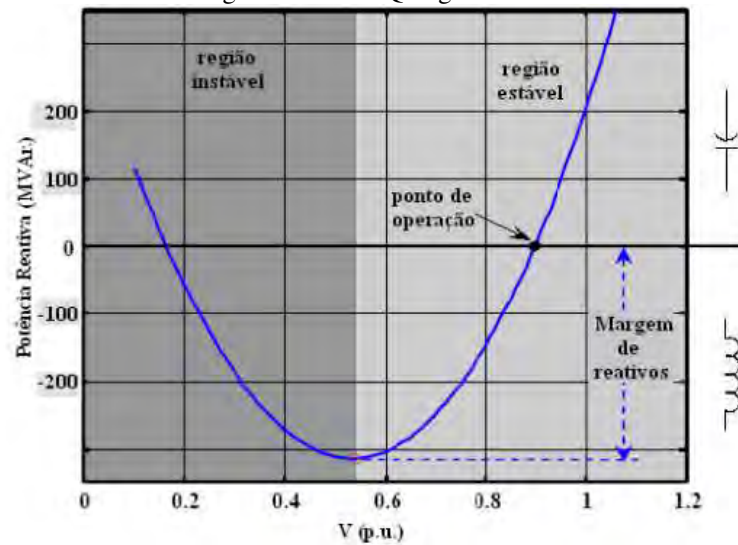
Fonte: Amorim (2011)

3.4 Curva Q-V

O traçado da curva Q-V é realizado simulando a introdução de um compensador síncrono a cada barra escolhida para a análise, convertendo a barra do tipo PQ em tipo PV sem limites de reativos. Esta simulação é desenvolvida diminuindo-se gradativamente os valores especificados da tensão na barra à medida que se calcula a injeção de reativos através das soluções de fluxos de potência (TAYLOR, 1994). Mediante esta curva determina-se a compensação de potência reativa local necessária para levar o sistema para um ponto de operação estável, o ponto de operação corresponde à interseção da curva com o eixo das abscissas, onde a potência reativa injetada pelo compensador síncrono se anula.

Na figura 7 mostra-se a margem de reativo disponível numa barra, que é a diferença entre potência reativa no ponto de operação e aquela correspondente à base da curva Q-V onde $dQ/dV=0$. Se a base da curva está abaixo do ponto de operação significa que o sistema pode aumentar potência ativa sem necessidade de compensação local, mas se a base da curva está acima do ponto de operação, significa que o sistema não possui nenhum ponto de operação factível. Neste caso há a necessidade de se efetuar a compensação local de reativo.

Figura 7- Curva Q-V genérica.



Fonte: Amorim (2011)

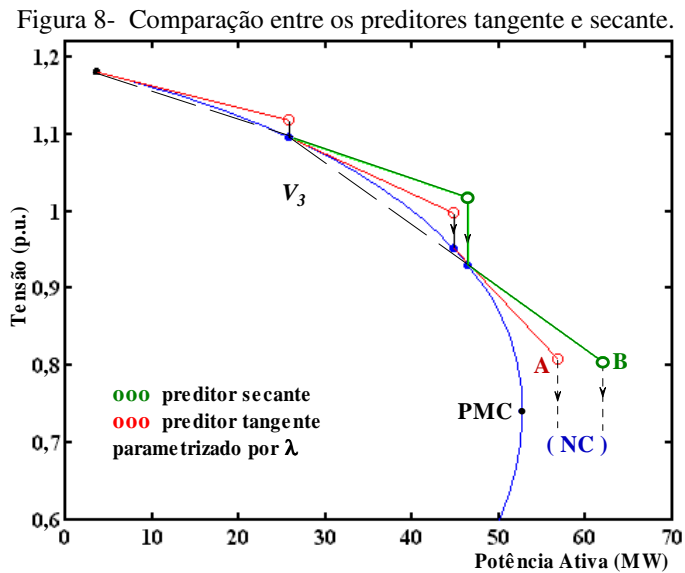
3.5 Fluxo de Carga Associado ao Método da Continuação

O fluxo de carga convencional não possibilita a determinação da margem de carregamento devido à singularidade da matriz Jacobiana no PMC. Por outro lado, o fluxo de carga continuado permite o traçado completo da curva P-V porque utiliza uma técnica de parametrização para superar as dificuldades numéricas que surgem próximo ao PMC. A diferença entre os métodos de FCC existentes reside na forma de se eliminar a singularidade da matriz Jacobiana. Por realizarem sucessivas soluções de fluxo de carga consomem um alto tempo computacional. A seguir são apresentados os passos necessários aos métodos de FCC descrito na literatura.

3.5.1 Passo Preditor

A primeira etapa consiste na determinação, a partir de uma solução conhecida, de uma estimativa para a próxima solução. Esta estimativa é usada na próxima etapa, onde é efetuada a correção desta solução aproximada de forma a se obter um novo ponto de operação, i.e., um novo ponto sobre a curva P-V. Cabe destacar que nesse passo também se empregam técnicas de parametrização para a eliminação dos problemas numéricos originados pela singularidade da matriz Jacobiana. Os preditores mais conhecidos são o tangente e o secante (ALVES et al., 2003). Como se pode observar na figura 8, a reta vermelha indica o preditor tangente e que é

como esperado, um passo adequado na direção da tangente à curva nesse ponto. A reta verde indica o preditor secante que, a partir de dois pontos da curva, prevê um terceiro ponto com um passo adequado.



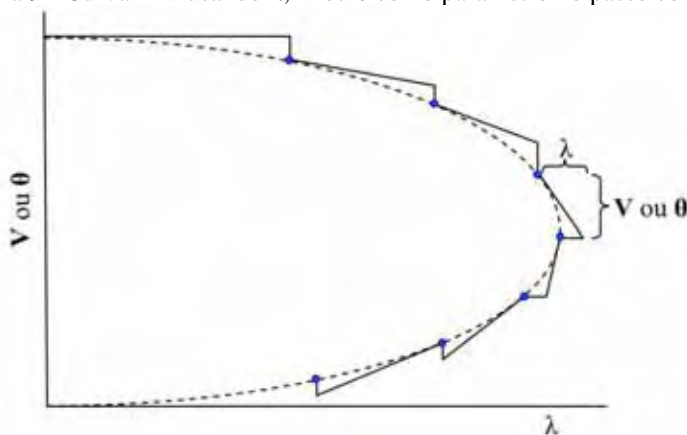
3.5.2 Preditor Polinomial de Ordem Zero

A técnica de previsão que será utilizada neste trabalho é a que usa o preditor polinomial de ordem zero (CHIANG et al., 1995), também conhecida como previsão trivial, onde se considera a solução atual e um incremento fixo num parâmetro escolhido (λ , θ_k ou V_k) como uma estimativa para a próxima solução. Escolhendo-se um determinado parâmetro, obtém-se a curva P-V. Observa-se que no PMC, a parametrização por λ também gera problemas decorrentes da singularidade da matriz Jacobiana. Portanto nesse caso, se tem que efetuar a troca de parâmetro para superar essa dificuldade. Com essa técnica, portanto, não se estima a próxima solução como nos casos dos preditores tangente e secante, para depois se fazer a correção para a solução (ponto de operação) correta. Neste método se calcula o próximo ponto de operação na curva P-V em função ao passo adotado.

3.5.3 Passo Corretor

Uma vez feita a previsão da solução, é necessário se efetuar a correção para obter-se um ponto na curva P-V. Neste procedimento, quanto mais próxima for a solução prevista, menor será o número de iterações para se alcançar a solução correta. Na figura 9 pode-se observar que esta etapa busca corrigir a previsão (estimativa), ou verticalmente quando parametrizado pelo fator de carregamento (λ), ou horizontalmente quando parametrizado pela magnitude de tensão (V). Isto é feito igualando-se o parâmetro a um valor pré-especificado, que garante que o sistema de equações convirja para esse ponto.

Figura 9- Curva P-V usando λ , V ou θ como parâmetro no passo corretor.



Fonte: Bonini Neto (2011)

Cabe ressaltar que a eficiência do método empregado no traçado da curva P-V depende de uma boa escolha do tamanho passo (do escalar que define o tamanho do passo preditor) ou de uma boa estratégia usada no controle de este passo, como mostra a figura 9, já que para passos muito grandes o método pode divergir ou talvez convirja, porém para uma solução indesejada ou errônea. Este passo depende do algoritmo usado, do carregamento que pode ser leve ou pesado, e do sistema elétrico em avaliação.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DOS LIMITES DE INTERCÂMBIO ENTRE ÁREAS

4.1 Introdução

Um sistema elétrico de potência é normalmente dividido em múltiplas áreas com linhas de intercâmbio entre elas. A capacidade de transferência de potência de um SEP indica o máximo intercâmbio de potência ativa entre suas diferentes áreas sem que a segurança seja comprometida (HENRIQUES et al., 2011; PATÉL; GIRGIS, 2009, SANTANNA et al., 2011). Esta informação é de grande importância tanto na fase do planejamento da expansão quanto na fase de operação, onde são avaliados os mais diversos cenários energéticos, patamares de carga e configurações topológicas e podem ainda ser atualizados na operação em tempo real. Muitas vezes, em consequência do crescimento dos sistemas elétricos de potência e do aumento da demanda de energia elétrica, uma empresa, numa determinada área, ou é incapaz de atender o crescimento de sua demanda, ou está interessada em reduzir seus custos comprando energia de outra área. Uma área poderá ou recorrer à importação de energia de outras áreas vizinhas, ou aumentar o suprimento por parte de seus geradores para atender a demanda de outra área. Nestes casos, a potência ativa é então transferida do vendedor ao comprador através de linhas de intercâmbio existentes entre as áreas.

Atualmente, o cálculo dos limites de intercâmbio consiste num processo de aumento sistemático dos intercâmbios de forma a estressar ao máximo o fluxo de potência nos circuitos envolvidos até que determinados critérios econômicos e/ou de segurança predefinidos para a operação sejam atingidos. No entanto, em certas condições, o fluxo de potência é restrito por problemas de instabilidades de tensão.

O fluxo de carga continuado é uma ferramenta de estudo de estabilidade estática de tensão num sistema de potência e é utilizado entre outros para a obtenção da margem de carregamento de um sistema elétrico de potência (AJJARAPU; CHRISTY, 1992). O fluxo de carga continuado também é utilizado para encontrar o máximo fluxo de intercâmbio, (IBSAIS; AJJARAPU, 1996) neste método não se inclui as equações de controle de

intercâmbio e se considera o sistema operando como uma única área e se faz o carregamento do sistema traçando a curva P-V e depois se calcula a máxima potência de intercâmbio.

Em (SANTOS et al., 2004) foi proposto uma nova metodologia para a inclusão do controle de intercâmbio entre áreas no fluxo de carga convencional. Baseado nessa metodologia, neste capítulo propõe-se a inclusão do controle de intercâmbio no fluxo de carga continuado possibilitando a obtenção da capacidade de transferência de potência entre as diversas áreas considerando múltiplas barras folga por área como também os limites das potências geradas das barras de folga, oferecendo com isso uma flexibilidade adicional ao método da continuação.

Além da inclusão do controle de intercâmbio no método da continuação, neste capítulo mostra-se a comparação entre os resultados obtidos considerando duas formas de carregamento do sistema. Na primeira considera-se só o incremento da potência ativa das barras de carga (IBSAIS; AJJARAPU, 1996) e na outra se considera o incremento da potência ativa e reativa das barras de carga com fator de potência constante, como definido em (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL – WSCC, 1998). Mostra-se também a influência da potência reativa que restringe muito a capacidade de transferência de potência ativa do sistema, dependendo da robustez do sistema.

4.2 Cálculo dos Limites de Intercâmbio entre Áreas.

4.2.1. Considerando o Incremento de Cargas só de Potência Ativa.

O cálculo dos limites de intercâmbio entre duas áreas apresentado em (IBSAIS; AJJARAPU, 1996) envolve uma série de etapas. Com o objetivo de exportar energia para outra área, define-se uma área exportadora e outra importadora. Na área exportadora é escolhido um conjunto de barras tipo PV que terão acréscimos de geração, enquanto que na importadora, é escolhido um conjunto de barras tipo PQ que terão acréscimos de carga. Para cada incremento gradual da potência de intercâmbio tem-se um ponto de operação do sistema com valores que atendam as faixas de seguranças preestabelecidas, em função do cenário energético que se deseja explorar.

De uma forma geral, quando se faz o incremento de potência ativa e reativa de uma barra i , pertencente às barras PQ que terão um acréscimo de carga, a expressão da potência ativa e da reativa é dada por:

$$\begin{aligned} P_{PQi}(\lambda) &= P_{Li0} + \lambda K_{PCi} S_{bi0} \cos \psi_{i0} \\ Q_{PQi}(\lambda) &= Q_{Li0} + \lambda K_{QCi} S_{bi0} \sin \psi_{i0} \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde P_{Li0} é a potência ativa da barra i no caso base, K_{PCi} é a constante de carga ativa da barra i , S_{bi0} é a potência aparente da barra i no caso base, e ψ_{i0} é o ângulo do fator de potência da barra de carga i , onde Q_{Li0} é a potência reativa da barra i no caso base, K_{QCi} é a constante de carga reativa da barra.

Quando se considera só incremento de potência ativa das barras de carga, a constante de carga ativa é igual a 1, enquanto que a constante de carga reativa é igual a 0 ($K_{PCi} = 1, K_{QCi} = 0$). Neste caso, a equação (4.1) fica como:

$$\begin{aligned} P_{PQi}(\lambda) &= P_{Li0} + \lambda K_{PCi} S_{bi0} \cos \psi_i \\ Q_{PQi}(\lambda) &= Q_{Li0} \end{aligned} \quad (4.2)$$

O somatório total da potência ativa das barras de carga pode ser representada por:

$$\sum_{i=1}^n P_{PQi}(\lambda) = \sum_{i=1}^n (P_{Li0} + \lambda K_{PCi} S_{bi0} \cos \psi_i) \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{PQi}(\lambda) = \sum_{i=1}^n P_{Li0} + \lambda P_{tr0} \quad (4.4)$$

sendo $P_{tr0} = \sum_{i=1}^n (K_{PCi} S_{bi0} \cos \psi_i)$, a potência de transferência desejada no caso base. O acréscimo de potência das barras de carga PQ deve ser fornecido pelos geradores das barras PV pertencente à área que exportará energia elétrica. Assim, a potência ativa da barra i pertencente às barras PV é dada por:

$$P_{PVi}(\lambda) = P_{Gi0} + \lambda ger_i \cdot P_{tr0} \quad (4.5)$$

sendo P_{Gi0} a potência ativa gerada pela barra i no caso base e ger_i o fator de participação do gerador i . Os fatores de participação dos geradores são calculados a partir da solução do caso base de acordo a seguinte equação ou podem ser escolhidos pelo usuário de acordo aos dados do planejamento do sistema:

$$ger_i = P_{Gi0} / \sum_{j=1}^{n_{ger}} P_{Gj0} \quad (4.6)$$

Sendo que n_{ger} representa o número de geradores que atenderão o incremento de carga.

O processo de obtenção dos perfis das curvas de tensão das barras à medida que o fator de carregamento é aumentado é feito usando o método da continuação, cuja ideia básica consiste na obtenção de sucessivas soluções de fluxo de potência a partir do caso base até o PMC. Obtêm-se com isso, as margens de estabilidade de tensão, os limites de transferência de potência e as informações adicionais a respeito dos comportamentos das tensões das barras do sistema em análise.

4.2.1.1 Fluxo de Carga Continuado

As equações do fluxo de carga convencional representam um limite para a região de operação estável, sendo que este limite está associado com a singularidade da matriz Jacobiana. Conforme foi visto no capítulo anterior, o método da continuação possibilita o traçado completo do perfil de tensão variando o valor do carregamento do sistema, e por meio de uma parametrização adequada, possibilita a eliminação das dificuldades numéricas consequentes da singularidade da matriz Jacobiana no PMC (AJJARAPU; CHRISTY, 1992).

Para superar as dificuldades devidas a singularidade da matriz Jacobiana no PMC, é necessária uma troca de parâmetro. Em geral, o novo parâmetro será a magnitude de tensão da barra que apresenta a maior diminuição. Com a parametrização, o determinante da matriz Jacobiana deixa de ser nulo, i.e., a matriz Jacobiana é não-singular. Com essa troca, λ passa a ser considerado como variável dependente e o novo parâmetro (no caso V_k) como variável independente. A partir daí a magnitude de tensão dessa barra pode-se prefixada e a respectiva solução determinada

Para se possibilitar a variação automática do carregamento do sistema, inclui-se o fator de carregamento (λ) à equação do fluxo de carga convencional, sendo que o novo sistema de equações passa a ser:

$$G(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (4.7)$$

O qual também pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \Delta P(\theta, V, \lambda) &= P^{\text{esp}}(\lambda) - P(\theta, V) = 0 \\ \Delta Q(\theta, V) &= Q^{\text{esp}} - Q(\theta, V) = 0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Sendo que $P^{\text{esp}}(\lambda)$ indica o incremento de potência nas barras PQ, conforme apresentado em (4.1), e a repartição desse incremento nas barras PV, conforme apresentado em (4.5). Das equações (4.8), tem-se que para uma barra k qualquer:

$$\begin{aligned} P_k^{\text{esp}}(\lambda) &= P_{PV_k}(\lambda) - P_{PQ_k}(\lambda), \quad k \in PQ, PV \\ Q_k^{\text{esp}} &= Q_k^{\text{ger}} - Q_k^{\text{car}}, \quad k \in PQ \end{aligned} \quad (4.9)$$

Esta equação indica a potência especificada como sendo a potência gerada menos a potência consumida de cada barra, de acordo com as barras que foram escolhidos para ter os incrementos de carga ($P_{PQ_i}(\lambda)$) e de geração ($P_{PV_i}(\lambda)$).

Para uma barra k qualquer, a potência ativa ($P_k(V, \theta)$) e reativa ($Q_k(V, \theta)$) calculadas são escritas como:

$$\begin{aligned} P_k(V, \theta) &= V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}), \quad k \in PQ, PV \\ Q_k(V, \theta) &= V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}), \quad k \in PQ \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.2.2. Considerando o Incremento de Carga de Potência Ativa e Reativa com Fator de Potência Constante.

Neste caso, modela-se a carga com um fator de potência constante (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL – WSCC, 1998). Neste caso, considera-se que as constantes de carga ativa reativa são iguais a 1 ($K_{PQi} = 1, K_{QCi} = 1$), durante todo o processo de carregamento do sistema. Então a potência ativa e reativa da barra i pertencente às barras PQ que terão um acréscimo de carga é dado pela equação (4.1). Sendo que a potência de transferência desejada $P_{tr_0} = \sum_{i=1}^n (K_{Li} S_{bi0} \cos \varphi_i)$ do caso base é a mesma de quando se considera só incremento da potência ativas das barras de carga.

O acréscimo de potência ativa e reativa das barras de carga PQ deve ser fornecido pelos geradores das barras PV pertencente à área que exportará energia elétrica. Assim, a distribuição da potência de transferência pelas barras PV é dada pela equação (4.5). Entretanto, a distribuição de potência reativa dessas barras não se pode especificar visto que são barras de geração.

O processo de obtenção dos perfis das curvas de tensão das barras à medida que o fator de carregamento é aumentado é efetuado usando o método da continuação.

4.2.2.1 Fluxo de Carga Continuado

Para se possibilitar a variação automática do carregamento do sistema, inclui-se o fator de carregamento (λ) à equação do fluxo de carga convencional, sendo que o novo sistema de equações passa a ser:

$$G(\theta, V, \lambda) = 0 \quad (4.11)$$

O qual também pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \Delta P(\theta, V, \lambda) &= P^{\text{esp}}(\lambda) - P(\theta, V) = 0 \\ \Delta Q(\theta, V, \lambda) &= Q^{\text{esp}}(\lambda) - Q(\theta, V) = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

sendo que $P^{\text{esp}}(\lambda)$ e $Q^{\text{esp}}(\lambda)$ indicam os respectivos incrementos de potência ativa e reativa nas barras PQ, conforme apresentado na equação (4.1), e a repartição desse incremento nas barras PV, conforme apresentado na equação (4.5). Das equações (4.12), tem-se que para uma barra k qualquer.

$$\begin{aligned} P_k^{\text{esp}}(\lambda) &= P_{PV_k}(\lambda) - P_{PQ_k}(\lambda), \quad k \in PQ, PV \\ Q_k^{\text{esp}}(\lambda) &= Q_k^{\text{ger}} - Q_k^{\text{car}}(\lambda), \quad k \in PQ \end{aligned} \quad (4.13)$$

A qual indica a potência ativa e reativa especificada como sendo a potência gerada menos potência consumida de cada barra.

4.2.3 Técnica de Parametrização Adotada

4.2.3.1 Parametrização pelo Fator de Carregamento (λ)

Com a inclusão de λ o novo sistema de equações modificado passa a ter mais uma incógnita. Assim, o sistema de equação passa a ser.

$$\begin{aligned} G(\theta, V, \lambda) &= 0 \\ \lambda - \lambda^{\text{esp}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

sendo que λ^{esp} é o valor especificado de λ . O processo de linearização da equação anterior fornece.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_\theta & G_V & G_\lambda \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

onde se considera que $\lambda^{\text{esp}} = \lambda^{\text{atual}} + \Delta\lambda$, sendo $\Delta\lambda$ o passo adotado.

Inicia-se com $\lambda^{\text{atual}} = 0$ e se considera um passo razoável para a obtenção dos pontos de operação da curva P-V, até a vizinhança do PMC.

4.2.3.2 Parametrização pela Magnitude de Tensão de uma Barra k Qualquer (V_k)

Para superar as dificuldades numéricas devido à singularidade da matriz Jacobiana no PMC é preciso efetuar-se a troca de parâmetro, de λ para V_k . A escolha da barra cuja magnitude de tensão será considerada como parâmetro (p) é realizada por:

$$p \leftarrow \max\left(\frac{|V^j - V^{j-1}|}{|V^j|}\right) \quad (4.16)$$

onde V^j refere-se à magnitude de tensão no ponto de operação atual e V^{j-1} o seu valor anterior. Neste caso o sistema de equações passa a ser dado por:

$$\begin{aligned} G(\theta, V, \lambda) &= 0 \\ V_k - V_k^{\text{esp}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.17)$$

sendo V_k^{esp} o valor especificado da magnitude de tensão da barra k que vai ser considerada como parâmetro da continuação. O processo de linearização da equação anterior fornece.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_\theta & G_V^* & G_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V^* \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

sendo ΔV^* o vetor das magnitudes de tensão das barras PQ e G_V^* o vetor das derivadas de $G(\theta, V, \lambda)$ com relação às magnitudes de tensão das barras PQ. Ambos excluem o elemento k correspondente à barra escolhida como parâmetro. Onde se considera que:

$$V_k^{\text{esp}} = V_k^{\text{atual}} + \Delta V \quad (4.19)$$

Para a obtenção dos pontos de operação do sistema na vizinhança do PMC, representada pelo nariz da curva P-V, parte-se de V_k^{atual} , que é a magnitude de tensão da barra

escolhida como parâmetro no último ponto de operação antes de fazer a troca de parâmetro. Considera-se um passo de tensão (ΔV) razoável, no caso negativo porque a magnitude diminui com o aumento de λ . Uma vez superado o PMC, e próximo a ele, realiza-se novamente a troca de parâmetros, de V_k para λ , troca-se o sinal do passo $\Delta\lambda$, e completa-se o traçado da curva P-V.

4.3 Fluxo de Carga Continuado Considerando o Controle de Intercâmbio entre Áreas

4.3.1 Considerando só o Incremento de Potência Ativa

Neste caso se modela a carga variando somente a potência ativa e considera-se a inclusão do controle intercâmbio entre área. Assim, a equação do fluxo de carga passa a ser dada por:

$$G(\theta, V, P_G, \lambda) = 0 \quad (4.20)$$

A qual pode também ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \Delta P(\theta, V, \lambda) &= P^{\text{esp}}(\lambda) - P(\theta, V) = 0 \\ \Delta Q(\theta, V) &= Q^{\text{esp}} - Q(\theta, V) = 0 \\ \Delta \text{PI}(\theta, V, \lambda) &= \text{PI}^{\text{esp}}(\lambda) - \text{PI}(\theta, V) = 0 \\ \Delta g(P_G) &= g^{\text{esp}} - g(P_G) = 0 \end{aligned} \quad (4.21)$$

onde $\text{PI}^{\text{esp}}(\lambda)$ é o intercâmbio especificado.

Com o intuito de viabilizar a determinação da máxima transferência de potência entre as áreas, a área que aumenta a geração terá um incremento (λPtr_0) no seu intercâmbio, enquanto que a área que aumenta a carga terá um decremento no seu intercâmbio, já as áreas restantes manterão seu intercâmbio constante. Assim, $\text{PI}^{\text{esp}}(\lambda)$ pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} \text{PI}_{\text{ger}}^{\text{esp}}(\lambda) &= \text{PI}_{\text{ger}_0}^{\text{esp}} + \lambda \text{Ptr}_0 \\ \text{PI}_{\text{carg}}^{\text{esp}}(\lambda) &= \text{PI}_{\text{carg}_0}^{\text{esp}} - \lambda \text{Ptr}_0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.3.2 Considerando o Incremento da Potência Ativa e Reativa das Cargas, com Fator de Potência Constante.

Neste caso se modela a carga com fator de potência constante, durante todo o processo de carregamento do sistema, com a inclusão as equações do controle de intercâmbio entre áreas. Assim, as potências ativa e reativa da barra i , pertencente às barras PQ que terão um acréscimo de carga, são dadas pela equação (4.1). A equação do fluxo de carga passa a ser dada por:

$$G(\theta, V, P_G, \lambda) = 0 \quad (4.23)$$

que também pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \Delta P(\theta, V, \lambda) &= P^{\text{esp}}(\lambda) - P(\theta, V) = 0 \\ \Delta Q(\theta, V, \lambda) &= Q^{\text{esp}}(\lambda) - Q(\theta, V) = 0 \\ \Delta \text{PI}(\theta, V, \lambda) &= \text{PI}^{\text{esp}}(\lambda) - \text{PI}(\theta, V) = 0 \\ \Delta g(P_G) &= g^{\text{esp}} - g(P_G) = 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

4.3.3 Técnica de Parametrização Adotada

4.3.3.1 Parametrização pelo Fator de Carregamento (λ)

Com a inclusão de λ o novo sistema de equações modificado passa a ter mais uma incógnita. Com a parametrização por λ , o sistema de equação passa a ser:

$$\begin{aligned} G(\theta, V, P_G, \lambda) &= 0 \\ \lambda - \lambda^{\text{esp}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.25)$$

onde λ^{esp} é o valor especificado de λ . O processo de linearização da equação anterior fornece:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta \text{PI} \\ \Delta g \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_\theta & G_V & G_{P_G} & G_\lambda \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta P_G \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

onde se considera $\lambda^{\text{esp}} = \lambda^{\text{atual}} + \Delta \lambda$, sendo $\Delta \lambda$ o passo adotado.

