



Arthur Massari Filho

**Reforços das condições de estabilidade de
tensão via algoritmos genéticos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro
Março de 2021



Arthur Massari Filho

Reforços das condições de estabilidade de tensão via algoritmos genéticos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Ricardo Bernardo Prada

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dra. Érica Telles Carlos

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Marcos Vinícius Pimentel Teixeira

Instituto Militar de Engenharia – IME

Rio de Janeiro, 30 de Março de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Arthur Massari Filho

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em sistema de potência pela UFF (Niterói, Rio de Janeiro - Brasil) em 2016

Ficha Catalográfica

Massari Filho, Arthur

Reforços das condições de estabilidade de tensão via algoritmos genéticos / Arthur Massari Filho; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2021.

v., 137 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Sistema de Potência – Teses. 3. Fluxo de potência. 4. ações de controle preventivas. 5. colapso de tensão. 6. estabilidade de tensão. 7. margem de potência. 8. esgotamento de recursos. 9. algoritmo genético. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me dado forças para conseguir chegar até aqui.

A minha mãe por sempre estar ao meu lado, me dando todo apoio emocional necessário para que eu pudesse continuar e chegar até aqui.

Ao meu pai, que sempre incentivou os meus estudos e me nunca deixou me faltar nada.

A todos os meus professores da PUC-Rio, e todos os demais professores que já passaram em minha vida, em especial ao meu orientador Ricardo Prada, que sempre apoiaram, zelaram e mostraram o caminho ao qual eu tive que percorrer. Também agradeço a instituição PUC-Rio pela infraestrutura que pode me proporcionar para realizar esse trabalho.

A minha namorada e futura companheira de vida, que sempre me apoiou e deu seu ombro para eu poder descansar.

Aos meus amigos, que em momentos difíceis da minha vida me deram a mão e me ajudaram a levantar. Não os cito nominalmente, pois seria uma injustiça com aqueles que eu poderia me esquecer.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Massari Filho, Arthur; Prada, Ricardo Bernardo. **Reforços das condições de estabilidade de tensão via algoritmos genéticos**. Rio de Janeiro, 2021. 137p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nos sistemas de potência ao redor do mundo, inclusive o brasileiro, são feitas as medições dos níveis de tensão nos barramentos e a corrente nos ramos de transmissão durante algum tipo de contingência em tempo real. A lista de contingências inclui: a perda de qualquer ramo de transmissão, a perda de alguns pares de ramos e, de menor importância, a perda de geração. Nesse momento, também são avaliadas as condições de estabilidade de tensão. A inclusão na lista de contingências de perda de controle de tensão devido ao esgotamento da fonte controladora (gerador, compensador, tap de LTC) em todas as barras de tensão controlada e também a perda de capacidade de aumentar/diminuir a geração de potência ativa em todos os geradores da rede permite identificar o grau de sensibilidade de cada grandeza contingenciada sobre a margem de estabilidade de tensão. Depois de feita a análise dos esgotamentos, é determinado em ordem decrescente as tensões e as gerações que mais influenciam a margem de estabilidade de tensão de uma determinada barra. Esse resultado indica as direções do movimento das grandezas. Portanto, para melhorar a margem da barra crítica, devem-se calcular ações de controle, ou seja, variar a tensão e/ou a potência ativa dos geradores, encontrando assim um novo ponto de operação. Esse novo ponto de operação deve ser buscado através de algoritmos genéticos. O desvio mínimo quadrático em relação ao ponto de operação do caso base deve ser observado, ou seja, busca-se um novo ponto de operação que não seja muito distante ao caso base. No algoritmo genético, a tensão dos geradores é a variável; a sua variação é discreta em degraus de 0,01 pu (em módulo). Também há casos em que potência ativa dos geradores será variável do GA e tendo suas variações em degraus de 5% em módulo em relação ao caso base. São realizados diversos testes para encontrar o novo ponto de operação, buscando encontrar os menores desvios possíveis enquanto melhora-se a margem de potência. No primeiro sistema utilizado (CEPEL-34) duas configurações dentre os testes feitos para o GA se sobressaem das demais e por isso são usadas para outro sistema (Nórdico). Em ambos os sistemas o objetivo inicial é cumprido.

Palavras-chave

Fluxo de potência ações de controle preventivas colapso de tensão
estabilidade de tensão margem de potência esgotamento de recursos
algoritmo genético

Abstract

Massari Filho, Arthur; Prada, Ricardo Bernardo (Advisor). **Reinforcement of voltage stability conditions by genetic algorithms**. Rio de Janeiro, 2021. 137p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Power systems around the world, including the Brazilian one, measure the voltage levels on the buses and the current in the transmission branches during some type of contingency in real time. The list of contingencies includes: the loss of any branch of transmission, the loss of some pairs of branches and, of less importance, the loss of generation. At that time, the voltage stability conditions are also evaluated. The inclusion in the list of contingencies of loss of voltage control due to the exhaustion of the controlling source (generator, compensator, LTC tap) in all controlled voltage bars and also the loss of capacity to increase / decrease the generation of active power in all generators in the network make it possible to identify the degree of sensitivity of each contingent quantity on the voltage stability margin. After the analysis of the exhausts, the tensions and generations that most influence the voltage stability margin of a given bar are determined in decreasing order. This result indicates the directions of movement of the quantities. Therefore, to improve the margin of the critical bar, control actions must be calculated, that is, vary the voltage and / or the active power of the generators, thus finding a new point of operation. This new point of operation must be sought through genetic algorithms. The minimum quadratic deviation in relation to the operating point of the base case must be observed, that is, a new operating point that is not far from the base case is sought. In the genetic algorithm, the voltage of the generators is the variable; its variation will be discrete in steps of 0.01 pu (in module). There will also be cases in which the active power of the generators will be variable in the GA and having their variations in steps of 5% in module in relation to the base case. Several tests are carried out to find the new operating point, seeking to find the smallest possible deviations while improving the power margin. In the first system used (CEPEL-34) two configurations among the tests made for GA stand out from the others and therefore replicated to another system (Nordic). In both systems the initial objective is fulfilled.

Keywords

Power flow preventive control actions voltage collapse voltage stability power range resources exhaustion genetic algorithm

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Considerações iniciais	17
1.2	Objetivo	17
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	Conceitos básicos	20
2.1	Fluxo de potência	20
2.1.1	Introdução	20
2.1.2	Equações	21
2.1.3	Solução do problema do fluxo de potência através do método de Newton-Raphson	23
2.1.3.1	Barras PQ, PV e $V\theta$	24
2.1.3.2	Sistema com transformador em fase com controle automático de tap (barra PQV)	27
2.1.3.3	Múltiplas barras <i>swing</i>	29
2.2	Algoritmo Genético	32
2.2.1	Introdução	32
2.2.2	Inicialização	35
2.2.3	Seleção	35
2.2.4	Operador de <i>Crossover</i>	35
2.2.5	Operador de Mutação	36
2.2.6	Encerramento do GA	36
2.2.7	Penalização	36
2.2.8	Avaliação Multiobjetivo	37
2.3	Resumo do capítulo	37
3	Estabilidade de Tensão	39
3.1	Fenômeno	39
3.2	Limite de Estabilidade de Tensão(LET)	41
3.3	Avaliação das condições de estabilidade de tensão	46
3.3.1	Matriz $[D']$	47
3.3.2	Análise para sistema com duas barras	48
3.3.3	Análise para sistemas com mais de duas barras	51
3.3.4	Matriz $[D']$ para barras de carga (barras PQ)	52
3.3.5	Matriz $[D']$ para barras de controle de tensão	53
3.3.6	Matriz $[D']$ para sistema com múltiplas barras <i>swing</i>	54
3.3.6.1	Barras V	54
3.3.6.2	Barra $V\theta$	55
3.4	Índices de estabilidade de tensão	56
3.5	Resumo do capítulo	59
4	Esgotamento de recursos	60
4.1	Modelagem dos esgotamentos	60
4.1.1	Esgotamento de potência ativa	61

4.1.1.1	Barra V	61
4.1.1.2	Barra $V\theta$	61
4.1.2	Esgotamento de potência reativa	62
4.1.2.1	Barras PV	62
4.1.2.2	Em barra V	62
4.1.2.3	Barra $V\theta$	63
4.1.3	Esgotamento de <i>tap</i>	63
4.2	Sistemas teste	63
4.2.1	Sistema-teste de 6 barras	64
4.2.1.1	Fluxo de potência	64
4.2.1.2	Índices de estabilidade de tensão	65
4.2.1.3	Esgotamento de potência ativa	68
4.2.1.4	Esgotamento de potência reativa	69
4.2.1.5	Esgotamento de <i>tap</i>	70
4.2.1.6	Resultados	70
4.2.2	Sistema CEPEL-34	71
4.2.2.1	Fluxo de potência	72
4.2.2.2	Índices de estabilidade de tensão	72
4.2.2.3	Esgotamento de recursos	73
4.3	Resumo do capítulo	75
5	Ação de controle preventiva	76
5.1	Introdução	76
5.2	Ações de controle preventiva de potência reativa	77
5.2.1	Barra de carga	77
5.2.2	Barra de geração	81
5.3	Ações de controle preventiva de potência ativa	87
5.3.1	Barra de carga	87
5.3.2	Barra de geração	90
5.4	Ações de controle preventiva combinadas: potência ativa e potência reativa para barra de geração	92
5.5	Resumo do capítulo	94
6	Ação de controle preventivo via algoritmo genético	95
6.1	Introdução	95
6.2	Sistema CEPEL-34	95
6.2.1	Teste 1	98
6.2.2	Teste 2	100
6.2.3	Teste 3	103
6.2.4	Teste 4	106
6.2.5	Teste 5	108
6.2.6	Teste 6	111
6.2.7	Resumo dos testes	113
6.3	Sistema Nórdico - Ponto B	114
6.3.1	Teste 1	118
6.3.2	Teste 2	120
6.3.3	Resumo dos testes	124
6.4	Resumo do capítulo	124

7	Conclusão	126
7.1	Trabalhos Futuros	128
	Referências bibliográficas	129
A	Apêndice A	130

Lista de figuras

Figura 1	Convenção de sinais para fluxos e injeções de corrente, potência ativa e reativa[2]	22
Figura 2	Algoritmo genético básico [7]	34
Figura 3	Circuito de duas barras[9]	39
Figura 4	Limites de Estabilidade Angular [9]	40
Figura 5	P_1 e Q_1 constantes no plano $\theta_1 v_1$ [9]	42
Figura 6	P_1 e Q_1 constantes no plano $\theta_1 v_1$ [9]	42
Figura 7	Circuito com as impedâncias da carga e transmissão	43
Figura 8	Lugar geométrico do LET no plano $\theta_1 v_1$ para diversos ϕ constantes e seus pontos de máximo carregamento	45
Figura 9	Curvas para ϕ constante e o LET no plano SV	46
Figura 10	Região de operação e sinal do valor da margem	57
Figura 11	Sistema-teste de 6 barras	64
Figura 12	Diagrama unifilar do sistema de 34 barras do CEPEL	72
Figura 13	Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência reativa (tensão) da barra 1	78
Figura 14	Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência reativa (tensão) das barras <i>swing</i>	80
Figura 15	Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência reativa (tensão) da própria barra 1	83
Figura 16	Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência reativa (tensão) das barras <i>swing</i> , exceto a barra 1	85
Figura 17	Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência ativa das barras <i>swing</i>	90
Figura 18	Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras <i>swing</i>	92
Figura 19	Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras <i>swing</i> para v_1 aumentado ($v_1 = 1,14$)	93
Figura 20	Fluxograma para a busca de solução para o problema de aumento da margem	96
Figura 21	Representação cromossômica para a resolução do problema apresentado pelo Teste 1	99
Figura 22	Níveis de tensão para o caso base e para a solução encontrada pelo GA para essa configuração do problema (Teste 1)	100
Figura 23	Representação cromossômica para a resolução do problema apresentado pelo Teste 2	101
Figura 24	Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 2)	102
Figura 25	Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo (Teste 2)	103

Figura 26	Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 3)	105
Figura 27	Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 3)	105
Figura 28	Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 4)	107
Figura 29	Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 4)	108
Figura 30	Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 5)	110
Figura 31	Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA para essa configuração do problema (Teste 5)	110
Figura 32	Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 6)	113
Figura 33	Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 6)	113
Figura 34	Diagrama unifilar do sistema Nórdico [10]	115
Figura 35	Geradores duplicados [10]	117
Figura 36	Representação cromossômica do GA (Teste 1 - Sistema Nórdico)	118
Figura 37	Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 1)	121
Figura 38	Representação cromossômica do GA (Teste 2)	121
Figura 39	Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA para essa configuração do problema (Teste 2)	123

Lista de tabelas

Tabela 1	Analogia entre os termos biológicos e utilizados no algoritmo genético	34
Tabela 2	Informações dos dados das barras para o sistema-teste de 6 barras	64
Tabela 3	Informações dos dados dos ramos de transmissão para o sistema-teste de 6 barras	65
Tabela 4	Ponto de operação para o sistema-teste de 6 barras	65
Tabela 5	Margem de potência e o β de cada barra para o sistema de 6 barras	67
Tabela 6	Resultado dos índices de influência de cada barra e do sistema para cada tipo de esgotamento no sistema de 6 barras	71
Tabela 7	Resultado para a máxima potência injetada descontada pelo resto da rede para cada barra do sistema de 6 barras	71
Tabela 8	Ponto de operação para o sistema de 34 barras	73
Tabela 9	Índices de estabilidade de tensão para o sistema de 34 barras do CEPEL	74
Tabela 10	Esgotamento de recursos de potência ativa e reativa nas barras <i>swing</i> do sistema de 34 barras	74
Tabela 11	Índices de influência no sistema de 34 barras do CEPEL ordenado pela severidade do esgotamento.	75
Tabela 12	Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência reativa (tensão) da barra 1	78
Tabela 13	Ações de controle preventiva sobre margem de potência da barra 29, atuando na potência reativa (tensão) das barras <i>swing</i> , exceto a barra 1	79
Tabela 14	Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência reativa para a barra 29	81
Tabela 15	Margem de potência da barra 29 a tensão aproximada de 1.2 pu em cada barra <i>swing</i> do sistema de 34 barras	81
Tabela 16	Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência reativa (tensão) da própria barra 1	82
Tabela 17	Ações de controle preventiva sobre margem de potência da barra 1, atuando na potência reativa (tensão) das barras <i>swing</i> , exceto a barra 1	84
Tabela 18	Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência reativa para a barra 1 - excluindo a própria barra 1	86
Tabela 19	Margem de potência da barra 1 a tensão aproximada de 1.2 pu em cada barra <i>swing</i> do sistema de 34 barras - exceto a barra 1	86
Tabela 20	Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência ativa para a barra 29	88

Tabela 21	Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência ativa das barras <i>swing</i>	89
Tabela 22	Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência ativa para a barra 1	91
Tabela 23	Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras <i>swing</i>	92
Tabela 24	Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras <i>swing</i> para v_1 aumentado ($v_1 = 1,14$)	93
Tabela 25	Valores dos desvios mínimos quadráticos das tensões, potências ativas e potências reativas para o resultado encontrado em (5.4) para $v_1 = 1,14$ pu	98
Tabela 26	Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 1)	99
Tabela 27	Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras <i>swing</i> juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 1)	100
Tabela 28	Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 2)	101
Tabela 29	Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras <i>swing</i> juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 2)	102
Tabela 30	Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 3)	104
Tabela 31	Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras <i>swing</i> juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 3)	104
Tabela 32	Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 4)	106
Tabela 33	Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras <i>swing</i> juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 4)	107
Tabela 34	Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 5)	109
Tabela 35	Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras <i>swing</i> juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 5)	110
Tabela 36	Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 6)	112
Tabela 37	Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras <i>swing</i> juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 6)	112
Tabela 38	Tensões e potência encontrados pelo GA juntamente com as do caso base e dos resultados na Seção 5.4	114
Tabela 39	Margens e desvios encontrados pelo GA nos testes anteriores juntamente os do caso base e dos resultados na Seção 5.4	114
Tabela 40	Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema Nórdico, caso-base	116

Tabela 41	Índices de influência para o esgotamento de recursos referentes a barra 7 - valores menores que 0,5 são ocultados na Tabela	117
Tabela 42	Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema Nórdico, no resultado encontrado pelo GA (Teste 1)	119
Tabela 43	Solução encontrada pelo GA para as tensões e potências ativas das barras <i>swing</i> juntamente dos DMQ referentes a essas variáveis (Teste 1)	120
Tabela 44	Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema Nórdico, para o resultado encontrado pelo GA (Teste 2)	122
Tabela 45	Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras <i>swing</i> juntamente dos DMQ referentes a essas variáveis (Teste 2)	123
Tabela 46	Resumo dos resultados encontrados para os testes 1 e 2 com a intenção de melhoria em M_7	124
Tabela 47	Informações dos dados das barras para CEPEL-34	130
Tabela 48	Informações dos dados dos ramos de transmissão de CEPEL-34	131
Tabela 49	Dados de barra para o sistema Nórdico - Ponto B de operação	132
Tabela 50	Informações das linhas do sistema Nórdico - Ponto B de operação	135

Lista de Abreviaturas

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

II - Índice de influência

LEEA – Limite de estabilidade estático angular

LET – Limite de Estabilidade de Tensão

LTC – *Load tap changer*

DMQ – Desvio Mínimo Quadrático

GA – Algoritmo Genético

1

Introdução

1.1

Considerações iniciais

O sistema elétrico vem em constante expansão, devido ao aumento de consumo de energia e isso faz com que o sistema de transmissão seja sobrecarregado. Uma das maneiras para aliviar esse sobrecarregamento nas linhas de transmissão, é injetar compensação reativa nelas, possibilitando assim uma maior capacidade de transmissão de potência ativa. Esse sobrecarregamento nas linhas de transmissão gera o problema de instabilidade de tensão [1].

A estabilidade de tensão é a capacidade do sistema de manter os níveis de tensão aceitáveis em todas as barras do sistema (em condições normais de operação ou a algum tipo de distúrbio na rede). Quando um distúrbio na rede causa uma queda incontrollável na tensão, temos o estado de instabilidade de tensão.

O maior problema causado pela instabilidade de tensão é quando, em um sistema, há a injeção de potência reativa em uma determinada barra, culminando no efeito oposto ao esperado. Quando se injeta potência reativa em uma barra, espera-se que a tensão da mesma ou em qualquer outra barra venha a subir. Porém, quando o sistema apresenta instabilidade de tensão, ao injetar potência reativa na barra, a tensão irá cair, em qualquer uma das barras do sistema, podendo chegar a um colapso de tensão [1].

Em sistemas de potência que apresentam instabilidade de tensão devem ser tomadas alguns tipos de ações de controle preventivas, para melhorar a sua estabilidade. Essas ações visam melhorar as margens da estabilidade de tensão variando a tensão e/ou as gerações de potência ativa, fazendo com que o sistema tenha um novo ponto de operação. Esse novo ponto de operação pode ser encontrado utilizando-se algoritmo genético.

1.2

Objetivo

O principal objetivo desse trabalho é encontrar um novo ponto de operação, de um sistema de potência, que originalmente tenha margens de

estabilidade de tensão muito baixas, ou até negativas, em barras críticas do sistema. Para encontrar um novo ponto de operação duas maneiras distintas são utilizadas.

O primeiro método para se encontrar um novo ponto de operação é elaborar ações de controle preventivas que atuem sobre as tensões e/ou gerações de potência ativa para elevarem as margens do sistema. Esse processo é manual. Já o segundo método consiste na utilização de algoritmo genético para encontrar um novo ponto de operação, esse algoritmo genético irá atuar sobre a tensão e/ou gerações de potência ativa com o intuito de aumentar as margens de estabilidade de tensão das barras críticas. Os desvios mínimos quadráticos, em relação ao ponto de operação do caso base, devem ser observados e não há preocupação de maximizar a margem de estabilidade.

Porém antes de se fazer a busca pelo novo ponto de operação, são feitos alguns estudos sobre o esgotamento da capacidade de controle de tensão e geração ativa relacionados à estabilidade de tensão. É calculado o índice de influência para medir a variação da margem para o sistema em pré-esgotamento e pós-esgotamento. Após o cálculo desse índice, é feita uma ordenação dos esgotamentos pelo grau de severidade.

1.3

Estrutura do trabalho

No Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos básicos para o desenvolvimento desse trabalho. O primeiro conceito é relacionado ao problema do fluxo de potência resolvido pelo método de Newton-Raphson. A solução desse problema inclui múltiplas barras *swing*, pois é mais fidedigno ao que acontece na operação em tempo real. O segundo conceito apresentado é o algoritmo genético, mostra-se como o algoritmo funciona no que ele é baseado e para que serve. Mostram-se também algumas funcionalidades específicas desse algoritmo.

No Capítulo 3 apresenta-se o fenômeno de estabilidade de tensão. É mostrado que existe uma máxima tensão possível em um sistema de duas barras, mesmo que haja compensação reativa, e que há uma máxima carga que pode ser alimentada. São apresentados também os conceitos de LEEA, LET. É apresentado a matriz $[D']$, primeiramente para um sistema de duas barras e em seguida a generalização para um sistema com mais de duas barras, sendo construída, em um sistema com múltiplas barras *swing*, para cada tipo de barra (PQ, PQV, V, $V\theta$). Após a montagem da matriz $[D']$ são apresentados os índices de estabilidade de tensão.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo sobre o esgotamento de recursos.

São apresentados três tipos diferentes de esgotamentos: potência reativa, potência ativa e tap. É demonstrado também como cada esgotamento afeta cada tipo diferente de barra. Por fim, são feitos os estudos de esgotamento para dois tipos diferentes de sistemas: sistema testes 6 barras e CEPEL-34 barras.