Inicia-se com $\lambda^{\text{atual}} = 0$, e se considera um passo razoável para a obtenção dos pontos de operação da curva P-V, até a vizinhança do PMC.

4.3.3.2 Parametrização pela Magnitude de Tensão de uma Barra k Qualquer (V_k)

Para se superar as dificuldades numéricas devido à singularidade da matriz Jacobiana no PMC, precisa-se efetuar a troca de parâmetro, de λ para V_k . A escolha da barra cuja magnitude de tensão será considerada como parâmetro (p) é descrita em (4.16). Neste caso o sistema de equações passa a ser dado por:

$$\begin{aligned} G(\theta, V, P_G, \lambda) &= 0 \\ V_k - V_k^{\text{esp}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.27)$$

sendo V_k^{esp} o valor especificado da magnitude de tensão da barra k que vai ser considerada como parâmetro da continuação. O processo de linearização da equação anterior fornece:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta PI \\ \Delta g \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G_\theta & G_V^* & G_{P_G} & G_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V^* \\ \Delta P_G \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

sendo ΔV^* o vetor das magnitudes de tensão das barras PQ e G_V^* o vetor das derivadas de $G(\theta, V, P_G, \lambda)$ com relação às magnitudes de tensão das barras PQ. Ambos excluem o elemento k correspondente à barra escolhida como parâmetro.

Para a obtenção dos pontos de operação do sistema na vizinhança do PMC, representada pelo nariz da curva P-V, parte-se de V_k^{atual} , e que é a magnitude de tensão da barra escolhida como parâmetro no último ponto de operação antes de fazer a troca de parâmetro. Considera-se um passo de tensão (ΔV) razoável, no caso negativo porque a magnitude diminui com o aumento de λ . Uma vez superado o PMC, e próximo a ele, realiza-se novamente a troca de parâmetros, de V_k para λ , troca-se o sinal do passo $\Delta \lambda$, porque o carregamento estará diminuindo, e completa-se o traçado da curva P-V

CAPÍTULO 5

TESTES E RESULTADOS

5.1 Introdução

No presente capítulo são apresentados os principais resultados obtidos com as metodologias implementadas num programa desenvolvido no ambiente MATLAB. Para um melhor entendimento, este capítulo se subdivide em dois subcapítulos cujos temas são:

- Comparação do fluxo de carga continuado com e sem o controle de intercâmbio entre áreas (AVILA; ALVES, 2012).
- Comparação do fluxo de carga continuado considerando o controle de intercâmbio entre áreas e duas formas distintas de carregamento do sistema.
- Avaliação das contingências considerando o controle de intercâmbio entre áreas.

5.2 Comparação do Fluxo de Carga Continuado com e sem o CIA.

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o sistema teste IEEE-9 barras, que é constituído por 3 geradores, 3 transformadores, 9 barras e 9 linhas (ANDERSON; FOUAD, 1994; ALVES et al., 2003), e para o sistema New England de 30 barras (GAO, 1992) . Ambos os sistemas foram divididos em áreas com o objetivo de evidenciar as diferenças entre as margens de carregamento obtidas com o fluxo de carga continuado sem e com as restrições impostas pelas equações de controle de intercâmbio entre áreas. O método usado para o CIA é o descrito em (SANTOS et al., 2004), já que se constitui no método que apresenta a maior flexibilidade, pois possibilita o uso de múltiplas barras de folga por área.

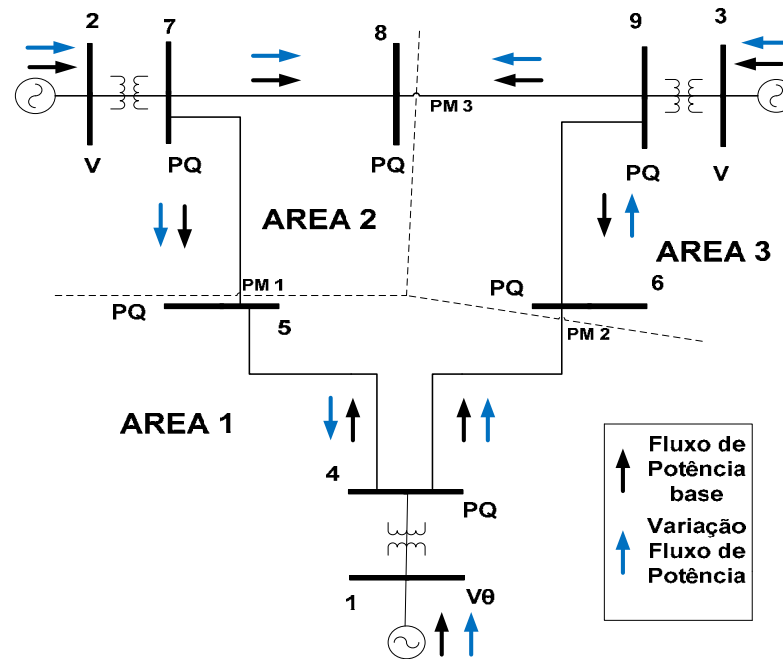
5.2.1 Sistema IEEE- 9 barras Considerando Apenas uma Barra de Folga por Área.

A figura 10 apresenta o diagrama unifilar do sistema IEEE-9 barras que é dividido em três áreas. A área 1 é a área de referência. A barra 1 é a barra de referência (tipo $V\theta$), pertence à área de referência. Para esse sistema se analisa o efeito sobre a margem de carregamento do sistema quando se incrementa a potência ativa de carga na barra 8, com e sem o controle de intercâmbio entre áreas. Em ambos os casos, a barra de geração que vai suprir o incremento de carga é a barra de geração 2 pertencente a área 2, que nesse caso é uma barra de folga (tipo V). Ambas as barras (2 e 8), pertencem à mesma área, no caso a área 2. Nesse caso, está-se avaliando a margem de carregamento da barra 8 da área 2. Os resultados apresentados para este sistema possibilitam a compreensão dos efeitos do fluxo de circulação e que ocorre devido aos caminhos paralelos existentes. Assim, a transferência de potência entre dois pontos da rede se dará de forma inversamente proporcional às impedâncias equivalentes de cada caminho, obrigando com isso o aumento (ou diminuição) das gerações das áreas envolvidas de forma a suprirem-se as variações nas perdas.

A figura 11 apresenta as curvas λ -V da barra 8 para os dois casos. Pode se verificar que a margem de carregamento com a inclusão do controle de intercâmbio é menor do que a obtida sem o controle, em 3,5%.

Primeiro se vai avaliar o efeito do controle de intercâmbio entre áreas no sistema onde a figura 12(a) mostra as variações dos fluxos nos pontos de medição (PM) com relação ao caso base. Estes fluxos, que são exatamente iguais nos três pontos, são conhecidos como fluxos de circulação. Nesse caso, a variação do fluxo que entra numa área pelo ponto de medição tem que ser igual à que sai dessa mesma área pelo outro ponto, porque os intercâmbios são mantidos constantes e iguais aos valores do caso base, conforme se pode ver na figura 13(b).

Figura 10- Diagrama Unifilar do Sistema IEEE-9 Barras dividido em 3 áreas



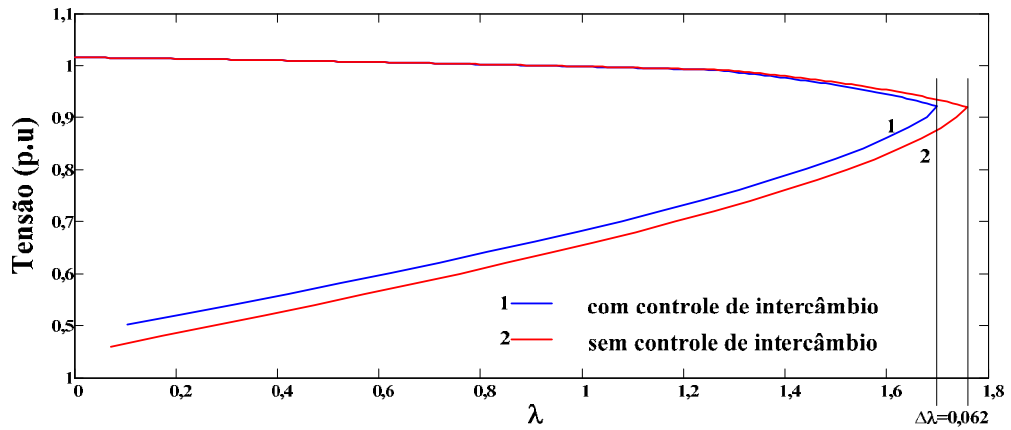
Fonte: Avila (2012)

Na figura 12 (b) é mostrado o efeito do fluxo de circulação sobre geração das áreas envolvidas. Pode-se observar que as variações (com relação às do caso base) nas perdas ativas das linhas de transmissão das áreas fazem com que as barras de folga destas áreas variem suas gerações em igual proporção para poder controlar o intercâmbio de suas áreas conforme se pode ver na figura 13(b).

Na figura 13 pode-se observar a comparação dos intercâmbios entre áreas com e sem o controle. Sem controle de intercâmbio (figura 13(a)) o sistema é visto como uma só área onde a barra de referência (barra 1) é a responsável pela manutenção do balanço de potência, como se pode ver na figura 15, uma vez que não há barras de folga que possam controlar o intercâmbio, o mesmo variará em todas as áreas.

Assim, da figura 14(a) se verifica que a potência gerada na barra de referência é a única que varia para suprir a variação das perdas ativa de todo o sistema, já a potência gerada, pela barra 2, varia proporcionalmente ao valor do caso base para suprir apenas a variação da potência ativa da carga da barra 8. Por outro lado, quando o controle de intercâmbio é mantido constante durante todo o carregamento (figura 13(b)) ocorrem, como já comentado anteriormente, variações de potência gerada em todas as barras de folga, ver figura 14(b).

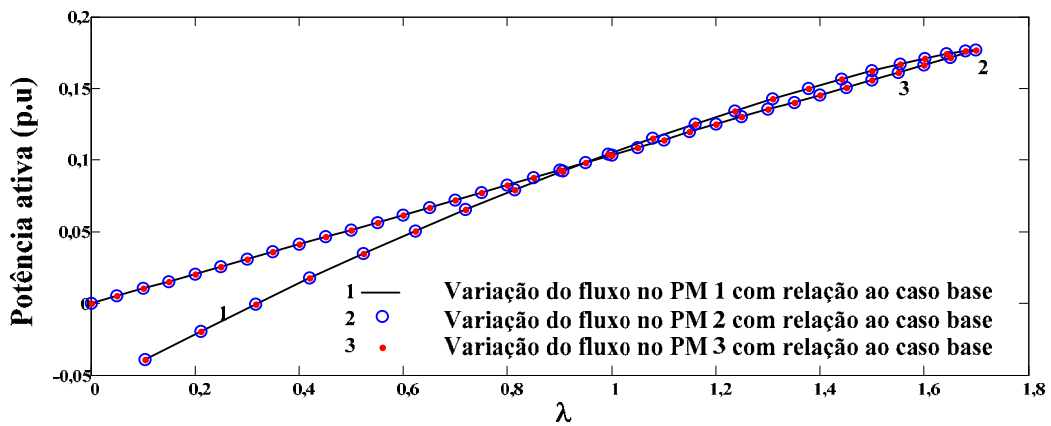
Figura 11- Comparação entre as curvas λ - da barra 8 (parâmetro), sem e com o CIA.



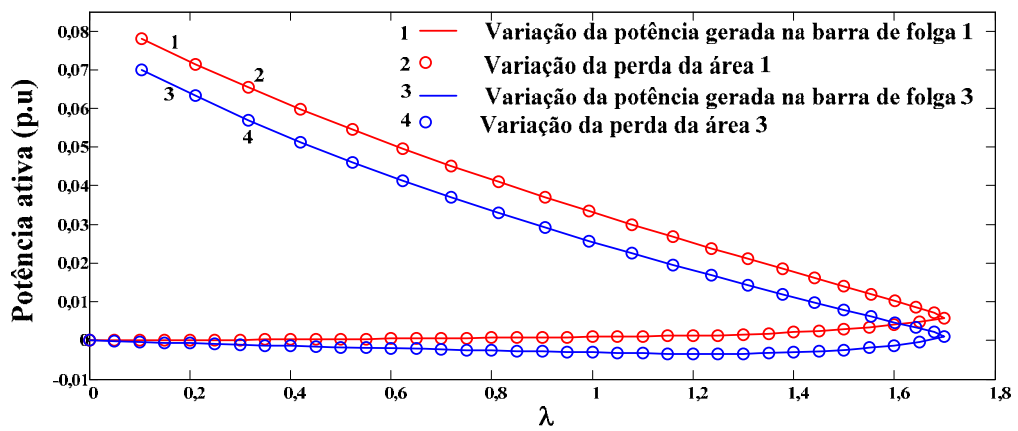
Fonte: Avila (2012)

Figura 12: (a) Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição. (b) Comparação das variações das potências geradas nas barras folga das áreas 1 e 3 com a variação das perdas das respectivas áreas.

(a)

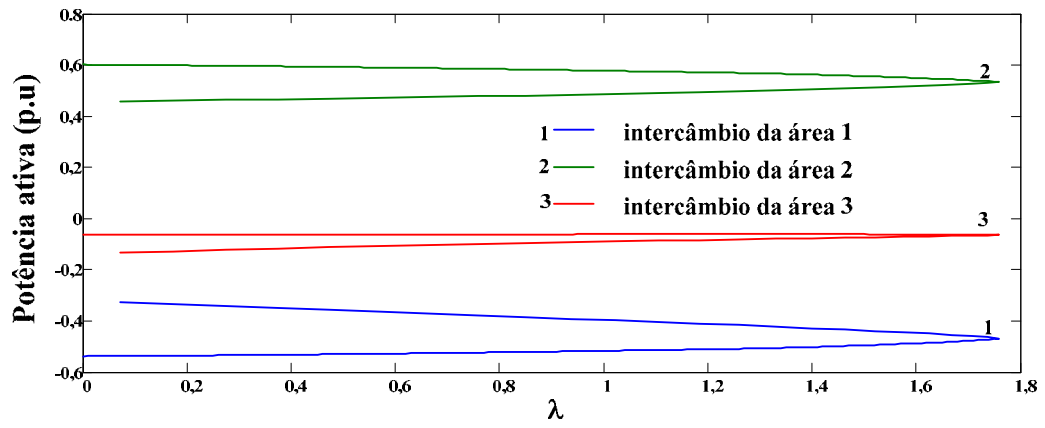


(b)

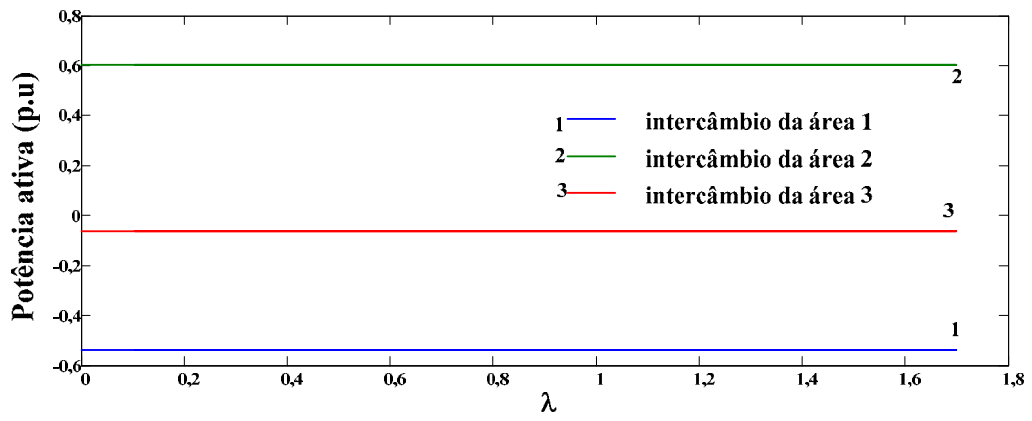


Fonte: Avila (2012)

Figura 13- Comparação dos intercâmbios entre áreas, (a) sem controle, (b) com controle.
(a)

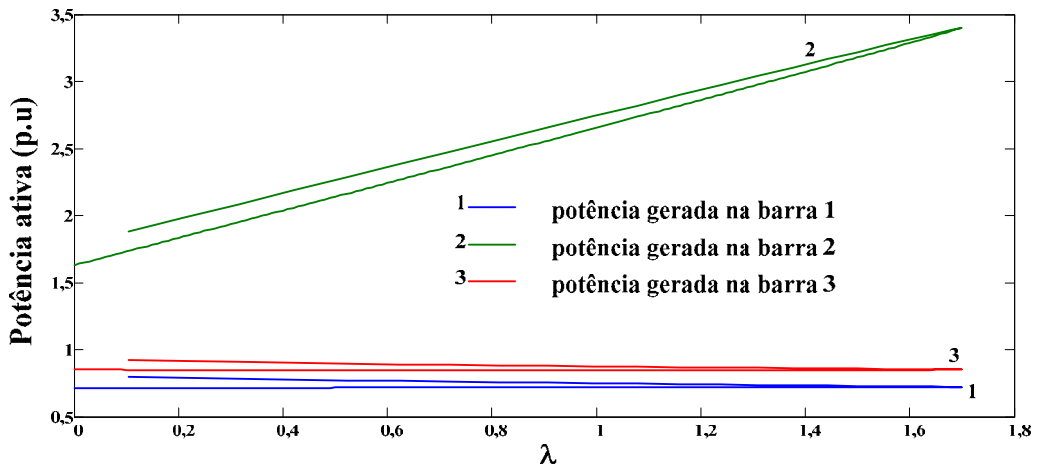
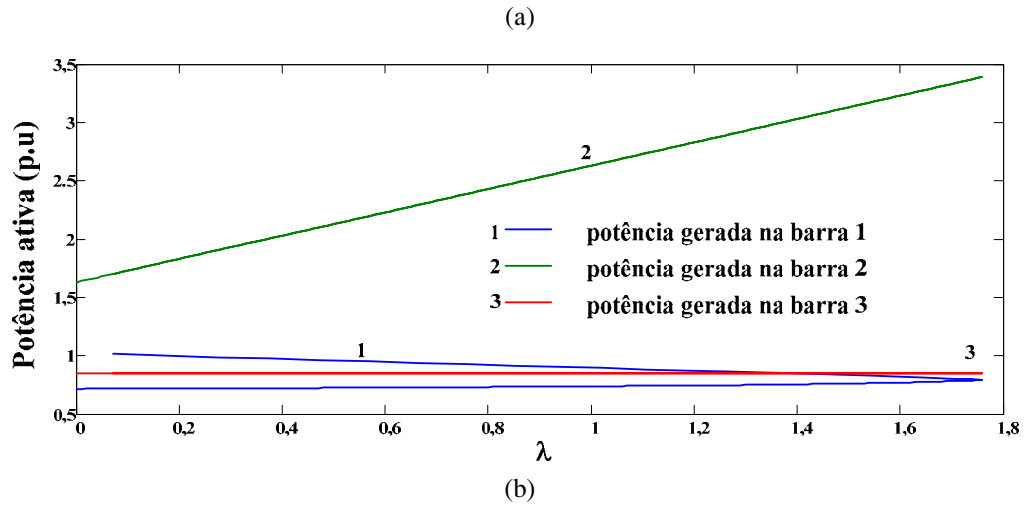


(b)



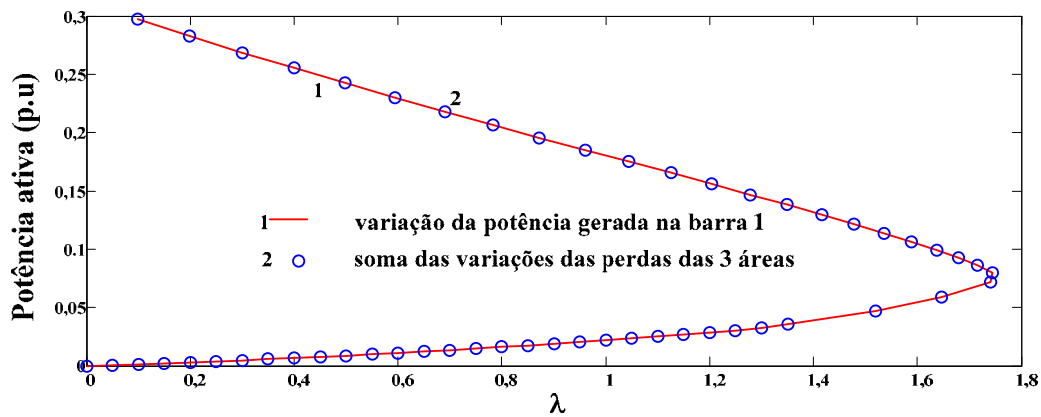
Fonte: Avila (2012)

Figura 14- Comparação entre as potências de geração, (a) sem controle de intercâmbio, (b) com controle de intercâmbio entre áreas.



Fonte: Avila (2012)

Figura 15- Comparação da variação da potência gerada na barra slack com a soma das variações das perdas das respectivas áreas.



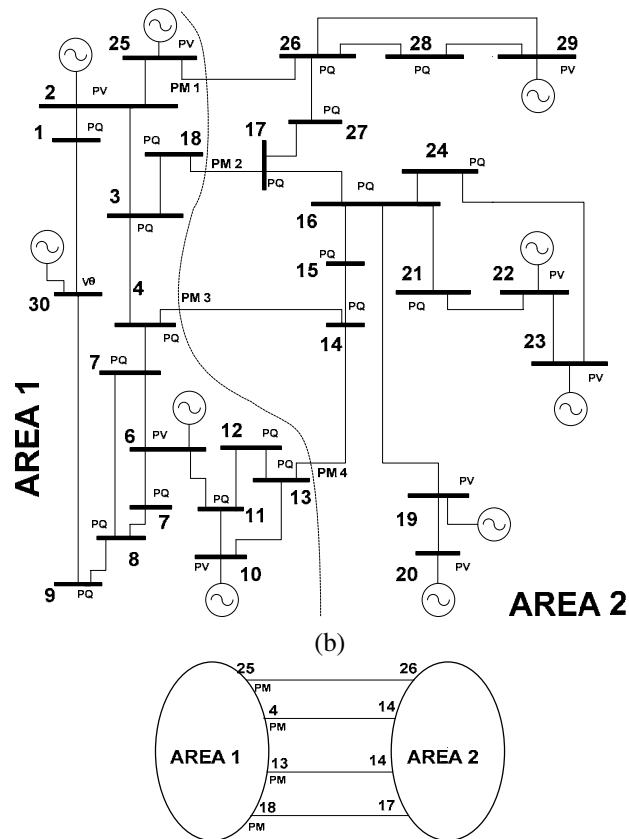
Fonte: Avila (2012)

5.2.2 Sistema New England Considerando Apenas uma Barra de Folga por Área.

Este sistema (vide figura 16) é dividido em duas áreas (IBSAIS; AJJARAPU, 1996). Os dados deste sistema são apresentados em (GAO, 1992). Incrementam-se as potências ativas das cargas das barras 20, 21, 23, 24, 26 e 27 da área 2, proporcionalmente ao caso. As barras de geração que vão suprir o incremento de carga são as barras 2, 6, 10 e 25 da área 1, são apresentados dos seguintes cenários.

1. sem controle intercâmbio, sendo a barra 30 a barra de referência;
2. com controle de intercâmbio entre áreas, sendo que a barra 30 a barra de referência da área 1 e a barra 20 é a barra folga da área 2, e o intercâmbio é ajustado para possibilitar a transferência de potência de uma área a outra, aumentando o intercâmbio na área de geração da área 1 e diminuindo-o na área das cargas, área 2, de acordo com o apresentado na equação (4.22).

Figura 16- Representação do sistema New England de 30 barras com a divisão arbitrária das áreas, (a) diagrama unifilar, (b) representação simplificada.

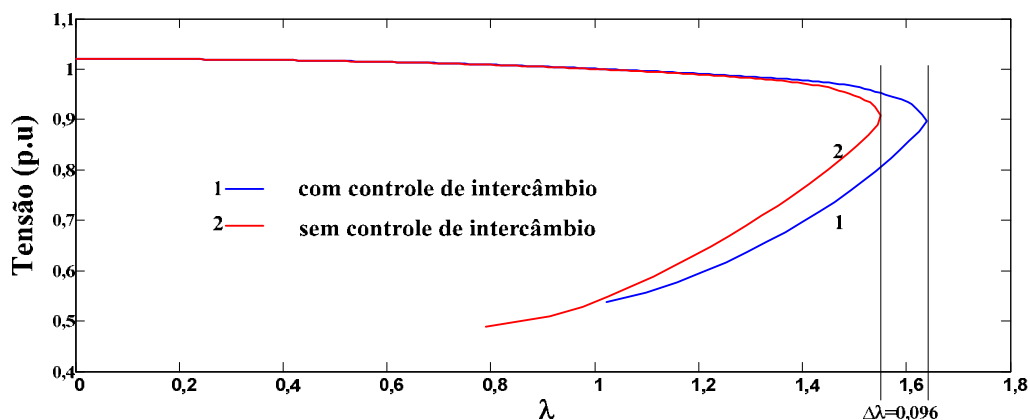


Fonte: Avila (2012)

Na figura 17 é mostrada que a máxima transferência de potência considerando o controle intercâmbio é maior em 5,8% que quando sem o controle de intercâmbio. A figura 18 mostra que, a sua variação do intercâmbio da área 1 com controle será proporcional ao fator de carregamento como pode-se observar na equação (4.22), já que a barra de folga 20 e a de referência 30 se encarregam de controlar o intercâmbio de suas respectivas áreas (cenário adotado). Nesse caso, a barra 30 é a responsável pelo balanço de potência da área 1 de forma a manter o intercâmbio em seu valor especificado, enquanto que a barra de folga 20 é encarregada de fazer o balanço da área 2 como se pode ver na figura 20.

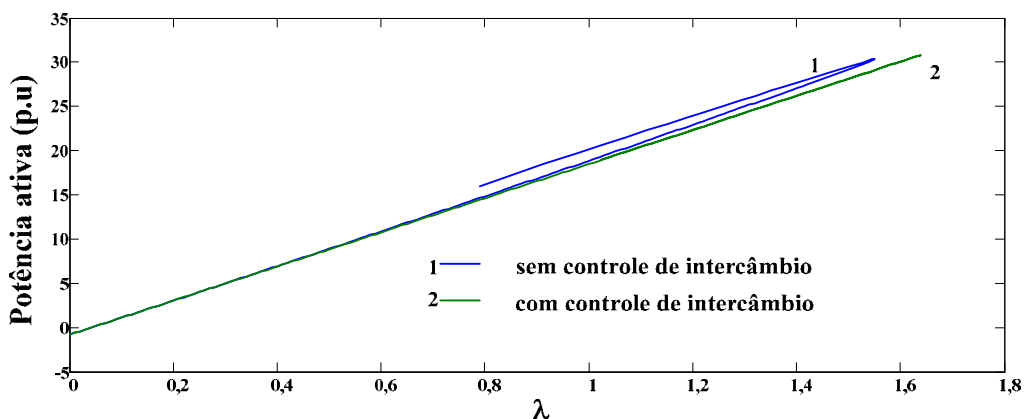
Por outro lado, sem o controle de intercâmbio, a perda de potência ativa das duas áreas é suprida unicamente pela barra 30, como se pode ver nas figuras 19 e 21. Pode-se ver que sem o controle de intercâmbio, a potência de geração da barra 30 é a única que varia, já que é a única barra que vai fazer o balanço de potência do sistema. Entretanto, embora a potência ativa da carga da barra 20 varie, a sua potência ativa gerada permanece constante.

Figura 17- Comparação entre as curvas λ -V da barra 15 sem e com o CIA



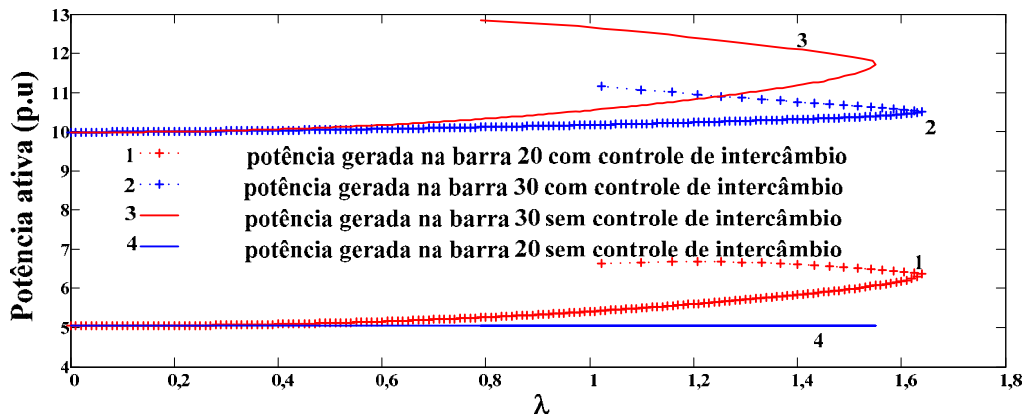
Fonte: Avila (2012)

Figura 18- Comparação entre os intercâmbios da área 1, sem e com o CIA.



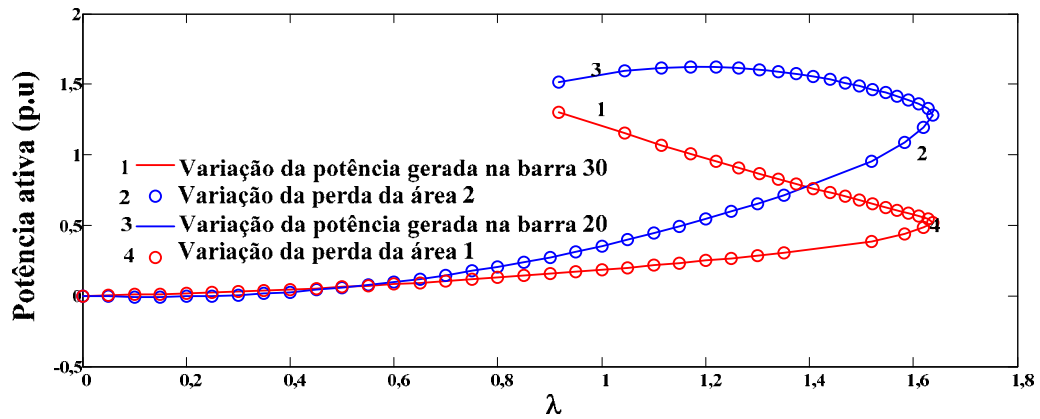
Fonte: Avila (2012)

Figura 19- Comparação entre as potências geradas nas barras de folga, sem e com o CIA.



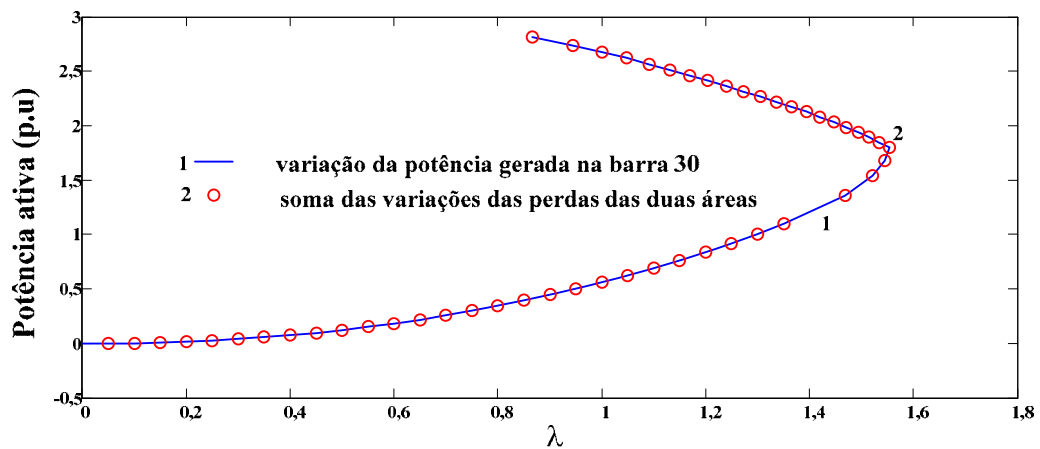
Fonte: Avila (2012)

Figura 20- Comparação das variações das potências geradas nas barras folga das áreas 1 e 2 com a variação das perdas das respectivas áreas.



Fonte: Avila (2012)

Figura 21- Comparação da variação da potência gerada na barra slack com a soma das variações das perdas das respectivas áreas.

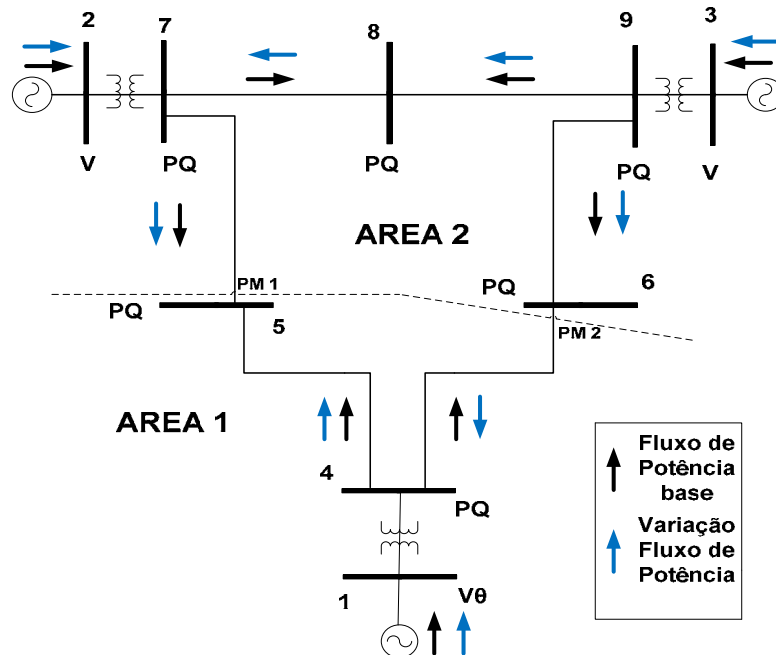


Fonte: Avila (2012)

5.2.3 Sistema IEEE-9 Barras Considerando Múltiplas Barras de Folga numa Mesma Área.

O sistema foi dividido em duas áreas. Na área 1, adotada como área de referência, encontra-se a barra 1 (gerador 1), que é a barra de referência (tipo $V\theta$) do sistema. Será analisada a transferência de potência ativa da área 2 para a área 1. Para isso, considera-se um incremento de potência ativa da carga localizada na barra 5 da área 1. Esse incremento de carga deverá ser suprido pelas barras de geração de números 2 e 3 da área 2. Os fatores de participação das barras de geração 2 e 3, calculados a partir da solução do caso base por meio da equação (4.6), são iguais a 65,72% e 34,28%, respectivamente. O intercâmbio é ajustado de forma a possibilitar a transferência de potência de uma área à outra. Neste caso, conforme a equação (4.22), incrementa-se o intercâmbio na área de geração (área 2) e decrementa-se na área da carga, área 1. Observa-se que diferente dos casos de sistemas radiais, a transferência de potência entre dois pontos de uma rede malhada dar-se-á pelos caminhos paralelos existentes. Assim, conforme se pode ver na figura 22, além da circulação interna de fluxo de potência ativa, haverá também a circulação de fluxo de potência por outras áreas (nesse caso a área 1), obrigando-as com isso a aumentarem (ou diminuïrem) as suas gerações para suprir as suas respectivas perdas.

Figura 22- Diagrama Unifilar do sistema IEEE-9 Barras dividido em 2 áreas



Fonte: Avila (2012)

São apresentados dois cenários: sem e com controle intercâmbio. A barra 1 é a barra de referência da área 1, e as barras folgas da área 2 são as barras 2 e 3.

Na figura 23 apresentam-se as curvas λ -V da barra 5, para os dois casos. Pode se verificar que a capacidade de transferência de potência ativa considerando o controle de intercâmbio entre áreas é menor do que a obtida sem a consideração do controle. Há uma redução de 7,97%.

Na figura 24 mostra-se as variações dos fluxos nos pontos de medição PM 1 e PM 2 em relação aos seus valores do caso base, curvas 2 e 1, respectivamente. A curva 4, na figura 24 representa a variação do incremento da potência de transferência (λP_{tr_0} ver equação (4.4)) entre as áreas. Uma vez que há uma transferência de potência ativa da área 2 para a 1, a soma dos fluxos nos pontos de medição (curva 3) deve ser exatamente igual à variação do incremento da potência de intercâmbio, o que pode ser confirmado na figura 24.

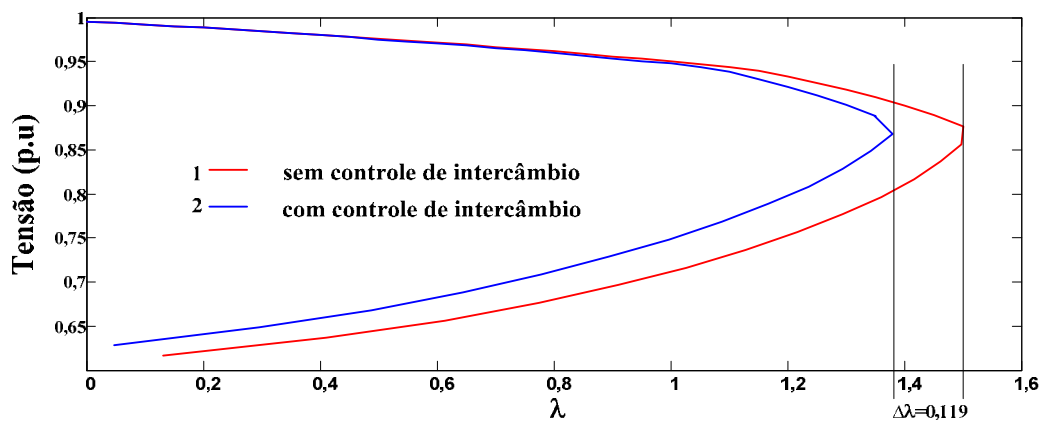
Em consequência da existência de caminhos paralelos haverá a circulação do fluxo de potência ativa pelas áreas o que acarretará uma variação das perdas nas áreas 1 e 2. A variação das perdas de cada área deverá ser suprida por suas respectivas barras de folgas de forma a atender os intercâmbios programados. Conforme se pode observar na figura 27, o gerador 1 supre apenas a variação das perdas da área 1. Já no caso da área 2, conforme pode-se verificar nas figuras 25 e 26(b), ambas as barras de folga (2 e 3) participam, de acordo a seu fator de participação de barra, tanto do fornecimento de potência necessária para o atendimento da variação da perda total de potência ativa da área 2 quanto da variação do incremento de potência ativa da carga localizada na barra 5 da área 1.

Na figura 26(a), as curvas 4 e 5 mostra a variação da potência ativa gerada pela barra de folga (ΔP_{Gf}). As curvas 2 e 3 representam os incrementos de potência ativa geradas nas barras 2 e 3, respectivamente. Estes incrementos são calculados conforme o segundo termo ($\lambda_{ger_i} \cdot P_{tr_0}$) do lado direito da equação (4.5). A curva 1 apresenta o somatório das diferença entre a variação da potência ativa gerada pelas barras de folga e o seu incremento das potências ativas geradas. Conforme se pode ver da figura 26(a), essa diferença coincide com a variação das perdas da área e que está apresentada na curva 6. Portanto, além da participação no suprimento da variação de potência ativa da barra 5, os geradores 2 e 3 (barras de folga).

A figura 26(a) também pode ser representado por figura 26(b), onde o somatório dos incrementos das potências nas barras de geração (curva 2 e 3 da figura 26(a)) é a potência de transferência P_{tr_0} representado por a curva 3 na figura 26(b) e o somatório das variações das barras de folga (curva 4 e 5 da figura 26(a)) é representado por a curva 4 na figura 26(b).

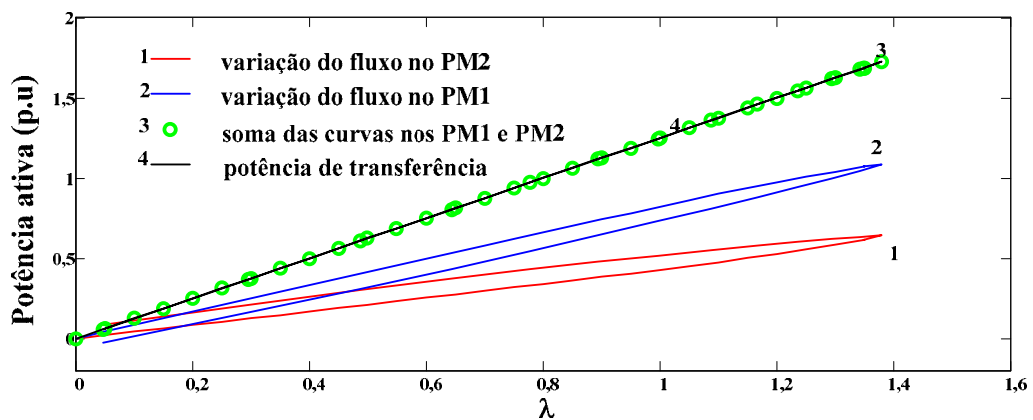
Observe que quando não se considera o controle de intercâmbio, o sistema é visto como uma única área onde a barra de referência (barra 1) é a responsável pela manutenção do balanço de potência ativa de todo o sistema. Das figuras 28 e 29 se pode constatar que o gerador 1 fornece a variação total de perda de potência ativa (curva 1 da figura 29). Essa variação é decorrente do atendimento da variação da carga localizada na barra 5. Observe que os incrementos de potência ativa fornecidos pelos geradores localizados nas barras 2 e 3 (curvas 2 e 3 da figura 29) variam de acordo com os seus fatores de participação (ger_i).

Figura 23- Curvas λ -V da barra 5, sem e com o CIA.



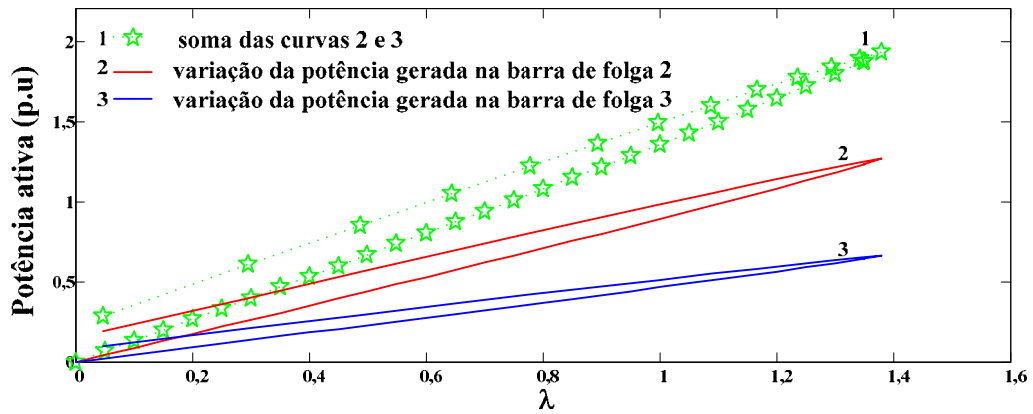
Fonte: Avila (2012)

Figura 24- Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.



Fonte: Avila (2012)

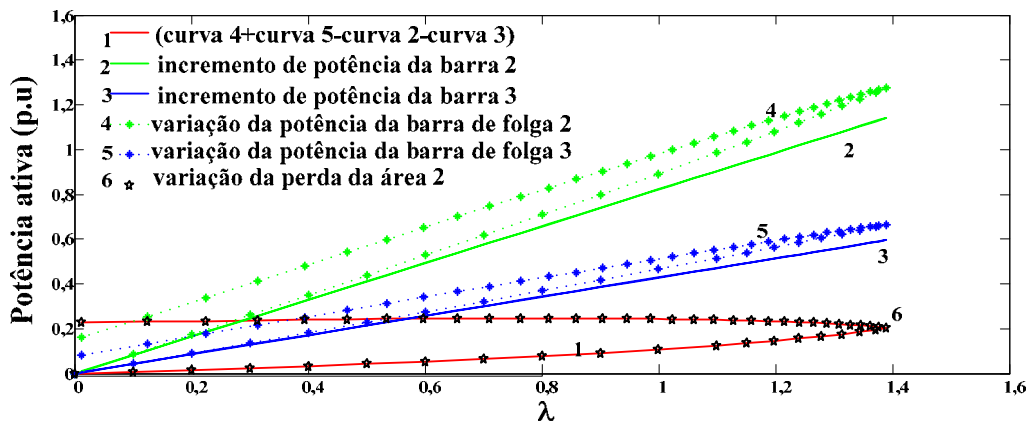
Figura 25- Soma das variações de potência ativa geradas pelas barras de folga da área 2.



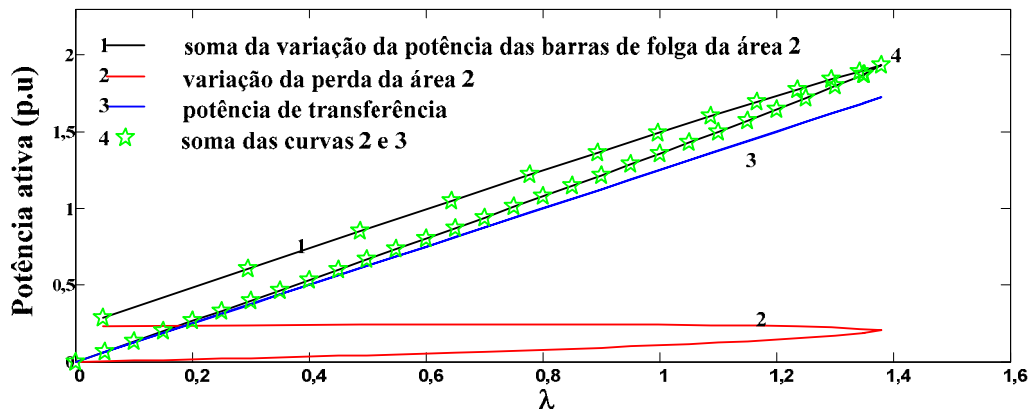
Fonte: Avila (2012)

Figura 26- Efeito da transferência de potência ativa na variação da potência gerada pelas barras de folga da área 2.

(a)

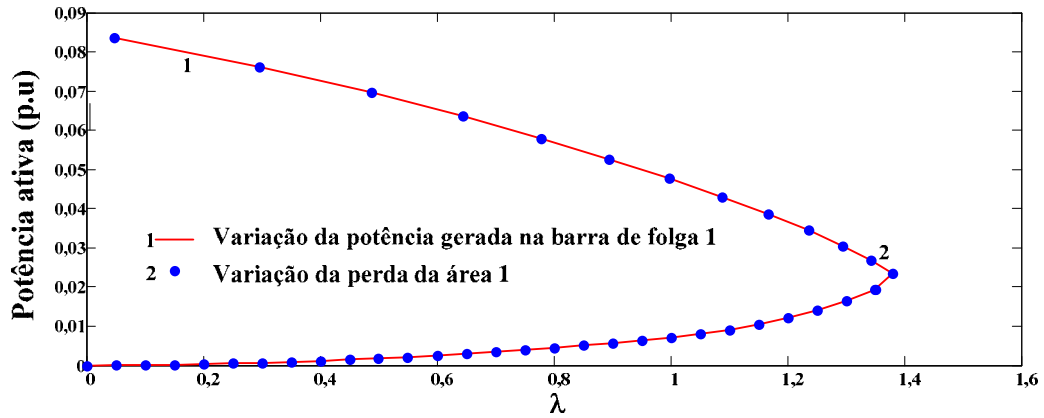


(b)



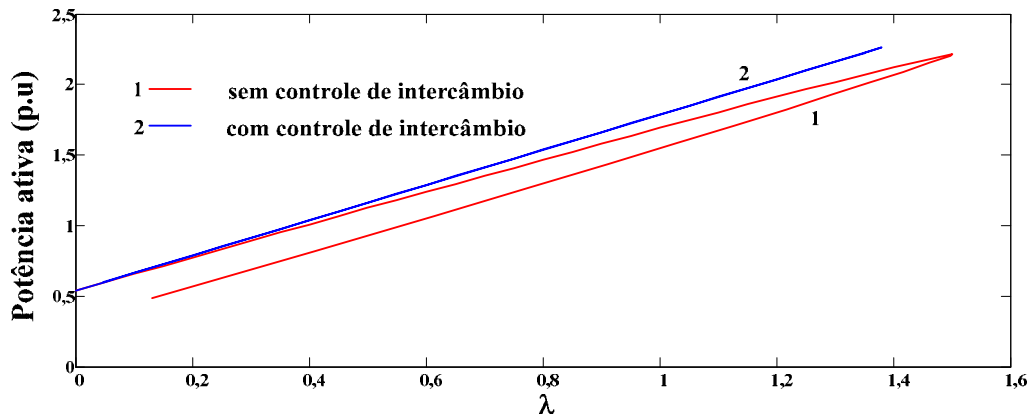
Fonte: Avila (2012)

Figura 27- Comparação da variação de potência ativa gerada na barra de folga da área 1 (barra 1) com a variação da perda total de potência ativa da área 1.



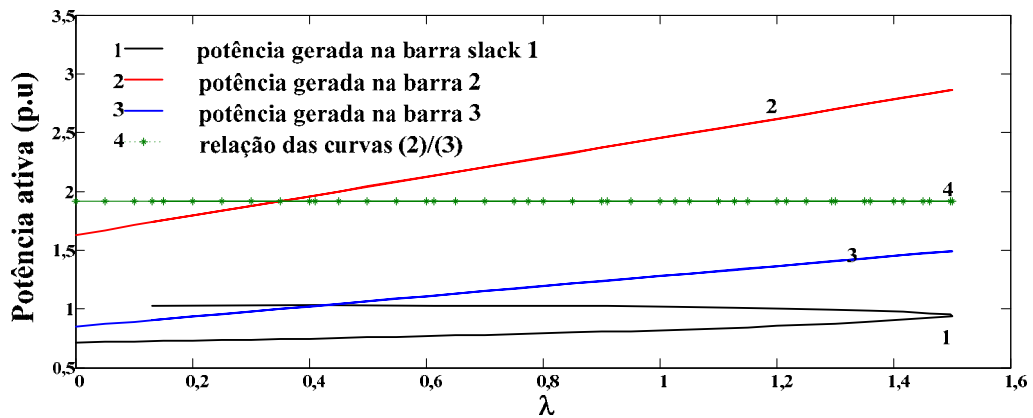
Fonte: Avila (2012)

Figura 28- Variação do intercâmbio da área 1, sem e com o CIA.



Fonte: Avila (2012)

Figura 29- Variação das potências ativas dos geradores, sem o CIA.

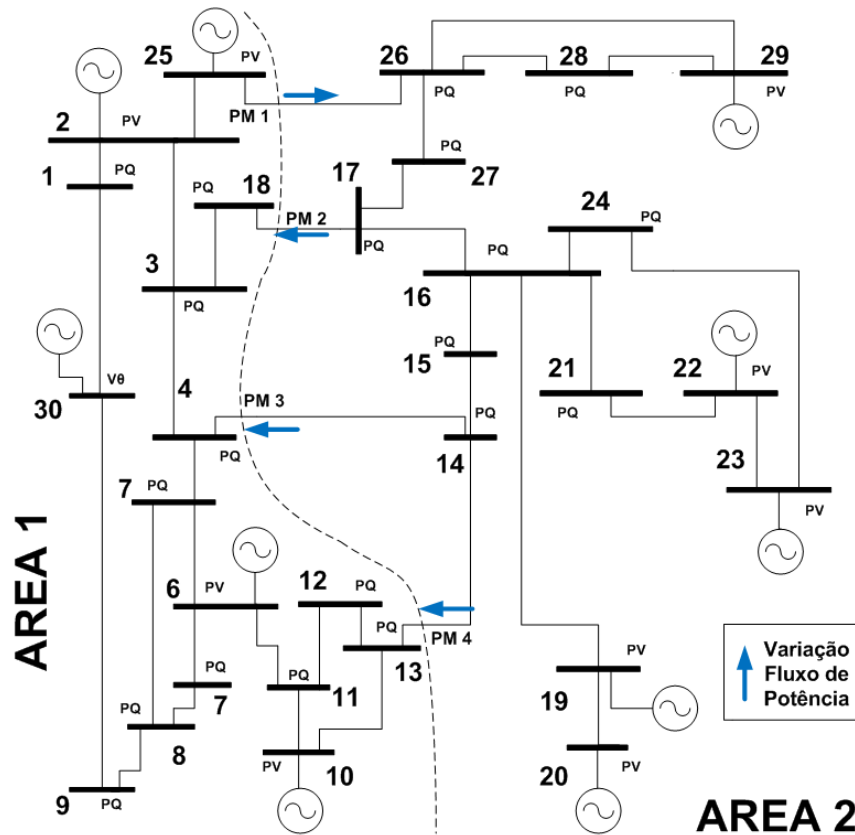


Fonte: Avila (2012)

5.2.4 Sistema New England Considerando Múltiplas Barras de Folga por Área

Este sistema (vide figura 30) é dividido em duas áreas. Incrementam-se as potências ativas das cargas localizadas nas barras 24, 27 e 28 da área 2, proporcionalmente ao caso base. As barras de geração escolhidas para suprir o incremento de carga são as barras 19, 20 e 23 da mesma área 2. O objetivo aqui é o de mostrar a influência do controle de intercâmbio com múltiplas barras de folga sobre a capacidade de transferência de potência dentro de uma área. São apresentados dois cenários: sem e com o controle intercâmbio entre áreas. Em ambos os casos a barra 30 é a barra de referência. Os respectivos fatores de participação das barras de geração 19, 20 e 23, calculados a partir do caso base, são iguais a 37,15%, 29,86% e 32,99%.