Alguns sistemas, em determinados pontos de operação, podem apresentar índices de estabilidade de tensão muito ruins e, por isso, no Capítulo 5 apresentam-se as ações de controle preventivas que podem melhorar esses índices. São mostrados dois tipos diferentes de ação. O primeiro é alterar indiretamente a potência reativa das barras de geração (*swing*), alterando-se a tensão dessas barras para melhorar os índices. O segundo tipo de ação preventiva é alterando-se as potências ativas dos geradores.

Outra maneira feita para melhorar os índices, é utilizando o algoritmo genético. No Capítulo 6 é utilizado o GA para a melhora dos índices de estabilidade de tensão, levando em conta as ações de controle preventivas apresentadas no Capítulo 5. Por isso, para o sistema CEPEL-34 é utilizado o GA com diversas configurações possíveis, tentando variar ao mínimo o ponto de operação da qual o sistema se encontra inicialmente. Com isso são escolhidas as melhores configurações e testadas em outra rede, o sistema Nórdico. É aumentada a carga até índices negativos de estabilidade de tensão e após isso é utilizado o GA para melhorar esses índices e sem alterar muito o seu ponto de operação.

2

Conceitos básicos

2.1

Fluxo de potência

2.1.1

Introdução

O cálculo do fluxo de potência é utilizado para se conhecer o estado da rede em operação, dos fluxos nas redes e de outras grandezas. Nesse tipo de problema, a rede é representada por equações e inequações algébricas, do qual se desconsidera os efeitos do transitório, pois essa representação só é feita quando as variações com o tempo são lentas. O cálculo do fluxo de potência utiliza de métodos computacionais e, para esse trabalho, utiliza-se do método de Newton-Raphson [2].

Os geradores e cargas são considerados como a parte externa do sistema e modelados como injeções de potência nos nós da rede. Já a parte interna do sistema é composta dos demais componentes (linha de transmissão, transformadores, reatores, entre outros). As equações básicas de fluxo de potência são obtidas a partir das duas leis de Kirchhoff. A primeira lei se refere a soma das potências (ativas e reativas) injetadas em um nó da rede deve ser igual a soma das potências que fluem pelos componentes internos que tem este nó. A segunda lei de Kirchhoff é usada para representar os fluxos de potência nos componentes internos, em função das tensões (variáveis de estado) de seus nós terminais [2].

Na formulação simples do problema do fluxo, cada barra é associada a quatro variáveis, que podem ser constantes do problema ou incógnitas do mesmo. As variáveis são [2]:

v_k é módulo da tensão nodal (barra k);

θ_k é o ângulo da tensão nodal;

P_k é a injeção líquida (geração menos carga) de potência ativa nodal; e

Q_k é a injeção líquida (geração menos carga) de potência reativa nodal.

Dependendo de como cada variável é tratada (se é constante ou incógnita) em cada barra do problema de fluxo de potência, podemos definir os tipos de

barra do sistema. Abaixo serão definidas cada tipo de barra para a resolução dos problemas aqui propostos [2].

PQ é a barra de carga, da qual terá as variáveis de potência (ativa e reativa) como constantes e as variáveis de tensão (módulo e ângulo) como incógnitas, ou seja, P_k e Q_k são dados do problema e v_k e θ_k são calculados. Não há o controle de tensão para essa barra.

PV é a barra de controle de tensão, ou seja, utiliza-se de dispositivos de controle, tais como geradores e compensadores síncronos, que permitem que o módulo da tensão e da potência ativa sejam controlados em valores específicos. Nessa barra a potência ativa (P_k) e o módulo da tensão (v_k) são especificados, já a potência reativa (Q_k) e ângulo da tensão (θ_k) são calculados.

V θ é a barra conhecida como *swing* de referência. Como o próprio nome já diz, é a barra do sistema que é utilizada como referência angular (a referência para o módulo de tensão é o próprio nó terra). Fecha o balanço de potência ativa do sistema, levando em conta as perdas das linhas de transmissão [2]. Geralmente é a barra de maior potência ativa de gerador do sistema. Para esse tipo de barra já é conhecido os valores de ângulo (θ_k) e módulo da tensão (v_k) e calculados as potências ativas (P_k) e reativas (Q_k).

PQV é a barra de carga com controle de tensão. O controle de tensão realizado nessa barra é feito ou através de outras barras que tem a potência reativa livre ou através de transformadores com o tap variável. As variáveis fixas dessa barra são as P_k , Q_k e v_k . As incógnitas para essa barra que devem ser calculadas são θ_k . Vale ressaltar que alguma outra parte do sistema irá ter uma incógnita a mais para fazer o controle de tensão para essa barra (seja Q_k de alguma outra barra ou o tap variável de algum transformador) [3].

V é a barra *swing* que fecha o balanço de potência ativa do sistema, levando em consideração as perdas das linhas de transmissão. Apenas a variável de v_k é conhecida para essa barra. P_k , Q_k e θ_k deverão ser calculadas para ela.

2.1.2 Equações

O problema de fluxo de potência apresenta duas equações para cada barra do sistema, sendo cada uma o somatório dos fluxos das potências ativas e reativas injetadas na barra iguais ao somatório dos fluxos das potências ativas e reativas que deixam a barra através das linhas de transmissão, o que equivale a primeira lei de Kirchhoff[2]. A expressão matemática se dá :

Figura 1: Convenção de sinais para fluxos e injeções de corrente, potência ativa e reativa[2]

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_K} P_{km}(v_k, v_m, \theta_k, \theta_m, a_{km}, \phi_{km}) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh} = \sum_{m \in \Omega_K} Q_{km}(v_k, v_m, \theta_k, \theta_m, a_{km}, \phi_{km}) \quad (2.2)$$

Onde:

- $k=1\dots NB$, sendo NB o número de barras do sistema;
- Ω_k é o conjunto de barras vizinhas à barra k;
- v_k, v_m são os módulos das tensões das barras terminais k-m;
- θ_k, θ_m são os ângulos das tensões das barras terminais k-m;
- P_{km} é o fluxo de potência ativa no ramo k-m;
- Q_{km} é o fluxo de potência reativa no ramo k-m;
- Q_k^{sh} é a injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra k;
- a_{km} é o tap do transformador no ramo k-m;
- ϕ_{km} é o ângulo de defasagem produzido pelo transformador no ramo k-m.

Em (2.1) e (2.2) adotam a seguinte convenção de sinais: potência injetada na barra (geração) são positivas e quando elas saem da barra (carga) são negativas; os fluxos de potência são negativos quando entram na barra e positivos quando saem da barra; os elementos *shunt* tem a mesma convenção que as injeções. Todas as convenções de sinais são mostradas na Figura 1.

As expressões gerais dos fluxos de potência ativa e reativa para um ramo qualquer k-m é dado por [2]:

$$P_{km} = (a_{km}v_k)^2 g_{km} - (a_{km}v_k)v_m g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) + \\ - (a_{km}v_k)v_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (2.3)$$

$$P_{mk} = (g_{km}v_m)^2 - (a_{km}v_m)v_k g_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) + \\ + (a_{km}v_k)v_m b_{km} \sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (2.4)$$

$$Q_{km} = - (a_{km}v_k)^2(b_{km} + b_{km}^{sh}) + (a_{km}v_k)v_mb_{km}\cos(\theta_{km} + \phi_{km}) + \\ - (a_{km}v_k)v_mg_{km}\sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (2.5)$$

$$Q_{mk} = - ((b_{km} + b_{km}^{sh})v_m^2) + (a_{km}v_m)v_kb_{km}\cos(\theta_{km} + \phi_{km}) + \\ + (a_{km}v_k)v_mg_{km}\sin(\theta_{km} + \phi_{km}) \quad (2.6)$$

Sendo:

θ_{km} é a diferença entre θ_k e θ_m ;

g_{km} é a condutância no ramo k-m;

b_{km} é a susceptância no ramo k-m;

b_{km}^{sh} é a susceptância devido ao elemento *shunt* no ramo k-m;

Caso o ramo k-m seja uma linha de transmissão: $a_{km} = 1$ e $\phi_{km} = 0$.

Como (2.1) e (2.2) mostram que a potência injetada no sistema é o somatório das potências que entram na barra devem ser iguais ao somatório das potências que saem em uma barra, por isso teremos as seguintes equações para as potências injetadas em uma barra:

$$P_k = v_k \sum_{m \in \Omega_K} v_m a_{km} (G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \sin(\theta_{km})) \quad (2.7)$$

$$Q_k = v_k \sum_{m \in \Omega_K} v_m a_{km} (G_{km} \sin(\theta_{km}) - B_{km} \cos(\theta_{km})) \quad (2.8)$$

Onde:

Ω_k é o conjunto de barras vizinhas à barra k, incluindo a barra k;

G_{km} é o elemento da matriz de condutância nodal;

B_{km} é o elemento da matriz de susceptância nodal.

2.1.3

Solução do problema do fluxo de potência através do método de Newton-Raphson

Nesse tópico mostra-se como resolver o problema de fluxo de potência através do método de Newton-Raphson. Primeiramente, será mostrado como resolver o problema apenas para sistemas com barras PQ, PV e V θ . Em seguida é mostrado como resolver o problema de fluxo com a inserção de um LTC com tap variável (em barra PQV) e por último como é resolvido para um sistema com múltiplas barras *swing*.

2.1.3.1

Barras PQ, PV e Vθ

Seja um sistema com apenas as barras do tipo PQ, PV e Vθ. Para as barras PQ são dados P_k e Q_k e calculam-se v_k e θ_k , para a barra PV são dados P_k e v_k e calculam-se Q_k e θ_k e para as barras Vθ são dados v_k e θ_k e calculam-se P_k e Q_k . Portanto temos um problema que pode ser descrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = f \left(\begin{bmatrix} \theta \\ v \end{bmatrix} \right) \quad (2.9)$$

As equações para as potências entre duas barras do sistema são descritas da seguinte maneira [2]:

$$P_{km} = (v_k)^2 g_{km} - v_k v_m g_{km} \cos(\theta_{km}) - v_k v_m b_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (2.10)$$

$$Q_{km} = (v_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + v_k v_m b_{km} \cos(\theta_{km}) - v_k v_m g_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (2.11)$$

Encontrar a solução para a equação matricial descrita em (2.9) é encontrar o ponto de operação do sistema de potência. A resolução para esse problema é dividida em dois subproblemas, o subproblema 1 consiste em calcular v_k e θ_k para as barras PQ e calcular θ_k para as barras PV. Já o subproblema 2 calculam-se P_k e Q_k para a barra swing de referência e Q_k para as barras PV.

O subproblema 1 trata de um sistema de $2NPQ$ (número de barras PQ) + NPV (número de barras PV) equações algébricas não-lineares com o mesmo número de incógnitas. Portanto:

$$P_k^{esp} - v_k \sum_{m \in \Omega_K} v_m a_{km} (G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \sin(\theta_{km})) = 0 \quad (2.12)$$

Para as barras PQ e PV.

$$Q_k^{esp} - v_k \sum_{m \in \Omega_K} v_m a_{km} (G_{km} \sin(\theta_{km}) - B_{km} \cos(\theta_{km})) = 0 \quad (2.13)$$

Para as barras PQ.

Onde:

- P_k^{esp} é a potência ativa especificada da barra k;
- Q_k^{esp} é a potência reativa especificada da barra k.

Considerando-as incógnitas para o subproblema 1, elas podem ser agrupadas da seguinte forma:

$$x = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{v} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Em que $\underline{\theta}$ é o vetor dos ângulos de tensão para as barras PQ e PV, e \underline{v} é o vetor do módulo de tensão para as barras PQ. Portanto, a quantidade de equações será dada pela quantidade de $\underline{\theta}$ mais a quantidade de \underline{v} , que será igual a $2NPQ + NPV$. Portanto, podemos reescrever (2.12) e (2.16) da seguinte maneira:

$$\Delta \underline{P} = \underline{P}^{esp} - \underline{P}(\underline{v}, \underline{\theta}) = 0 \quad (2.15)$$

Para as barras PQ e PV.

$$\Delta \underline{Q} = \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}(\underline{v}, \underline{\theta}) = 0 \quad (2.16)$$

Para as barras PQ.

Em que \underline{P} é o vetor das potências ativas injetadas nas barras PQ e PV e \underline{Q} é o vetor das potências reativas injetadas nas barras PQ.

Seja $\underline{g}(\underline{x})$ a função vetorial descrita em (2.17). A resolução para esse tipo de sistema é dada pelo método de Newton-Raphson.

$$\underline{g}(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P} \\ \Delta \underline{Q} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.17)$$

É necessário a linearização da função vetorial de $\underline{g}(\underline{x})$ para $\underline{x} = \underline{x}^n$ (n é o número da iteração), da qual é dada pelos dois primeiros termos da série de Taylor. Que é mostrada na Figura 2.18.

$$\underline{g}(\underline{x}^n + \Delta \underline{x}^n) \approx \underline{g}(\underline{x}^n) + J(\underline{x})^n \Delta \underline{x}^n \quad (2.18)$$

Onde J é conhecido como a matriz Jacobiano, que é a matriz formada pelas derivadas parciais de primeira ordem de uma função vetorial (para esse problema $\underline{g}(\underline{x})$).

O vetor $\Delta \underline{x}$ é conhecido como as variáveis do problema, portanto, deve-se resolver o seguinte sistema linear:

$$\underline{g}(\underline{x}^n) = -J(\underline{x}^n) \Delta \underline{x}^n \quad (2.19)$$

Sendo a matriz Jacobiana a seguinte:

$$J(\underline{x}^n) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{v}} \\ \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{v}} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

As submatrizes da matriz Jacobiana são comumente representadas conforme a seguir:

$$H = \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}}; N = \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{v}}; M = \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}}; L = \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{v}} \quad (2.21)$$

Juntando (2.19), (2.20) e (2.21), obtém-se a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^n \\ \Delta \underline{Q}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^n \\ \Delta \underline{v}^n \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

As fórmulas para o cálculo dos elementos fora da diagonal principal das submatrizes H, M, N e L são:

$$H_{km} = v_k v_m (G_{km} \text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} \cos(\theta_{km})) \quad (2.23)$$

$$N_{km} = v_k (G_{km} (\cos(\theta_{km}) + B_{km} (\text{sen}(\theta_{km})))) \quad (2.24)$$

$$M_{km} = -v_k v_m (G_{km} \cos(\theta_{km}) + B_{km} \text{sen}(\theta_{km})) \quad (2.25)$$

$$L_{km} = v_k (G_{km} (\text{sen}(\theta_{km}) - B_{km} (\cos(\theta_{km})))) \quad (2.26)$$

As fórmulas para o cálculo dos elementos da diagonal principal das submatrizes H, M, N e L são:

$$H_{kk} = -Q_k - v_k^2 B_{kk} \quad (2.27)$$

$$N_{kk} = v_k^{-1} (P_k + v_k^2 G_{kk}) \quad (2.28)$$

$$M_{kk} = P_k - V_k^2 G_{kk} \quad (2.29)$$

$$L_{kk} = v_k^{-1} (Q_k - v_k^2 B_{kk}) \quad (2.30)$$

Caso o elemento fora da diagonal principal da matriz de admitância nodal seja nulo, os elementos fora da diagonal principal de todas as submatrizes também serão nulos.

A resolução do subsistema 1 é dado conforme os passos a seguir.

1. Na a primeira iteração escolhe-se os valores iniciais para v e θ para as barras PQ e θ para as barras PV. Geralmente para os valores de módulo de tensão o valor escolhido é 1(um) pu e para o ângulo de tensão é zero;
2. Calcula-se $P_k(v, \theta)$ para as barras PQ e PV e $Q_k(v, \theta)$ para as barras PQ. Determina-se os valores dos resíduos ΔP_k e ΔQ_k ;

3. Faz-se um teste de convergência, da qual se verifica se todos os valores dos resíduos são menores que a tolerância escolhida inicialmente. Caso isso aconteça, o processo iterativo convergiu e a solução é (v, θ) . Caso algum resíduo seja maior que a tolerância, passa-se para o próximo item;
4. Calcula-se a matriz Jacobiana;
5. Determina-se a nova solução para $(\underline{v}^{n+1}, \underline{\theta}^{n+1})$, sendo esses novos valores de módulo de tensão e ângulo calculados da seguinte forma:

$$\underline{\theta}^{n+1} = \underline{\theta}^n + \Delta \underline{\theta}^n \quad (2.31)$$

$$\underline{v}^{n+1} = \underline{v}^n + \Delta \underline{v}^n \quad (2.32)$$

Onde $(\underline{v}^{n+1}, \underline{\theta}^{n+1})$ é determinado resolvendo o seguinte sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^n \\ \Delta \underline{v}^n \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P(\underline{v}^n, \underline{\theta}^n) \\ \Delta Q(\underline{v}^n, \underline{\theta}^n) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Após encontrar os resultados, retorna-se para o item 2.

Com os resultados obtidos ao resolver o subproblema 1, encontra-se o resultado para o subproblema 2, utilizando (2.7) para a barra swing de referência e (2.8) para as barras PV.

2.1.3.2

Sistema com transformador em fase com controle automático de tap (barra PQV)

Nesse tópico de estudo é mostrado como é calcula-se o fluxo de potência para sistemas dos quais há a inserção de transformadores em fase com controle automático de tap.

Seja uma barra PQV com a tensão sendo controlada por um transformador em fase com tap variável (barra PQV), que é colocado entre as barras k-m, sendo a barra m a de tensão controlada (v_m). A variável ligada ao controle de tensão barra m é o tap variável (a_{km}) do transformador. Em (2.10) e em (2.11) são alteradas de maneira que v_k seja substituído por $a_{km} \times v_k$, sendo a_{km} uma nova incógnita para o problema do fluxo. Portanto (2.9) é reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = f \left(\begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{v} \\ a_{km} \end{bmatrix} \right) \quad (2.34)$$

(2.10) e (2.11) são reescritas da seguinte forma:

$$P_{km} = (a_{km} v_k)^2 g_{km} - (a_{km} v_k) v_m g_{km} \cos(\theta_{km}) - (a_{km} v_k) v_m b_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (2.35)$$

$$P_{mk} = (g_{km}v_m)^2 - (a_{km}v_k)v_m g_{km} \cos(\theta_{km}) + (a_{km}v_k)v_m b_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (2.36)$$

$$Q_{km} = -(a_{km}v_k)^2(b_{km} + b_{km}^{sh}) + (a_{km}v_k)v_m b_{km} \cos(\theta_{km}) - (a_{km}v_k)v_m g_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (2.37)$$

$$Q_{mk} = -((b_{km} + b_{km}^{sh})v_m^2) + (a_{km}v_m)v_k b_{km} \cos(\theta_{km} + \phi_{km}) + (a_{km}v_k)v_m g_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (2.38)$$

Sendo assim, o subproblema 1 fica com uma incógnita a menos (v_m), que é substituída pela variável a_{km} . Com isso a matriz Jacobiana fica da seguinte forma:

$$J(\underline{x}^n) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial v} & \frac{\partial P}{\partial a_{km}} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial v} & \frac{\partial Q}{\partial a_{km}} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

As novas submatrizes são representadas conforme a seguir:

$$T = \frac{\partial P}{\partial a_{km}}; W = \frac{\partial Q}{\partial a_{km}}; \quad (2.40)$$

As submatrizes T e W substituem as colunas de N e L que se referiam as tensões da barra PQV. Por isso, a quantidade de colunas de T e W é o número de barras PQV do sistema. Todos os valores de T e W são nulos, exceto pelas barras k e m ligadas ao transformador. Esses elementos dessas submatrizes são calculados pelas seguintes equações:

$$T_{km} = 2 * a_{km} v_k^2 g_{km} - v_k v_m (g_{km} \cos(\theta_{km}) + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.41)$$

$$T_{mk} = -v_k v_m (g_{km} \cos(\theta_{km}) - b_{km} \sin(\theta_{km})) \quad (2.42)$$

$$W_{km} = -2 * a_{km} v_k^2 b_{km} + v_k v_m (b_{km} \cos(\theta_{km}) - g_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.43)$$

$$W_{mk} = v_k v_m (b_{km} \cos(\theta_{km}) - g_{km} \sin(\theta_{km})) \quad (2.44)$$

Com isso, o sistema linear fica da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^n \\ \Delta Q^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & T \\ M & L & W \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} \Delta \theta^n \\ \Delta v^n \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

O método para resolução desse sistema é o mesmo utilizado anteriormente, adicionando a variável a_{km} na resolução.

2.1.3.3

Múltiplas barras *swing*

No sistema elétrico é comum ter apenas uma barra *swing*, porém com o aumento contínuo do sistema (carga/geração), a premissa de se ter apenas uma barra *swing* para o algoritmo de cálculo de fluxo de potência é questionada. Por isso há a proposta de múltiplas barras *swings*.

Nesse trabalho, a abordagem de múltiplas barras *swing* é feita com a premissa de que a distribuição de perdas ativas entre as barras *swing* deve ter a mesma proporção que as gerações das mesmas, para o sistema sem perdas [4]. Há a inclusão de novas equações de controle no problema de fluxo.

Nesse modelo, fixa-se o ângulo de uma barra *swing* (referência) e deixa o ângulo de todas as demais barra *swings* livres para variar. Porém, apenas adicionando os ângulos das tensões nas equações linearizadas, elas deixariam de ser quadradas, resultando em infinitas possibilidades de resultado, ou seja, o número de equações é menor que o número de incógnitas. O critério utilizado para se manter as equações quadradas é a relação entre as perdas ativas das barras *swings* [4]. Essa relação é feita através das potências dos geradores das barras *swing*, incluindo-as nas equações de controle do sistema de fluxo de potência.

Considerando um sistema de n barras *swing*, a relação de proporção das perdas se dá pela seguinte equação matemática:

$$\begin{aligned}
 P_{G_1} &= \alpha_{12} P_{G_2} \\
 P_{G_2} &= \alpha_{23} P_{G_3} \\
 &\dots \\
 P_{G_{n-1}} &= \alpha_{(n-1)n} P_{G_n}
 \end{aligned}
 \tag{2.46}$$

Portanto, a relação entre os fatores de participação se dá pela seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\alpha_{12_0} &= \frac{P_{G_{1_0}}}{P_{G_{2_0}}} \\
\alpha_{23_0} &= \frac{P_{G_{2_0}}}{P_{G_{3_0}}} \\
&\dots \\
\alpha_{(n-1)n_0} &= \frac{P_{G_{(n-1)_0}}}{P_{G_{n_0}}}
\end{aligned}
\tag{2.47}$$

O subíndice " 0 " representa os valores iniciais de potência dos geradores, desconsiderando as perdas. Reescrevendo (2.46), tem-se:

$$\begin{aligned}
g_1 &= P_{G_1}^{(h)} - \alpha_{12} P_{G_2}^{(h)} \\
g_2 &= P_{G_2}^{(h)} - \alpha_{23} P_{G_3}^{(h)} \\
&\dots \\
g_{n-1} &= P_{G_{n-1}}^{(h)} - \alpha_{(n-1)n} P_{G_n}^{(h)}
\end{aligned}
\tag{2.48}$$

Onde h é a iteração da qual se encontra a resolução do fluxo de potência.

A forma linearizada de (2.48) a serem incorporadas ao sistema linearizado das equações fica da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\Delta g_1 &= \Delta P_{G_1}^{(h)} - \alpha_{12} \Delta P_{G_2}^{(h)} \\
\Delta g_2 &= \Delta P_{G_2}^{(h)} - \alpha_{23} \Delta P_{G_3}^{(h)} \\
&\dots \\
\Delta g_{n-1} &= \Delta P_{G_{n-1}}^{(h)} - \alpha_{(n-1)n} \Delta P_{G_n}^{(h)}
\end{aligned}
\tag{2.49}$$

Esse novo critério tem como objetivo criar $n-1$ equações para que a matriz Jacobiana possa ser invertível, porém surgiram n novas incógnitas, o que faria que a matriz Jacobiana ainda não fosse quadrada. Para a matriz Jacobiana ficar quadrada, insere-se as equações de injeções nodais de potência ativa das n barras *swing*.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \vdots \\ \Delta P_1^* \\ \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \\ \Delta g_1 \\ \vdots \\ \Delta g_{(n-1)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_2} & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{G_n}} \\ \vdots & & \vdots & & & & & & \\ \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_2} & \frac{\partial P_n^*}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial P_{G_n}} \\ \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial v_2} & \frac{\partial P_1}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial P_{G_n}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_m}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_2} & \frac{\partial P_m}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial P_{G_n}} \\ \vdots & & \vdots & & & & & & \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_m}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_2} & \frac{\partial P_m}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial P_{G_n}} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial v_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial P_{G_n}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{G_n}} \\ \vdots & & \vdots & & & & & & \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{G_n}} \\ \frac{\partial g_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial g_1}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial v_2} & \frac{\partial g_1}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial P_{G_n}} \\ \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial \theta_n} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial v_2} & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial g_{(n-1)}}{\partial P_{G_n}} \end{bmatrix}}_J \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \vdots \\ \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \Delta v_1 \\ \vdots \\ \Delta v_m \\ \Delta P_{G_1} \\ \vdots \\ \Delta P_{G_n} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Onde:

n é o número de barras *swing* do sistema;

m é o número de barras PQ (carga) do sistema.

Em (2.50) são incluídas as equações de controle ($\Delta g_1 \dots \Delta g_{(n-1)}$) e as equações de potência ativa das barras *swings* ($\Delta P_1^* \dots \Delta P_n^*$). A forma linearizada da Equação de potência ativa de uma determinada barra *swing* (barra i) é dada por:

$$\Delta P_i^* = P_{G_i}^{(h)} - P_{L_i} - P_i^{(h)} = -\Delta P_{G_i} + \frac{\partial P_i^*}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial P_i^*}{\partial v} \Delta v \quad (2.51)$$

Ao final do processo iterativo, a potência ativa da barra *swing* i deve ser atualizada conforme:

$$P_{G_i}^{(h+1)} = P_{G_i}^h + \Delta P_{G_i}^h \quad (2.52)$$

Os elementos das colunas adicionais da matriz jacobiana apresentada em (2.50) são todos nulos, exceto os elementos correspondentes às injeções de potência ativa das barras *swing*, onde as derivadas de (2.51) são iguais a -1. Nas linhas adicionais, todos os elementos são nulos exceto os elementos referentes aos incrementos de potência ativa gerada das barras *swing* relacionados, sendo iguais ao α . Portanto, a matriz Jacobiana tem a seguinte forma:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_2} & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \\ \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_2} & 0 & \cdots & -1 \\ \frac{\partial P_1^*}{\partial P_1} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_1} & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_1} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_1} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \\ \frac{\partial P_m^*}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial P_m^*}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_m^*}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial P_m^*}{\partial v_2} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial v_2} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial v_2} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & & & & & \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & \alpha_{n(n-1)} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

A principal diferença desse modelo para o modelo clássico é a inclusão das equações de injeção de potência ativa das barras *swings*, enquanto que no modelo clássico essas equações são tratadas após resolver-se o sistema linear.

2.2

Algoritmo Genético

2.2.1

Introdução

O algoritmo genético foi desenvolvido por John Henry Holland, em seu livro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*" (*Adaptação em sistemas naturais e artificiais*), lançado em 1975 e desde então expandiu em toda a área científica até atingir a engenharia elétrica [5]. A primeira publicação da utilização de algoritmos genéticos aplicados em algum ramo da engenharia elétrica aconteceu em 1995, no artigo "*Multi-parameter Optimization Program for Magnetostatic Circuit Design Utilizing a Genetic Algorithm*" (Otimização multi-parâmetro Para Projetos de Circuito Magnetostático Utilizando Algoritmo Genético), que foi um artigo que trata sobre a parametrização de um circuito magnetostático que não podia ser otimizado através das técnicas convencionais, pois isso a utilização do GA. Esse artigo não tem nenhuma citação [6].

Um dos artigos com um maior número de citações relacionando a engenharia elétrica e o algoritmo genético é "*A fuzzy model for wind speed*

prediction and power generation in wind parks using spatial correlation" (Um modelo *fuzzy* para previsão de velocidade do vento e geração de energia em parques eólicos usando correlação espacial). Esse artigo foi escrito em junho de 2004, que o algoritmo genético é utilizado para fazer a indicação da velocidade do vento medida em locais vizinhos em um raio de até 30 km de distância dos aglomerados de turbinas eólicas. Esse artigo tem um total de 309 citações [6].

Outro artigo muito citado é o *"Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi Method"* (Otimização dos parâmetros do processo de usinagem por descarga elétrica (WEDM) usando o método Taguchi) tendo um total de 218 citações. Esse artigo utiliza o algoritmo genético para otimizar o processo de usinagem de descarga elétrica no fio com múltiplos objetivos [6].

Existem diversas outras aplicações de algoritmos genéticos na engenharia elétrica, como nos artigos *Applications of artificial neural networks for refrigeration, air-conditioning and heat pump systems - A review* (Aplicações de redes neurais artificiais para refrigeração, ar-condicionado e bombas de calor - Uma revisão), sendo publicado em fevereiro de 2012, com um total de 204 citações, *A critical review of detection and classification of power quality events* (Uma revisão crítica da detecção de eventos de qualidade de energia), sendo publicado em janeiro de 2015 com 173 citações, *Fault diagnosis of power transformer based on support vector machine with genetic algorithm* (Diagnóstico de falta de transformadores de potência baseado na máquina de vetor de suporte), sendo publicado em outubro de 2009 com um total de 137 citações, entre diversos outros exemplos de aplicações. Portanto a utilização de algoritmos genéticos na engenharia elétrica é cada vez mais utilizada.

Os Algoritmos Genéticos (GA) são algoritmos baseados em técnicas de busca baseados na teoria da evolução das espécies e seleção natural proposto por Darwin. São técnicas heurísticas ¹ de otimização global[5].

Por se basear na teoria da evolução de Darwin há uma analogia entre os termos utilizados na biologia com os utilizados nos GA. Na Tabela 1 são apresentados alguns desses termos.

As entidades da otimização são [5]:

1. Problema: características, restrições e variáveis;
2. Variáveis do problema: valores que afetam a qualidade da solução;
3. Função objetivo: cálculo que mede o quão boa é a solução;

¹técnicas matemáticas de solução de problemas, quando os métodos para a solução de problemas clássicos são mais lentos

Tabela 1: Analogia entre os termos biológicos e utilizados no algoritmo genético

Analogia entre os nomes	
Evolução Natural	Algoritmo Genético
Indivíduo	Solução
Cromossoma	Representação
Reprodução Sexual	Operador Cruzamento
Mutação	Operador de Mutação
População	Conjunto de soluções
Gerações	Ciclos
Meio Ambiente	Problema

Figura 2: Algoritmo genético básico [7]

4. Método ou algoritmo ou heurística: para buscar a solução;
5. Espaço de busca: número total de soluções para um problema, que é determinado pelo número de variáveis e pelo seu domínio;
6. Recursos computacionais: tratamento do problema e escolha da melhor solução.

As etapas para o funcionamento de um algoritmo genético básico são dados conforme os itens numerados abaixo e na Figura 2:

1. Escolha dos parâmetros;
2. Geração da população inicial;
3. Decodificação do cromossomo;
4. Avaliar a aptidão para cada indivíduo;
5. Seleciona os indivíduos mais adaptados;
6. Processo de *Crossover* entre os indivíduos;
7. Processo de Mutação dos indivíduos;
8. Verificar se o critério de convergência, caso seja satisfeito esse critério, encerra-se o algoritmo, caso não tenha sido satisfeito o critério, retorna-se ao item 3.

Cada item citado acima será explicado nos próximos tópicos.

2.2.2

Inicialização

O GA inicializa escolhendo um conjunto de indivíduos (população inicial) aleatoriamente, que são candidatos à solução do problema. Cada indivíduo terá uma representação específica, dependendo do problema, e caso seja necessário, será processada através de uma decodificação, inspirada no genoma dos seres vivos, que é um vetor de características que pode ser desmontado e re combinado com partes de outros vetores de outras soluções[8].

A população é avaliada através da função objetivo, atribuindo um índice para a sua adaptação ao problema. A aptidão é definida em cima da população da iteração em qual se encontra o algoritmo. A função objetivo é definida a partir do problema de otimização que se deseja ter [8].

Essa etapa do processo é referente aos itens 1, 2, 3 e 4.

2.2.3

Seleção

É a etapa do processo que são selecionados os pais que irão gerar novos filhos (novos indivíduos) que formarão as novas gerações. Os indivíduos que obtiveram melhores resultados para a função objetivo tem uma maior chance de serem selecionados, porém não são apenas os indivíduos com melhores resultados a serem selecionados. Esse artifício faz com que se evite encontrar o máximo ou mínimo local, ajudando na busca pelo máximo ou mínimo global [5].

A seleção corresponde ao passo 5.

2.2.4

Operador de *Crossover*

Após a seleção de pais um ponto de corte é definido como a posição entre dois genes de um cromossomo. Cada indivíduo que contenha n genes, terá $n-1$ pontos de cortes. O ponto de corte é útil para a separação dos genes de cada pai. Esse ponto de corte pode ser definido aleatoriamente [5].

Após selecionado o ponto de corte, os pais são separados em duas partes: uma à esquerda e outra à direita ao ponto de corte. A parte esquerda do primeiro pai junta-se com parte direita do segundo pai, formando indivíduo e a parte direita do primeiro pai junta-se com a parte esquerda do segundo pai, formando outro indivíduo, que ambos são chamados de filhos. Esse processo denomina-se *crossover* de um ponto [5]. Pode haver a seleção de mais pontos de corte.

O *crossover* corresponde ao item 6.

2.2.5

Operador de Mutação

Após a composição dos filhos, a mutação começa a agir. Ela funciona da seguinte maneira: um valor muito baixo de probabilidade é atribuído para cada gene do filho (usualmente na faixa de 0,5%), e após isso sorteia-se um valor aleatório entre 0 e 1. Caso esse valor sorteado seja menor que a probabilidade referida ao gene, o operador de mutação irá agir alterando o valor do gene aleatoriamente. Esse processo é repetido para todos os genes do indivíduo [5].

Essa parte do processo do algoritmo genético corresponde ao passo 7.

2.2.6

Encerramento do GA

Há duas maneiras para se encerrar o GA: A primeira é através do tempo de simulação, ou seja, caso o tempo de simulação do GA ultrapasse o tempo limite, o programa do qual se está rodando o GA é finalizado, porém esse tipo de encerramento pode não trazer o resultado desejável para o problema. O segundo é através do critério de convergência, que caso seja atingido, o GA é encerrado. Para esse critério de encerramento, o resultado obtido é mais confiável.

2.2.7

Penalização

A função de penalização é um método de restrição, que traz simplicidade e fácil implementação. A principal função da penalização é transformar problemas de otimização com algum tipo de restrição em problemas sem restrição, somando ou subtraindo um valor na função objetivo.

A penalização funciona da seguinte forma: geram-se as soluções para cada indivíduo, sem se considerar nenhuma restrição, para as soluções que as restrições forem violadas, aplicam-se as penalidades. A maneira que a penalidade é aplicada, é mostrada em (2.54) para casos de mínimo e em (2.55) para casos de máximo.

$$Aptidão(x) = Avaliação(x) + Penalidade(x); \quad (2.54)$$

$$Aptidão(x) = Avaliação(x) - Penalidade(x); \quad (2.55)$$

Onde:

- Penalidade(x) = 0; se solução atende a restrição e
- Penalidade(x) > 0; se solução não atende a restrição.

Existem diversas formas de penalização, nesse trabalho será utilizada apenas a penalização estática, que consiste em aplicar uma penalização fixa toda vez que a solução não atender a alguma restrição.

2.2.8

Avaliação Multiobjetivo

Há problemas que apresentam mais de um objetivo a ser encontrado, por isso existem métodos para lidar com esse tipo de problema, tendo em vista que o algoritmo genético (por si só) sempre buscará a otimização para apenas um objetivo. O método utilizado nesse trabalho é o método conhecido como "distância ao alvo".

O método da distância ao alvo busca avaliar a distância entre o valor ideal de cada objetivo e o valor da função objetivo quando separados. A maneira feita é seguindo (2.56).

$$F = \left(\sum_{i=1}^n |user_i - f_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad p \geq 1 \quad (2.56)$$

Onde:

- f_i - avaliação da solução em relação ao objetivo i ;
- $user_i$ - valor ideal dos objetivos i ;
- n - número de objetivos;
- p - pressão exercida.

O parâmetro p determina a pressão ser exercida em cima de soluções ruins, ou seja, quanto maior o valor de p , maior será a penalidade aplicada a soluções ruins para o objetivo. Nesse trabalho é utilizada a distância euclidiana, ou seja, $p = 2$.

2.3

Resumo do capítulo

Esse capítulo é separado em duas partes, e ambas tem a proposta de mostrar os conceitos básicos para a formulação de resultados para a proposta dado nesse trabalho.

A primeira seção desse Capítulo mostra o problema de fluxo de potência. Começa com a demonstração de todas as ferramentas para a solução do problema para o sistema mais básico, ou seja, um sistema com apenas uma barra *swing* (barra $V\theta$), barras de controle de tensão (barras PV) e barras

de carga (barras PQ). Para solução do problema de fluxo de potência foi apresentada a matriz das derivadas parciais, a matriz Jacobiana, que é uma matriz de extrema importância para os próximos tópicos abordados aqui.

Após a explicação do cálculo do sistema mais simples, é apresentado o sistema com outros tipos de barras, primeiramente apresentando a barra do tipo PQV, que é uma barra de carga com controle de tensão através de um dispositivo LTC, mais especificadamente: quem faz o controle da tensão é o tap do transformador. É mostrado também a modificação feita na matriz jacobiana, pois entram as incógnitas referentes ao tap do transformador, entrando assim as equações de potência ativa e reativa das derivadas parciais do tap.

Por último é tratado o sistema com múltiplas barras *swings*, que é apresentado o conceito de se fazer a distribuição de perdas entre todas as barras de geração do sistema e não em apenas uma, como normalmente é feito. Com diversas barras *swing* em um sistema, apenas uma deve ser escolhida como a barra de referência angular. É inserida na equação de fluxo todas as equações de potência ativa das barras *swing*, junto com as equações da relação de proporção das perdas. A matriz Jacobiana é modificada, inserindo nela as derivadas parciais de potência ativa das barras *swing* e as derivadas parciais das equações de proporção de perda.

A segunda parte trata sobre o funcionamento dos algoritmos genéticos. Esse tipo de algoritmo é inspirado na teoria da evolução de Darwin e as suas propriedades têm seu nome inspirado nos termos da biologia. É apresentado o algoritmo genético mais básico, do qual trata do processo inicial do algoritmo, passando pela seleção, depois pelos operadores de *crossover* e mutação e o seu encerramento. Também são apresentados os conceitos de penalidade e função multiobjetivo. A penalidade é o conceito de aplicar uma penalização na função objetivo toda vez que ela não cumprir alguma regra do problema, já a função multiobjetivo é quando o problema pretende otimizar mais de uma função. O método de resolução para função multiobjetivo é o método de distância ao alvo.

3

Estabilidade de Tensão

3.1

Fenômeno

Para a análise do fenômeno de Estabilidade de tensão é utilizado o circuito com duas barras (uma de carga e outra de geração) e uma linha de transmissão. Esse circuito é apresentado na Figura 3. A solução para esse sistema se dá através das equações de fluxo.

Os valores para cada elemento na Figura 3 são dados, a seguir:

$$\begin{aligned}v_0 &= 1,0 \text{ pu} \\ \theta_0 &= 0^\circ \\ Z_t &= 0,2 \text{ pu} \\ \alpha_t &= 70^\circ \\ 0 &< P_0 < \infty \\ -\infty &< Q_0 < \infty\end{aligned}$$

O conjugado da potência aparente que sai da barra 1 e flui para a barra 0, é dado por:

$$S_{10}^* = P_{10} - jQ_{10} = v_1^* I_{10} \quad (3.1)$$

Sendo:

$$I_{10} = \frac{v_1 \angle \theta_1 - v_0 \angle \theta_0}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (3.2)$$

e

$$v_1^* = v_1 \angle -\theta_1 \quad (3.3)$$

Substituindo (3.3) e (3.2) em (3.1), obtém-se:

$$S_{10}^* = \frac{v_1^2 \cos(\alpha_t) - v_1 v_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} - j \frac{v_1^2 \sin(\alpha_t) - v_1 v_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (3.4)$$

Figura 3: Circuito de duas barras[9]

Portanto, comparando (3.1) e (3.4), conclui-se que as potências ativas e reativas que fluem da barra 1 para a barra 0, são:

$$P_{10} = \frac{V_1^2}{Z_t} \cos(\alpha_t) - \frac{V_1 V_0}{Z_t} \cos(\theta_{10} + \alpha_t) \quad (3.5)$$

$$Q_{10} = \frac{V_1^2}{Z_t} \sin(\alpha_t) - \frac{V_1 V_0}{Z_t} \sin(\theta_{10} + \alpha_t) \quad (3.6)$$

Pela lei dos nós tem-se o seguinte:

$$P_{10} + P_1 = 0 \Leftrightarrow P_{10} = -P_1 \quad (3.7)$$

$$Q_{10} + Q_1 = 0 \Leftrightarrow Q_{10} = -Q_1 \quad (3.8)$$

Na Figura 4 apresenta-se a potência consumida na carga (P_1) em função do ângulo de defasagem da tensão (θ_1) a uma determinada tensão (v_1). Variar a tensão v_1 gera as curvas do gráfico. O máximo para todas as curvas acontecerá quando θ_1 for igual a $-\alpha_t$. Essa reta vertical ($\theta_1 = -\alpha_t$) é conhecida como limite de estabilidade estático angular (LEEA), que divide as regiões de operação em instável ($\theta_1 < -\alpha_t$) e estável ($\theta_1 > -\alpha_t$) [9].

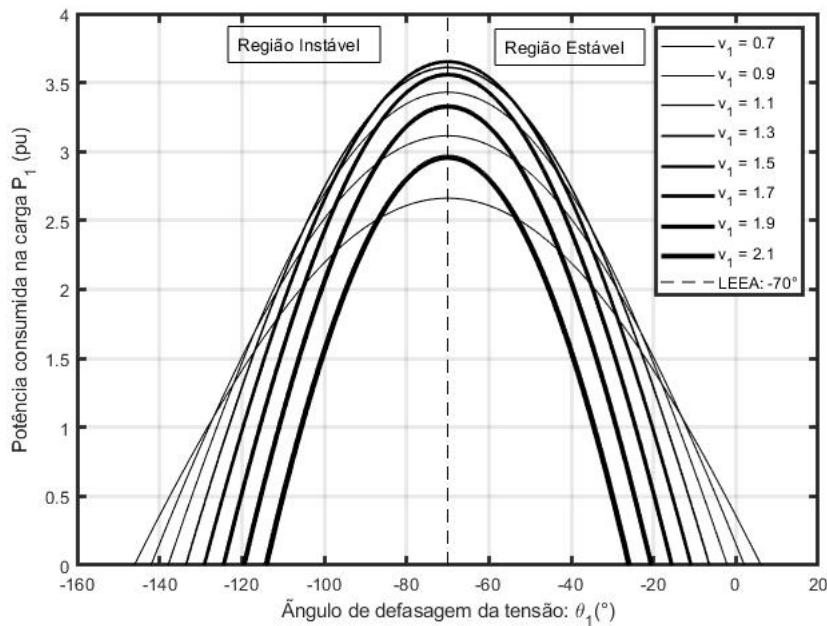


Figura 4: Limites de Estabilidade Angular [9]

Inicialmente, ao aumentar o valor de v_1 o valor de P_1^{max} aumenta, como o esperado. Porém quando o valor de v_1 chega a 1,7 pu, percebe-se que o valor de P_1^{max} diminui. Portanto, conclui-se que há um valor máximo (*maximun*

maximorum) para o valor de P_1^{max} que a carga pode ser alimentada. P_1^{max} é o máximo dos máximos quando:

$$\frac{\partial P_1^{max}}{\partial v_1} = 0 = -2 \frac{v_1}{Z_t} \cos(\alpha_t) + \frac{v_0}{Z_t} \quad (3.9)$$

Portanto:

$$v_1 = \frac{v_0}{2 \cos(\alpha_t)} \quad (3.10)$$

Substituindo (3.10) em (3.5), obtém-se:

$$P_1^{max,max} = \frac{v_0^2}{4 Z_t \cos(\alpha_t)} \quad (3.11)$$

O estudo da carga máxima através do plano $P_1 \theta_1$ é importante, porém insuficiente. Portanto, verificam-se as características do sistema elétrico no plano $\theta_1 v_1$.