Figura 30- Representação do sistema New England de 30 barras com a divisão arbitrária das áreas.



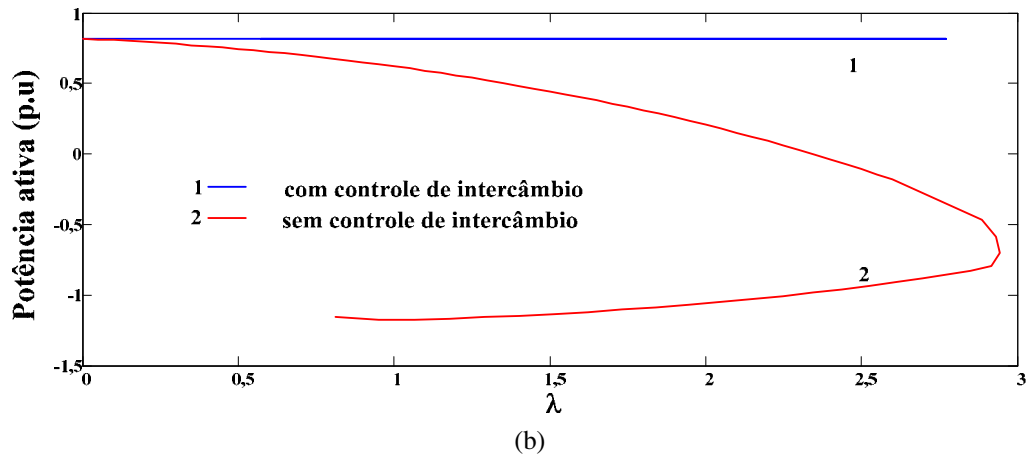
Fonte: Avila (2012)

A figura 31(b) apresenta os intercâmbios líquidos e as respectivas curvas λ -V da barra 15 para os dois cenários. Pode se verificar que a margem de carregamento com a inclusão do controle de intercâmbio é menor do que a obtida sem o controle, i.e., há uma redução de 5,86%.

A figura 32 mostra as variações dos fluxos nos pontos de medição (PM) com relação ao caso base. Uma vez que o fluxo de intercâmbio deve ser mantido constante e igual ao seu valor no caso base (curva 1 na figura 31(a)), o somatório das variações dos fluxos de potência ativa nos pontos de medição (PM) deve ser igual a zero, conforme se pode ver na figura 32. Observe que a variação do fluxo no PM1 que sai (positivo) da área 1, é igual à soma das variações dos fluxos nos PM2, PM3 e PM4 que entram (negativos) na área 1. Estes fluxos, conhecidos como fluxos de circulação geram perdas nas linhas de transmissão das áreas envolvidas.

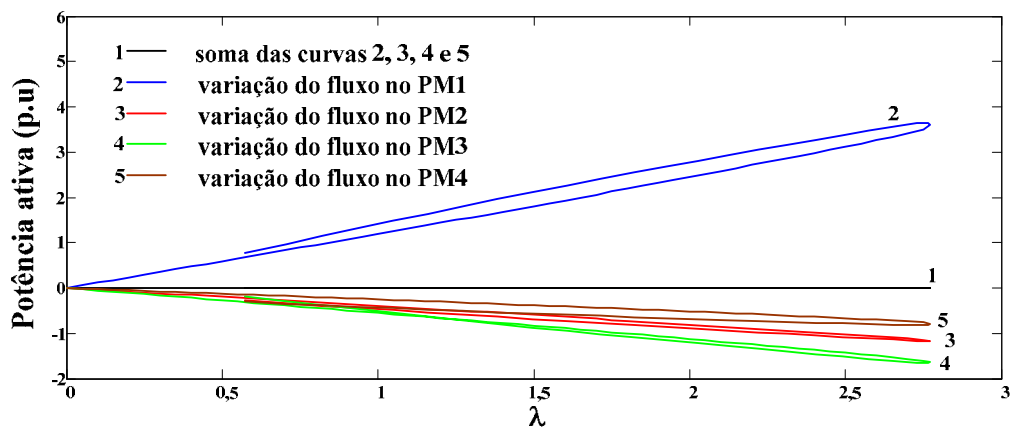
As figuras 33 a 35 mostram os efeitos do fluxo de circulação sobre geração das áreas envolvidas. Pode-se observar que as variações (com relação às do caso base) nas perdas ativas das linhas de transmissão das áreas fazem com que as barras de folga destas áreas variem suas gerações em igual proporção. Conforme se pode ver na figura 33, a área 1 é forçada a variar sua geração de forma a suprir a variação das perdas geradas pelo fluxo de circulação. Nas figuras 34 e 35 pode se verificar como as três barras de folga da área 2 participam do controle do seu intercâmbio líquido, variando suas gerações, em proporção a seus fatores de participação, de forma a fornecer a variação das perdas ativas da área 2 e a variação do incremento de potência ativa das barras de carga.

Figura 31- (a) intercâmbios entre as áreas e (b) curvas λ -V da barra 15, sem e com o CIA.



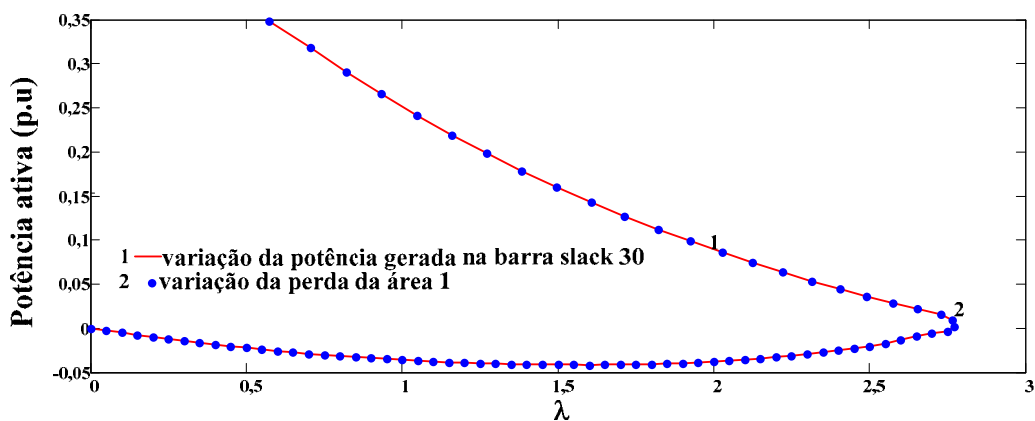
Fonte: Avila (2012)

Figura 32- Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.



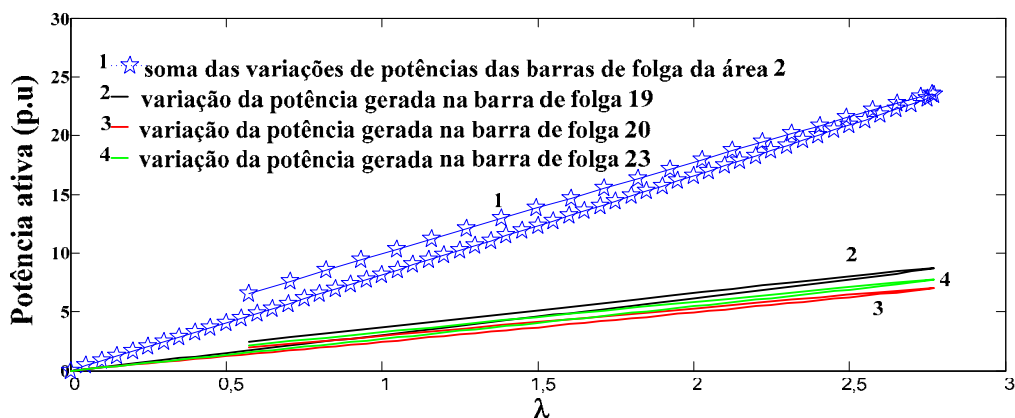
Fonte: Avila (2012)

Figura 33- Comparação entre a variação da potência gerada pela barra slack 30 e a variação das perdas ativas da área 1.



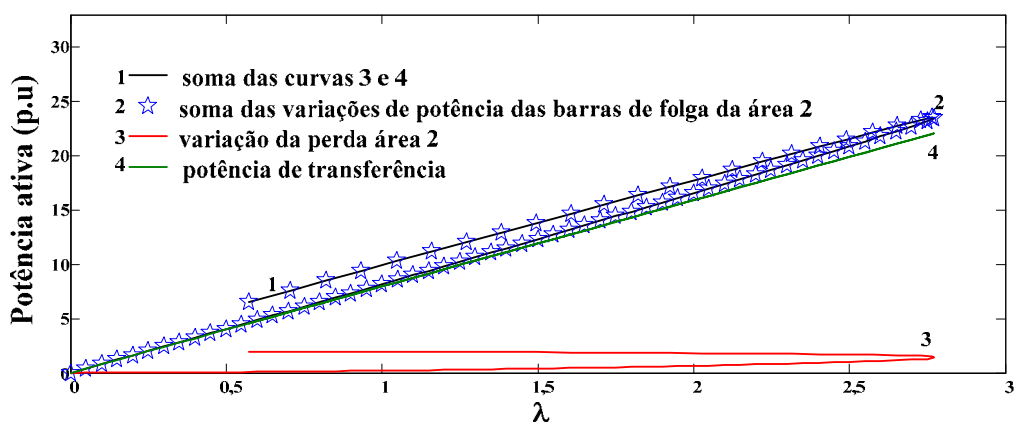
Fonte: Avila (2012)

Figura 34- Variações das potências ativas geradas pelas barras folga área 2, com o CIA.



Fonte: Avila (2012)

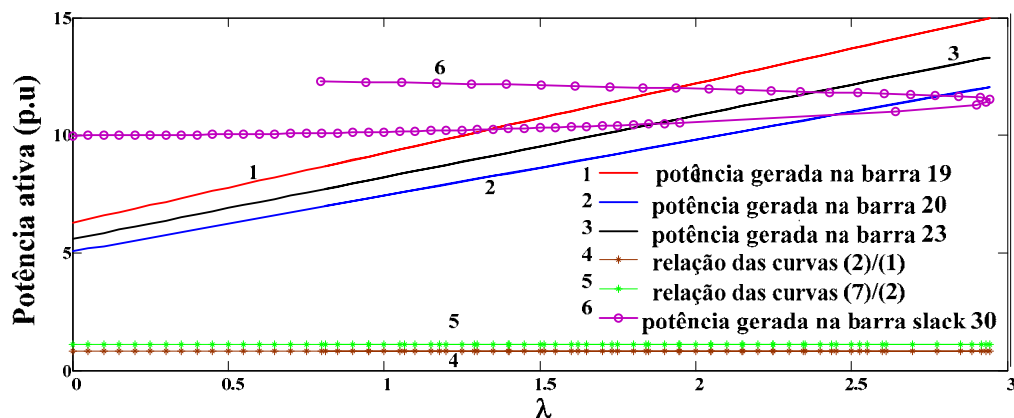
Figura 35- Efeito da transferência de potência ativa na variação da potência gerada pelas barras de folga da área 2.



Fonte: Avila (2012)

Na figura 36, podem-se ver os efeitos da transferência de potência ativa sem o controle de intercâmbio. Sem o controle de intercâmbio o sistema é visto como uma só área. Assim, uma vez que não há barras de folga que possam manter o intercâmbio líquido em seu valor programado, a barra de referência (barra 30) será a única responsável pela manutenção do balanço de potência. Observe que as barras 19, 20 e 23, aumentam as suas gerações em proporção a seus fatores de participação, e não sendo encarregados de controlar o intercâmbio, não participam do suprimento das perdas.

Figura 36- Comparação entre a potência gerada da barra de folga 19, 20 e 23 sem controle



Fonte: Avila (2012)

5.3 Comparação do Fluxo de Carga Continuado com o CIA para Duas Formas Distintas de Carregamento do Sistema.

Além da inclusão do controle de intercâmbio no método da continuação, neste trabalho também se mostra a comparação entre os resultados obtidos considerando duas formas de carregamento do sistema, de onde se constata que em geral, há uma redução da capacidade de transferência de potência ativa quando se considera o carregamento da potência ativa e reativa das cargas com fator de potência constante:

5.3.1 Sistema IEEE-9 barras.

A figura 22 representa o sistema a avaliar, que foi dividido em duas áreas. Na área 1, adotada como área de referência, encontra-se a barra 1 (gerador 1), que é a barra de referência (tipo $V\theta$) do sistema. Será analisada a transferência de potência ativa da área 2 para a área 1, considerando-se duas formas de carregamento do sistema:

Caso1- Incremento só de potência ativa das cargas.

Caso2- Incremento de potência ativa e reativa das cargas, mantendo o fator de potência constante.

Incrementa-se a potência da carga localizada na barra 5 da área 1, cujo valor no caso base é: potência ativa igual 125 MW e potência reativa igual a 50 Mvar. Esse incremento de carga deverá ser suprido pelas barras de geração 2 e 3 da área 2. Os fatores de participação das barras de geração 2 e 3, calculados a partir da solução do caso base por meio da equação (95), são iguais a 65,72% e 34,28%, respectivamente. Considera-se como barra de folga da área 2 a barra de geração 2 que será o encarregado de controlar o intercâmbio de forma a possibilitar a transferência de potência de uma área à outra, Neste caso, conforme a equação (4.22), incrementa-se o intercâmbio na área de geração (área 2) e decrementa-se na área da carga, área (1).

No primeiro cenário, considera-se o controle de intercâmbio entre áreas com apenas uma barra de folga na área 2, no caso a barra 2. O gerador localizado na barra 3 também participa do suprimento de potência da carga localizada na barra 5 da área 1. Porém não participa do controle do intercâmbio. Observa-se primeiramente que em consequência da existência de caminhos paralelos entre os geradores 2 e 3 e a barra de carga 5, haverá a circulação do fluxo de potência ativa nas duas áreas, o que acarretará uma variação das perdas em ambas as áreas, 1 e 2. A variação das perdas de cada área deverá ser suprida por suas respectivas barras de folgas, de forma a atender os intercâmbios programados. Assim, conforme se pode ver das curvas 4 e 5 apresentadas nas figuras 37(a) e 37(b), o gerador 2 supre as variação das perdas da área 2 nos dois casos (Caso 1 e Caso 2).

As figuras 38(a) e 38(b) mostram para os dois casos, as respectivas variações dos fluxos de potência ativa nos pontos de medição (PM1-curva 2 e PM2-curva 1), e a variação da potência de transferência (curva 4). Conforme já era esperado, e de acordo com equação (4.22), a somatória dos fluxos nos pontos de medição (curva 3) corresponde exatamente à variação de potência de transferência (curva 3).

Figura 37- Efeito da transferência de potência ativa na variação da potência gerada pela barra de folga da área 2:
 (a) caso 1 e (b) caso 2.
 (a)

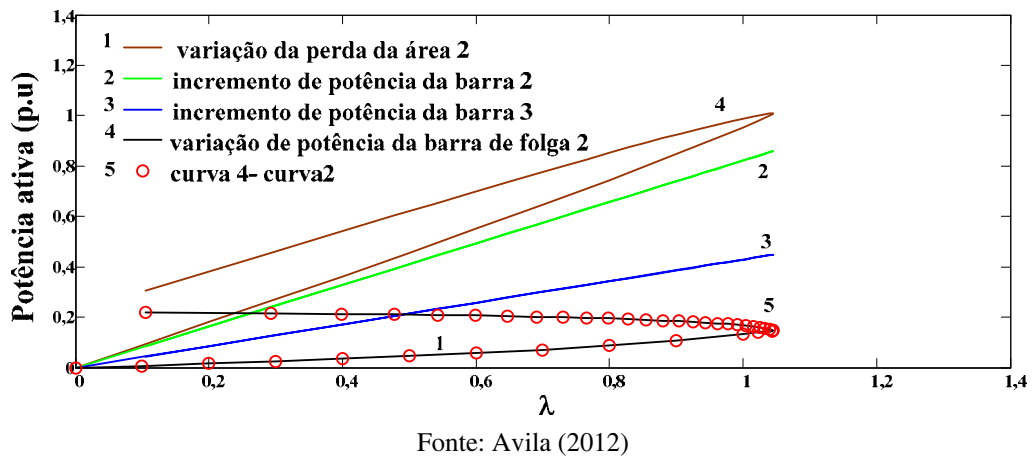
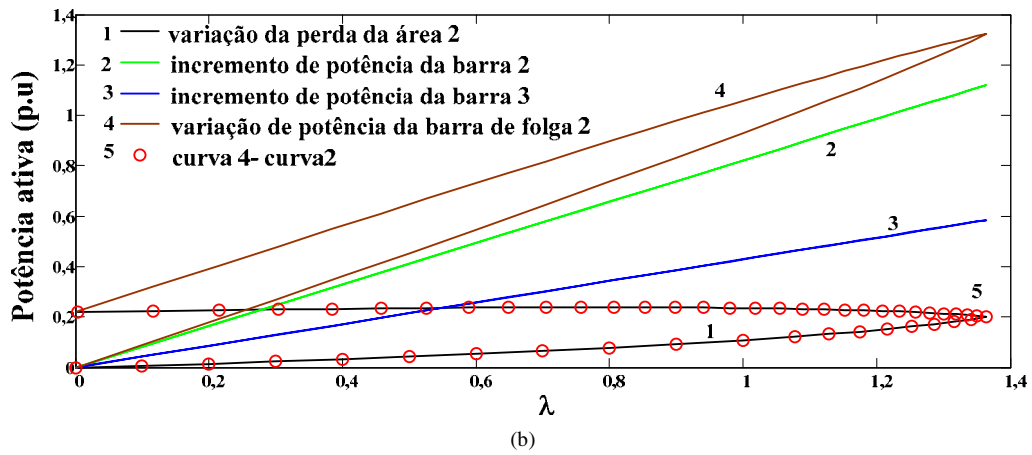
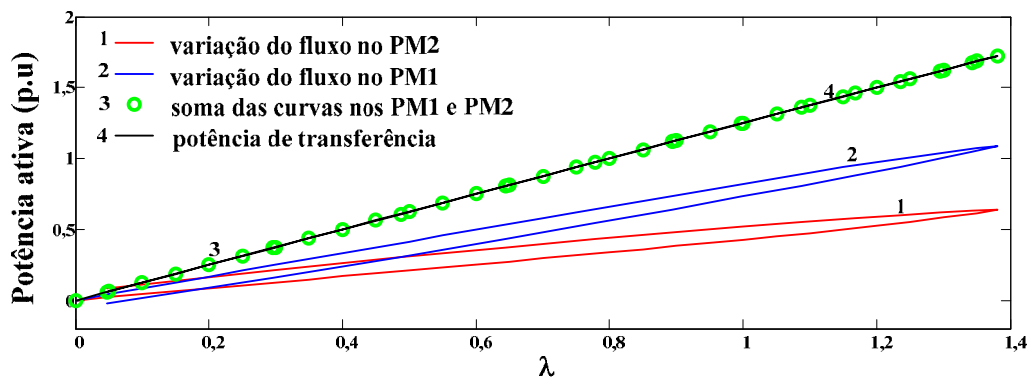
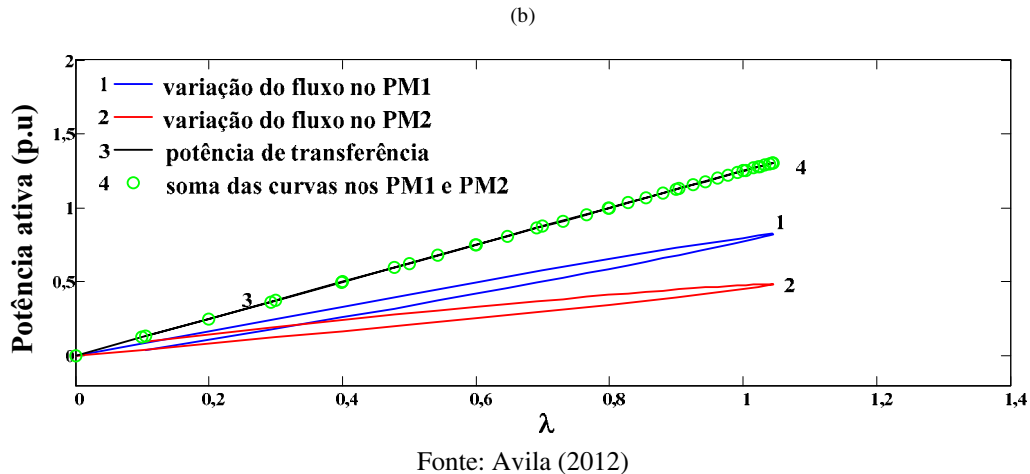


Figura 38- Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição: (a) caso 1 e (b) caso 2.
 (a)





A figura 39 apresenta as curvas λ -V da barra 5, para as duas formas de carregamento do sistema (Caso 1-curva 1 e Caso 2-curva2). Pode se verificar a maior influência do carregamento do sistema com fator de potência constante sobre a margem de transferência de potência ativa. Observa-se que a capacidade de transferência de potência ativa sofre uma redução de 23,38% com relação à margem apresentada pelo caso 1, onde somente a potência ativa da barra 5 é incrementada.

Nas figuras 40(a) e 40(b), e nas figuras 41(a) e 42(b), podem ser observadas para ambos os casos, as curvas P-V e as respectivas potências reativas geradas dos geradores localizados nas barras 2 e 3 da área 2. Ambos os limites máximo de potência reativa das barras de geração 2 e 3 são de 50 Mvar. Observe que em ambos os casos o limite máximo de potência reativa do gerador 2 é violado primeiro, enquanto que o do 3 é atingido praticamente no ponto em que λ atinge seu valor máximo. No momento que o limite de reativo é atingido, a potência reativa injetada pelo gerador permanece constante e já não mais existe o controle da tensão da barra. A capacidade de transferência de potência ativa sofre uma redução maior no caso 2 porque além do aumento das perdas nas linhas de transmissão, há também um aumento da potência reativa da carga do caso base, a qual varia de 50 Mvar para 102 Mvar.

Para um mesmo fator de carregamento (λ), no caso 1 se tem 50 Mvar o qual será fornecido pelos geradores, mas no caso 2, tem-se $50 \times \lambda$ Mvar a ser suprido pelos geradores. Como se poder ver das figuras 41(a) e 41(b), em consequência desse incremento de potência reativa (no caso 2) os geradores violam seus limites antes que no caso 1.

Figura 39- Comparação entre as curvas λ -V da barra 5 com os dois casos.

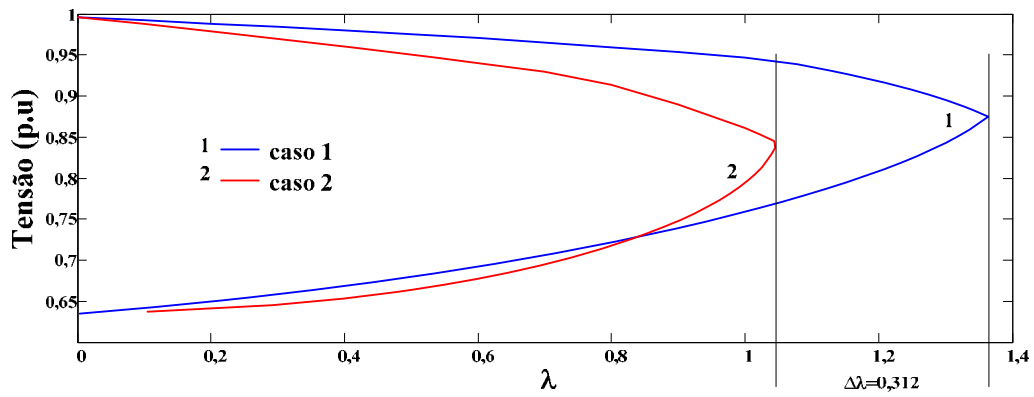


Figura 40- Curvas dos geradores (2 e 3) para o caso 1: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.

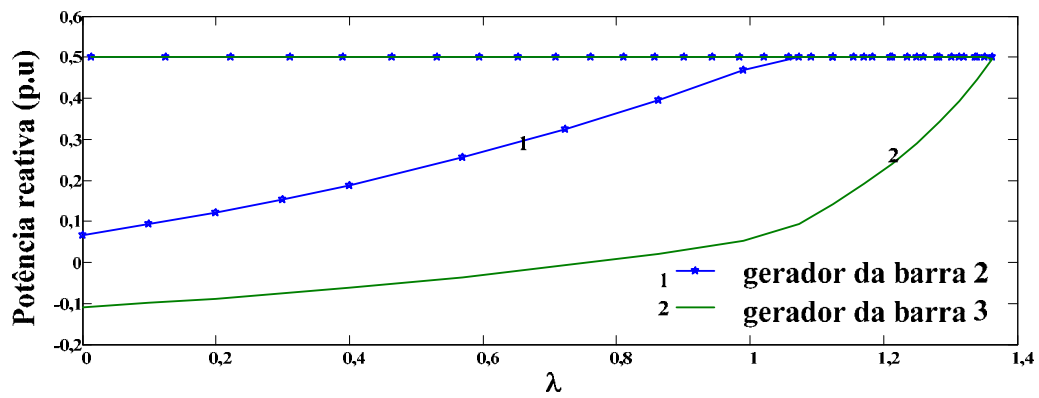
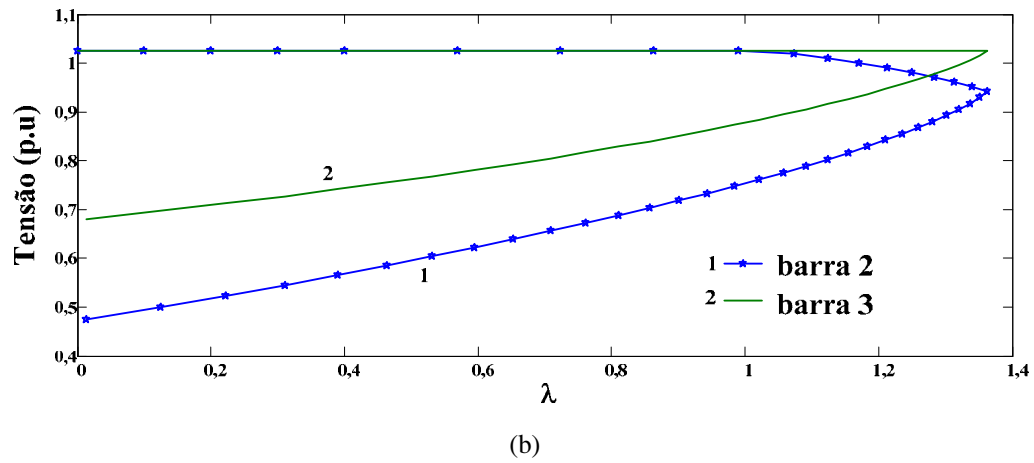
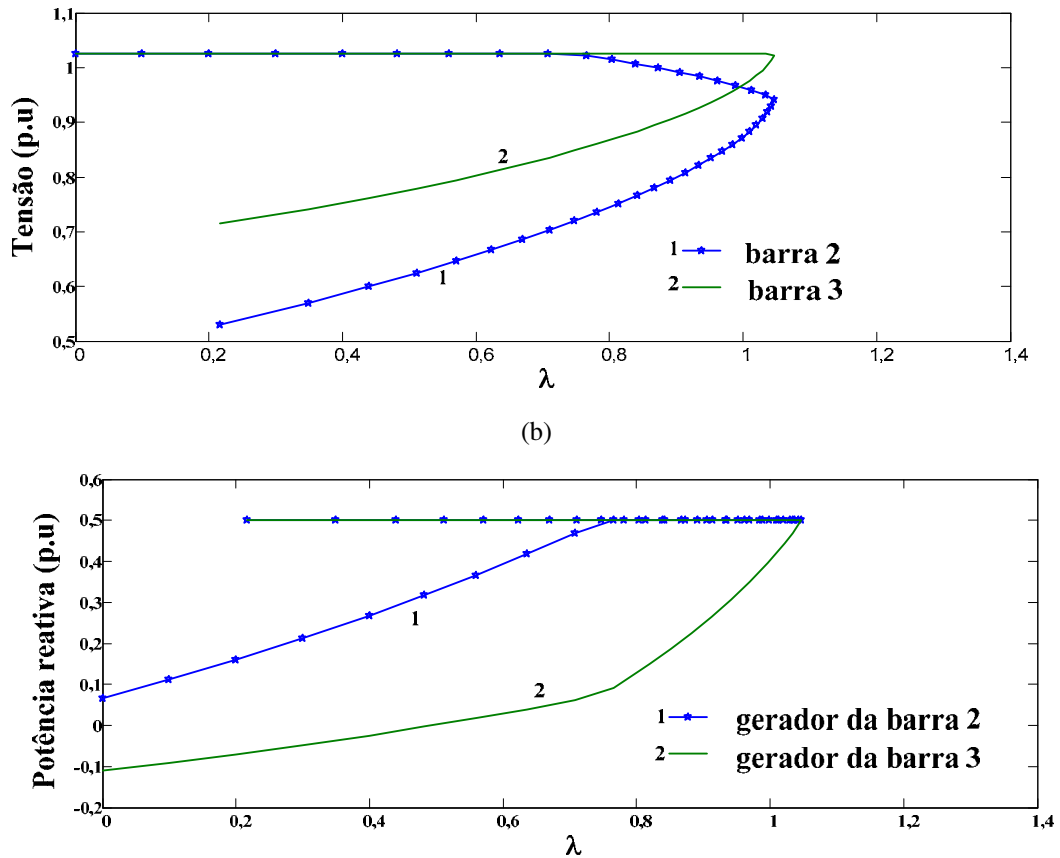


Figura 41- Curvas dos geradores (2 e 3) para o caso 2: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.