Na análise feita anteriormente para (3.5) e (3.6) fixava-se o valor de v_1 e variava-se θ_1 para o cálculo de P_1 e Q_1 . O processo para análise no plano $\theta_1 v_1$ é feito da seguinte forma: fixa-se o valor de P_1 e varia-se θ_1 para encontrar os valores de v_1 . Porém para cada valor de carga e ângulo, serão encontrados dois valores de tensão, ou seja, duas soluções. O método de Newton-Raphson leva apenas para uma solução. Com esses valores é possível traçar a curva P_1 constante no plano $\theta_1 v_1$. Cada curva é o lugar geométrico das soluções de tensão (θ_1, v_1) para P_1 constante. O mesmo processo é feito para a potência reativa (Q_1) [9]. Na Figura 5 apresentam-se os gráficos encontrados para alguns valores fixos de P_1 e Q_1 .

Novamente nota-se a existência de um P_1 máximo e esse valor é o mesmo encontrado em (4) ("*maximum maximorum*"), mesmo que tenha uma compensação reativa ilimitada, ou seja, mesmo sem limite físico, há um limite de geração. Portanto, para valores maiores que P_1^{max} não há soluções.

3.2

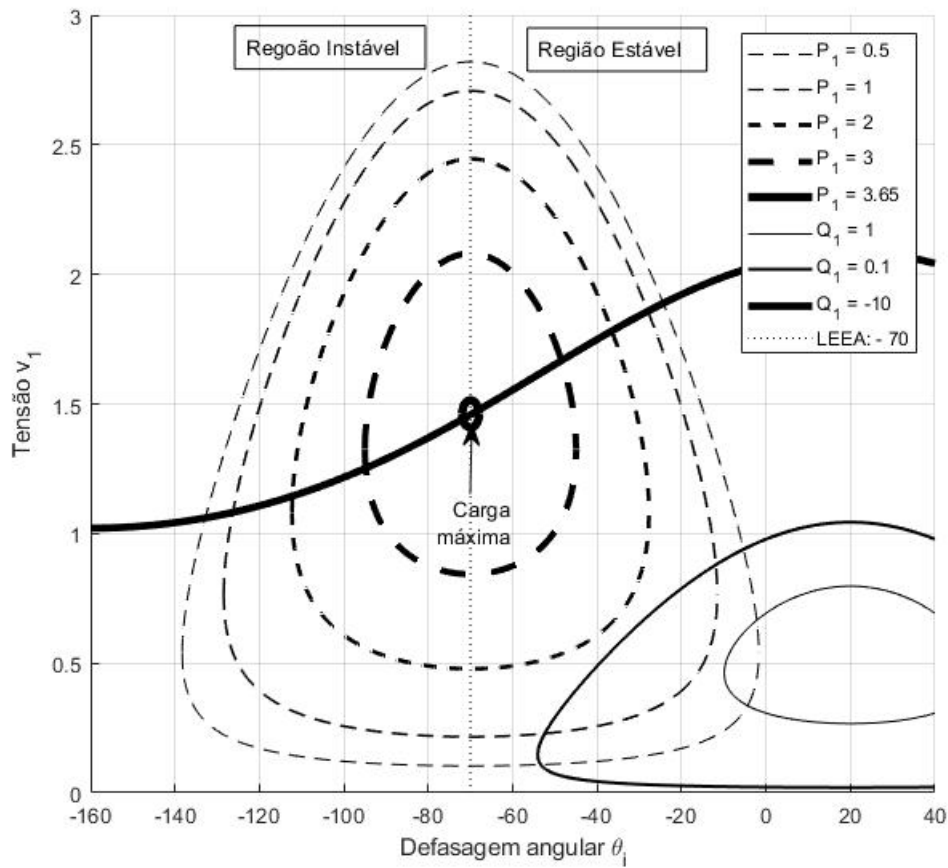
Limite de Estabilidade de Tensão(LET)

O circuito de duas barras apresentado na Figura 3 é analisado com o fator de potência fixo ($\phi = 41,19^\circ$).

O fator de potência pode ser calculado seguindo (3.12)

$$\tan(\phi) = \frac{Q_{10}}{P_{10}} = \frac{\frac{v_1^2 \sin(\alpha_t) - v_1 v_2 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t}}{\frac{v_1^2 \cos(\alpha_t) - v_1 v_2 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t}} \quad (3.12)$$

Portanto, juntando (3.5) e (3.6) com (3.12), calcula-se o valor de v_1 segundo (3.13):

Figura 5: P_1 e Q_1 constantes no plano $\theta_1 v_1$ [9]

$$v_1 = v_0 \frac{[\text{sen}(\theta_{10} + \alpha_t) - \tan(\phi)\cos(\theta_{10} + \alpha_t)]}{\text{sen}(\alpha_t) - \tan(\phi)\cos(\alpha_t)} \quad (3.13)$$

Ao inserir os valores de v_1 encontrado em (3.13) juntamente na Figura 5, obtém-se os resultados observados na Figura 6.

Figura 6: P_1 e Q_1 constantes no plano $\theta_1 v_1$ [9]

Na Figura 6 apresentam-se três curvas distintas para P_1 e Q_1 distintos, dos quais os fatores de potência permanecem constantes enquanto as potências ativas e reativas vão aumentando gradativamente (mantendo o FP constante). A primeira curva é a menor potência ativa consumida pela carga ($P_1 = 0,8$ pu) e reativa ($Q_1 = 0,7$ pu). Para essas curvas (P_{cte} e Q_{cte}) existem dois pontos de interseção, ou seja, há duas soluções de tensão. A solução A (do inglês *above* -

acima) e a solução B (do inglês *below* - abaixo). Logo, para uma carga têm-se duas soluções (θ_1, v_1) .

Aumentando o valor da carga, ou seja, aumentando os valores de P_1 e Q_1 as curvas se afastam, até chegar ao ponto representado pelas curvas P_{cte}^+ e Q_{cte}^+ ($P_1 = 1.0$ pu e $Q_1 = 0.88$ pu). Essas curvas tem apenas um ponto de interseção, ou seja, apresenta apenas uma solução. Esse ponto é representado por C (do inglês *critical* - crítico) e ao se aumentar ainda mais a carga, ao ponto de chegar à curva P_{cte}^{++} e Q_{cte}^{++} ($P_1 = 1.2$ pu e $Q_1 = 1.1$ pu) não há solução, ou seja, não há interseção entre as curvas. Portanto, há uma máxima carga para cada fator de potência [9].

As curvas encontradas na Figura 6 têm o fator de potência constante. Então, ao alterar o fator de potência, a curva seguirá para duas direções, dependendo da variação feita no fator de potência. Caso o fator de potência seja mais capacitivo, a curva do gráfico ficará menos íngreme e, caso o fator de potência seja mais indutivo, a curva será mais íngreme. Para todo valor de fator de potência há um valor de carga máxima, porém quando a carga máxima ocorrer em $\theta_1 = -\alpha_t$, corresponderá ao *maximum maximorum*[9]. O valor desse máximo está relacionado com as impedâncias da carga e da linha. Para mostrar essa relação, o circuito apresentado na Figura 7 é utilizado como exemplo.

Figura 7: Circuito com as impedâncias da carga e transmissão

Na Figura 7 é apresentado o diagrama unifilar referente ao circuito apresentado na Figura 3. A corrente, em módulo, para esse circuito é calculada segundo (3.14).

$$I = \frac{v_0}{\sqrt{[Z_t \cos(\alpha_t) + Z_l \cos(\phi)]^2 + [Z_t \sin(\alpha_t) + Z_l \sin(\phi)]^2}} \quad (3.14)$$

E a potência consumida pela carga é:

$$P_1 = v_1 I \cos(\phi) \quad (3.15)$$

Sendo:

$$v_1 = Z_l I \quad (3.16)$$

Juntando (3.14) e (3.16) com (3.15), o resultado é dado em (3.17).

$$P_1 = \frac{Z_l V_0^2 \cos(\phi)}{Z_t^2 + Z_l^2 + 2Z_t Z_l \cos(\alpha_t - \phi)} \quad (3.17)$$

Para encontrar o valor da máxima carga consumida na carga para um determinado ϕ constante, tem-se:

$$\frac{\partial P_1}{\partial Z_l} = 0 = \frac{v_0^2 \cos(\phi)(Z_t^2 - Z_l^2)}{Z_t^2 + Z_l^2 + 2Z_t Z_l \cos(\alpha_t - \phi)} \quad (3.18)$$

Quando $Z_l = Z_t$ (casamento de impedâncias), (3.18) é satisfeita, ou seja, a máxima potência consumida na carga para um ϕ constante (ponto C na Figura 6) ocorre quando a impedância da carga é igual a impedância da linha de transmissão.

A máxima potência consumida na carga é dada em (3.19).

$$P_1^{max} = \frac{v_0^2}{Z_t} \frac{\cos(\phi)}{4\cos^2(\frac{\alpha_t - \phi}{2})} \quad (3.19)$$

E a tensão para esse ponto será:

$$v_1^c = \frac{v_0}{2\cos(\frac{\phi - \alpha_t}{2})} \quad (3.20)$$

Cada valor de ϕ corresponde a um P_1^{max} , quando $Z_l = Z_t$. Há um valor de ϕ que corresponde ao "*maximum maximorum*" e esse valor será:

$$\frac{\partial P_1^{max}}{\partial \phi} = 0 \quad (3.21)$$

O resultado que satisfaz (3.21) acontece quando $\phi = -\alpha_t$, portanto $P_1^{max,max}$ ocorre em $Z_l = Z_t$ e $\phi = -\alpha_t$, ou seja, o máximo dos máximos da potência consumida na carga ocorre quando a impedância da carga é igual ao conjugado da impedância equivalente da linha de transmissão.

A tensão no ponto crítico também pode ser calculada como $\dot{v}_1^c = \dot{Z}_c \dot{I}_{01}$, então:

$$v_1^c \angle \theta_1 = Z_t \angle \phi \frac{v_0}{Z_t \angle \alpha_t + Z_t \angle \phi} \quad (3.22)$$

Separando a parte real de (3.22) obtém-se o seguinte resultado:

$$v_1^c = \frac{v_0}{2\cos(\theta_1)} \quad (3.23)$$

Comparando (3.20) com (3.23), o ângulo de tensão da carga que terá a máxima potência consumida será:

$$\theta_1 = \frac{\phi - \alpha_t}{2} \quad (3.24)$$

O Limite de Estabilidade de Tensão (LET) é formado por todos os pontos que satisfazem $Z_t = Z_l$. O LET é o lugar geométrico que representa os pontos de máxima transmissão de potência à carga. Na Figura 8 mostra-se o lugar geométrico LET no plano $\theta_1 v_1$ com diversos valores de fator de potência.

Já no plano SV, o LET equivale a união das pontas das curvas para cada ϕ constante, que equivale ao máximo carregamento de cada curva. Na Figura 9 mostra-se a LET juntamente a curvas com determinados ϕ constantes.

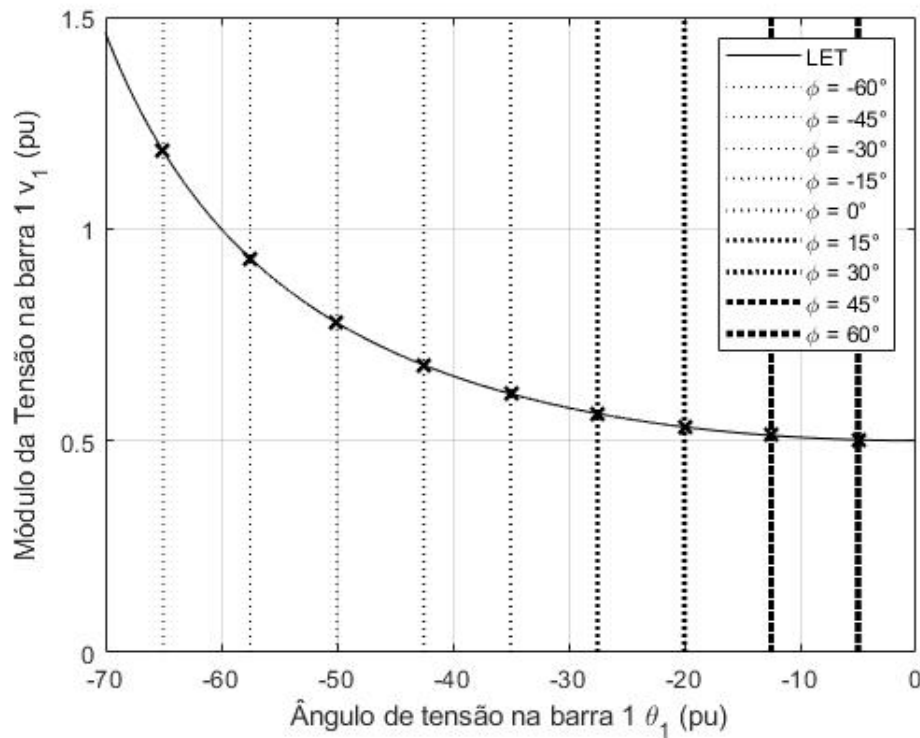


Figura 8: Lugar geométrico do LET no plano $\theta_1 v_1$ para diversos ϕ constantes e seus pontos de máximo carregamento

Caso a potência aparente consumida na carga seja de 3,0 pu e com ângulo de fator de potência igual a -45° , os pontos de operações possíveis estão marcados na Figura 9 como A e B. O ponto A encontra-se acima da LET, então caso o fator de potência se torne mais capacitivo, ou seja, o ângulo do FP passe a ser de -60° , o novo ponto de operação será A'. O nível de tensão para essa barra será maior, ou seja, $v'_A > v_A$. Caso o ponto de operação esteja abaixo do LET, ou seja, no ponto de operação B, a mudança do fator de potência para um fator de potência mais capacitivo, a tensão irá diminuir, ou seja, $v'_B < v_B$. Comumente, o ponto de operação é acima do LET [1]. O fator de potência também pode ser mais indutivo, então caso isso aconteça, como por exemplo, o ângulo de fator de potência seja de -30° . Observa-se na Figura 9 o ponto de operação será muito próximo ao máximo carregamento permitido, ou seja, o ponto C. Para fatores de potência mais indutivos não haverá ponto de operação.

O limite de estabilidade de tensão separa em duas as regiões de operação, a região "A" e a região "B". A região "A" é o lugar geométrico das tensões acima da curva LET, que é conhecida como região normal de operação. A região "B" é o lugar geométrico das tensões abaixo da curva LET, conhecida como região anormal de operação da qual os efeitos de controle de ação têm o efeito

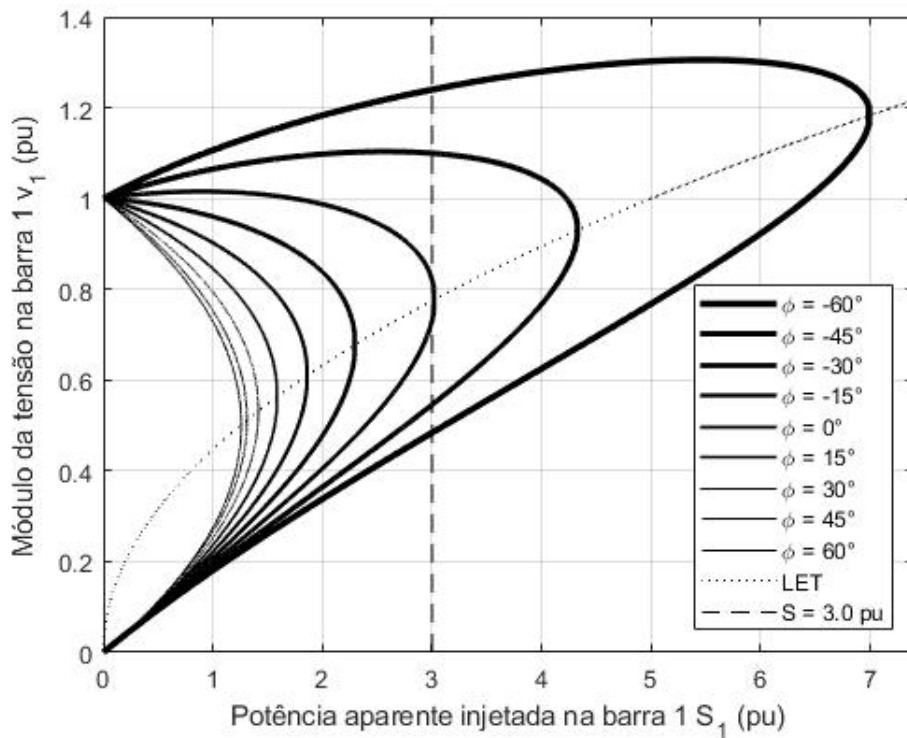


Figura 9: Curvas para ϕ constante e o LET no plano SV

contrário ao esperado inicialmente.

3.3

Avaliação das condições de estabilidade de tensão

A estabilidade de tensão possui duas características:

- Máxima carga que pode ser alimentada através da rede (ou máxima geração que pode ser injetada na rede) e
- possibilidade de ações de controle de tensão terem o efeito oposto ao esperado inicialmente.

Portanto, a avaliação consiste em analisar a região do ponto de operação em estudo e a distância ao ponto de máximo carregamento para aquela configuração de sistema. Essa avaliação é feita, pois caso a região de operação do sistema esteja na parte inferior da curva, ou seja, abaixo do máximo carregamento para aquela configuração no plano SV, a ação de controle a ser realizada terá o efeito oposto ao esperado inicialmente. A avaliação é feita através do método da matriz $[D']$.

O método da matriz $[D']$ é uma ferramenta analítica de avaliação das condições de estabilidade de tensão com base em um modelo matemático

simples, porém poderoso, com uma interpretação física direta do fenômeno. Índices abrangentes e significativos são deduzidos [9].

3.3.1

Matriz [D']

Considerando a equação linearizada do fluxo de potência, mostrada em (2.33), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta v \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Reescrevendo (3.25), de forma a separar as variáveis da barra em análise das demais barras do sistema, obtém-se (3.26)

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta P} \\ \Delta P_i \\ \overline{\Delta Q} \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \overline{\Delta \theta} \\ \Delta \theta_i \\ \overline{\Delta v} \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

onde:

- O vetor $\overline{\Delta P}$ exclui o elemento ΔP_i
- O vetor $\overline{\Delta \theta}$ exclui o elemento $\Delta \theta_i$
- O vetor $\overline{\Delta Q}$ exclui o elemento ΔQ_i
- O vetor $\overline{\Delta v}$ exclui o elemento Δv_i

Realocando as colunas e linhas do sistema afim de isolar a barra em estudo, tem-se (3.27).

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta P} \\ \overline{\Delta Q} \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \overline{\Delta \theta} \\ \overline{\Delta v} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Essa análise é feita afim de verificar o efeito de variações infinitesimais de ΔP_i e ΔQ_i sobre $\Delta \theta_i$ e Δv_i , sem que os outros elementos $\overline{\Delta P}$ e $\overline{\Delta Q}$ sofram algum tipo de variação. As variações de ΔP_i e ΔQ_i , e a variação das perdas ativas e reativas são absorvidas pela barra *swing* e pelos geradores com potência reativa variável [9]. Portanto, a equação linear resulta em (3.28).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\Delta \theta} \\ \overline{\Delta v} \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

onde:

- submatriz A: contém os elementos da matriz jacobiana original, excluindo as linhas e colunas referentes a barra em análise;
- submatriz B: contém os elementos da matriz jacobiana referente derivadas parciais da potência ativa e reativa em relação as variáveis dependentes da barra em análise;
- submatriz C: contém os elementos da matriz jacobiana referente derivadas parciais da potência ativa e reativa da barra em análise em relação as variáveis dependentes do sistema;
- submatriz D: contém os elementos das derivadas parciais das equações de potência ativa e reativa da barra em análise em relação as suas próprias variáveis.

Separando as equações referentes as submatrizes A e B, tem-se (3.29).

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta v} \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta v} \end{bmatrix} = -[A]^{-1} [B] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

E as equações referentes as submatrizes C e D são (3.30).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} \frac{\Delta \theta}{\Delta v} \end{bmatrix} [D] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Substituindo (3.29) em (3.30), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = ([D] - [C] [A]^{-1} [B]) \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Portanto, define-se a matriz [D'] como:

$$[D'] = [D] - [C] [A]^{-1} [B] \quad (3.32)$$

A dimensão da matriz [D'] será sempre de 2x2.

3.3.2

Análise para sistema com duas barras

Para o sistema com duas barras, têm-se as seguintes opções para as curvas P e Q constantes:

- Dois pontos de interseção (pontos A e B) ou;
- um ponto de interseção (ponto C) ou;
- nenhum ponto de interseção.

No ponto C, a reta tangente à curva P é a mesma para a curva Q, logo os gradientes de P e Q estão alinhados, então tem-se a seguinte relação entre os gradientes:

$$\nabla P - \lambda \nabla Q = 0 \quad (3.33)$$

Onde λ é um escalar. Como nas soluções de A e B os gradientes não estão alinhados, não se tem essa relação entre os gradientes. Decompondo (3.33) em θ e v , tem-se a seguinte relação (3.34).

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial P}{\partial v} - \lambda \frac{\partial Q}{\partial v} = 0 \leftrightarrow \lambda = \frac{\partial Q^{-1}}{\partial v} \frac{\partial P}{\partial v} \quad (3.35)$$

Substituindo (3.35) em (3.34), tem-se que:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \frac{\partial Q}{\partial v} - \frac{\partial P}{\partial v} \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad (3.36)$$

Essa relação é igual ao determinante da matriz Jacobiana. Portanto no ponto de máximo carregamento, o determinante da matriz Jacobiana é nulo, então variações infinitesimais da carga causam variações infinitas na tensão.

O ângulo entre os gradientes da potência ativa e reativa é denominado de β . A análise do valor de β é fundamental para saber a região de operação do sistema. A região de operação é definida conforme:

- Região de tensão A: $0^\circ < \beta < 180^\circ$
- Região de tensão B: $-180^\circ < \beta < 0^\circ$
- Região de tensão C: $\beta = 0^\circ$ ou $\pm 180^\circ$

Portanto os sinais do determinante do Jacobiano e de β indicam a região de operação e o módulo do determinante do jacobiano "indica" uma distância ao máximo carregamento.

Para o sistema de duas barras, não há as submatrizes A, B e C, pois elas indicam a influência de outras barras na barra em análise, portanto a matriz jacobiana é exatamente igual à matriz D', ou seja:

$$J \equiv D \equiv D' \quad (3.37)$$

Portanto:

$$\det[D'] = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} - \frac{\partial P_k}{\partial v_k} \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} \quad (3.38)$$

Escrevendo as equações de potência ativa e reativa injetadas na barra i, em função das admitâncias e susceptâncias da matriz de admitância nodal, tem-se (3.39) e (3.40).

$$P_i = v_i^2 G_{ii} + v_i v_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.39)$$

$$Q_i = -v_i^2 B_{ii} + v_i v_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.40)$$

e as derivadas parciais são:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = v_i v_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial v_i} = -2v_i G_{ii} - v_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = -v_i v_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial v_{ki}} = 2v_i B_{ii} - v_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.44)$$

Substituindo (3.41), (3.42), (3.43) e (3.44) em (3.38), obtém-se (3.45).

$$\det[D'] = -v_i v_k^2 (G_{ik}^2 + B_{ik}^2) + 2v_i^2 B_{ii} (v_k G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - v_k B_{ik} \cos(\theta_{ik})) - \quad (3.45)$$

$$-2v_i^2 G_{ii} (v_k G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + v_k B_{ik} \sin(\theta_{ik}))$$

Como $Y_{ik}^2 = G_{ik}^2 + B_{ik}^2$ e multiplicando ambos os lados da equação por v_i , obtém-se (3.46).

$$\det[D']v_i = -(v_i v_k Y_{ik})^2 + 2v_i^2 B_{ii} (v_i v_k (G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik}))) - \quad (3.46)$$

$$-2v_i^2 G_{ii} (v_i v_k (G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik})))$$

A potência aparente injetada na barra ($S_i = P_i + jQ_i$) pode ser desenvolvida seguindo (3.47).

$$S_i^2 = P_i^2 + Q_i^2 = v_i^4 Y_{ii}^2 + v_i^2 v_k^2 Y_{ik}^2 + \quad (3.47)$$

$$+ 2v_i^2 G_{ii} v_i v_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} - 2v_i^2 B_{ii} v_i v_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}))$$

Comparando (3.45) e (3.47), tem-se (3.48).

$$\det[D']v_i = (v_i Y_{ii})^2 - S_i^2 \quad (3.48)$$

Sendo S_i^2 a potência aparente injetada na barra em análise, no ponto de operação em análise ao quadrado.

Definindo S_{i0}^2 como a estimativa de máxima potência injetada calculada no ponto de operação em análise ao quadrado, sendo $S_{i0}^2 = (v_i Y_{ii})^2$, portanto:

$$\det[D']v_i = S_{i0}^2 - S_i^2 \quad (3.49)$$

Nas três regiões de operação possíveis, tem-se:

- Região A: $\det[D']v_i > 0 \leftrightarrow S_{i0}^2 > S_i^2$, ou seja, a injeção de potência é menor que a estimativa do máximo.
- Região B: $\det[D']v_i < 0 \leftrightarrow S_{i0}^2 < S_i^2$, ou seja, a injeção de potência é maior que a estimativa do máximo.
- Ponto C (máximo): $\det[D']v_i = 0 \leftrightarrow S_{i0}^2 = S_i^2$, ou seja, a injeção de potência é exatamente igual a estimativa do máximo.

3.3.3

Análise para sistemas com mais de duas barras

Para sistemas com mais de duas barras, as submatrizes A, B e C não são nulas, portanto, a matriz $[D']$ não é igual a matriz Jacobiana, mas sim igual a relação mostrada em (3.32).

Então, supondo que:

$$[D] = \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

E:

$$-[C][A]^{-1}[B] = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Portanto, o determinante da matriz $[D']$ será feito da seguinte forma:

$$\det[D'] = \det \left\{ \begin{bmatrix} x & z \\ y & u \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_1 & b_3 \\ b_2 & b_4 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.52)$$

O resultado desse determinante é:

$$\det[D'] = [xu - yz] + [xb_4 - yb_3] + [b_1u - b_2z] + [b_1b_4 - b_2b_3] \quad (3.53)$$

Como $\det[D] = [xu - yz]$ e a outra parte da equação é chamada de $\Delta\det$, logo:

$$\det[D'] = \det[D] + \Delta\det \quad (3.54)$$

Multiplicando ambos os lados de (3.54) por v_1 , tem-se (3.55).

$$\det[D']v_1 = \det[D]v_1 + v_1\Delta\det \quad (3.55)$$

Como $\det[D]v_1 = S_{i0}^2 - S_i^2$, tem-se:

$$\det[D']v_1 = S_{i0}^2 - S_i^2 + v_1\Delta\det \quad (3.56)$$

Determinando $S_m^2 = S_{i0}^2 + v_1\Delta\det$, então:

$$\det[D']v_1 = S_m^2 - S_i^2 \quad (3.57)$$

onde:

- S_i^2 : injeção de potência na barra em análise, no ponto de operação, ao quadrado;
- S_{i0}^2 : estimativa da máxima potência injetada na barra em análise, para o ponto de operação, ao quadrado;
- $\Delta\det v_i$: estimativa da influência da rede na barra em análise do resto da rede, ao quadrado;

- S_m^2 : estimativa da máxima injeção de potência na barra em análise, para o ponto de operação, ao quadrado. É o resultado da estimativa de S_{i0}^2 limitada por $\Delta \det v_i$.
- $\det[D']v_i$: estimativa de "distância" do que está sendo injetado da máxima injeção, ao quadrado.

Nas regiões de operação:

- Região A: $\det[D']v_i > 0$; $S_i^2 > S_m^2$
- Região B: $\det[D']v_i < 0$; $S_i^2 < S_m^2$
- Ponto C (máximo): $\det[D']v_i = 0$; $S_i^2 = S_m^2$

3.3.4

Matriz $[D']$ para barras de carga (barras PQ)

Em um sistema com transformadores de regulação de tensão, caso a barra em análise (barra i) seja uma barra de carga, basta deslocar as linhas para baixo das equações referentes a barra i e para a direita as colunas das variáveis referentes a barra i. Portanto o sistema linearizado é feito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \vdots \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_m \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_m}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_i} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_m} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial v_k} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial a_{km}} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \vdots \\ \Delta v_k \\ \vdots \\ \Delta a_{km} \\ \vdots \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Organizando (3.58) em função das submatrizes A, B, C e D, obtém-se (3.59).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta v \\ \Delta a \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

3.3.5

Matriz [D'] para barras de controle de tensão

A análise de barras de controle é importante pois mecanismos de controle agem sobre a sua tensão.

A matriz Jacobiana inicial não apresenta os resíduos de potência reativa das barras de controle de tensão por gerador, ou seja, não tem os elementos $\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i}$ e $\frac{\partial Q_i}{\partial v_i}$, além das derivadas parciais referentes aos elementos ligados a barra de controle de tensão. Portanto, a matriz [D'] que depende desses elementos não pode ser feita de maneira direta da matriz Jacobiana. Então para a análise desse tipo de barra é feita a inserção da equação linearizada da potência reativa e da tensão referente aquela barra. Caso tenha variáveis que controlem a tensão, elas também são substituídas, ou seja, a nova matriz jacobiana que será construída para a barra de controle de tensão, passa a ser analisada como se fosse uma barra de carga.

Caso a barra de tensão seja controlada por um gerador (barra PV) devem ser feitas as seguintes alterações a matriz jacobiana:

- inserção da equação referente à ΔQ_i e;
- inserção da coluna referente à variável Δv_i .

Caso a barra de controle de tensão seja a barra de referência angular, deve-se escolher outra barra geradora j para ser a nova barra de referência angular. Portanto, são feitas as seguintes alterações na matriz jacobiana:

- excluir a equação referente à ΔP_j ;
- excluir a coluna referente à variável $\Delta \theta_j$;
- inserção da equação referente à ΔP_j ;
- inserção da coluna referente à variável $\Delta \theta_i$;
- inserção da equação referente à ΔQ_i e;
- inserção da coluna referente à variável Δv_i .

Para uma barra m que tenha a tensão controlada por um LTC, a matriz jacobiana já contém a equação referente a ΔQ_m , portanto, para esse caso deve-se fazer as seguintes alterações na matriz jacobiana:

- inserção da coluna referente à Δv_m e;
- excluir a coluna referente à variável Δa_{km} .

3.3.6

Matriz [D'] para sistema com múltiplas barras *swing*

A abordagem feita até esse momento leva em consideração que o sistema apresenta apenas uma barra *swing* e todas as variações de potência ativa injetada e as perdas do sistema são absorvidas pela barra *swing* referência e as variações de potência reativa são absorvidas pelas barras com potência reativa para variar. O modelo apresentado em (2.1.3.3) se aproxima mais do que acontece na prática, tendo em vista que as variações de potência ativa injetadas e perdas são absorvidas por todas as barras *swing* do sistema e as potências reativas injetadas são absorvidas pelas barras que conseguem variar a potência reativa.

Com isso, o estudo é feito para avaliar as variações infinitesimais de carga (ou geração) em ΔP_i e ΔQ_i e seus efeitos em $\Delta \theta_i$ e Δv_i de uma determinada barra i do sistema.

Portanto, a matriz jacobiana tem a inclusão das equações de potência ativa das barras *swings*, das equações de distribuição proporcional de perdas (Δg) e das colunas referentes a potências ativas geradas das barras *swings*.

A matriz [D'] para barra PQ, PV e PQV é calculada da mesma maneira apresentado em 3.3.4 e 3.3.5 respectivamente, sendo apenas feitos os ajustes mencionados acima. Para as barras *swings*, uma delas será escolhida como referência angular de tensão (barras $v\theta$) e as demais terão o seu ângulo de tensão livre para variar (barras V), sendo assim divididas em duas partes. O tratamento da matriz [D'] é dado conforme os itens a seguir.

3.3.6.1

Barras V

Caso a barra i seja do tipo V, os resíduos dela são ΔP_i^* , ΔQ_i mais a parcela das variações de ΔP_{g_i} . No entanto, para o estudo das variações infinitesimais em ΔP_i e ΔQ_i e os efeitos causados por elas nas variáveis de tensão (θ_i e v_i), as perdas ativas não são alocadas para a barra i , portanto a barra i não é mais uma barra *swing*, ou seja, no momento da análise, a barra i é "transformada" em barra PQ.

Portanto, a nova matriz jacobiana deve seguir as seguintes alterações:

- substituir a equação referente a ΔP_i^* por ΔP_i ;
- excluir a equação de $\Delta g_{(i-1)}$;
- excluir a coluna referente a ΔP_{G_i} e;
- refazer os cálculos dos fatores de participação das barras *swing* no momento em análise, tendo em vista que a barra i é uma barra PQ.

Portanto, a nova matriz $[D']$ será:

$$\begin{bmatrix}
 \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_m} & \frac{\partial P_1^*}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_1^*}{\partial \Delta P_{G_n}} & \frac{\partial P_1^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_1^*}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_m} & \frac{\partial P_n^*}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_n^*}{\partial P_{G_n}} & \frac{\partial P_n^*}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_n^*}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial P_1}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial v_m} & \frac{\partial P_1}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial P_{G_n}} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_1}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial P_m}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial P_m}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_m} & \frac{\partial P_m}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial P_{G_n}} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_m}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial Q_1}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial v_m} & \frac{\partial Q_1}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial P_{G_n}} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_1}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial P_{G_n}} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial g_1}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial g_1}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial v_m} & \frac{\partial g_1}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial g_1}{\partial P_{G_n}} & \frac{\partial g_1}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_1}{\partial v_i} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial g_{n-1}}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial g_{n-1}}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial g_{n-1}}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial g_{n-1}}{\partial v_m} & \frac{\partial g_{n-1}}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial g_{n-1}}{\partial P_{G_n}} & \frac{\partial g_{n-1}}{\partial \theta_i} & \frac{\partial g_{n-1}}{\partial v_i} \\
 \hline
 \frac{\partial P_i}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial P_i}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial v_m} & \frac{\partial P_i}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \Delta P_{G_n}} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \\
 \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_{(n-1+m)}} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial v_m} & \frac{\partial Q_i}{\partial P_{G_1}} & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \Delta P_{G_n}} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_i}
 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Onde:

- n é o número de barras *swing*, exceto a barra em análise;
- m é número de barras de carga do sistema.

3.3.6.2

Barra $V\theta$

Caso a barra i seja uma barra de *swing* de referência angular (barra $V\theta$), então o ângulo da barra i é especificado. Porém, ao se alterar ΔP_i e ΔQ_i não haveria alteração em θ_i , pois o ângulo é fixo, o que para o estudo não faz sentido. Portanto, na análise da barra *swing* de referência angular deve-se escolher outra barra de geração j a ser escolhida como referência angular e a barra i ser modificada em uma barra PQ. Então para a matriz jacobiana, deve-se:

- excluir a coluna referente a $\Delta \theta_j$;
- inserir a coluna referente a $\Delta \theta_i$;
- substituir a equação referente a ΔP_i^* por ΔP_i ;

- excluir a equação de $\Delta g_{(i-1)}$;
- excluir a coluna referente a ΔP_{G_i} ;
- inserir a equação referente a ΔQ_i ;
- incluir a coluna referente a Δv_i ;
- refazer os cálculos dos fatores de participação das barras *swing* no momento em análise, tendo em vista que a barra *i* é uma barra PQ.

3.4

Índices de estabilidade de tensão

Como visto em 3.3.2, o que define a região de operação é o sinal de $\det[D'] \cdot v_i$ e por β e a distância entre o ponto de operação ao máximo é monitorado por $\det[D'] v_i$. A potência aparente injetada na barra *i* é dada por:

$$S_i = \sqrt{S_i^2} \quad (3.61)$$

E a estimativa de máxima potência injetada sendo influenciada por todo o sistema é dado por:

$$S_{m_i} = \text{ sinal de } (S_{i0}^2 - \Delta \det \cdot v_i) \sqrt{|S_{i0}^2 - \Delta \det \cdot v_i|} \quad (3.62)$$

Assim, S_m terá o mesmo sinal de S_m^2 .

Define-se a margem em MVA (ou pu de MVA) como a diferença do que está sendo injetado e a máxima estimativa do que poderia ser injetado, no ponto de operação em análise, portanto, a margem é definida inicialmente, como:

$$M_i = S_{m_i} - S_i \quad (3.63)$$

Porém, essa abordagem matemática traz um problema de interpretação do tamanho do índice. Esse problema é mais bem explicado com o exemplo a seguir.

Supondo dois casos com o mesmo valor de margem, como $M_1 = 1MVA$ e $M_2 = 1MVA$, mas $S_{i_1} = 99MVA$, $S_{m_1} = 100MVA$ e $S_{i_2} = 9MVA$, $S_{m_2} = 10MVA$. Percebe-se que M_1 é maior que M_2 , pois M_1 representa 1% do máximo, já M_2 representa 10% do máximo. Então para resolver esse problema de interpretação pondera-se a margem conforme a região de operação ao qual se encontra o sistema.

Caso a região seja a superior, ou seja, a região A de operação, tem-se em pu de S_{m_i} :

$$M_i = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_{m_i}} \quad (3.64)$$

Ou em percentual de S_{m_i} :

$$M_i = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_{m_i}} 100\% \quad (3.65)$$

Para esse caso a margem M é o percentual de S_m que ainda pode ser adicionado a S_i para atingir o máximo.

Caso a região de operação seja a inferior, ou seja, a região B de operação, tem-se em pu de S_i :

$$M_i = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_i} \quad (3.66)$$

Ou em percentual de S_i :

$$M_i = \frac{S_{m_i} - S_i}{S_i} 100\% \quad (3.67)$$

Para esse caso, a margem M é o percentual de S_i que deve ser retirado de S_i para atingir o máximo.

No máximo, o valor da margem será nulo ($M_i = 0$), pois $S_i = S_{m_i}$ e a sua diferença será igual a zero, portanto, não há nada a ser retirado ou acrescentado de S_i , para atingir o máximo.

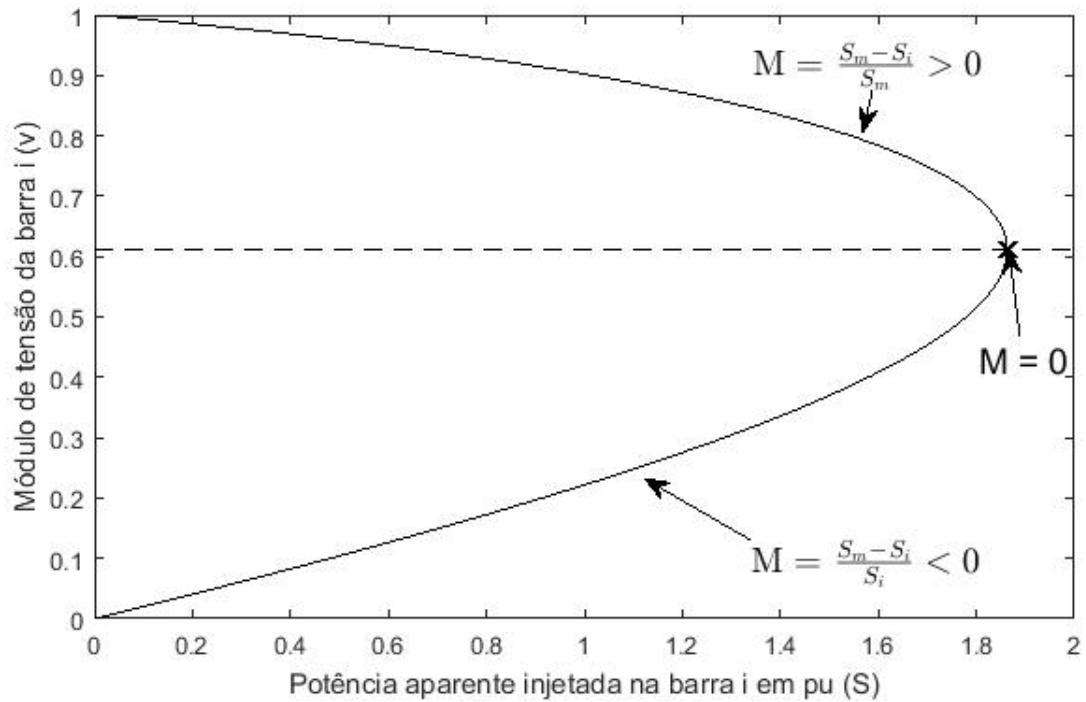


Figura 10: Região de operação e sinal do valor da margem

A todo o momento podem ocorrer eventos que alterem o ponto de operação do sistema, por isso existe um índice que mede a influência do evento $\#j$ que acontece sobre a margem da barra i do caso base denominado como índice de influência. Os eventos que podem acontecer são:

- aumento de carga;

- perda de controle de tensão;
- perda de ramo de transmissão;
- perda de gerador;
- alteração do perfil de tensão;
- redespacho de potência ativa;
- entre outros.

O índice de influência é definido como:

$$II_i^{\#j} = (\text{senal de } \beta_i^0) \frac{M_i^{\#j} - M_i^0}{M_i^0} \quad (3.68)$$

Onde:

- $II_i^{\#j}$ é o índice de influência na barra i após a ocorrência do evento $\#j$;
- β_i^0 é o valor do ângulo β da barra i no caso base;
- M_i^0 é a margem da barra i no caso base;
- $M_i^{\#j}$ é a margem da barra i após a ocorrência do evento $\#j$;

Se $II_i^{\#j}$ for positivo, o evento $\#j$ foi benéfico para a margem da barra i . Se $II_i^{\#j}$ for negativo, o evento $\#j$ foi prejudicial à margem da barra i e caso o $II_i^{\#j}$ seja nulo, o evento não afetou a margem da barra i .

O índice de influência avalia o quanto o evento que ocorreu distância a margem do caso base para cada barra do sistema. Há também o índice de influência do sistema que avalia o quanto o evento afetou o sistema. O $II_S^{\#j}$ é definido como:

$$II_S^{\#j} = \sum_{i=1}^{N_b} II_i^{\#j} \frac{S_{m_i}}{\max(S_m)} \quad (3.69)$$

Onde:

- S_{m_i} é a máxima potência injetada na barra i , limitada pela rede, no caso base.
- $\max(S_m)$ é o valor máximo entre todas as máximas potências injetadas, limitadas pela rede no caso base.

Se $II_S^{\#j}$ for positivo, o evento $\#j$ foi benéfico para o sistema. Se $II_S^{\#j}$ for negativo, o evento $\#j$ foi prejudicial ao sistema e caso o $II_S^{\#j}$ seja nulo, o evento não afetou o sistema.