5.3.2 Sistema New England.

A figura 16 mostra o sistema a analisar onde será analisada o margem de carregamento de potência ativa da área 2, considerando-se as duas formas de carregamento do sistema: incrementando somente a potência ativa das cargas (caso1) e incrementando-se as potências ativa e reativa das cargas com fator de potência constante (caso2).

Foram incrementadas as potências das cargas localizadas nas barras 21, 27 e 28 da área 2, proporcionalmente ao caso base. As barras de geração escolhidas para suprir os incrementos das cargas são as barras 19, 20 da mesma área 2. O objetivo é mostrar a influência do controle de intercâmbio sobre a capacidade de transferência de potência dentro de uma área considerando as duas formas de carregar o sistema, a barra 30 é a barra de referência. Os respectivos fatores de participação das barras de geração 19 e 20, calculados a partir do caso base, são iguais a 55,44% e 44,56%.

Na tabela 13 pode se apreciar as cargas base das barras escolhidas para o incremento da carga.

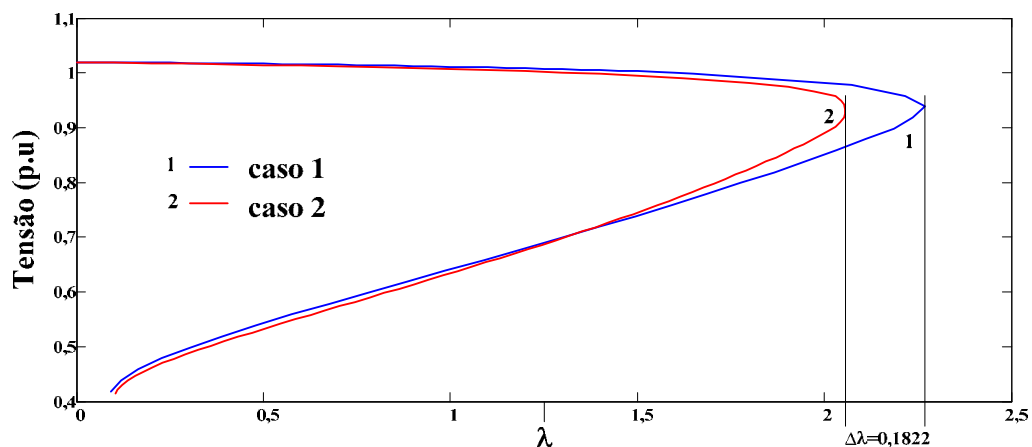
Tabela 13- Carga base das barras escolhidas para o incremento das cargas.

BARRA	21	27	28
Potência Ativa (MW)	274,56	281,00	206,00
Potência Reativa (MVar)	115,00	75,50	27,60

A Figura 42 apresenta as curvas λ -V da barra 15, para as duas formas de carregamento do sistema. A capacidade de transferência quando se considera o incremento de potência ativa e reativa (caso 2) apresenta uma redução de 8,1%, pode se confirmar novamente que o reativo representa uma restrição considerável no sistema.

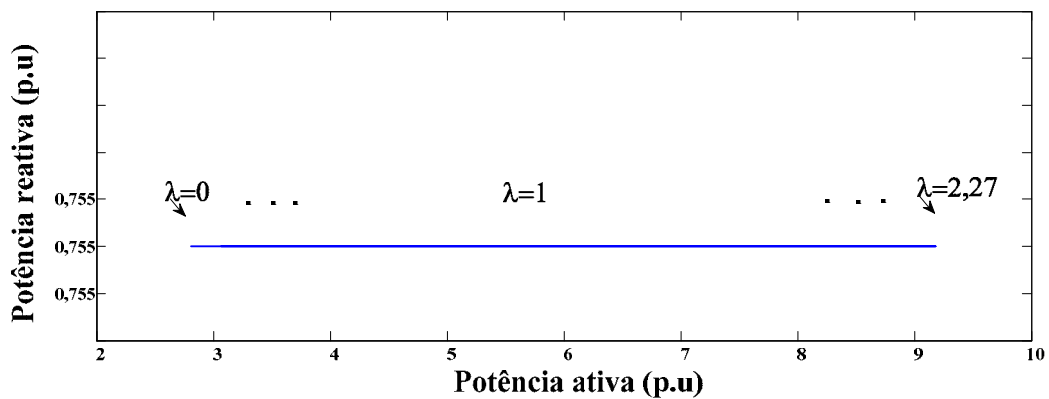
Observe na figura 43(a) (caso 1) que a potência reativa é mantida constante no seu valor do caso base (75,5 Mvar ou 0,755 p.u.), enquanto que no caso 2, como mostra a figura 43(b), a potência reativa aumenta de 0,755 p.u. para 2,265 p.u., ou seja, é possível um aumento de 1,51 p.u. (ou 151 Mvar) de potência reativa na carga, portanto, o fator de carregamento máximo é igual a 2. O mesmo aumento ocorre nas outras duas barras escolhidas (21 e 28). Assim, conforme se pode constatar das curvas P-V da barra 15 apresentadas na figura 42, o aumento concomitante da potência reativa acarreta uma restrição maior para o sistema, já que quando se consideram os incrementos de potência ativa e reativa (caso 2) há uma redução de 11,89% da capacidade de transferência com relação à do caso 1.

Figura 42- Comparação entre as curvas λ -V da barra 15 com os dois casos estabelecidos considerando o CIA.

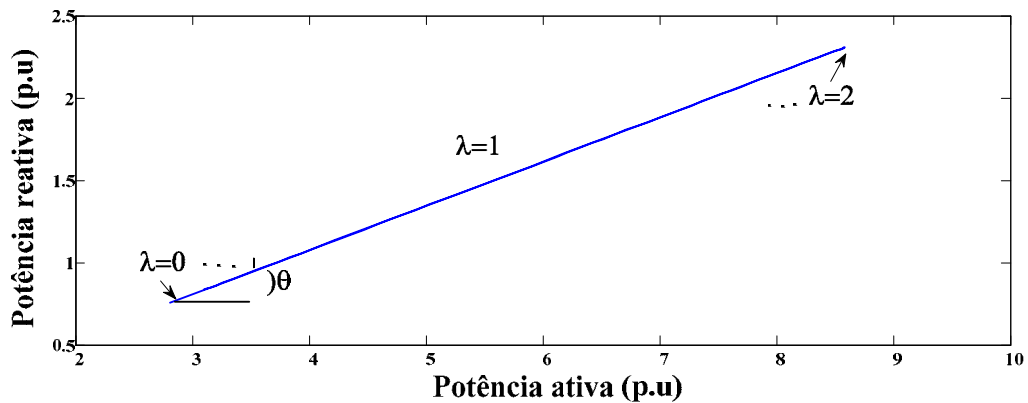


Fonte: Avila (2012)

Figura 43- Comparação entre as duas formas de carregamento da barra de carga 27. (a) caso 1 e (b) caso2



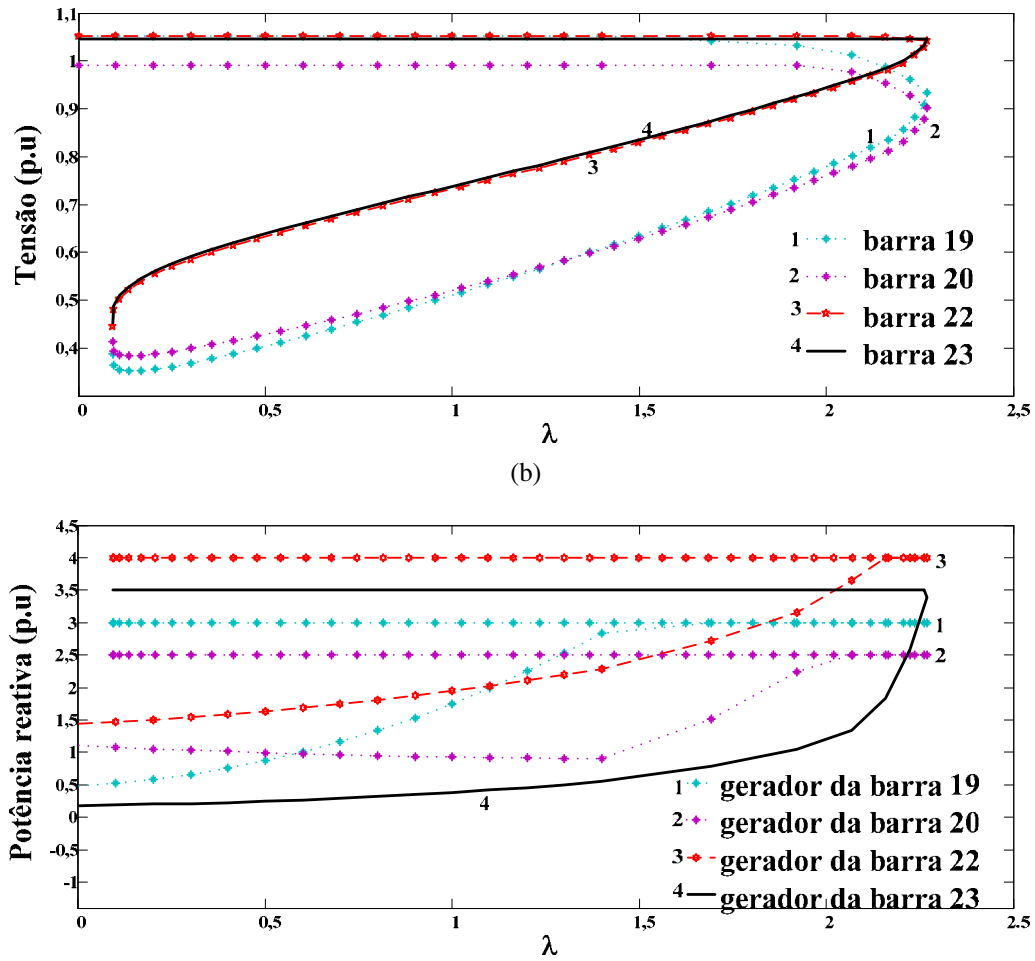
(b)



Fonte: Avila (2012)

Nas figuras 44(a) e 44(b) e nas figuras 45(a) e 45(b), podem ser observadas para ambos os casos, as curvas P-V e as respectivas potências reativas geradas dos geradores 19, 20, 22 e 23. No caso 1 se mantém o valor de potência reativa do caso base constante em 218 Mvar, enquanto no caso 2 o incremento de potência reativa varia de 218,2 Mvar para 713,5 Mvar. Comparando os casos pode-se confirmar que como era esperado, no caso 2 os limites de potência reativa das barras de geração são violados com um fator de carregamento menor. Como se pode verificar das tabelas 14 e 15, para um mesmo fator de carregamento (λ), no caso 1 se tem o fornecimento de 218,2 Mvar pelos geradores, enquanto que no caso 2 se tem um fornecimento de $218,2 \times \lambda$ Mvar por parte dos geradores, o que consequentemente fará que neste caso os geradores violem seus limites antes, como se pode apreciar nas barras 19, 20, 22 e 23 na figura 45(a) e 45(b).

Figura 44- Curvas dos geradores (19, 20, 22 e 23) para o caso 1: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.



Fonte: Avila (2012)

Tabela 14- Potência reativa dos geradores para ambos casos, com mesmo fator de carregamento e considerando o caso 2 próximo ao PMC.

$\lambda=2,05$

BARRAS		2	6	10	19	20	22	23	25	29	30
caso 1	Potência reativa (MVar)	64	238	170	limite	limite	357	129	275	27	60
caso 2	Potência reativa (MVar)	95	240	171	limite	limite	limite	limite	290	156	61
	Límite de potência reativa	180	300	300	300	250	400	350	300	livre	livre

Tabela 15- Potência reativa dos geradores para caso 1 próximo ao PMC.

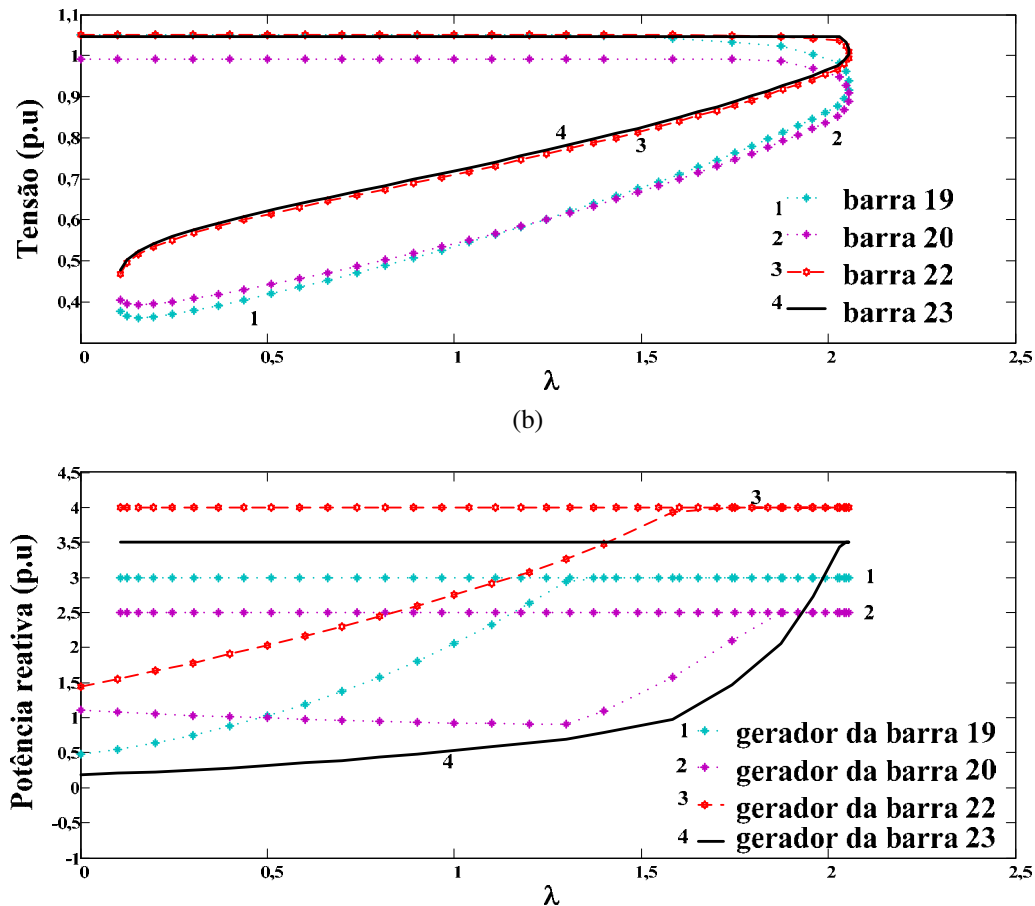
$\lambda=2,25$

BARRAS		2	6	10	19	20	22	23	25	29	30
	Potência reativa (MVar)	53	230	156	limite	limite	limite	341	275	72	60
	Límite de potência reativa	180	300	300	300	250	400	350	300	livre	livre

Os geradores são os principais responsáveis pela manutenção de níveis aceitáveis de tensão nas barras. Assim, conforme a demanda por potência reativa é incrementada, o gerador atingirá o seu limite de potência reativa e em consequência, a magnitude de tensão desse gerador tenderá a cair e com isso, obrigará os geradores mais próximos a fornecerem mais

potência reativa. Com a continuidade do processo a quantidade de geradores que atingirão os seus limites crescerá à medida que o fator de carregamento crescer.

Figura 45- Curvas dos geradores (19, 20, 22 e 23) para o caso 2: (a) curvas λ -V e (b) curvas λ -Q.

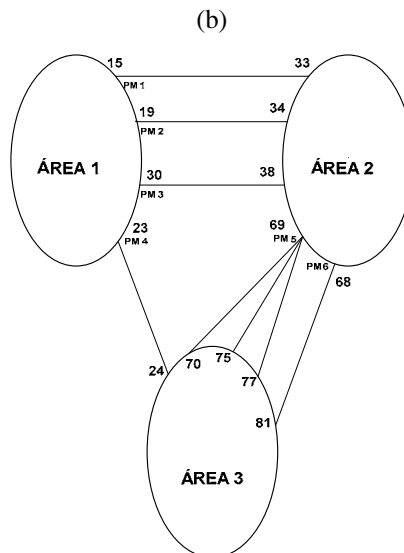
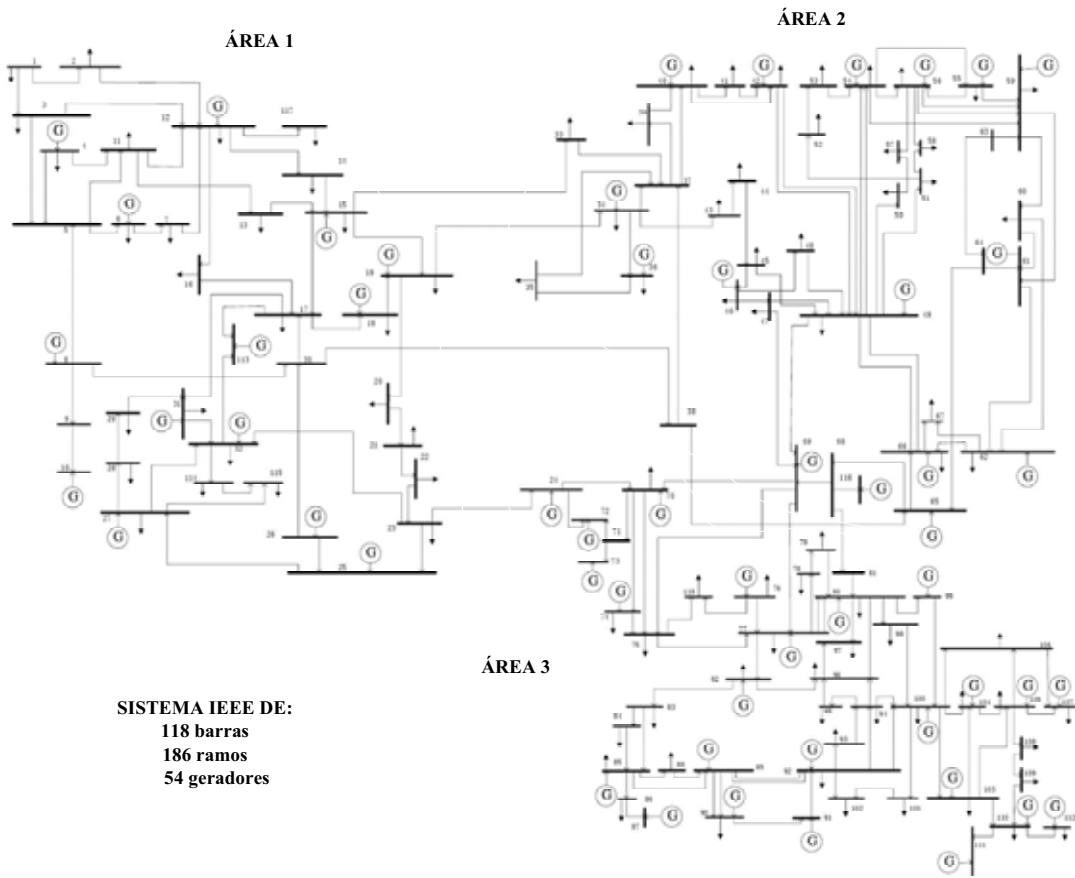


Fonte: Avila (2012)

5.4 Sistema IEEE-118 Barras.

Este sistema constituído por 118 barras e 186 ramos encontra-se apresentado na figura 46. Ele foi dividido em três áreas, sendo que na área 2, adotada como área de referência, encontra-se a barra 69, que é a barra de referência (tipo $V\theta$) do sistema. São analisados dois cenários de transferência de potência: no cenário 1 a transferência de potência da área 2 para à área 3, e no cenário 2 se realiza a transferência de potência da área 1 para à área 3. O objetivo aqui é o de mostrar a influência do controle de intercâmbio sobre a capacidade de transferência de potência no caso de um sistema de maior dimensões.

Figura 46- Representação do sistema IEEE de 118 barras com a divisão arbitrária das áreas, (a) diagrama unifilar, (b) representação simplificada.



Fonte: Avila (2012)

5.4.1 Cenário 1.

A seguir analisa-se a transferência de potência da área 2 para à área 3. Incrementam-se as potências ativa e reativa das cargas localizadas nas barras 78, 79, 82 e 83 da área 3, proporcionalmente ao caso base. Esse incremento de carga deverá ser suprido pelas barras de geração de números 46 e 49 da área 2, sendo seus fatores de participação calculados a partir do caso base por meio da equação (4.6). Novamente são comparados os desempenhos sem e com o controle intercâmbio entre áreas. Em ambos os casos a barra 69 é a barra de referência.

Com controle de intercâmbio a barra folga da área 1 é a barra 6, a da área 2 é barra de referencia (barra 69). No caso da área 3 são escolhidas duas barras de folga, as barras 76 e 77. Seus fatores de participação são iguais a 66,66% e 33,33%, respectivamente. O intercâmbio é ajustado de forma a possibilitar a transferência de potência de uma área à outra. Neste caso, conforme a equação (4.22), incrementa-se o intercâmbio na área de geração da (área 2), diminuindo o intercâmbio na área de carga (área 3) e mantendo constante o intercâmbio da área 1.

Na figura 47 apresentam-se as curvas $V-\lambda$ da barra 82, para os dois casos. Pode se verificar que a capacidade de transferência de potência ativa considerando o controle de intercâmbio entre áreas é maior que a obtida sem a consideração do controle. Há um aumento de 6.12%.

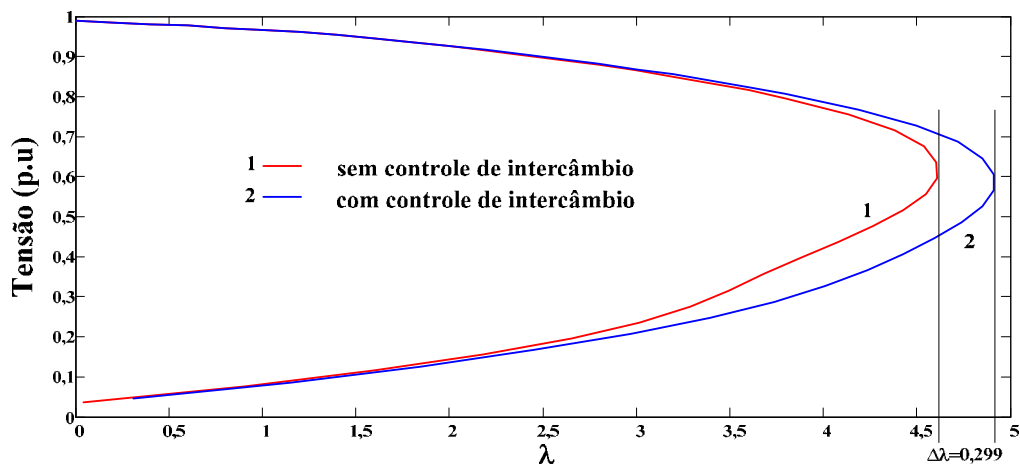
Na figura 48 mostra-se que em consequência da existência de caminhos paralelos, durante a transferência de potência da área 3 para a área 2 haverá um fluxo de circulação de potência ativa pela área 1. Isto acarretará uma variação da perda na área 1. Nos pontos de medição, a somatória das variações dos fluxos que entram na área 1 tem que ser igual à da que sai dessa mesma área pelo outro ponto de medição, isto porque o intercâmbio dessa área é mantido constante e igual ao valor do caso base, conforme pode-se ver pela curva 1 da figura 49.

Na figura 50, as curvas 1 e 2 representam os incrementos de potência ativa gerados nas barras 46 e 49, respectivamente. Estes incrementos são calculados conforme o segundo termo ($\lambda_{ger_i} \cdot P_{tr_0}$) do lado direito da equação (4.5). A curva 4 apresenta a somatória dos incrementos das potências ativas geradas. Conforme se pode ver na figura 50, essa somatória coincide com a potência de transferência P_{tr_0} , representado pela curva 3 na figura 50, sendo a somatória dos incrementos das barras de carga, que tem que ser fornecidos pelas barras de geração 46 e 49.