3.5

Resumo do capítulo

Esse Capítulo apresenta conceitos do fenômeno da estabilidade de tensão. Mostra que um sistema tem uma máxima potência ativa que possa ser transmitida a uma barra de carga, mesmo com a compensação reativa, conhecido como *maximum maximorum*.

Em um sistema com o fator de potência constante, podem haver três tipos de solução para a tensão: duas soluções de tensão, ou uma solução de tensão ou nenhuma solução de tensão. O caso para apenas uma única solução é o caso que acontece o *maximum maximorum*. É apresentado o LEEA, que é o limite de estabilidade angular do sistema.

Verificou-se que o limite de estabilidade de tensão (LET) é a curva de máxima potência que pode ser transferida para a carga, a diversos valores de fator de potência.

Apresentou-se também um método para avaliar as condições de estabilidade de tensão denominado de matriz $[D']$. Mostrou-se o cálculo dessa matriz para o sistema mais simples de fluxo potência, com apenas uma barra *swing*, e no cálculo com múltiplas barras *swing*.

Com os valores encontrados pela matriz $[D']$, mostraram-se os índices de estabilidade de tensão, que servem para mostrar a região de operação e a "distância" entre o ponto de operação e a máxima potência injetada na barra, que é definido como a margem da barra i . E caso ocorra alguma alteração do ponto de operação foi mostrado como esse evento influencia naquele sistema, sendo ele benéfico ou não.

4

Esgotamento de recursos

O objetivo desse Capítulo é estudar o comportamento da rede em situações que há o esgotamento de potência ativa ou do controle de tensão (seja feita pelo gerador ou pelo tap do transformador).

Esse tipo de estudo é importante pois ele avalia como variações infinitesimais na carga, ou na geração, de uma barra influenciam a tensão dessa barra, ou seja, avalia o carregamento do ponto de vista de estabilidade de tensão.

Serão apresentados três tipos de esgotamentos:

- limite de geração de potência ativa;
- limite de geração de potência reativa;
- limite de variação do *tap* do LTC;

Serão utilizados dois exemplos para os cálculos. Serão feitas as seguintes etapas em cada exemplo:

1. Cálculo do fluxo de potência;
2. Cálculo dos índices de estabilidade de tensão;
3. Simulação dos esgotamentos de recurso;
4. Cálculo dos índices relativos a esgotamentos de recurso.

4.1

Modelagem dos esgotamentos

Os esgotamentos são aplicados nas barras que têm algum tipo de controle de tensão, ou seja, barras *swing*, PV e PQV. O esgotamento de potência ativa e reativa são aplicadas as barras *swing*, já o esgotamento de *tap* é feito para barras de tensão controlada por um LTC.

Na prática, o esgotamento ocorre quando algum recurso do sistema chega ao seu limite, ou um evento não deixe que haja algum tipo de variação sobre determinada grandeza.

Toda a análise é feita em sistemas com múltiplas barras *swing*.

4.1.1

Esgotamento de potência ativa

4.1.1.1

Barra V

Seja a barra b do tipo *swing*, sem ser de referência angular, portanto, o valor da potência ativa injetada na barra b (P_b) é desconhecido para o pré-esgotamento. Sendo assim, a equação de ΔP_b^* e a coluna de θ_b estão presentes no sistema linearizado. A equação de distribuição proporcional de perdas (g) com referência a ΔP_{G_b} e a coluna referente a ΔP_{G_b} são excluídas.

Nesse caso a barra b perde a capacidade de variar a sua potência ativa, então as variações infinitesimais da carga (ou gerador) devem ser absorvidas por outras barras *swing*. Portanto a barra b deixa de ser uma barra *swing* tendo que ser feitas as seguintes alterações matemáticas:

- substituir a equação de ΔP_b^* por ΔP_b ;
- excluir a equação de Δg ;
- excluir a coluna referente à variável ΔP_{G_b} ;
- recalcular os valores dos fatores de participação (α) excluindo a potência ativa do gerador da barra b.

4.1.1.2

Barra V θ

Para uma barra b que seja *swing* de referência angular, o esgotamento de potência ativa é feito para avaliar variações infinitesimais da carga em ΔP_i e ΔQ_i e seus efeitos em $\Delta \theta_i$ e Δv_i , quando a geração da barra b não pode absorver essas variações.

Como a potência ativa da barra b é constante no esgotamento de potência ativa, as equações referentes a ΔP_b^* , a coluna referente a variável ΔP_{G_b} e a equação de perdas (g) devem ser retiradas do sistema linearizado. Em compensação, a equação de ΔP_b deve ser inserida no sistema. Como a barra b perdeu a capacidade de absorver as variações de perdas ativas, outra barra j, que possa absorver as variações de potência ativa, deve ser escolhida como *swing* de referência angular. Portanto, o novo ângulo de referência passa a ser θ_j . Sendo assim, a coluna referente à θ_j deve ser retirada do sistema linearizado e a coluna de θ_b inserida no sistema. Portanto, as alterações no sistema linearizado são:

- substituir a equação de ΔP_b^* por ΔP_b ;

- excluir a coluna da variável $\Delta\theta_j$;
- incluir a coluna da variável $\Delta\theta_b$;
- excluir a equação de Δg ;
- excluir a coluna da variável ΔP_{G_b} ;
- recalcular os valores dos fatores de participação (α) excluindo a potência ativa do gerador da barra b.

4.1.2

Esgotamento de potência reativa

O esgotamento de potência reativa é feito para todas as barras que podem absorver as variações infinitesimais de potência reativa, mantendo a tensão em um valor controlado. As barras estudadas para esse tipo de esgotamento são: PV, V e V θ . Portanto, sendo a barra b em análise, a equação referente a ΔQ_b e a coluna referente a Δv_b não estão presentes no sistema linearizado[3].

4.1.2.1

Barras PV

Seja a barra b do tipo PV, da qual se deseja estudar o esgotamento de potência reativa. Nesse evento, a potência reativa da barra b não pode mais variar, ou seja Q_b é um valor fixo. Portanto o objetivo é estudar as variações infinitesimais da carga (ou em geração) em ΔP_i e ΔQ_i e os efeitos que elas causam em θ_i e v_i para a barra i. Como Q_b torna-se fixo, a equação de ΔQ_b e a coluna referente a v_b são inseridos no sistema linearizado. Tem-se:

- inserir a equação referente a ΔQ_b ;
- inserir a coluna referente a variável v_b

Do ponto de vista matemático, a análise do esgotamento de potência reativa em barras PV é transforma-la em barra PQ.

4.1.2.2

Em barra V

A análise na barra b que seja do tipo V (*swing*) é feita de maneira semelhante a barra PV. Deve-se inserir a equação referente a ΔQ_b e a coluna referente a variável Δv_b no sistema linearizado. Vale ressaltar que ao perder a capacidade de absorver as variações de potência reativa, a barra b não deixa de ser uma barra *swing*, pois para perder essa característica ela não deve mais conseguir absorver potência ativa. Portanto, tem-se:

- inserir a equação referente a ΔQ_b ;
- inserir a coluna referente a variável v_b

4.1.2.3

Barra $V\theta$

Seja a barra b do tipo $V\theta$ (*swing* de referência angular), a análise do esgotamento de potência reativa para esse tipo de barra é semelhante ao analisado dos casos anteriores. Portanto:

- inserir a equação referente a ΔQ_b ;
- inserir a coluna referente a variável v_b

Como não há o comprometimento da capacidade dessa barra em absorver as variações de potência ativa do sistema, essa barra não deixa de ser *swing* referência.

4.1.3

Esgotamento de *tap*

A análise de esgotamento de *tap* em um sistema elétrico é feito para um LTC que controle a tensão de uma barra m , conectado as barras k e m . Esse tipo de análise consiste no transformador perder a capacidade de ajustar o seu *tap* (a_{km})[3].

Para o caso de pré-esgotamento, a_{km} é uma incógnita do sistema linearizado, pois essa variável é a que mantém o valor de v_m constante. Então para o caso do esgotamento, a_{km} passa a ser fixo, deixando a tensão da barra m (v_m) como a nova variável do sistema, portanto:

- excluir a coluna referente a Δa_{km} ;
- inserir a coluna referente a variável v_m

4.2

Sistemas teste

São utilizados dois sistemas testes como exemplo, neles são feitas as seguintes etapas:

1. Cálculo do fluxo de potência;
2. Cálculo dos índices de estabilidade de tensão;
3. Simulação dos esgotamentos de recurso;
4. Cálculo dos índices relativos a esgotamentos de recurso.

O primeiro exemplo é o sistema-teste de seis barras e outro exemplo é o de trinta e quatro barras do CEPEL. Mais detalhes desses sistemas serão mostrados a seguir.

4.2.1

Sistema-teste de 6 barras

O sistema-teste de 6 barras é apresentado segundo na Figura 11 e os dados das barras e dos ramos de transmissão são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Nesse sistema, as barras 1, 5 e 6 são *swing*, sendo a barra 1 a de referência angular de tensão. As barras 2 e 4 são as barras de carga (PQ) do sistema elétrico e a barra 3 é uma barra de carga com controle de tensão (PQV) através de um LTC, que fica entre as barras 6 e 3.

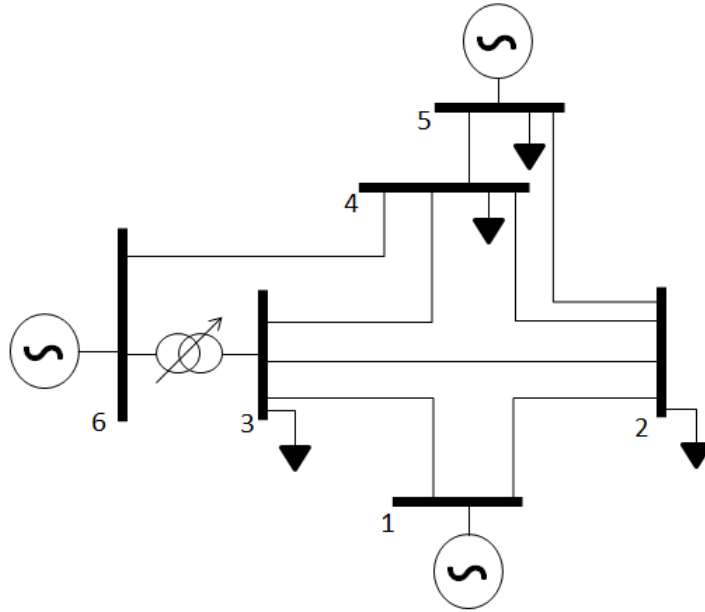


Figura 11: Sistema-teste de 6 barras

Tabela 2: Informações dos dados das barras para o sistema-teste de 6 barras

Barra	Tipo	$v(\text{pu})$	$\text{Ang}(^{\circ})$	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	P_D (MW)	Q_D (Mvar)
1	V θ	1,005	0	50	30	40	10
2	PQ	0,998	0	0	0	25	10
3	PQV	0,975	0	0	0	100	50
4	PQ	1,000	0	0	0	50	15
5	V	1,000	0	70	20	60	20
6	V	1,000	0	120	5	0	0

4.2.1.1

Fluxo de potência

O sistema linear para o caso de 6 barras é dado conforme (4.1).

Tabela 3: Informações dos dados dos ramos de transmissão para o sistema-teste de 6 barras

De barra	Para barra	R	X	B^{sh}
1	2	0,02	0,04	0,05
1	3	0,03	0,04	0,05
2	3	0,06	0,02	0,04
2	4	0,06	0,08	0,04
2	5	0,04	0,04	0,04
3	4	0,04	0,06	0,03
4	5	0,04	0,03	0,05
3	6	0,00	0,05	0,00
6	4	0,08	0,10	0,01
	a_{36}	=	1,00	

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_{15} \\ \Delta g_{56} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{12} & N_{14} & T_{13} & -1 & 0 & 0 \\ H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{22} & N_{24} & T_{23} & 0 & 0 & 0 \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{32} & N_{34} & T_{33} & 0 & 0 & 0 \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{42} & N_{44} & T_{43} & 0 & 0 & 0 \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{52} & N_{54} & T_{53} & 0 & -1 & 0 \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{62} & N_{64} & T_{63} & 0 & 0 & -1 \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{22} & L_{24} & W_{23} & 0 & 0 & 0 \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{32} & L_{34} & W_{33} & 0 & 0 & 0 \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{42} & L_{44} & W_{43} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_4 \\ \Delta a_{36} \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_5} \\ \Delta P_{G_6} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

O resultado encontrado no problema do fluxo de potência é apresentado na Tabela 6.

Tabela 4: Ponto de operação para o sistema-teste de 6 barras

Barra	Tipo	v (pu)	$\theta(^{\circ})$	P_G (MW)	Q_G (Mvar)
1	V θ	1,005	0,00	58,48	113,28
2	PQ	0,998	0,0018	0	0
3	PQV	0,975	1,2690	0	0
4	PQ	0,984	0,6181	0	0
5	V	1,000	-0,1212	81,88	72,39
6	V	1,000	3,9459	140,36	-95,10
		a_{36}	=	1,0664	

4.2.1.2

Índices de estabilidade de tensão

O cálculo dos índices de estabilidade de tensão é feito através do método da matriz $[D']$. Nesse tópico é demonstrado como se calcula os índices para as

barras 1, 2, 3 e 5. Para a barra 4, o método utilizado é análogo ao da barra 2 e a barra 6 é análogo a barra 5.

Como demonstrado em (3.3.6.2), o método da matriz $[D']$ para a barra *swing* de referência angular, que nesse caso é a barra 1, outra barra deve ser escolhida como referência angular, que possa absorver as variações da carga. Nesse caso a barra escolhida é a 5. Portanto, a matriz $[D']$ para a barra 1 é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_{56} \\ \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{26} & N_{22} & N_{24} & T_{23} & 0 & 0 & H_{21} & N_{21} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{36} & N_{32} & N_{34} & T_{33} & 0 & 0 & H_{31} & N_{31} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{46} & N_{42} & N_{44} & T_{43} & 0 & 0 & H_{41} & N_{41} \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{56} & N_{52} & N_{54} & T_{53} & -1 & 0 & H_{51} & N_{51} \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{66} & N_{62} & N_{64} & T_{63} & 0 & -1 & H_{61} & N_{61} \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{26} & L_{22} & L_{24} & W_{23} & 0 & 0 & M_{21} & L_{21} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{36} & L_{32} & L_{34} & W_{33} & 0 & 0 & M_{31} & L_{41} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{46} & L_{42} & L_{44} & W_{43} & 0 & 0 & M_{41} & L_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{16} & N_{12} & N_{14} & T_{13} & 0 & 0 & H_{11} & N_{11} \\ M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{16} & L_{12} & L_{14} & W_{13} & 0 & 0 & M_{11} & L_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_4 \\ \Delta a_{36} \\ \Delta P_{G_5} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta v_1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Já a matriz $[D']$ para a barra 2, que é uma barra de carga, fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_{15} \\ \Delta g_{56} \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{14} & T_{13} & -1 & 0 & 0 & H_{12} & N_{12} \\ H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{34} & T_{33} & 0 & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{44} & T_{43} & 0 & 0 & 0 & H_{42} & N_{42} \\ H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{54} & T_{53} & 0 & -1 & 0 & H_{52} & N_{52} \\ H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{64} & T_{63} & 0 & 0 & -1 & H_{62} & N_{62} \\ M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{34} & W_{33} & 0 & 0 & 0 & M_{32} & L_{32} \\ M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{44} & W_{43} & 0 & 0 & 0 & M_{42} & L_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{24} & T_{23} & 0 & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{24} & W_{23} & 0 & 0 & 0 & M_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_4 \\ \Delta a_{36} \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_5} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A barra 3, que é uma barra de controle de tensão através de um LTC é feito conforme (3.3.5), e fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_{15} \\ \Delta g_{56} \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{12} & N_{14} & -1 & 0 & 0 & H_{13} & N_{13} \\ H_{22} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{22} & N_{24} & 0 & 0 & 0 & H_{23} & N_{23} \\ H_{42} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{42} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & H_{43} & N_{43} \\ H_{52} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{52} & N_{54} & 0 & -1 & 0 & H_{53} & N_{53} \\ H_{62} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{62} & N_{64} & 0 & 0 & -1 & H_{63} & N_{63} \\ M_{22} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{22} & L_{24} & 0 & 0 & 0 & M_{23} & L_{23} \\ M_{42} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{42} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & M_{43} & L_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{32} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{32} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & H_{33} & N_{33} \\ M_{32} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{32} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & M_{33} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_5} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta v_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Como a barra 5 é do tipo *swing*, ela é tratada conforme (3.3.6.2), portanto:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_{16} \\ \Delta P_5 \\ \Delta Q_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{12} & H_{13} & H_{14} & H_{16} & N_{12} & N_{14} & T_{13} & -1 & 0 & H_{15} & N_{15} \\ H_{22} & H_{23} & H_{24} & H_{26} & N_{22} & N_{24} & T_{23} & 0 & 0 & H_{25} & N_{25} \\ H_{32} & H_{33} & H_{34} & H_{36} & N_{32} & N_{34} & T_{33} & 0 & 0 & H_{35} & N_{35} \\ H_{42} & H_{43} & H_{44} & H_{46} & N_{42} & N_{44} & T_{43} & 0 & 0 & H_{45} & N_{45} \\ H_{62} & H_{63} & H_{64} & H_{66} & N_{62} & N_{64} & T_{63} & 0 & -1 & H_{65} & N_{65} \\ M_{22} & M_{23} & M_{24} & M_{26} & L_{22} & L_{24} & W_{23} & 0 & 0 & M_{25} & L_{25} \\ M_{32} & M_{33} & M_{34} & M_{36} & L_{32} & L_{34} & W_{33} & 0 & 0 & M_{35} & L_{35} \\ M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{46} & L_{42} & L_{44} & W_{43} & 0 & 0 & M_{45} & L_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{16} & 0 & 0 \\ H_{52} & H_{53} & H_{54} & H_{56} & N_{52} & N_{54} & T_{53} & 0 & 0 & H_{55} & N_{55} \\ M_{52} & M_{53} & M_{54} & M_{56} & L_{52} & L_{54} & W_{53} & 0 & 0 & M_{55} & L_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_2 \\ \Delta v_4 \\ \Delta a_{36} \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta v_5 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Para a barra 5 vale ressaltar que todas as equações de controle g que pertenciam a barra 5 são retiradas.

Portanto, os índices de estabilidade de tensão calculados através do método da matriz $[D']$ são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Margem de potência e o β de cada barra para o sistema de 6 barras

Barra	Tipo	M(pu)	$\beta(^{\circ})$
1	V θ	0,9665	79,12 $^{\circ}$
2	PQ	0,9960	104,08 $^{\circ}$
3	PQV	0,9835	90,46 $^{\circ}$
4	PQ	0,9887	85,16 $^{\circ}$
5	V	0,9759	93,79 $^{\circ}$
6	V	0,8311	158,66 $^{\circ}$

4.2.1.3

Esgotamento de potência ativa

O esgotamento acontece quando a geração de potência ativa de uma barra chega ao seu limite, então para o exemplo do sistema de 6 barras, todas as barras com potência ativa livre (barras *swing*), terão suas gerações de potência ativa limitadas. Por exemplo, caso o estudo seja feito para a barra 5 e deseja-se calcular os índices de estabilidade de tensão para a barra 2, a matriz $[D']$, é calculada conforme a seção 4.1.1, por isso, a matriz $[D']$ fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5 \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_{16} \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{14} & T_{13} & -1 & 0 & H_{12} & N_{12} \\ H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{34} & T_{33} & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{44} & T_{43} & 0 & 0 & H_{42} & N_{42} \\ H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{54} & T_{53} & 0 & 0 & H_{52} & N_{52} \\ H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{64} & T_{63} & 0 & -1 & H_{62} & N_{62} \\ M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{34} & W_{33} & 0 & 0 & M_{32} & L_{32} \\ M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{44} & W_{43} & 0 & 0 & M_{42} & L_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{16} & 0 & 0 \\ H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{24} & T_{23} & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{24} & W_{23} & 0 & 0 & M_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_4 \\ \Delta a_{36} \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Observando a matriz $[D']$ encontrada nesse caso e comparando-a com o caso base no cálculo dos índices da barra 2, as principais diferenças encontradas entre elas são:

- Substituição da equação ΔP_5^* pela equação ΔP_5 ;
- Substituição das equações Δg_{15} e Δg_{56} pela equação Δg_{16} ;
- Exclusão da coluna referente à ΔP_{G_5} .

Vale ressaltar que ao fazer o estudo para a barra de referência, outra barra deve ser a escolhida como a nova barra de referência, que para esse sistema deve ser a barra 6, já que a barra 5 tem a sua geração de potência ativa limitada.

Os resultados encontrados para os índices são comparados ao caso base, através do índice de influência. O índice de influência para a barra 5 deve ser nulo, já que a matriz $[D']$ do esgotamento de potência ativa da barra 5 é exatamente igual para o caso base dos índices da barra 5.