A variação das perdas de cada área deverá ser suprida por suas respectivas barras de folgas de forma a atender os intercâmbios programados. Conforme se pode observar na figura 51, o gerador 6 supre apenas a variação das perdas da área 1 e o gerador 69 supre a variação das perdas da área 2. Já no caso da área 3, conforme pode-se verificar na figura 40 e 43, ambas barras de folga 76 e 77 (curvas 2 e 3 da figura 52) participam, de acordo a seu fator de participação de cada barra, do atendimento da variação da perda total de potência ativa da área 2. Isto garante que os intercâmbios sejam atingidos de acordo com o programado, aumentando o intercâmbio na área 2 (curva 2 da figura 49), diminuindo o intercâmbio na área 3 (curva 3 da figura 49), e mantendo constante o intercâmbio na área 1 (curva 1 da figura 49).

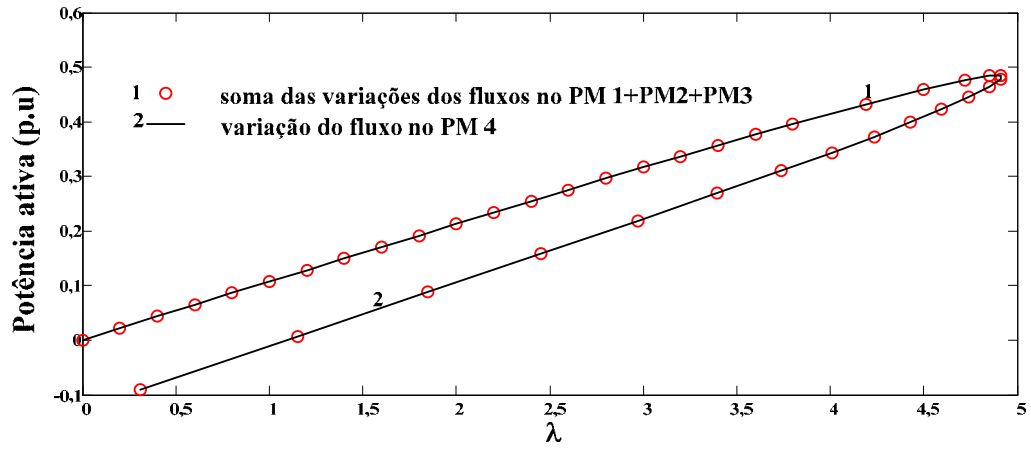
Observe que quando não se considera o controle de intercâmbio, o sistema é visto como uma única área onde a barra de referência (barra 69) é a responsável pela manutenção do balanço de potência ativa de todo o sistema. Da figura 53 pode-se constatar que o gerador 69 fornece a variação total de perda de potência ativa.

Figura 47- Curvas V- λ da barra 82: com e sem o CIA.



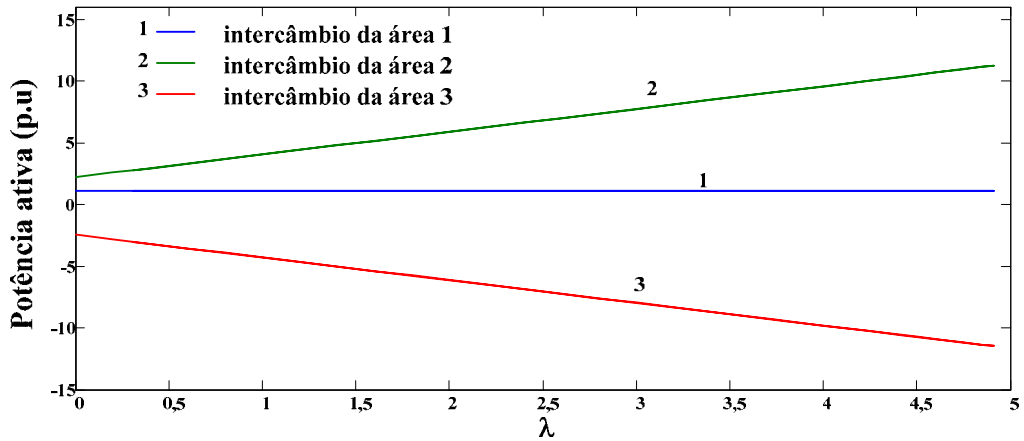
Fonte: Avila (2012)

Figura 48- Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.



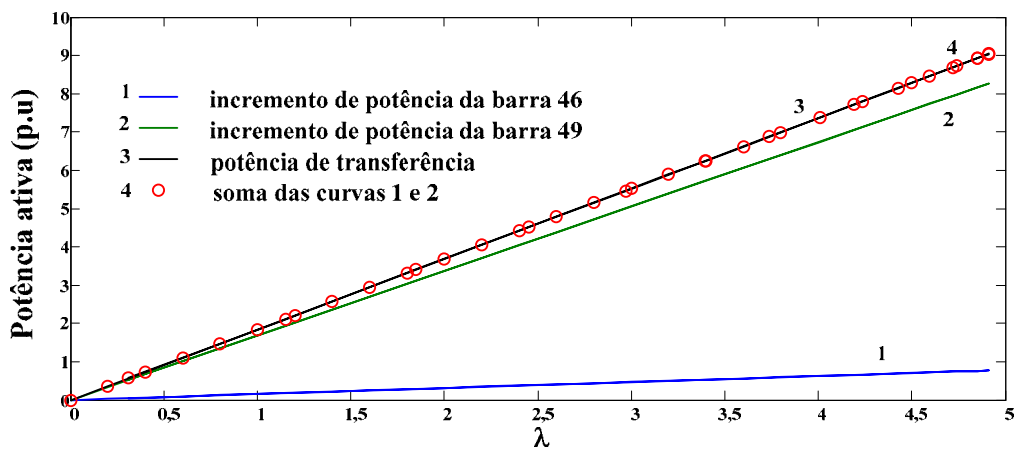
Fonte: Avila (2012)

Figura 49- Variação do intercâmbio das áreas com o CIA.



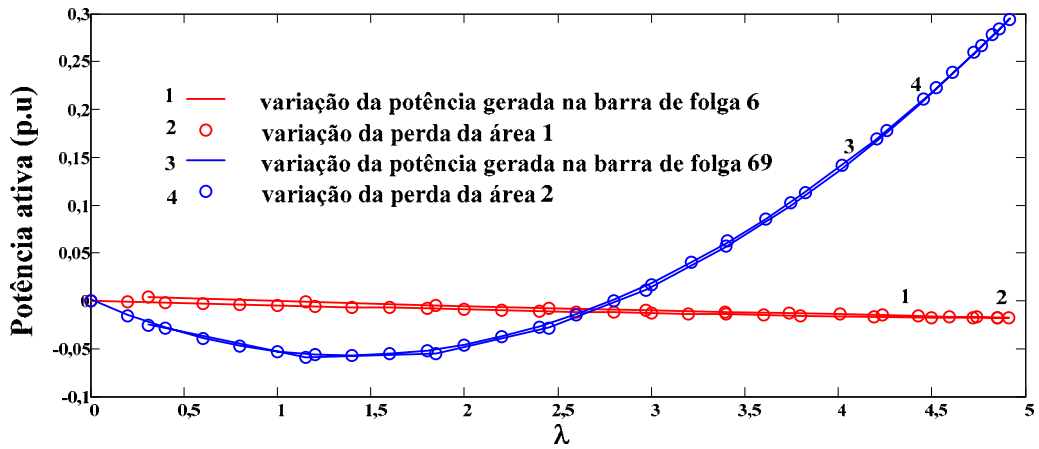
Fonte: Avila (2012)

Figura 50- Soma dos incrementos de potência ativa geradas pelas barras da área 2.



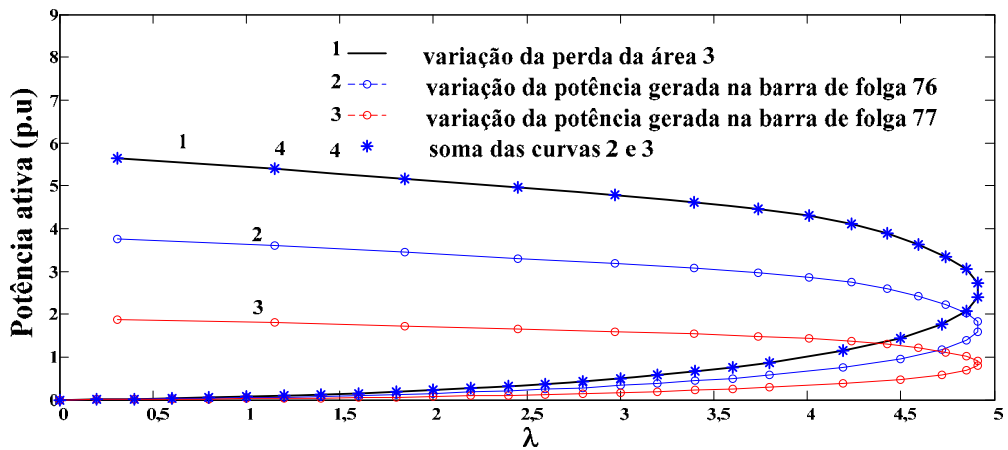
Fonte: Avila (2012)

Figura 51- Comparação da variação de potência ativa gerada na barra de folga da área 1 e 2 com a variação da perda total de potência ativa da área 1 e 2.



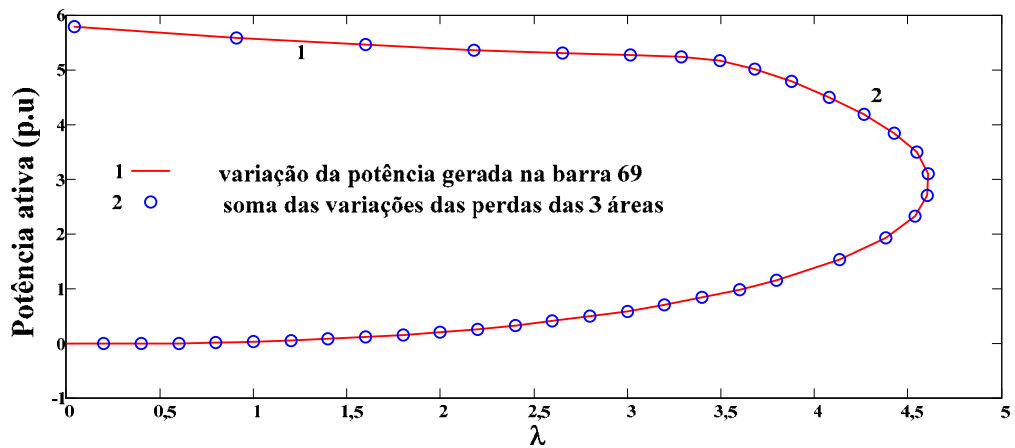
Fonte: Avila (2012)

Figura 52- Soma das variações de potência ativa geradas pelas barras de folga da área 3.



Fonte: Avila (2012)

Figura 53- Variação da potência ativa do gerador 69 (referência), sem o CIA.



Fonte: Avila (2012)

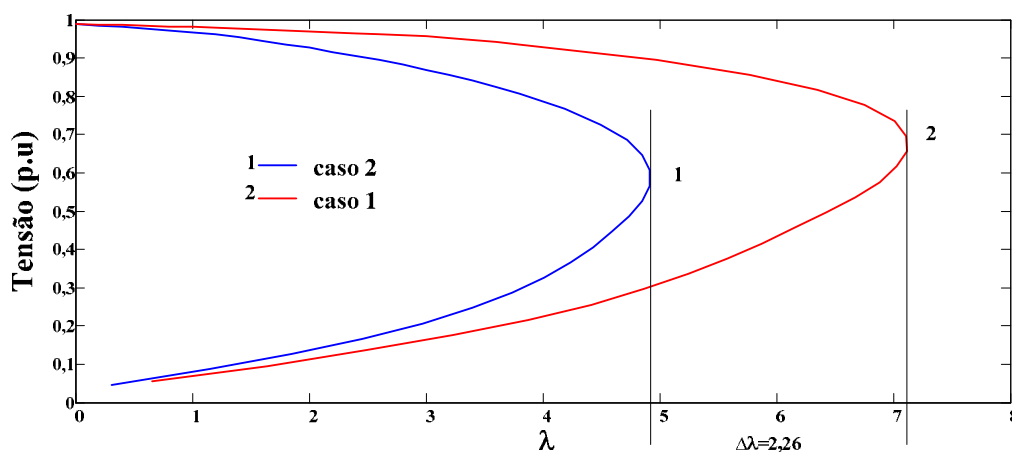
A seguir é realizada para o sistema IEEE de 118 barras, uma comparação entre dois casos de crescimento de carga considerando a inclusão do CIA: no primeiro caso (caso 1) incrementam-se somente as potências ativas das barras de carga 78, 79, 82 e 83, e no segundo (caso 2) as incrementam-se as potências ativas e reativas dessas mesmas barras mantendo-se o fator de potência constante. Na tabela 13 pode-se apreciar as cargas base das barras de carga escolhidas para o incremento de carga.

A Figura 54 apresenta as curvas $V-\lambda$ da barra 82 para as duas formas de carregamento do sistema. Observe que a capacidade de transferência quando se considera o incremento de potência ativa e reativa, caso 2, apresenta uma redução de 31,9% em relação ao caso 1. Consta-se portanto, que o incremento de reativo representa uma restrição considerável à capacidade de transferência de potência pelo sistema.

Tabela 16- Carga base das barras escolhidas para se incrementar as cargas.

BARRA	78	79	82	83
Potência Ativa (MW)	71	39	54	20
Potência Reativa (MVar)	26	32	27	10

Figura 54- Curvas $V-\lambda$ da barra 82: com o CIA para os dois casos.



Fonte: Avila (2012)

5.4.1.1 Cenário 1: Avaliando as Contingências.

A seguir são apresentados os efeitos sobre a transferência de potência das contingências de ramos: linhas de transmissão e transformadores (CHOWDHURY; BARAVC, 2006). Foram avaliados os efeitos das contingências de linhas de transmissão internas a área 1 (figura 55(a)), da área 2 e 3 (figura 55(b)), e das contingências de linhas de

intercâmbio (figura 56). A seguir analisa-se a transferência de potência da área 2 para à área 3. Incrementam-se as potências ativa e reativa das cargas localizadas nas barras 78, 79, 82 e 83 da área 3, proporcionalmente ao caso base. Esse incremento de carga deverá ser suprido pelas barras de geração de números 46 e 49 da área 2, sendo seus fatores de participação calculados a partir do caso base por meio da equação (4.6).

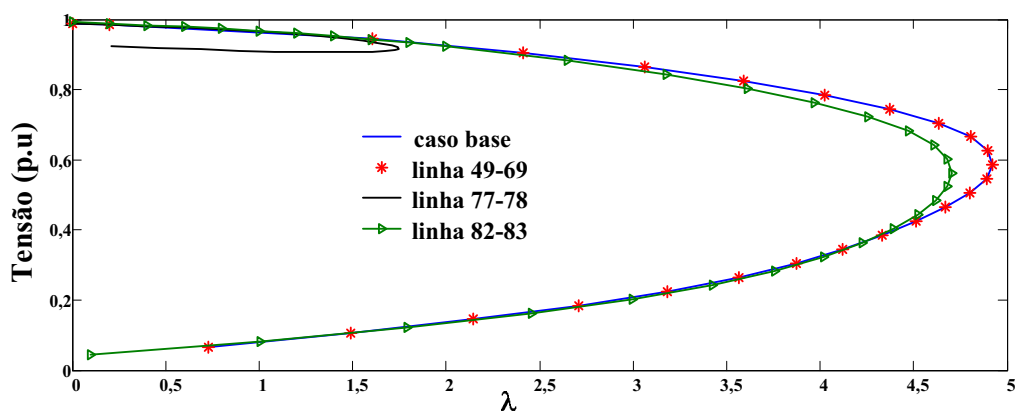
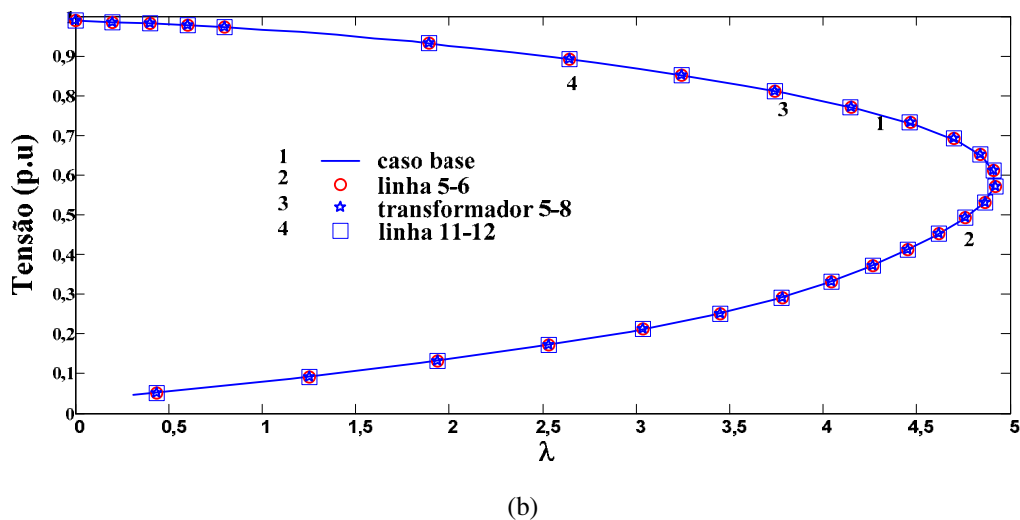
Com controle de intercâmbio a barra folga da área 1 é a barra 6, a da área 2 é barra de referencia (barra 69). No caso da área 3 são escolhidas duas barras de folga, as barras 76 e 77. Seus fatores de participação são iguais a 66,66% e 33,33%, respectivamente. O intercâmbio é ajustado de forma a possibilitar a transferência de potência de uma área à outra. Neste caso, conforme a equação (4.22), incrementa-se o intercâmbio na área de geração da (área 2), diminuindo o intercâmbio na área de carga (área 3) e mantendo constante o intercâmbio da área 1.

As contingências apresentadas na figura 55(a) foram realizadas internamente a área 1: contingência das linhas de transmissão situadas entre as barras 5 e 6 e entre as barras 11 e 12, e a do transformador localizado entre as barras 5 e 8. Observe da figura 55(a) que essas contingências internas praticamente não proporcionam nenhuma diminuição da capacidade de transferência de potência ativa em relação à do caso base. Isto se deve à robustez do sistema e aos caminhos alternativos existentes para a transferência de potência, como também pelo fato de que neste caso se transfere potência da área 2 à área 3, sendo que a área 1 só é afetada pelo fluxo de circulação. Observa-se que quando se incrementa todo o sistema proporcionalmente ao caso base considerando apenas uma área, a contingência mais severa é a do transformador localizado entre as barras 5 e 8. Por outro lado, conforme se pode observar da figura 55(b), as contingências internas realizadas nas áreas 2 e 3, no caso a contingência da linha de transmissão situada entre as barras 77 e 78 há uma considerável diminuição da capacidade de transferência de potência ativa em relação à do caso base. Por outro lado, a contingência da linha de transmissão situada entre as barras 82 e 83 acarreta apenas uma leve diminuição da capacidade de transferência de potência ativa, enquanto que a contingência da linha de transmissão situada entre as barras 49 e 69 praticamente não proporciona nenhuma diminuição da capacidade de transferência de potência ativa.

Observe da figura 56 que as contingências realizadas nas linhas de intercâmbio situadas entre as áreas 2 e 3 acarretam uma maior diminuição da capacidade de transferência de potência ativa em relação à do caso base do que a situadas entre as áreas 1 e 3

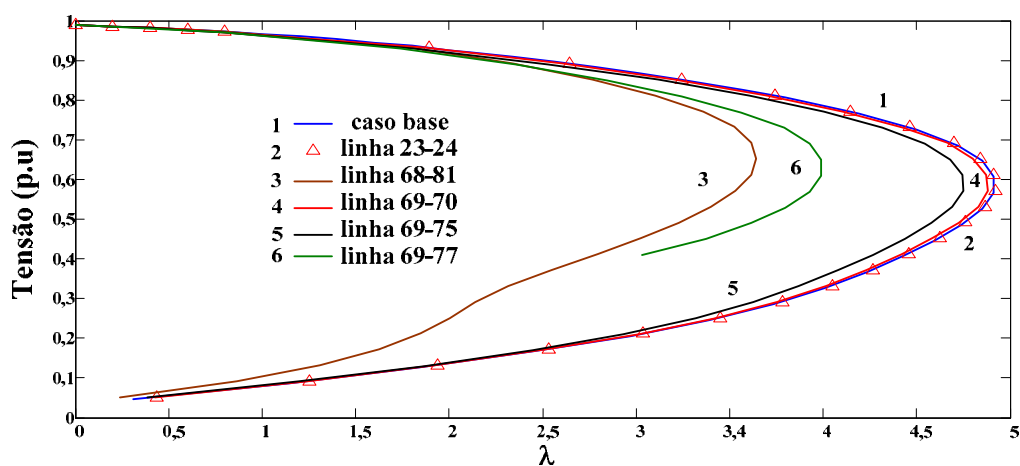
(linha de transmissão situada entre as barras 23 e 24). A contingência mais severa esta representado na linha de intercâmbio situada entre as barras 68 e 81.

Figura 55- Comparação entre as contingências internas (a) área 1 (b) área 2 e 3.



Fonte: Avila (2012)

Figura 56- Comparação entre as contingências das linhas de intercâmbio.



Fonte: Avila (2012)

5.4.2 Cenário 2.

Este cenário o sistema encontra-se apresentado na figura 46, sendo que na área 2, adotada como área de referência, encontra-se a barra 69, que é a barra de referência (tipo V θ) do sistema. A seguir analisa-se a transferência de potência da área 1 para à área 3. Incrementam-se as potências ativa e reativa das cargas localizadas nas barras 91, 92, 94 e 95 da área 3, proporcionalmente ao caso base. Esse incremento de carga deverá ser suprido pela barra de geração 12 da área 1. O objetivo aqui é o de mostrar a influência do controle de intercâmbio sobre a capacidade de transferência de potência. São comparados dois cenários: sem e com o controle intercâmbio entre áreas. Em ambos os casos a barra 69 é a barra de referência.

Com controle de intercâmbio a barra folga da área 1 é a barra 6, a da área 2 é barra de referência (barra 69). No caso da área 3 são escolhidas duas barras de folga, as barras 76 e 77. Seus fatores de participação são iguais a 66,66% e 33,33%, respectivamente. O intercâmbio é ajustado de forma a possibilitar a transferência de potência de uma área à outra. Neste caso, conforme a equação (4.22), incrementa-se o intercâmbio na área de geração da (área 2), diminuindo o intercâmbio na área de carga (área 3) e mantendo constante o intercâmbio da área 1.

Na figura 57 apresentam-se as curvas V- λ da barra 95, para os dois casos. Pode se verificar que a capacidade de transferência de potência ativa considerando o controle de intercâmbio entre áreas é maior que a obtida sem a consideração do controle. Há um aumento de 2,65%.

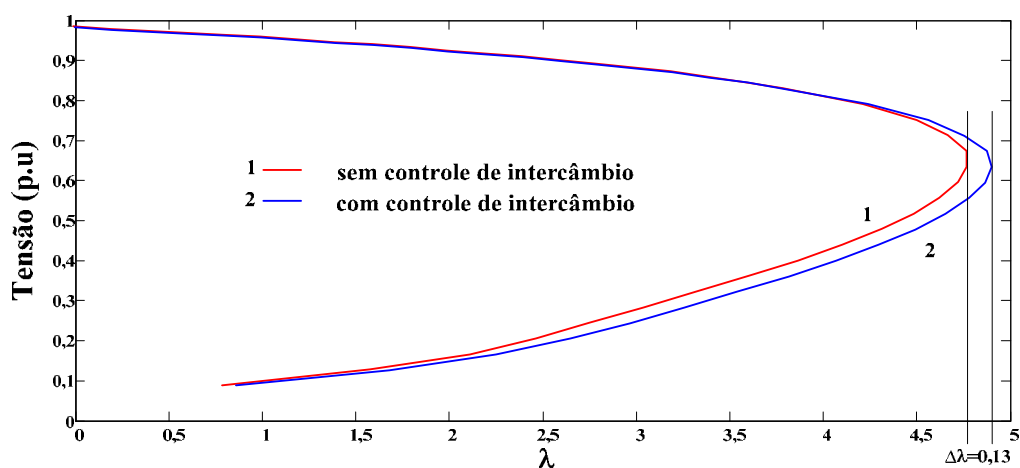
Na figura 58 mostra-se que em consequência da existência de caminhos paralelos, durante a transferência de potência da área 1 para a área 3, haverá um fluxo de circulação de potência ativa pela área 2. Isto acarretará uma variação da perda na área 2. Nos pontos de medição, a somatória das variações dos fluxos que entram na área 2 tem que ser igual à da que sai dessa mesma área pelo outro ponto de medição, isto porque o intercâmbio dessa área é mantido constante e igual ao valor do caso base, conforme pode-se ver pela curva 2 da figura 59.

A variação das perdas de cada área deverá ser suprida por suas respectivas barras de folgas de forma a atender os intercâmbios programados. Conforme se pode observar na figura 60, o gerador 6 supre apenas a variação das perdas da área 1 e o gerador 69 supre a variação das perdas da área 2. Já no caso da área 3, conforme pode-se verificar na figura 59 e 61,

ambas barras de folga 76 e 77 (curvas 2 e 3 da figura 61) participam, de acordo a seu fator de participação de cada barra, do atendimento da variação da perda total de potência ativa da área 2. Isto garante que os intercâmbios sejam atingidos de acordo com o programado, como pode-se ver na figura 59.

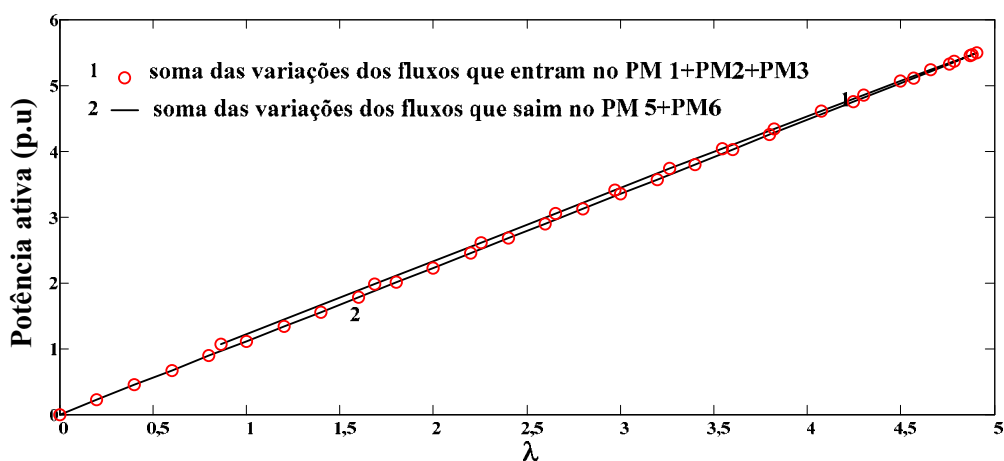
Observe que quando não se considera o controle de intercâmbio, o sistema é visto como uma única área onde a barra de referência (barra 69) é a responsável pela manutenção do balanço de potência ativa de todo o sistema. Da figura 62 pode-se constatar que o gerador 69 fornece a variação total de perda de potência ativa.

Figura 57- Curvas V- λ da barra 82: com e sem o controle de intercâmbio entre áreas.



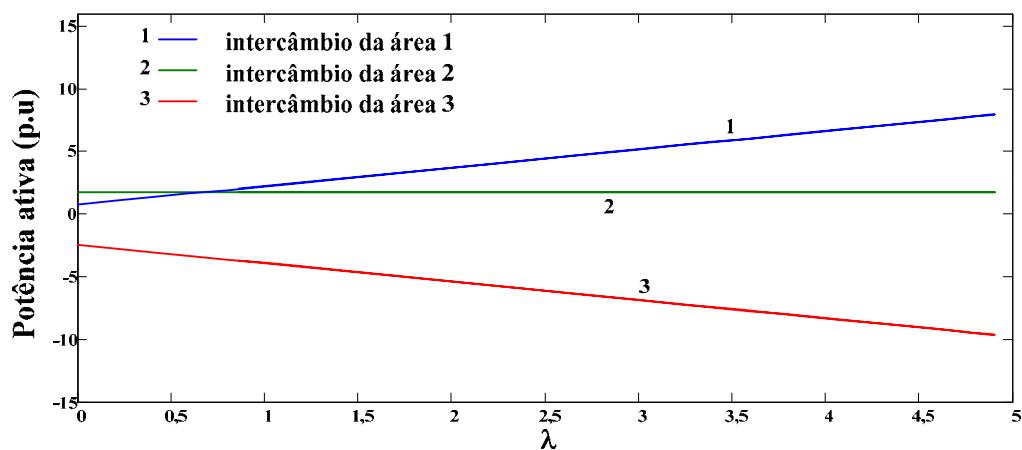
Fonte: Avila (2012)

Figura 58- Comparação entre as variações de fluxo nos Pontos de Medição.



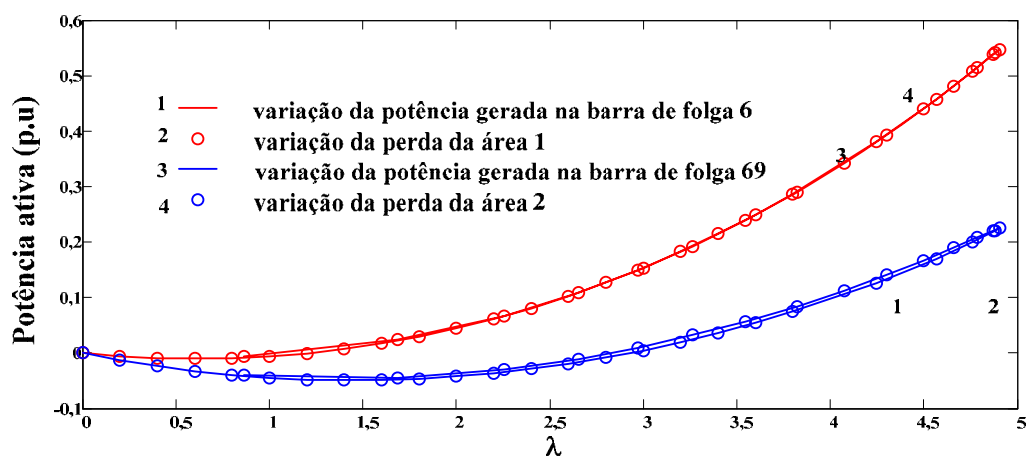
Fonte: Avila (2012)

Figura 59- Variação do intercâmbio das áreas com o controle de intercâmbio entre áreas.



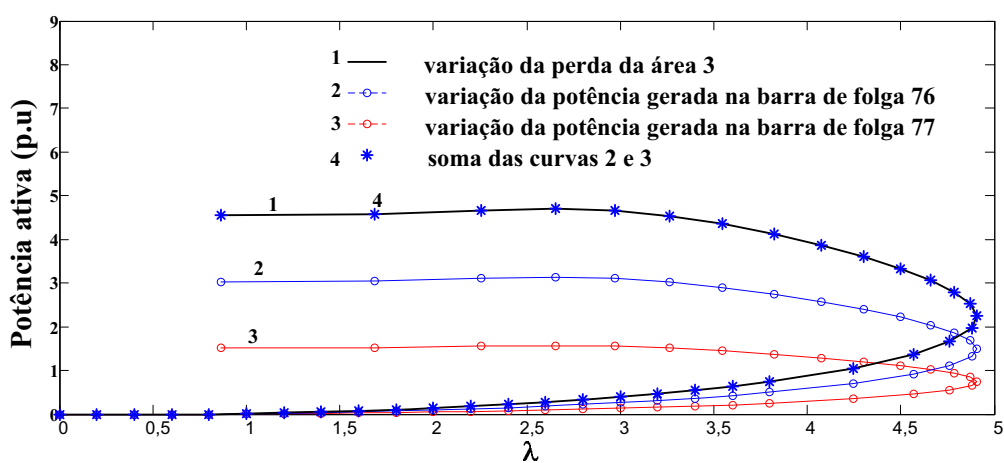
Fonte: Avila (2012)

Figura 60- Comparação da variação de potência ativa gerada na barra de folga da área 1 e 2 com a variação da perda total de potência ativa da área 1 e 2.



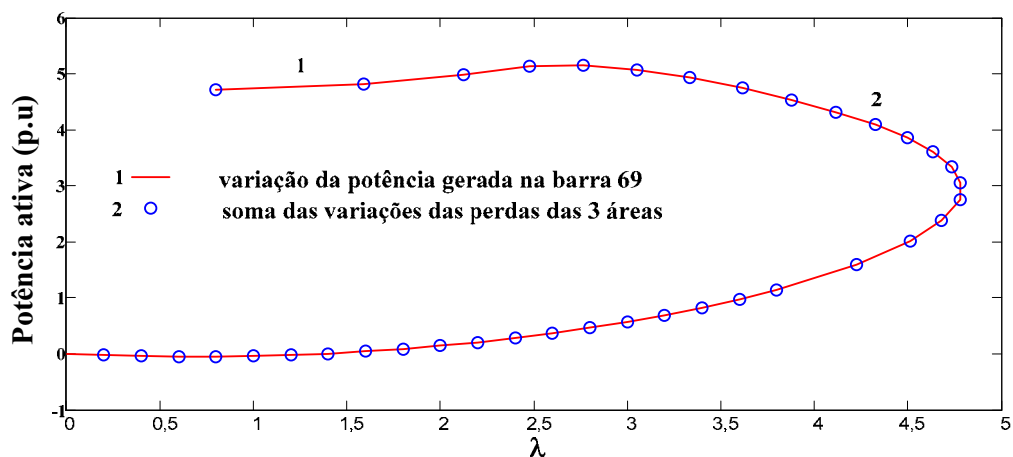
Fonte: Avila (2012)

Figura 61- Soma das variações de potência ativa geradas pelas barras de folga da área 3.



Fonte: Avila (2012)

Figura 62- Variação da potência ativa do gerador 69 (referência): sem o controle de intercâmbio entre áreas.



Fonte: Avila (2012)

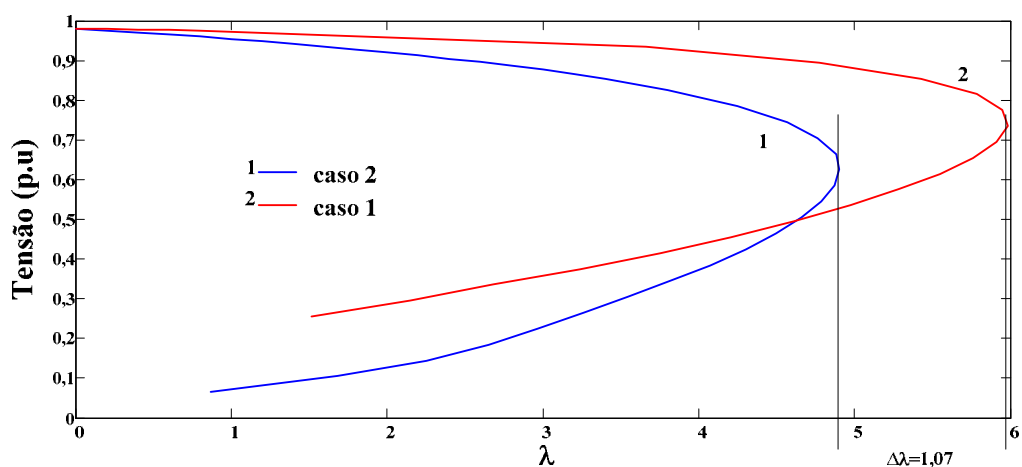
A seguir é realizada para o sistema IEEE de 118 barras, uma comparação entre dois casos de crescimento de carga considerando a inclusão do CIA: no primeiro caso (caso 1) incrementam-se somente as potências ativas das barras de carga 91, 92, 94 e 95, e no segundo (caso 2) as incrementam-se as potências ativas e reativas dessas barras mantendo-se o fator de potência constante. Na tabela 14 pode-se apreciar as cargas base das barras de carga escolhidas para o incremento de carga.

Tabela 17- Carga base das barras escolhidas para se incrementar as cargas.

BARRA	91	92	94	95
Potência Ativa (MW)	10	65	30	42
Potência Reativa (MVar)	0	10	16	31

A Figura 63 apresenta as curvas $V-\lambda$ da barra 95 para as duas formas de carregamento do sistema. Observe que a capacidade de transferência quando se considera o incremento de potência ativa e reativa, caso 2, apresenta uma redução de 17,92% em relação ao caso 1. Consta-se por tanto, que o incremento de reativo representa uma restrição considerável à capacidade de transferência de potência pelo sistema.

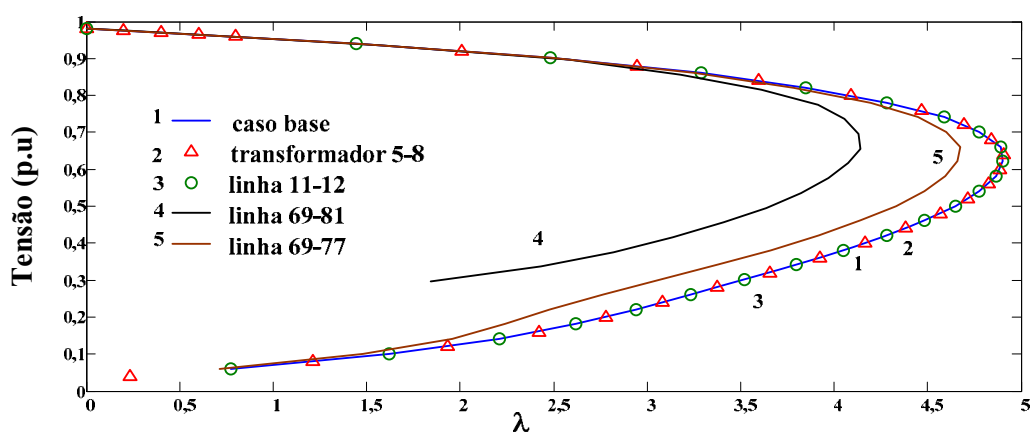
Figura 63- Curvas V- λ da barra 95: com o controle de intercâmbio entre áreas para os dois casos.



5.4.2.1 Cenário 2: Avaliando as Contingências.

Observe da figura. 64 que as contingências realizadas nas linhas de intercâmbio acarretam mais diminuição da capacidade de transferência de potência ativa do caso base, dependendo da linha é escolhida, a contingência mais severa esta representado na linha de intercambio 68-.81

Figura 64- Ccontingência no linhas do sistema.



CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES GERAIS E CONTINUIDADE DO TRABALHO

6.1 Conclusão Geral

Neste trabalho foram apresentados os efeitos da inclusão do controle de intercâmbio entre áreas sobre a capacidade de transferência de potência ativa. Mostrou-se que há a necessidade de se considerar as restrições de intercâmbio para se verificar qual é a máxima transferência de potência possível de se realizar, sem que ocorram violações dos níveis de segurança do sistema.

Deve se ressaltar que a implementação do método proposto dá uma maior flexibilidade ao método da continuação, já que considera cada área como um sistema independente regulando seu intercâmbio no processo de carregamento do sistema, onde são consideradas múltiplas barras de folga numa mesma área. Observa-se que o método também possibilita a consideração dos limites de potência para as barras de folga. O método permite o traçado completo de curvas P-V levando em conta o controle do intercâmbio e assim, possibilita ao engenheiro acompanhar as evoluções das tensões e fluxos durante o todo o processo de transferência.

Pode se verificar uma maior redução da capacidade de transferência de potência ativa com carregamento das cargas com fator de potência constante em relação ao carregamento de potência ativa das cargas, ou seja, que o aumento concomitante de potência reativa representa uma restrição considerável no sistema. Observou-se que em geral há uma redução da capacidade de transferência de potência ativa. Os resultados também mostram que a transferência de potência é dependente da forma de carregar o sistema, dos diferentes cenários em estudo, e das contingências. Observou-se que as contingências mais severas em geral são as das linhas de intercâmbio e das linhas de transmissão que estão na trajetória de transferência do fluxo de potência.

6.2 Continuidade do Trabalho

- Investigar novas técnicas de parametrização para tornar ao programa mais competitivo em termos de tempo computação e que permitam o traçado completo da curva P-V sem as dificuldades relacionadas com a singularidade da matriz Jacobiana .
- Investigar a aplicação da análise modal com a inclusão das equações do CIA.
- Implementar e investigar os efeitos de outros tipos de controle de tensão tais como o SVC (*Static Var Compensator*).
- Modelar as cargas dependentes da tensão de uma maneira mais geral e não só como potência constante.
- Investigar com o método proposto e a análise modal os melhores locais para a compensação de pós e pré-contingência do sistema elétrico de potência de forma a aumentar a máxima transferência de potência.
- Estudar de forma mais detalhada o fluxo de circulação com as restrições de CIA.
- Desenvolver a versão do método de Newton desacoplado com o CIA.

REFERÊNCIAS

- AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 1, p. 416-423, 1992.
- ALVES, D. A. et al. Análise e resultados de simulação da implementação do fluxo de carga ótimo na malha terciária do controle automático de geração. In: ENCONTRO REGIONAL LATINO - AMERICANO DE CIGRE, 9, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: [s.n.], 2001. p. 1-8.
- AMORIM, E. D. **Aplicação da análise modal estática no estudo de estabilidade de tensão**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2011.
- ANDERSON, P. M.; FOUAD, A. A. **Power systems control and stability**. [S.l.]: IEEE, [s.n], 1994.
- AVILA, H. C.; ALVES, D. A. Inclusão do controle de intercâmbio entre áreas no fluxo de carga continuado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., 2012, Goiania. **Simpósio...** Goiania: [s.n.], 2012. p. 1-6.
- BONINI, N. A. **Técnicas de parametrização geométrica para o método da continuação**. 2011. 128 f. Thesis (Doutor em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2011.
- CAÑIZARES, C. A. et al. Point of collapse methods applied to AC/DC power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 2, p. 673-683, 1992.
- CASTRO, C. A. **Cálculo de fluxo de carga**. Campinas: FEEC/UNICAMP, [2009?]. Apostila do curso de cálculo de fluxo de carga. Disponível em: <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro>>. Acesso em: 15 jul. 2011.
- CASTRO, M. R. **Modelagem do controle de tensão por geradores e de múltiplas barras swing na avaliação das condições de estabilidade de tensão**. 2007. 124 f. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica- PUC, Rio de Janeiro, 2007.
- CHIANG, H. D. et al. A practical tool for tracing power system steady state stationary behavior due to load and generation variations. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 10, n. 2, p. 623-624, 1995.

CHOWDHURY, B. H.; BARAVC, S. Creating cascading failure scenarios in interconnected power systems. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, Montreal, p. 1-8, 2006.

SANTOS, M. J. dos et al. Uma nova proposta para o controle de intercâmbio entre áreas. **Revista Controle & Automação- SBA**, Campinas, v. 15, n. 4, p. 449-458, 2004.

FUERTE-ESQUIVEL, C.; ACHA, E. A Newton-type algorithm for the control of power flow in electric power networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 4, p. 1474-1480, November 1997.

GAO, B. **Voltage stability analysis of large power systems**. 1992. 149 f. Thesis (Doctor of Philosophy Department of Electrical Engineering)- Department of Electrical Engineering, University of Toronto, Canada, 1992.

HENRIQUES, R. M. et al. Desenvolvimento de uma ferramenta automática para a determinação da máxima transferência de potência entre áreas/regiões em regime permanente. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- SNPTEE, 21., 2011, Florianópolis. **Seminário...** Florianópolis: [s.n.], 2011. v. 1, p. 1-10.

HENRIQUES, R. M. et al. O programa ANAREDE - novas funcionalidades de análise de redes para modo de estudo em centros de controle. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- SNPTEE, 21., 2011, Florianópolis. **Seminário...** Florianópolis: [s.n.], 2011. v. 1, p. 1-9.

IBSAIS, A.; AJJARAPU, V. Voltage stability - limited interchange flow. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 38, n. 2, p. 91-95, 1996.

KAZEMI, A.; JADID, S.; ANDAMI, H. Introducing a new method for multiarea transmission networks loss allocation. **Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering**, Tehran, v. 3, n. 1, p. 21-30, 2007.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1993. 1176 p.

LO, K. L.; ZHANG, X. Dispatching outputs of generators for enhancing the power margins from the viewpoint of voltage stability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT-APSCOM, 2., 1993, Hong Kong. **Conference...** Hong Kong: [s.n.], 1993. v. 1, p. 60-65.

MODELO proposto para análise de barras de controle local de tensão. Rio de Janeiro: PUC, [200-]. 36 p. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/11320/11320_5.PDF>. Acesso em: 15 abr. 2011.

MODELO proposto para o tratamento de múltiplas barras swing. Rio de Janeiro: PUC, [200-]. 17 p. Disponível em: <http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/11320/11320_6.PDF>. Acesso em: 20 set. 2011.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 162 p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Diretrizes e critérios para estudos elétricos, procedimento de rede**: submódulo 23.3. Rio de Janeiro: [s.n], 2001. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 12 fev. 2012.

PATÉL, M.; GIRGIS, A. A. Review of available transmission capability (ATC) calculation methods. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE - PSC, 9., 2009, Clemson. **Annual..** Clemson: [s.n], 2009. p. 1-9.

SANTANNA, E. G. et al. Proposição de uma metodologia de avaliação dos limites de intercâmbio em sistemas de grande porte: desafios para automação. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 1-10, Mar. e Abr., 2011.

SEYDEL, R. **From equilibrium to chaos**: practical bifurcation and stability analysis. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1994. 407 p.

SHIN, J. R. et al. Improvement of precise P/V curve considering effects of voltage-dependent load models and transmission losses for voltage stability analysis. **IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution**, v. 149, n. 4, p. 384-388, July 2002.

STAGG, G. W.; EL-ABIAD, A. H. **Computer methods in power system analysis**. McGraw-Hill: International Student Edition, 1968. 427 p.

TAYLOR, C. W. **Power system voltage stability**. New York: McGraw-Hill, 1994. 273 p.

UNIVERSIDADE DE WASHINGTON ELECTRICAL ENGINEERING. **Power systems test case archive**. [S.l.: s.n., 2010?] Disponível em: <www.ee.washington.edu/research/pstca/>. Acesso em: 1 mar. 2012.

WESTERN SYSTEMS COORDINATING COUNCIL - WSCC. **Final Report, voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology**: reactive power reserve work group. [S.l.: s.n.], 1998. 154 p.

Apêndice A

A1. Fluxo de Potencia em Coordenadas Polares Utilizando o Método de Newton-Raphson

Têm-se um sistema n-dimensional de equações não lineares $g(x)$, onde o ponto central do método de Newton-Raphson consiste em determinar o vetor correção Δx que garante a solução do sistema $g(x^v)=0$, é dado através da equação:

$$g(x^v) = -J(x^v)\Delta x^v \quad (\text{A.1})$$

Sendo a matriz Jacobiana J representada por:

$$J(x^v) = \frac{\partial}{\partial x} g(x^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \frac{\partial g_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Considerar os seguintes tipos de barras para o fluxo de potência:

barra de carga (PQ) são conhecida as potências ativa e reativa consumida. Calculam-se magnitude e ângulo de fase da tensão.

barra de geração (PV) são conhecidas a potências ativa gerada e magnitude da tensão terminal da barra. Calculam-se potência reativa consumida e ângulo de fase da tensão.

barra de referência (V θ) são conhecidos as magnitude e o ângulo de fase da tensão. Calculam-se potência ativa e reativa.

barra de folga (V) é conhecida a magnitude da tensão. Calculam-se potência ativa gerada, potência reativa e ângulo de fase da tensão.

O método de Newton-Raphson para o problema de fluxo de potência tem as seguintes equações:

$$g(x^v) = \begin{bmatrix} \Delta P^v \\ \Delta Q^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{\text{esp}} - P^{\text{calc}} \\ Q^{\text{esp}} - Q^{\text{calc}} \end{bmatrix}^v \begin{matrix} \rightarrow npq + npv \\ \rightarrow npq \end{matrix} \quad (\text{A.3})$$

Onde npq é número de barras tipo PQ e npv é número de barras tipo PV

$$\Delta x^v = \begin{bmatrix} \Delta\theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow npq + npv \\ \rightarrow npq \end{matrix} \quad (A.4)$$

A matriz Jacobiana é dada por:

$$J(x^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial\theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial\theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{bmatrix}^v \begin{matrix} \rightarrow npq + npv \\ \rightarrow npq \end{matrix} \quad (A.5)$$

Já que os valores especificados da potência ativa e reativa são constantes, os resíduos das potências da matriz Jacobiana ficam como:

$$J(x^v) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial(P)}{\partial\theta} & \frac{\partial(P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(Q)}{\partial\theta} & \frac{\partial(Q)}{\partial V} \end{bmatrix}^v \begin{matrix} \rightarrow npq + npv \\ \rightarrow npq \end{matrix} \quad (A.6)$$

As submatrizes que compõem a matriz Jacobiana são representadas por:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\partial P}{\partial\theta} & N &= \frac{\partial P}{\partial V} \\ M &= \frac{\partial Q}{\partial\theta} & L &= \frac{\partial Q}{\partial V} \end{aligned} \quad (A.7)$$

Finalmente, a equação (A.8), representa o sistema de equações a ser resolvido a cada iteração no problema geral de fluxo de potência:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^v \\ \Delta Q^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^v \begin{bmatrix} \Delta\theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} \quad (A.8)$$

H, N, M e L são as submatrizes de matriz Jacobiana.

As submatrizes são calculadas com as seguintes equações:

$$\begin{aligned}
H_{kk} &= \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -B_{kk} V_k^2 - Q_k \\
H_{km} &= \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \\
N_{kk} &= \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (G_{kk} V_k^2 + P_k) \\
N_{km} &= \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\
M_{kk} &= \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -G_{kk} V_k^2 - P_k \\
M_{km} &= \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \\
L_{kk} &= \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (-B_{kk} V_k^2 + Q_k) \\
L_{km} &= \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km})
\end{aligned} \tag{A.9}$$

Após a resolução do sistema de equações na iteração h , os ângulos e módulos das tensões nodais são atualizados, respectivamente, através da equação (A.10):

$$\begin{aligned}
\theta^{(h+1)} &= \theta^{(h)} + \Delta \theta^{(h)} \\
V^{(h+1)} &= V^{(h)} + \Delta V^{(h)}
\end{aligned} \tag{A.10}$$

Apêndice B

B1. Dados dos sistemas testados

A tabela 18 e 19 mostram os dados de barra e linha desde sistema do IEEE de 9 barras (ANDERSON; FOUAD, 1994).

Tabela 18- Dados de barra do sistema de 9 barras.

N°	Tipo	Carga		Geração		Gsh (Mvar)	Bsh	Área (p.u.)	Tensão (rad)	Ângulo (Mvar)	Qmax (Mvar)	Qmin
		P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)	P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)							
1	1	0,0	0,0	71,64	0,0	0,0	0,0	1,0	1,04	0,0	999,0	-999,0
2	2	0,0	0,0	162,99	0,0	0,0	0,0	2,0	1,025	0,0	50,0	-40,0
3	2	0,0	0,0	85,12	0,0	0,0	0,0	2,0	1,025	0,0	50,0	-40,0
4	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	999,0	-999,0
5	3	125,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	999,0	-999,0
6	3	90,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	999,0	-999,0
7	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	999,0	-999,0
8	3	100,0	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	999,0	-999,0
9	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	999,0	-999,0

Tabela 19- Dados de linha do sistema de 9 barras

De	Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Shunt (p.u.)	Tap (p.u.)
1	4	0,0	0,0576	0,0	1,0
4	5	0,01	0,085	0,176	1,0
6	4	0,017	0,092	0,158	1,0
5	7	0,032	0,161	0,306	1,0
6	9	0,039	0,17	0,358	1,0
2	7	0,0	0,0625	0,0	1,0
7	8	0,0085	0,0722	0,149	1,0
8	9	0,0119	0,101	0,209	1,0
3	9	0,0	0,0584	0,0	1,0

A tabela 20 e 21 mostram os dados de barra e linha desde sistema de 11 barras (SANTOS et al., 2004).

Tabela 20- Dados de barra do sistema de 11 barras.

N°	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (rad)	Geração		Carga		Área
				P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)	P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)	
1	3	1	0	0	0	3	1	1
2	3	1	0	0	0	15	-8	2
3	3	1	0	0	0	25	1	1
4	2	1	0	14	0	10	0	1
5	3	1	0	0	0	10	-9	2
6	1	1	0	0	0	25	0	2
7	3	1	0	0	0	3	1	3
8	3	1	0	0	0	15	5	3
9	3	1	0	0	0	3	1	3
10	2	1	0	8	0	2	0	3
11	3	1	0	0	0	3	1	3

Tabela 21- Dados de linha do sistema de 11 barras

De	Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Shunt (p.u.)	Tap (p.u.)
6	2	0,99	0,5	0,0	1,0
6	3	0,1	0,5	0,0	1,0
3	5	0,1	0,5	0,0	1,0
3	4	0,1	0,5	0,0	1,0
1	3	0,1	0,5	0,0	1,0
1	4	0,1	0,5	0,0	1,0
2	5	0,1	0,5	0,0	1,0
11	5	0,99	0,5	0,0	1,0
11	3	0,1	0,5	0,0	1,0
9	11	0,1	0,5	0,0	1,0
9	10	0,1	0,5	0,0	1,0
7	9	0,1	0,5	0,0	1,0
7	10	0,1	0,5	0,0	1,0
8	10	0,1	0,5	0,0	1,0

A tabela 22 e 23 mostram os dados de barra e linha desde sistema New England de 30 barras (GAO, 1992).