4.2.1.4

Esgotamento de potência reativa

A análise é feita em uma barra, que originalmente tinha a sua geração de potência reativa livre para absorver as variações de potência reativa de outras barras de carga (ou geração). O esgotamento acontece quando essa barra perde a capacidade de absorver as variações de potência reativa, ou seja, a sua geração de potência reativa chegou ao seu limite. Então para o exemplo do sistema com 6 barras, as barras que tem a potência reativa livre são as barras *swing*, então caso a barra 5 tenha perdido a sua capacidade de absorver as variações de potência reativa das outras barras. Então o cálculo dos índices na barra 2 no esgotamento de potência reativa tem a matriz [D'] conforme apresentado em (4.1.2), portanto:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta Q_5 \\ \Delta g_{15} \\ \Delta g_{56} \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{14} & N_{15} & T_{13} & -1 & 0 & 0 & H_{12} & N_{12} \\ H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{34} & N_{35} & T_{33} & 0 & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{44} & N_{45} & T_{43} & 0 & 0 & 0 & H_{42} & N_{42} \\ H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{54} & N_{55} & T_{53} & 0 & -1 & 0 & H_{52} & N_{52} \\ H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{64} & N_{65} & T_{63} & 0 & 0 & -1 & H_{62} & N_{62} \\ M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{34} & L_{35} & W_{33} & 0 & 0 & 0 & M_{32} & L_{32} \\ M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{44} & L_{45} & W_{43} & 0 & 0 & 0 & M_{42} & L_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{24} & N_{25} & T_{23} & 0 & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{24} & L_{25} & W_{23} & 0 & 0 & 0 & M_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_4 \\ \Delta v_5 \\ \Delta a_{36} \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_5} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Como apenas a geração de potência reativa chegou ao limite, as equações de ΔP_5^* , Δg_{15} e Δg_{56} permanecem na matriz [D']. Portanto, as diferenças na matriz [D'] do esgotamento de potência reativa para o caso base em relação ao cálculo dos índices da barra 2, são:

- inserir a equação de ΔQ_5 ;
- inserir a coluna referente à v_5 .

Nesse caso, o estudo feito na barra 1, pode fazer com que a barra 5 seja a barra de referência angular, já que essa manteve a sua capacidade de absorver as variações de potência ativa.

Os resultados encontrados para os índices são comparados ao caso base, através do índice de influência. O índice de influência para a barra 5 deve ser nulo, já que a matriz [D'] do esgotamento de potência reativa da barra 5 é exatamente igual ao caso base dos índices da barra 5.

4.2.1.5

Esgotamento de *tap*

O esgotamento de *tap* acontece quando a um LTC chega ao seu limite de *tap*, ou seja, o *tap* não pode variar mais para fazer o controle de tensão de uma determinada barra. Caso o LTC entre as barras 3 e 6 não possa mais variar o seu *tap* no controle de tensão da barra 3, a matriz $[D']$ no cálculo dos índices da barra 2 é:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^* \\ \Delta P_3 \\ \Delta P_4 \\ \Delta P_5^* \\ \Delta P_6^* \\ \Delta Q_3 \\ \Delta Q_4 \\ \Delta g_{15} \\ \Delta g_{56} \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{13} & H_{14} & H_{15} & H_{16} & N_{13} & N_{14} & -1 & 0 & 0 & H_{12} & N_{12} \\ H_{33} & H_{34} & H_{35} & H_{36} & N_{33} & N_{34} & 0 & 0 & 0 & H_{32} & N_{32} \\ H_{43} & H_{44} & H_{45} & H_{46} & N_{43} & N_{44} & 0 & 0 & 0 & H_{42} & N_{42} \\ H_{53} & H_{54} & H_{55} & H_{56} & N_{53} & N_{54} & 0 & -1 & 0 & H_{52} & N_{52} \\ H_{63} & H_{64} & H_{65} & H_{66} & N_{63} & N_{64} & 0 & 0 & -1 & H_{62} & N_{62} \\ M_{33} & M_{34} & M_{35} & M_{36} & L_{33} & L_{34} & 0 & 0 & 0 & M_{32} & L_{32} \\ M_{43} & M_{44} & M_{45} & M_{46} & L_{43} & L_{44} & 0 & 0 & 0 & M_{42} & L_{42} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \alpha_{56} & 0 & 0 \\ H_{23} & H_{24} & H_{25} & H_{26} & N_{23} & N_{24} & 0 & 0 & 0 & H_{22} & N_{22} \\ M_{23} & M_{24} & M_{25} & M_{26} & L_{23} & L_{24} & 0 & 0 & 0 & M_{22} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_3 \\ \Delta \theta_4 \\ \Delta \theta_5 \\ \Delta \theta_6 \\ \Delta v_3 \\ \Delta v_4 \\ \Delta P_{G_1} \\ \Delta P_{G_5} \\ \Delta P_{G_6} \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

As diferenças entre a matriz $[D']$ de esgotamento de *tap* para a matriz $[D']$ do caso base são:

- Substituição da coluna referente a variável a_{36} por v_3 .

Os resultados encontrados para os índices são comparados ao caso base, através do índice de influência. O índice de influência na barra 3 deve ser nulo, já que a matriz $[D']$ do esgotamento de *tap* da barra 3 é exatamente igual para o caso base dos índices da barra 3.

4.2.1.6

Resultados

Nas seções (4.2.1.3), (4.2.1.4) e (4.2.1.5) foram demonstrados como funciona o cálculo da matriz $[D']$ para alguns tipos de esgotamentos. Nessa seção são mostrados e discutidos os resultados encontrados pelas seções anteriores.

Os resultados encontrados para os índices de influência, em porcentagem, para cada barra e do sistema são mostrados na Tabela 6. Nessa Tabela exclui-se os valores menores que 0,5% em módulo.

Vale ressaltar que para o esgotamento em uma barra, o índice de influência para o esgotamento sobre a própria barra é nulo. Isso acontece, pois a matriz $[D']$ é exatamente igual para os casos pré-esgotamento e pós-esgotamento.

Tabela 6: Resultado dos índices de influência de cada barra e do sistema para cada tipo de esgotamento no sistema de 6 barras

Barra	P1	P5	P6	Q1	Q5	Q6	T3
1		-1,00	-1,01			-0,51	-0,88
2							
3	-0,72		-0,57				
4							
5	-0,74					-1,05	
6	-5,53	-2,44			-12,33		9,72
II_s	-1,83	-1,62	-2,02	-0,16	-2,12	-0,99	0,92

O evento que mais prejudica uma barra é o esgotamento de potência reativa da barra 5 ($Q5$), que nesse caso, prejudica a barra 6, pois o II_6^{Q5} é o maior (em módulo) dentre todos os II apresentados em (6).

Tabela 7: Resultado para a máxima potência injetada descontada pelo resto da rede para cada barra do sistema de 6 barras

Barra	S_m
1	31,35
2	67,29
3	68,02
4	46,31
5	23,60
6	10,04

Na Tabela 7 mostram-se os valores da máxima injeção, já aplicada o desconto da influência da rede naquela barra. Como a barra 6 tem o menor S_m . O esgotamento de recurso que mais afeta o sistema é o $Q5$, pois seu II_s é o maior (em módulo) entre todos os esgotamentos. Isso ocorre, pois mesmo S_m da barra sendo o menor, esse esgotamento foi muito prejudicial à barra, tendo que o sistema tenha sido o mais prejudicado.

4.2.2

Sistema CEPEL-34

Na Figura 12 mostra-se o segundo exemplo a ser analisado, o diagrama unifilar do sistema de 34 barras do CEPEL, que é baseado em um equivalente do sistema S/SE brasileiro. Nesse sistema, as barras 1, 31, 32, 33 e 34 são barras *swing*, sendo a última como a barra de referência angular. A barra 26 representa um equivalente de rede de um sistema real de grande porte, por isso não é feita a análise de estabilidade de tensão para ela. As barras 2, 3, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 24, 27, 28 e 30 são barras de passagem e por isso não é feita a análise de estabilidade de tensão para elas.

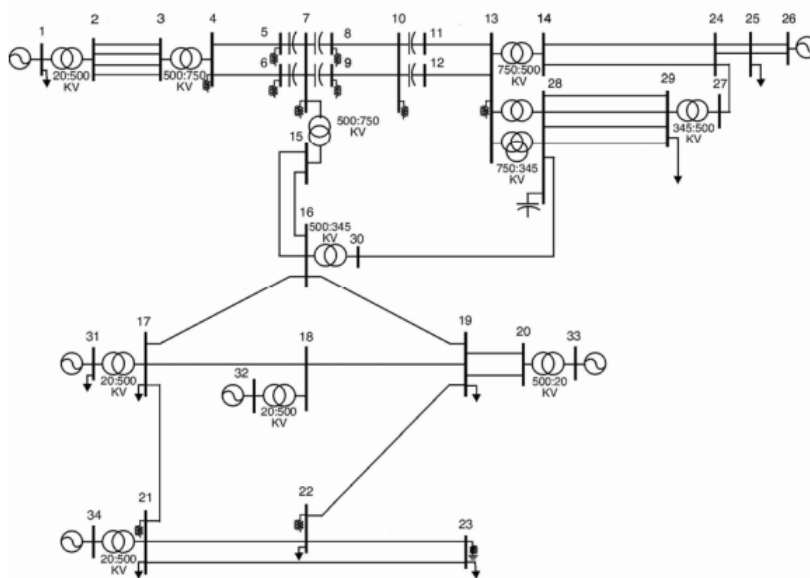


Figura 12: Diagrama unifilar do sistema de 34 barras do CEPEL

Os dados das barras e linhas dos sistemas são apresentados no apêndice A.

Nesse tópico são apresentados o ponto de operação, os índices de estabilidade de tensão e os esgotamentos para o sistema de 34 barras do CEPEL.

4.2.2.1

Fluxo de potência

O ponto de operação é encontrado através do cálculo do fluxo de potência para o sistema com múltiplas barras *swing*, então no caso de 34 barras o ponto de operação é demonstrado na Tabela 8.

4.2.2.2

Índices de estabilidade de tensão

Os índices de estabilidade de tensão calculados através do método da matriz $[D']$ são apresentados nesse sistema na Tabela 9.

Dentre todas as barras desse sistema, aquela que apresenta a pior margem de estabilidade de tensão é a barra 1, que é uma barra *swing*. Essa barra é chamada de barra crítica do sistema. Analisando apenas as barras de carga, a barra 29 é a que apresenta uma menor margem do sistema de potência, sendo a barra de carga crítica de carga.

Tabela 8: Ponto de operação para o sistema de 34 barras

Barra	Tipo	$v(\text{pu})$	$\theta(^{\circ})$	$P_g(\text{MW})$	$Q_g(\text{Mvar})$
1	V	1,030	4,1108	3300,42	1131,89
2	PQ	1,012	-2,3269	0	0
3	PQ	1,011	-2,5522	0	0
4	PQ	0,952	-5,7851	0	0
5	PQ	0,916	-25,9966	0	0
6	PQ	0,915	-25,9248	0	0
7	PQ	0,932	-17,7815	0	0
8	PQ	0,987	-4,3467	0	0
9	PQ	0,987	-4,3509	0	0
10	PQ	0,907	-31,8725	0	0
11	PQ	0,922	-14,7394	0	0
12	PQ	0,922	-14,7385	0	0
13	PQ	0,883	-49,5402	0	0
14	PQ	0,966	-55,5056	0	0
15	PQ	0,953	-12,7131	0	0
16	PQ	0,879	-12,3138	0	0
17	PQ	0,999	9,7031	0	0
18	PQ	1,037	9,9157	0	0
19	PQ	1,050	9,9157	0	0
20	PQ	1,052	5,3022	0	0
21	PQ	1,074	13,4825	0	0
22	PQ	1,075	9,2998	0	0
23	PQ	1,067	5,3529	0	0
24	PQ	1,037	-63,1736	0	0
25	PQ	1,093	-65,4654	0	0
26	PV	1,100	-64,6752	3879	1363,0
27	PQ	0,991	-63,1640	0	0
28	PQ	0,951	-58,6524	0	0
29	PQ	0,879	-63,7496	0	0
30	PQ	0,929	-16,5759	0	0
31	V	1,007	18,0065	1320,17	-142,27
32	V	1,058	16,5952	1200,15	412,57
33	V	1,059	12,5997	1200,15	477,92
34	$V\theta$	1,049	22,3000	1444,19	390,50

4.2.2.3

Esgotamento de recursos

A análise é feita nos esgotamentos de potência ativa e reativa das barras *swing*. Na Tabela 10 pode-se observar os índices de influência que cada evento de esgotamento gera nas barras e no sistema de forma geral.

Tabela 9: Índices de estabilidade de tensão para o sistema de 34 barras do CEPEL

Barra	Tipo	v(pu)	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$
1	V	1,030	-467,	-12
4	PQ	0,952	100	152
7	PQ	0,932	100	172
10	PQ	0,907	100	176
13	PQ	0,883	100	178
17	PQ	0,999	100	78
19	PQ	1,050	88	102
21	PQ	1,074	100	44
22	PQ	1,075	100	91
23	PQ	1,067	86	111
25	PQ	1,093	27	178
26	PV	1,100	-177	-130
29	PQ	0,879	5	178
31	V	1,007	6	1
32	V	1,058	73	52
33	V	1,059	62	43
34	V θ	1,049	49	35

Tabela 10: Esgotamento de recursos de potência ativa e reativa nas barras *swing* do sistema de 34 barras

Barra	Q1	Q31	Q32	Q33	Q34	P1	P31	P32	P33	P34
1		-71,77	-21,05	-36,84	-16,85		2,38	2,18	2,29	-2,90
4										
7										
10										
13										
17		-55901,70								
19	4,44	-457,53	-6,58	-18,94	-11,83	-3,99			-0,88	-7,69
21		-488063,28								
22		-231898,36								
23	0,58	-858,44	-1,36	-4,04	-16,40	-1,35				-8,92
25	-2153,82	-110,21	-39,23	-63,87	-15,82	-19,41	3,26	2,52	1,79	13,77
29	-4175,78	-106,57	-48,88	-72,49	-14,23	-31,15	5,29	4,11	2,98	30,70
31	1157,32		-11929,22	-16374,32	-6648,52	-4678,14		365,03	288,47	273,67
32	9,92	29,08		-1411,00	-1089,85	-12,74				-12,29
33	26,72	49,63	-1161,10		-658,94	-72,88	3,17	2,01		-12,96
34	32,21	-1208,93	-110,49	-610,13		10,67	-1,40	-1,34	-1,50	
Ils(%)	-451,34	-871,36	-7,97E+12	-574,49	-858,12	11,85	-196,74	0,79	14,01	10,41

Então, o esgotamento que mais afeta o sistema de 34 barras do CEPEL é perca de capacidade da barra 31 em absorver as variações de potência reativa da carga (ou geração), ou seja, a barra 31 perder a capacidade de geração de potência reativa.

Ordenando os esgotamentos mais influentes sobre a margem de potência,

resulta-se na Tabela 11

Tabela 11: Índices de influência no sistema de 34 barras do CEPEL ordenado pela severidade do esgotamento.

Esgotamento	II_S
Q32	$-7,97 \bullet 10^{12}$
Q31	-871,36
Q34	-858,12
Q33	-574,49
Q1	-451,34
P31	-196,74
P33	14,01
P1	11,85
P34	10,41
P32	0,79

4.3

Resumo do capítulo

O ponto de operação do sistema elétrico apresenta índices de estabilidade de tensão: M (Margem de potência) e β que são associados entre si. Esses índices podem indicar que há um problema no sistema, porém sem identificar o que ocasiona esse problema, por isso o estudo de esgotamento de recursos é importante, juntamente com o cálculo de índices de influência, pois nesses estudos é identificado o que mais pode prejudicar o sistema em caso de uma perda real de recurso.

Nesse Capítulo foram utilizados dois exemplos distintos para o estudo do esgotamento: sistema teste de 6 barras e o sistema de 34 barras do CEPEL. No primeiro sistema, os índices encontrados são bons e os estudos de esgotamento mostram a falta de recursos que mais podem afetar o sistema. Já o segundo exemplo é o sistema de 34 barras do CEPEL índices muito ruins, tendo barras operando na região B do plano SV.

Toda a análise feita é essencial, pois para sistemas em que as barras apresentem índices ruins, devem ser tomadas ações de controle para que não haja nenhum problema de estabilidade de tensão.

5

Ação de controle preventiva

5.1

Introdução

Pelo exemplo apresentado na Seção (4.2.2), do sistema elétrico de 34 barras do CEPEL, percebe-se que cada barra tem sua própria margem de estabilidade de tensão. Tendo esse dado, pode-se definir a barra crítica do sistema, ou seja, a barra que apresenta o menor valor de margem. Porém essa margem, que já era pequena, pode ser tornar menor ainda, basta que aconteça algum tipo de evento no sistema que a prejudique, ou seja, o índice de influência daquele evento sobre aquela barra seja negativo.

Esse capítulo mostra um meio para que se tenha uma melhora nos índices de estabilidade de tensão daquele sistema e para isso acontecer, deve-se, a princípio, realizar uma ação de controle na melhoria da margem da barra crítica em cima da variável do esgotamento que mais afeta essa barra. Sendo assim, a margem da barra crítica melhora após a tomada de ação de controle em relação ao caso base.

As etapas para o procedimento de ação de controle são:

1. Cálculo do ponto de operação do sistema;
2. Cálculo dos índices de estabilidade de tensão;
3. Simulação dos esgotamentos de recursos;
4. Cálculo dos índices de influência para cada tipo de esgotamento;
5. Cálculo das ações de controle preventivas;
6. Execução das ações de controle preventiva (atuando sobre a tensão, ou sobre a potência ativa dos geradores ou em ambos em conjunto);
7. Análise do efeito das ações de controle preventiva.

A execução das ações de controle é feita de duas maneiras distintas. Uma delas é atuando sobre as variáveis de maneira manual, ou seja, mapeando todas as soluções possíveis através de variações discretas na tensão ou no gerador de

potência ativa. O outro método é a busca pelo novo ponto de operação através de algoritmos genéticos.

5.2

Ações de controle preventiva de potência reativa

Inicialmente, seja um esgotamento de geração de potência reativa em uma barra b que influencia a barra i , espera-se que quanto maior for o $II_i^{Q_b}$, maior será o efeito da geração da potência reativa da barra b (Q_{G_b}) sobre a margem de potência da barra i (M_i), por isso é possível manipular Q_{G_b} para acrescentar M_i . Sendo assim, alterar o ponto de operação do sistema tendo em base uma ação de controle preventiva em cima da geração da potência reativa da barra b , deve alterar M_i . No problema de fluxo de potência, Q_{G_b} não está inserido diretamente, por isso a alteração é feita no módulo da tensão da barra b (v_b).

As ações de controle preventivas de potências reativas são aplicadas as barras com potência reativa livre para variar e a implicação delas em barras de carga e em barra de geração.

5.2.1

Barra de carga

As ações de controle preventiva reativa aplicada em barra de carga tem a função de aumentar a margem da barra de carga, alterando a potência reativa das barras de tensão controlada. O problema de fluxo de potência não permite a alteração direta da potência reativa, então a alteração é feita nas tensões das barras de tensão controlada. Para melhor exemplificar, será utilizado o sistema de 34 barras do CEPEL.

Após os cálculos dos índices de estabilidade de tensão, demonstrados em (4.2.2), nota-se que, entre as barras de carga, a margem da barra 29 é a menor ($M_{29} = 5,25\%$ e $\beta = 178,51^\circ$). Na Tabela 10, nota-se que o esgotamento de potência reativa que mais afeta a barra 29 é o esgotamento da barra 1 (Q_{G_1}), com $II_{29}^{Q_1} = -4175,78\%$.

Para aumentar o valor da margem da barra crítica, modifica-se as tensões das barras 1, 31, 32, 33 e 34. A variação da tensão é feita em degraus de 0,01 pu da tensão original (aumentando ou diminuindo) e variando apenas uma barra por vez.

Na Tabela 12 e na Figura 13 mostra-se o efeito da ação de controle preventiva sobre margem de potência da barra 29, conforme a tensão da barra 1 é alterada.

A ação de controle "0" é a que equivale ao caso base do sistema.

Tabela 12: Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência reativa (tensão) da barra 1

Ação	v_1	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^\circ)$
1	0,95	-	-
6	1	-	-
0	1,03	5	178
11	1,05	26	167
16	1,1	39	158
21	1,15	45	150
26	1,2	49,53	145
31	1,25	53	141
36	1,3	55	138
41	1,35	57	135
46	1,4	59	133
51	1,45	60	130

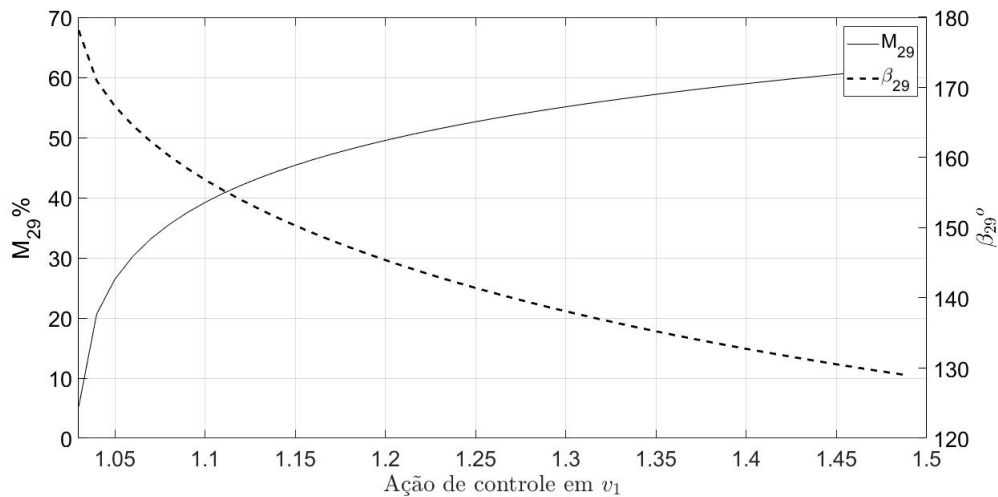


Figura 13: Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência reativa (tensão) da barra 1

Na Tabela 12 mostram-se alguns valores para as margens encontradas, sujeitas a variação de 0,01 pu da tensão da barra 1. O símbolo "-" indica que o fluxo não convergiu para aquele caso.

Na Figura 13 o eixo vertical da esquerda representa os valores de margem de potência para a barra 29, enquanto o eixo vertical da direita se remete a valor de β da barra 29. Já o eixo horizontal representa os valores de tensão para a barra 1. Na Figura 13 e na Tabela 12, nota-se que conforme a tensão da barra 1 aumenta, a margem da barra 29 também aumenta e o β da barra 29 diminui.

O mesmo processo também é aplicado as demais barras *swing* do sistema.