Tabela 22- Dados de barra do sistema de 30 barras.

N°	Tipo	Carga		Geração		Gsh	Bsh	Área (p.u)	Tensão (rad)	Ângulo (Mvar)	Qmax (Mvar)	Qmin
		P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)	P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)							
1	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
2	2	0,0	0,0	250,0	90,2	0,0	0,0	1,0	1,049	0,0	180,0	0,0
3	3	322,0	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
4	3	500,0	84,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
5	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
6	2	9,2	4,6	573,7	9,5	0,0	0,0	1,0	1,018	0,0	300,0	-300,0
7	3	233,8	84,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
8	3	522,0	76,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
9	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
10	2	0,0	0,0	650,0	-12,8	0,0	0,0	1,0	1,018	0,0	300,0	-300,0
11	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
12	3	8,5	88,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
13	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
14	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
15	3	320,0	153,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
16	3	329,4	32,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
17	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
18	3	158,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
19	2	0,0	0,0	629,1	47,0	0,0	0,0	2,0	1,051	0,0	300,0	-300,0
20	2	680,0	103,0	505,6	110,3	0,0	0,0	2,0	0,991	0,0	250,0	-250,0
21	3	274,0	115,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
22	2	0,0	0,0	650,0	143,6	0,0	0,0	2,0	1,051	0,0	400,0	-250,0
23	2	247,5	84,6	558,7	18,0	0,0	0,0	2,0	1,046	0,0	350,0	-250,0
24	3	308,6	-92,2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
25	2	224,0	47,2	538,3	-62,0	0,0	0,0	1,0	1,058	0,0	300,0	-220,0
26	3	139,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
27	3	281,0	75,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
28	3	206,0	27,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
29	2	283,5	26,9	824,9	-81,7	0,0	0,0	2,0	1,051	0,0	9999,0	-9999,0
30	1	1104,0	250,0	998,7	58,5	0,0	0,0	1,0	1,03	0,0	9999,0	-9999,0

Tabela 23- Dados de linha do sistema de 30 barras

De	Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Shunt (p.u.)	Tap (p.u.)	Ângulo (rad)	Tap/min (p.u.)	Tap/max (p.u.)
1	2	0,0035	0,0411	0,6987	1,0	0,0	1,0	1,0
1	30	0,001	0,025	0,75	1,0	0,0	1,0	1,0
2	3	0,0013	0,015	0,2572	1,0	0,0	1,0	1,0
2	25	0,007	0,0086	0,146	1,0	0,0	1,0	1,0
3	4	0,0013	0,0213	0,2214	1,0	0,0	1,0	1,0
3	18	0,0011	0,0133	0,2138	1,0	0,0	1,0	1,0
4	5	0,0008	0,0128	0,1342	1,0	0,0	1,0	1,0
4	14	0,0008	0,0129	0,1382	1,0	0,0	1,0	1,0
5	6	0,0002	0,0026	0,0434	1,0	0,0	1,0	1,0
5	8	0,0008	0,0112	0,1476	1,0	0,0	1,0	1,0
6	7	0,0006	0,0092	0,113	1,0	0,0	1,0	1,0
6	11	0,0007	0,0082	0,1389	1,0	0,0	1,0	1,0
7	8	0,0004	0,0046	0,0078	1,0	0,0	1,0	1,0
8	9	0,0023	0,0363	0,3804	1,0	0,0	1,0	1,0
9	30	0,001	0,025	1,2	1,0	0,0	1,0	1,0
10	11	0,0004	0,0043	0,0729	1,0	0,0	1,0	1,0
10	13	0,0004	0,0043	0,0729	1,0	0,0	1,0	1,0
12	11	0,0016	0,0435	0,0	1,006	0,0	0,95	1,05
12	13	0,0016	0,0435	0,0	1,006	0,0	0,95	1,05
13	14	0,0009	0,0101	0,1723	1,0	0,0	1,0	1,0
14	15	0,0018	0,0217	0,366	1,0	0,0	1,0	1,0
15	16	0,0009	0,0094	0,171	1,0	0,0	1,0	1,0
16	17	0,0007	0,0089	0,1342	1,0	0,0	1,0	1,0
16	19	0,0016	0,0195	0,304	1,0	0,0	1,0	1,0
16	21	0,0008	0,0135	0,2548	1,0	0,0	1,0	1,0
16	24	0,0003	0,0059	0,068	1,0	0,0	1,0	1,0
18	17	0,0007	0,0082	0,1319	1,0	0,0	1,0	1,0
17	27	0,0013	0,0173	0,3216	1,0	0,0	1,0	1,0
19	20	0,0007	0,0138	0,0	1,06	0,0	0,95	1,05
21	22	0,0008	0,014	0,2565	1,0	0,0	1,0	1,0
22	23	0,0006	0,0096	0,1846	1,0	0,0	1,0	1,0
23	24	0,0022	0,035	0,361	1,0	0,0	1,0	1,0
25	26	0,0032	0,0323	0,513	1,0	0,0	1,0	1,0
26	27	0,0014	0,0147	0,2396	1,0	0,0	1,0	1,0
26	28	0,0043	0,0474	0,7802	1,0	0,0	1,0	1,0
26	29	0,0057	0,0625	1,029	1,0	0,0	1,0	1,0
28	29	0,0014	0,0151	0,249	1,0	0,0	1,0	1,0

A tabela 24 e 25 mostram os dados de barra e linha desde sistema IEEE-118 barras (UNIVERSIDADE DE WASHINGTON, 2010).

Tabela 24- Dados de barra do sistema de 118 barras.

N°	Tipo	Carga		Geração		Gsh (Mvar)	Bsh	Área (p.u.)	Tensão (rad)	Ângulo (Mvar)	Qmax (Mvar)	Qmin
		P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)	P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)							
1	2	51,0	27,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,955	0,0	15,0	-5,0
2	3	20,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
3	3	39,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
4	2	39,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,998	0,0	300,0	-300,0
5	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-40,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
6	2	52,0	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,099	0,0	50,0	-13,0
7	3	19,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
8	2	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,015	0,0	300,0	-300,0
9	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
10	2	0,0	0,0	450,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,05	0,0	200,0	-147,0
11	3	70,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
12	2	47,0	10,0	85,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,99	0,0	120,0	-35,0
13	3	34,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
14	3	14,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
15	2	90,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,97	0,0	30,0	-10,0
16	3	25,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
17	6	11,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
18	2	60,0	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,973	0,0	50,0	-16,0
19	2	45,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,962	0,0	24,0	-8,0
20	3	18,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
21	3	14,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
22	3	10,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
23	3	7,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
24	2	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,992	0,0	300,0	-300,0
25	2	0,0	0,0	220,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,05	0,0	140,0	-47,0
26	2	0,0	0,0	314,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,015	0,0	1000,0	-1000,0
27	2	71,0	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,967	0,0	300,0	-300,0
28	3	17,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
29	3	24,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
30	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
31	2	43,0	27,0	7,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,967	0,0	300,0	-300,0
32	2	59,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,963	0,0	42,0	-14,0
33	3	23,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
34	2	59,0	26,0	0,0	0,0	0,0	13,0	2,0	0,984	0,0	24,0	-8,0
35	3	33,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
36	2	31,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,98	0,0	24,0	-8,0
37	6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-25,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
38	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
39	3	27,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
40	2	66,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,97	0,0	300,0	-300,0
41	3	37,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
42	2	96,0	23,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,985	0,0	300,0	-300,0
43	3	18,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
44	3	16,0	8,0	0,0	0,0	0,0	10,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
45	3	53,0	22,0	0,0	0,0	0,0	10,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
46	2	28,0	10,0	19,0	0,0	0,0	10,0	2,0	1,005	0,0	100,0	-100,0
47	3	34,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
48	3	20,0	11,0	0,0	0,0	0,0	15,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
49	2	87,0	30,0	204,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,025	0,0	210,0	-85,0
50	3	17,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
51	3	17,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
52	3	18,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
53	3	23,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
54	2	113,0	32,0	48,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,995	0,0	300,0	-300,0
55	2	63,0	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,952	0,0	23,0	-8,0
56	2	84,0	18,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,954	0,0	15,0	-8,0
57	3	12,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
58	3	12,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
59	2	277,0	113,0	155,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,985	0,0	180,0	-60,0
60	3	78,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
61	2	0,0	0,0	160,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,995	0,0	300,0	-100,0
62	2	77,0	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,998	0,0	20,0	-20,0
63	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
64	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0

N°	Tipo	Carga		Geração		Gsh	Bsh	Área	Tensão	Ângulo	Qmax	Qmin
		P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)	P. Ativa (MW)	P. Reativa (Mvar)							
65	2	0,0	0,0	391,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,005	0,0	200,0	-67,0
66	2	39,0	18,0	392,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,05	0,0	200,0	-67,0
67	3	28,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
68	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0
69	1	0,0	0,0	516,4	0,0	0,0	0,0	2,0	1,035	0,0	300,0	-300,0
70	2	66,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,984	0,0	32,0	-10,0
71	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
72	2	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,98	0,0	100,0	-100,0
73	2	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,991	0,0	100,0	-100,0
74	2	68,0	27,0	0,0	0,0	0,0	12,0	3,0	0,958	0,0	9,0	-6,0
75	3	47,0	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
76	2	68,0	36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,943	0,0	23,0	-8,0
77	2	61,0	28,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,006	0,0	70,0	-20,0
78	3	71,0	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
79	3	39,0	32,0	0,0	0,0	0,0	20,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
80	2	130,0	26,0	477,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,04	0,0	280,0	-165,0
81	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
82	3	54,0	27,0	0,0	0,0	0,0	20,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
83	3	20,0	10,0	0,0	0,0	0,0	10,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
84	3	11,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
85	2	24,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,985	0,0	23,0	-8,0
86	3	21,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
87	2	0,0	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,015	0,0	1000,0	-100,0
88	3	48,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
89	2	0,0	0,0	607,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,005	0,0	300,0	-210,0
90	2	163,0	42,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,985	0,0	300,0	-300,0
91	2	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,98	0,0	100,0	-100,0
92	2	65,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,99	0,0	9,0	-3,0
93	3	12,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
94	3	30,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
95	3	42,0	31,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
96	3	38,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
97	3	15,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
98	3	34,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
99	2	42,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,01	0,0	100,0	-100,0
100	2	37,0	18,0	252,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,017	0,0	155,0	-50,0
101	3	22,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
102	3	5,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
103	2	23,0	16,0	40,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,01	0,0	40,0	-15,0
104	2	38,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,971	0,0	23,0	-8,0
105	2	31,0	26,0	0,0	0,0	0,0	20,0	3,0	0,965	0,0	23,0	-8,0
106	3	43,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
107	2	50,0	12,0	0,0	0,0	0,0	6,0	3,0	0,952	0,0	200,0	-200,0
108	3	2,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
109	3	8,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0
110	2	39,0	30,0	0,0	0,0	0,0	6,0	3,0	0,973	0,0	23,0	-8,0
111	2	0,0	0,0	36,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,98	0,0	1000,0	-100,0
112	2	68,0	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,975	0,0	1000,0	-100,0
113	2	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,993	0,0	200,0	-100,0
114	3	8,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
115	3	22,0	7,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
116	2	184,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	1,005	0,0	1000,0	-1000,0
117	3	20,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
118	3	33,0	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	1,0	0,0	0,0	0,0

Tabela 25- Dados de linha do sistema IEEE-118 barras

De	Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Shunt (p.u.)	Tap (p.u.)	Ângulo (rad)	Tap/min (p.u.)	Tap/max (p.u.)
1	2	0,0303	0,0999	0,0254	1,0	0,0	1,0	1,0
1	3	0,0129	0,0424	0,01082	1,0	0,0	1,0	1,0
4	5	0,00176	0,00798	0,0021	1,0	0,0	1,0	1,0
3	5	0,0241	0,108	0,0284	1,0	0,0	1,0	1,0
5	6	0,0119	0,054	0,01426	1,0	0,0	1,0	1,0
6	7	0,00459	0,0208	0,0055	1,0	0,0	1,0	1,0
8	9	0,00244	0,0305	1,162	1,0	0,0	1,0	1,0
8	5	0,0	0,0267	0,0	0,97	0,0	0,95	1,05
9	10	0,00258	0,0322	1,23	1,0	0,0	1,0	1,0
4	11	0,0209	0,0688	0,01748	1,0	0,0	1,0	1,0
5	11	0,0203	0,0682	0,01738	1,0	0,0	1,0	1,0
11	12	0,00595	0,0196	0,00502	1,0	0,0	1,0	1,0
2	12	0,0187	0,0616	0,01572	1,0	0,0	1,0	1,0
3	12	0,0484	0,16	0,0406	1,0	0,0	1,0	1,0
7	12	0,00862	0,034	0,00874	1,0	0,0	1,0	1,0
11	13	0,02225	0,0731	0,01876	1,0	0,0	1,0	1,0
12	14	0,0215	0,0707	0,01816	1,0	0,0	1,0	1,0
13	15	0,0744	0,2444	0,06268	1,0	0,0	1,0	1,0
14	15	0,0595	0,195	0,0502	1,0	0,0	1,0	1,0
12	16	0,0212	0,0834	0,0214	1,0	0,0	1,0	1,0
15	17	0,0132	0,0437	0,0444	1,0	0,0	1,0	1,0
16	17	0,0454	0,1801	0,0466	1,0	0,0	1,0	1,0
17	18	0,0123	0,0505	0,01298	1,0	0,0	1,0	1,0
18	19	0,01119	0,0493	0,01142	1,0	0,0	1,0	1,0
19	20	0,0252	0,117	0,0298	1,0	0,0	1,0	1,0
15	19	0,012	0,0394	0,0101	1,0	0,0	1,0	1,0
20	21	0,0183	0,0849	0,0216	1,0	0,0	1,0	1,0
21	22	0,0209	0,097	0,0246	1,0	0,0	1,0	1,0
22	23	0,0342	0,159	0,0404	1,0	0,0	1,0	1,0
23	24	0,0135	0,0492	0,0498	1,0	0,0	1,0	1,0
23	25	0,0156	0,08	0,0864	1,0	0,0	1,0	1,0
26	25	0,0	0,0382	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
25	27	0,0318	0,163	0,1764	1,0	0,0	1,0	1,0
27	28	0,01913	0,0855	0,0216	1,0	0,0	1,0	1,0
28	29	0,0237	0,0943	0,0238	1,0	0,0	1,0	1,0
30	17	0,0	0,0388	0,0	0,97	0,0	0,95	1,05
8	30	0,00431	0,0504	0,514	1,0	0,0	1,0	1,0
26	30	0,00799	0,086	0,918	1,0	0,0	1,0	1,0
17	31	0,0474	0,1563	0,0399	1,0	0,0	1,0	1,0
29	31	0,0108	0,0331	0,0083	1,0	0,0	1,0	1,0
23	32	0,0317	0,1153	0,1173	1,0	0,0	1,0	1,0
31	32	0,0298	0,0985	0,0251	1,0	0,0	1,0	1,0
27	32	0,0229	0,0755	0,01926	1,0	0,0	1,0	1,0
15	33	0,038	0,1244	0,03194	1,0	0,0	1,0	1,0
19	34	0,0752	0,247	0,0632	1,0	0,0	1,0	1,0
35	36	0,00224	0,0102	0,00268	1,0	0,0	1,0	1,0
35	37	0,011	0,0497	0,01318	1,0	0,0	1,0	1,0
33	37	0,0415	0,142	0,0366	1,0	0,0	1,0	1,0
34	36	0,00871	0,0268	0,00568	1,0	0,0	1,0	1,0
34	37	0,00256	0,0094	0,00984	1,0	0,0	1,0	1,0
38	37	0,0	0,0375	0,0	0,97	0,0	0,95	1,05
37	39	0,0321	0,106	0,027	1,0	0,0	1,0	1,0
37	40	0,0593	0,168	0,042	1,0	0,0	1,0	1,0
30	38	0,00464	0,054	0,422	1,0	0,0	1,0	1,0
39	40	0,0184	0,0605	0,01552	1,0	0,0	1,0	1,0
40	41	0,0145	0,0487	0,01222	1,0	0,0	1,0	1,0
40	42	0,0555	0,183	0,0466	1,0	0,0	1,0	1,0
41	42	0,041	0,135	0,0344	1,0	0,0	1,0	1,0
43	44	0,0608	0,2454	0,06068	1,0	0,0	1,0	1,0
34	43	0,413	0,1681	0,04226	1,0	0,0	1,0	1,0
44	45	0,224	0,0901	0,0224	1,0	0,0	1,0	1,0
45	46	0,04	0,1356	0,0332	1,0	0,0	1,0	1,0
46	47	0,038	0,127	0,0316	1,0	0,0	1,0	1,0
46	48	0,0601	0,189	0,0472	1,0	0,0	1,0	1,0
47	49	0,0191	0,0625	0,01604	1,0	0,0	1,0	1,0

De	Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Shunt (p.u.)	Tap (p.u.)	Ângulo (rad)	Tap/min (p.u.)	Tap/max (p.u.)
42	49	0,03575	0,1615	0,172	1,0	0,0	1,0	1,0
45	49	0,0684	0,186	0,0444	1,0	0,0	1,0	1,0
48	49	0,0179	0,0505	0,01258	1,0	0,0	1,0	1,0
49	50	0,0267	0,0752	0,01874	1,0	0,0	1,0	1,0
49	51	0,0486	0,137	0,0342	1,0	0,0	1,0	1,0
51	52	0,0203	0,0588	0,01396	1,0	0,0	1,0	1,0
52	53	0,0405	0,1635	0,04058	1,0	0,0	1,0	1,0
53	54	0,0263	0,122	0,031	1,0	0,0	1,0	1,0
49	54	0,0399	0,145	0,1468	1,0	0,0	1,0	1,0
54	55	0,0169	0,0707	0,0202	1,0	0,0	1,0	1,0
54	56	0,00275	0,00955	0,00732	1,0	0,0	1,0	1,0
55	56	0,00488	0,0151	0,00374	1,0	0,0	1,0	1,0
56	57	0,0343	0,0966	0,0242	1,0	0,0	1,0	1,0
50	57	0,0474	0,134	0,0332	1,0	0,0	1,0	1,0
56	58	0,0343	0,0966	0,0242	1,0	0,0	1,0	1,0
51	58	0,0255	0,0719	0,01788	1,0	0,0	1,0	1,0
54	59	0,0503	0,2293	0,0598	1,0	0,0	1,0	1,0
56	59	0,0407	0,1224	0,1105	1,0	0,0	1,0	1,0
55	59	0,04739	0,2158	0,05646	1,0	0,0	1,0	1,0
59	60	0,0317	0,145	0,0376	1,0	0,0	1,0	1,0
59	61	0,0328	0,15	0,0388	1,0	0,0	1,0	1,0
60	61	0,00264	0,0135	0,01456	1,0	0,0	1,0	1,0
60	62	0,0123	0,0561	0,01468	1,0	0,0	1,0	1,0
61	62	0,00824	0,0376	0,0098	1,0	0,0	1,0	1,0
63	59	0,0	0,0386	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
63	64	0,00172	0,02	0,216	1,0	0,0	1,0	1,0
64	61	0,0	0,0268	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
38	65	0,00901	0,0986	1,046	1,0	0,0	1,0	1,0
64	65	0,00269	0,0302	0,38	1,0	0,0	1,0	1,0
49	66	0,09	0,04595	0,0496	1,0	0,0	1,0	1,0
62	66	0,0482	0,218	0,0578	1,0	0,0	1,0	1,0
62	67	0,0258	0,117	0,031	1,0	0,0	1,0	1,0
65	66	0,0	0,037	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
66	67	0,0224	0,1015	0,02682	1,0	0,0	1,0	1,0
65	68	0,00138	0,016	0,638	1,0	0,0	1,0	1,0
47	69	0,0844	0,2778	0,07092	1,0	0,0	1,0	1,0
49	69	0,0985	0,0324	0,0828	1,0	0,0	1,0	1,0
69	68	0,0	0,037	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
69	70	0,03	0,127	0,122	1,0	0,0	1,0	1,0
24	70	0,00221	0,4115	0,10198	1,0	0,0	1,0	1,0
70	71	0,00882	0,0355	0,00878	1,0	0,0	1,0	1,0
24	72	0,0488	0,196	0,0488	1,0	0,0	1,0	1,0
71	72	0,0446	0,18	0,04444	1,0	0,0	1,0	1,0
71	73	0,00866	0,0454	0,01178	1,0	0,0	1,0	1,0
70	74	0,0401	0,1323	0,03368	1,0	0,0	1,0	1,0
70	75	0,0428	0,141	0,036	1,0	0,0	1,0	1,0
69	75	0,0405	0,122	0,124	1,0	0,0	1,0	1,0
74	75	0,0123	0,0406	0,01034	1,0	0,0	1,0	1,0
76	77	0,0444	0,148	0,0368	1,0	0,0	1,0	1,0
69	77	0,0309	0,101	0,1038	1,0	0,0	1,0	1,0
75	77	0,0601	0,1999	0,04978	1,0	0,0	1,0	1,0
77	78	0,00376	0,0124	0,01264	1,0	0,0	1,0	1,0
78	79	0,00546	0,0244	0,00648	1,0	0,0	1,0	1,0
77	80	0,0109	0,0332	0,07	1,0	0,0	1,0	1,0
79	80	0,0156	0,0704	0,0187	1,0	0,0	1,0	1,0
68	81	0,00175	0,0202	0,808	1,0	0,0	1,0	1,0
81	80	0,0	0,037	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
77	82	0,0298	0,0853	0,08174	1,0	0,0	1,0	1,0
82	83	0,0112	0,03665	0,03796	1,0	0,0	1,0	1,0
83	84	0,0625	0,132	0,0258	1,0	0,0	1,0	1,0
83	85	0,043	0,148	0,0348	1,0	0,0	1,0	1,0
84	85	0,0302	0,0641	0,01234	1,0	0,0	1,0	1,0
85	86	0,035	0,123	0,0276	1,0	0,0	1,0	1,0
86	87	0,02828	0,2074	0,0445	1,0	0,0	1,0	1,0
85	88	0,02	0,102	0,0276	1,0	0,0	1,0	1,0

De	Para	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Shunt (p.u.)	Tap (p.u.)	Ângulo (rad)	Tap/min (p.u.)	Tap/max (p.u.)
85	89	0,0239	0,173	0,407	1,0	0,0	1,0	1,0
88	89	0,0139	0,0712	0,01934	1,0	0,0	1,0	1,0
89	90	0,0164	0,0652	0,01588	1,0	0,0	1,0	1,0
90	91	0,0254	0,0836	0,0214	1,0	0,0	1,0	1,0
89	92	0,008	0,0383	0,0962	1,0	0,0	1,0	1,0
91	92	0,0387	0,1272	0,03268	1,0	0,0	1,0	1,0
92	93	0,0258	0,0848	0,0218	1,0	0,0	1,0	1,0
92	94	0,0481	0,158	0,0406	1,0	0,0	1,0	1,0
93	94	0,0223	0,0732	0,01876	1,0	0,0	1,0	1,0
94	95	0,0132	0,0434	0,0111	1,0	0,0	1,0	1,0
80	96	0,0356	0,182	0,0494	1,0	0,0	1,0	1,0
82	96	0,0162	0,053	0,0544	1,0	0,0	1,0	1,0
94	96	0,0269	0,0869	0,023	1,0	0,0	1,0	1,0
80	97	0,0183	0,0934	0,0254	1,0	0,0	1,0	1,0
80	98	0,0238	0,108	0,0286	1,0	0,0	1,0	1,0
80	99	0,0454	0,206	0,0546	1,0	0,0	1,0	1,0
92	100	0,0648	0,295	0,0772	1,0	0,0	1,0	1,0
94	100	0,0178	0,058	0,0604	1,0	0,0	1,0	1,0
95	96	0,0171	0,0547	0,01474	1,0	0,0	1,0	1,0
96	97	0,0173	0,0885	0,024	1,0	0,0	1,0	1,0
98	100	0,0397	0,179	0,0476	1,0	0,0	1,0	1,0
99	100	0,018	0,0813	0,0216	1,0	0,0	1,0	1,0
100	101	0,0277	0,1262	0,0328	1,0	0,0	1,0	1,0
92	102	0,0123	0,0559	0,01464	1,0	0,0	1,0	1,0
101	102	0,0246	0,112	0,094	1,0	0,0	1,0	1,0
100	103	0,016	0,0525	0,0536	1,0	0,0	1,0	1,0
100	104	0,0451	0,204	0,0541	1,0	0,0	1,0	1,0
103	104	0,0466	0,1584	0,0407	1,0	0,0	1,0	1,0
103	105	0,0535	0,1625	0,0408	1,0	0,0	1,0	1,0
100	106	0,0605	0,229	0,062	1,0	0,0	1,0	1,0
104	105	0,00994	0,0378	0,00986	1,0	0,0	1,0	1,0
105	106	0,014	0,0547	0,01434	1,0	0,0	1,0	1,0
105	107	0,053	0,183	0,0472	1,0	0,0	1,0	1,0
105	108	0,0261	0,0703	0,01844	1,0	0,0	1,0	1,0
106	107	0,053	0,183	0,0472	1,0	0,0	1,0	1,0
108	109	0,0105	0,0288	0,0076	1,0	0,0	1,0	1,0
103	110	0,03906	0,1813	0,0461	1,0	0,0	1,0	1,0
109	110	0,0278	0,0762	0,0202	1,0	0,0	1,0	1,0
110	111	0,022	0,0755	0,02	1,0	0,0	1,0	1,0
110	112	0,0247	0,064	0,062	1,0	0,0	1,0	1,0
17	113	0,00913	0,0301	0,00768	1,0	0,0	1,0	1,0
32	113	0,0615	0,203	0,0518	1,0	0,0	1,0	1,0
32	114	0,0135	0,0612	0,01628	1,0	0,0	1,0	1,0
27	115	0,0164	0,0741	0,01972	1,0	0,0	1,0	1,0
114	115	0,0023	0,0104	0,00276	1,0	0,0	1,0	1,0
68	116	0,00034	0,00405	0,164	1,0	0,0	1,0	1,0
12	117	0,0329	0,14	0,0358	1,0	0,0	1,0	1,0
75	118	0,0145	0,0481	0,01198	1,0	0,0	1,0	1,0

Apêndice C

Este apêndice apresenta as publicações de artigos resultantes de trabalhos desenvolvidos em vínculos científicos até o momento.

A1. Publicações

AVILA, H. C.; ALVES, D. A. Inclusão do Controle de Intercâmbio Entre Áreas no Fluxo de Carga Continuado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4., Goiânia, 2012. **Simpósio...** Goiânia: [s.n.], 2012. p. 1-6.

A2. Artigos Aceitos

AVILA, H. C.; ALVES, D. A. Fluxo de carga continuado considerando controle de intercâmbio entre áreas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA- CBA, Campina Grande. **Congresso...** Campina Grande: [s.n.], 2012. p. 1-8.