O resultado é apresentado na Tabela 13 e na Figura apresentada em (14).

Tabela 13: Ações de controle preventiva sobre margem de potência da barra 29, atuando na potência reativa (tensão) das barras *swing*, exceto a barra 1

Ação	v_{31}	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$	Ação	v_{32}	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$
1	0,947	-	-	1	0,948	-	-
6	0,997	-	-	6	0,998	-	-
0	1,007	5	178	11	1,048	-	-
11	1,047	20	171	0	1,058	5	178
16	1,097	27	167	16	1,098	18	172
21	1,147	31	164	21	1,148	25	169
26	1,197	35	161	26	1,198	29	166
31	1,247	37	159	31	1,248	32	164
36	1,297	40	157	36	1,298	34	162
41	1,347	41	155	41	1,348	36	160
46	1,397	43	154	46	1,398	38	158
51	1,447	45	152	51	1,448	40	157

Ação	v_{33}	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$	Ação	v_{34}	$M_{29}(\%)$	$\beta_{29}(^{\circ})$
1	0,949	-	-	1	0,949	-	-
6	0,999	-	-	6	0,999	-	-
11	1,049	-	-	10	1,039	-	-
0	1,059	5	178	0	1,049	5	178
16	1,099	19	172	16	1,099	17	173
21	1,149	26	168	21	1,149	22	170
26	1,199	30	165	26	1,199	25	168
31	1,249	33	162	31	1,249	28	166
36	1,299	36	160	36	1,299	30	165
41	1,349	38	158	41	1,349	32	164
46	1,399	40	157	46	1,399	34	162
51	1,449	42	155	51	1,449	36	161

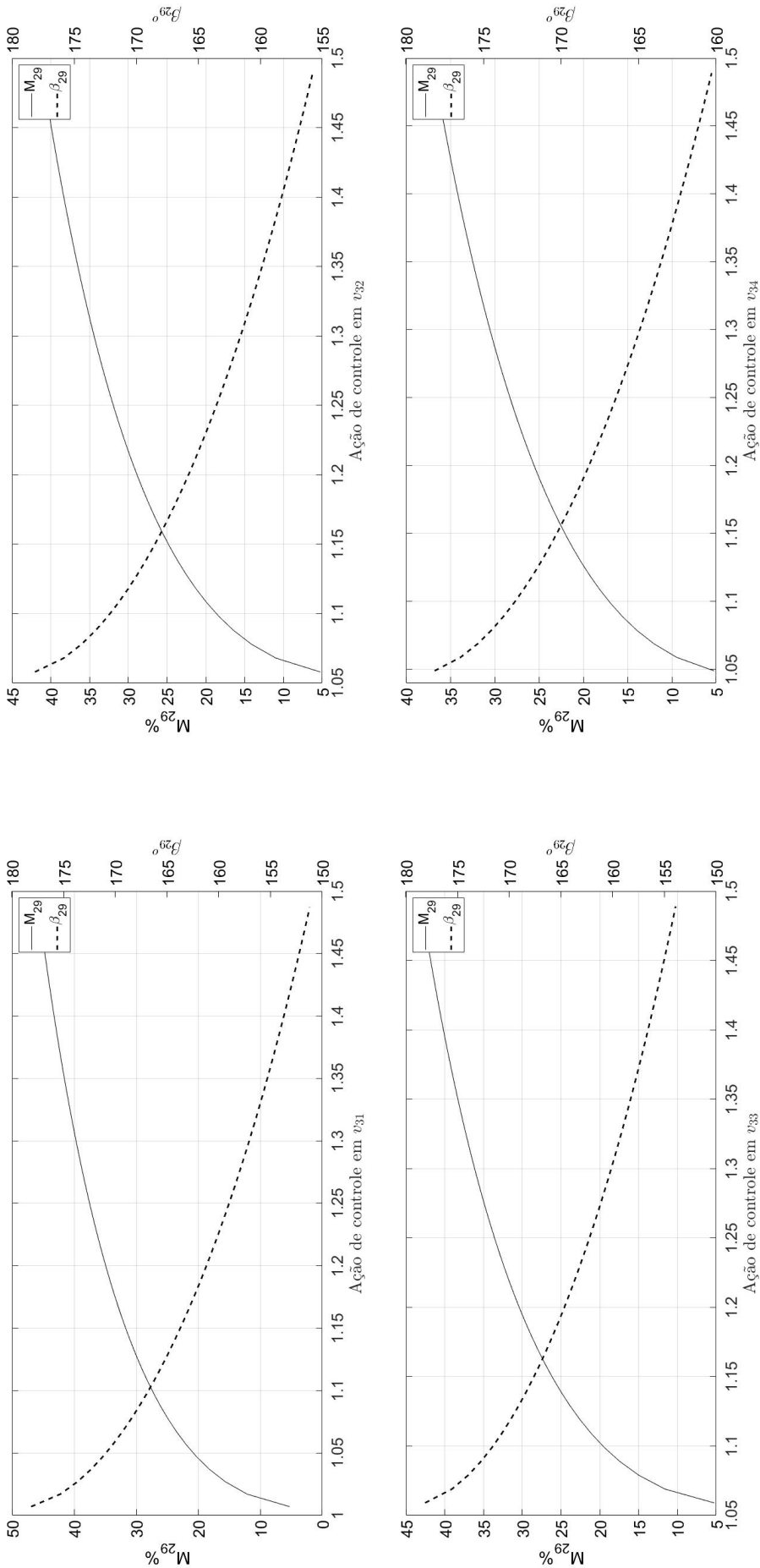


Figura 14: Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência reativa (tensão) das barras *swing*

Os dados apresentados na Tabela 10 mostram que o esgotamento que mais influência na barra 29 é a perda de reativo da barra 1 e na Figura 12 mostra-se que conforme se aumenta a tensão da barra 1, maior é a margem de potência da barra 29, sendo assim maior dos que encontrados pela variação da tensão das demais barras *swing*. Na Tabela 14 mostra os esgotamentos de potência reativa que mais influenciam a margem da barra 29.

Tabela 14: Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência reativa para a barra 29

Esgotamento	II
II_{29}^{Q1}	-4175,78
II_{29}^{Q31}	-106,57
II_{29}^{Q33}	-72,49
II_{29}^{Q32}	-48,88
II_{29}^{Q34}	-14,23

Pelos resultados obtidos, chega-se à conclusão que conforme maior o índice de influência do esgotamento (em módulo), o aumento de tensão nessa barra provocará um maior aumento na margem de potência da barra analisada. Exemplificando, para a tensão aproximada de 1,2 pu em cada ação de controle preventiva, a margem da barra 29 é mostrada na Tabela 15.

Tabela 15: Margem de potência da barra 29 a tensão aproximada de 1.2 pu em cada barra *swing* do sistema de 34 barras

Barra	$M_{29}(\%)$
1	49
31	35
33	30
32	29
34	25

Portanto, existe uma relação direta entre o índice de influência sobre a barra 29 e a margem de potência dessa barra, ou seja, quanto maior o índice de influência do esgotamento de geração de potência reativa de uma barra *swing* sobre a barra em análise, maior o efeito da variação da tensão da barra *swing* na margem da barra em análise [3].

5.2.2 Barra de geração

A metodologia feita para a ação de controle de potência reativa para uma barra de geração é análoga a feita para a análise de controle de potência reativa para uma barra de carga. Portanto, utilizando o sistema de 34 barras

do CEPEL como exemplo, a barra de geração que apresenta a pior margem de potência, é a barra 1 ($M_1 = -467,96 \%$), logo, as ações de controle preventivas de potência reativa serão feitas para melhorar a margem da barra 1.

Na Tabela 10 é observado que o esgotamento de potência reativa que mais afeta a margem da barra 1 é o da barra 31 ($II_{Q31}^1 = -71,77$). Porém, para a barra de carga, altera-se a tensão das barras diferentes a barra em análise, como a barra crítica do sistema é a barra 1 e é uma barra *swing*, também será alterada a tensão da própria barra em análise, que é a primeira estratégia abordada para esse caso.

Na Tabela 16 e na Figura 15 mostram-se os valores de margem de potência para a barra 1 ao variar sua tensão entre 0,95 pu até 1,5 pu (aproximadamente). Na Tabela 16 a ação demonstrada como "0" equivale ao caso base do sistema e apenas alguns resultados são apresentados.

Tabela 16: Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência reativa (tensão) da própria barra 1

Ação	v_1	$M_1(\%)$	$\beta_1(^{\circ})$
1	0,95	-	-
6	1	-	-
0	1,03	-468	-12
11	1,05	-195	-70
16	1,1	-31	-82
20	1,14	4	57
21	1,15	9	72
26	1,2	23	82
31	1,25	31	84
36	1,3	37	85
41	1,35	41	86
46	1,4	44	87
51	1,45	46	87

Na Figura 15 observa-se o gráfico de evolução do valor de M_1 conforme se aumenta v_1 . O eixo vertical da esquerda são os valores de M_1 e o eixo vertical da direita representa os valores de β_1 . Os valores de v_1 são apresentados pelo eixo horizontal. A linha tracejada são os valores de β_1 e a linha continua representa os valores de M_1 .

Inicialmente, a margem de potência da barra 1 é negativa para esse sistema, portanto espera-se que a ação de controle leve a margem da barra 1 de negativo para positivo e o β_1 se afaste do ângulo crítico (0°). Quando a tensão da barra é igual a 1,14 ($v_1 = 1,14$) tem-se o primeiro ponto de operação do qual M_1 é positivo ($M_1 = 4,31\%$). Na Figura 15 nota-se que até o primeiro ponto de antes M_1 se tornar positivo, M_1 cresce enquanto β_1 diminui, mas se

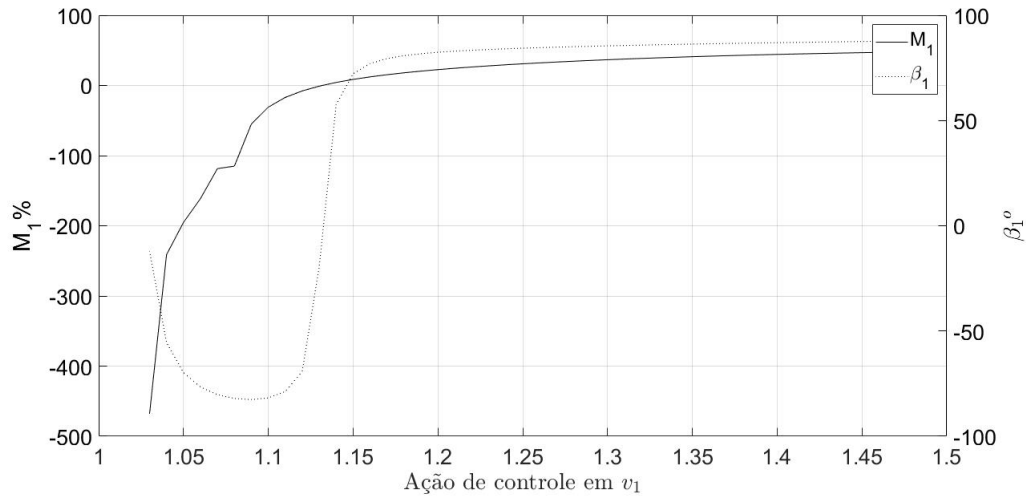


Figura 15: Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência reativa (tensão) da própria barra 1

afasta de 0° , mas quando M_1 se torna positivo, ambos (M_1 e β_1) passam a aumentar juntos e β_1 também se afasta de 0° . Portanto, o objetivo inicial de elevar M_1 e afastar β_1 do ângulo crítico foi atingido para essa ação de controle preventiva.

As demais ações de controle preventivas de potência reativa dos geradores são mostradas na Tabela 17 e na Figura 16.

Tabela 17: Ações de controle preventiva sobre margem de potência da barra 1, atuando na potência reativa (tensão) das barras *swing*, exceto a barra 1

Ação	v_31	M_1 (%)	$\beta_1(^{\circ})$	Ação	v_32	M_1 (%)	$\beta_1(^{\circ})$
1	0,947	-	-	1	0,948	-	-
6	0,997	-	-	6	0,998	-	-
0	1,007	-468	-12	11	1,048	-	-
11	1,047	-247	-55	0	1,058	-468	-12
16	1,097	-196	-73	16	1,098	-263	-49
21	1,147	-162	-80	21	1,148	-214	-68
26	1,197	-127	-82	26	1,198	-184	-76
31	1,247	-163	-82	31	1,248	-159	-80
36	1,297	-80	-80	36	1,298	-133	-82
41	1,347	-52	-76	41	1,348	-270	-83
46	1,397	-37	-71	46	1,398	-116	-82
51	1,447	-28	-64	51	1,448	-75	-80
Ação	v_33	M_1 (%)	$\beta_1(^{\circ})$	Ação	v_34	M_1 (%)	$\beta_1(^{\circ})$
1	0,949	-	-	1	0,949	-	-
6	0,999	-	-	6	0,999	-	-
11	1,049	-	-	0	1,049	-468	-12
0	1,059	-468	-12	16	1,099	-278	-45
16	1,099	-254	-53	21	1,149	-237	-61
21	1,149	-203	-71	26	1,199	-212	-71
26	1,199	-171	-79	31	1,249	-194	-77
31	1,249	-142	-82	36	1,299	-178	-80
36	1,299	-361	-83	41	1,349	-164	-83
41	1,349	-115	-82	46	1,399	-150	-84
46	1,399	-70	-79	51	1,449	-134	-84
51	1,449	-49	-75	56	1,499	-107	-84

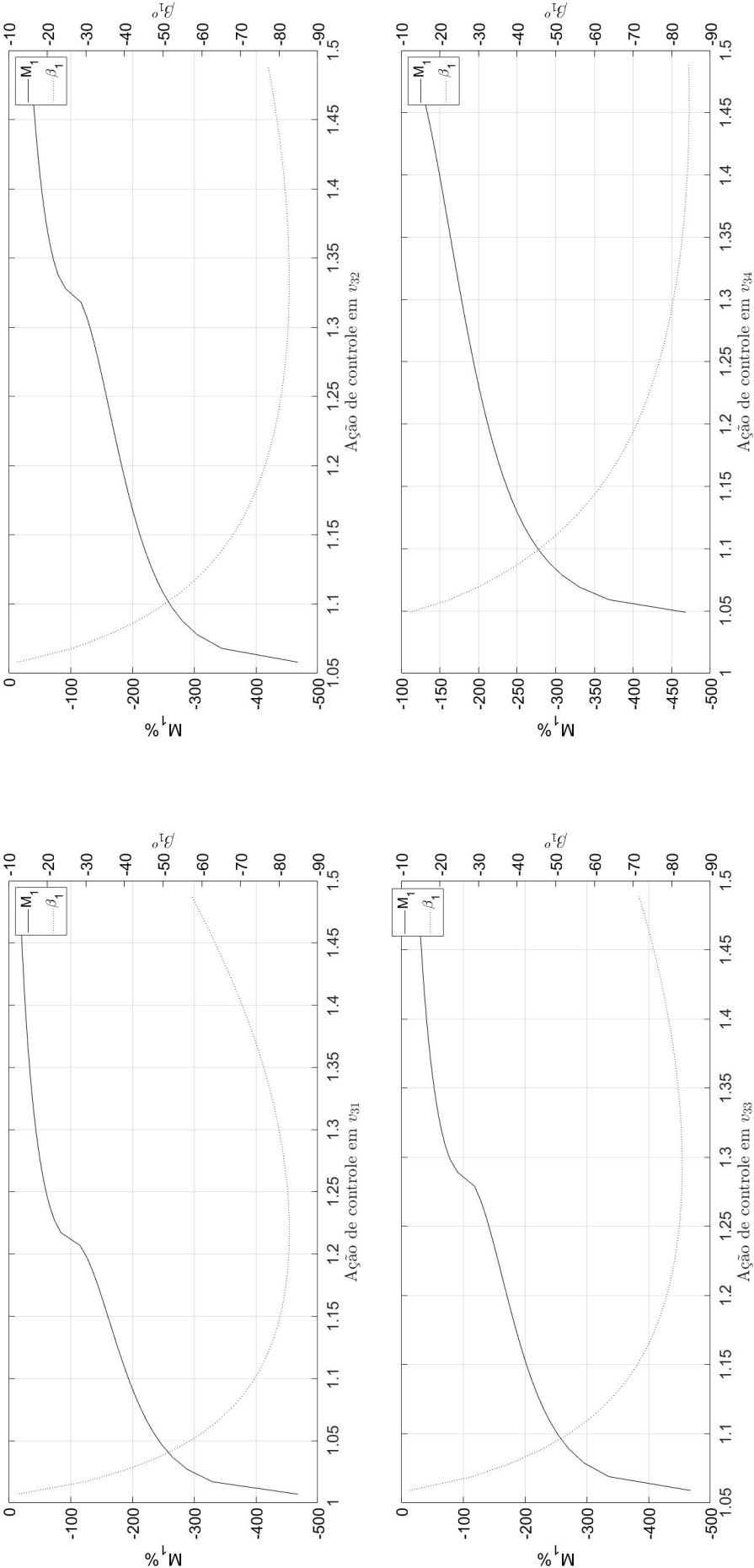


Figura 16: Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência reativa (tensão) das barras *swing*, exceto a barra 1

Os eixos dos gráficos mostrados em (16) obedecem a mesma configuração apresentada na Figura 15.

Na Tabela 17 e na Figura 16, nenhum dos 4 casos consegue elevar M_1 até ser positivo, apesar de seu valor aumentar e β_1 também se afastar do valor crítico (0°). Portanto, a variação de tensão das barras *swing* - excluindo a barra 1 - não obtém o resultado inicialmente desejado.

Tabela 18: Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência reativa para a barra 1 - excluindo a própria barra 1

Esgotamento	II
II_1^{Q31}	-71,774
II_1^{Q33}	-36,84
II_1^{Q32}	-21,054
II_1^{Q34}	-16,854

Observa-se que na Tabela 17 e na Tabela 18, conforme maior o índice de influência do esgotamento de geração de potência reativa, o aumento da tensão proporciona um aumento maior em M_1 . Por exemplo, para a tensão aproximada de 1,2 pu em cada ação de controle preventiva, a margem da barra 1 é mostrada na Tabela 19.

Tabela 19: Margem de potência da barra 1 a tensão aproximada de 1.2 pu em cada barra *swing* do sistema de 34 barras - exceto a barra 1

Barra	$M_1(\%)$
31	-127
33	-171
32	-184
34	-212

Portanto, existe uma relação direta entre o índice de influência sobre a barra 1 e a margem de potência dessa barra, ou seja, quanto maior o índice de influência do esgotamento de geração de potência reativa de uma barra *swing* na barra em análise, maior o efeito da variação da tensão da barra *swing* sobre a margem da barra em análise.

Porém o II_1^{Q1} é nulo e a variação de tensão dessa barra é a que mais afeta M_1 ($v_1 = 1.2$, $M_1 = 22,57$). Então, há uma limitação ao método aplicado, pois o índice de influência calculado sobre a mesma barra sempre será nulo, porém a variação de sua tensão afetará mais a sua margem de potência. Entretanto, nos demais casos, o II é útil para indicar quais medidas devem ser tomadas [3].

5.3

Ações de controle preventiva de potência ativa

As ações de controle preventiva voltadas para a geração de potência ativa não podem ser feitas individualmente para cada barra de geração, pois a geração de energia deve-se manter constante, portanto, se uma barra *swing* está aumentando a sua geração de potência ativa, outras barras *swing* devem reduzir a sua geração de potência ativa, para poder compensar o aumento da primeira barra *swing*. Esse tipo de ação de controle preventiva é um conjunto de intervenções coordenadas [3].

5.3.1

Barra de carga

Seja uma barra b uma barra de carga (barra PQ) e o esgotamento de geração de potência ativa em uma barra *swing* (barra i) influencie a margem de potência dessa barra b (M_b), então ao alterar P_{G_i} , M_b também será alterado. Assim como para as ações de controle preventiva de potência reativa, espera-se que nas ações de controle preventiva de potência ativa, quanto maior for o índice de influência do esgotamento ativo da barra i na barra b ($II_b^{P_i}$), maior será o efeito da variação de P_{G_i} em M_b .

Como a barra 29 é a que apresenta a menor margem de potência entre as barras de carga ($M_{29} = 5,25\%$ e $\beta = 178,51^\circ$), e na Tabela 10, nota-se que o esgotamento de potência ativa que mais afeta essa barra é o esgotamento geração de potência ativa da barra 1 (P_{G_1}), com $II_{29}^{P_1} = -31,15\%$.

Portanto, a ação de controle preventiva de geração de potência ativa visa mudar o ponto de operação de tal modo que ao alterar P_{G_1} , M_{29} seja modificado. Porém, para se alterar P_{G_1} as demais barras *swing* devem compensar essa alteração, para que a potência ativa total do sistema não se altere. Então, a divisão de compensação entre as demais barras *swing* é feita através dos índices de influência do esgotamento de potência ativa para a barra 29. O primeiro passo é verificar o sinal desses índices. Nesse caso, o sinal de $II_{29}^{P_1}$ é positivo e oposto aos sinais de $II_{29}^{P_{31}}$, $II_{29}^{P_{32}}$, $II_{29}^{P_{33}}$ e $II_{29}^{P_{34}}$, logo as gerações de potência ativa das barras 31, 32, 33 e 34 devem compensar as variações da barra 1. Na Tabela 20 mostram-se os valores dos II para o esgotamento de potência ativa das barras *swing*.

A alocação de potência ativa é feita separando as barras *swing* em dois conjuntos: Ω_e e Ω_r . Em Ω_e estão os N_e elementos de geração de potência ativa que tenham o seu II com o mesmo sinal do esgotamento de potência ativa mais significativo para a barra i , ou seja, Ω_e contém a barra cujo o esgotamento de potência ativa mais influência a barra i e todas as demais barras *swing* que

Tabela 20: Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência ativa para a barra 29

Esgotamento	II
II_{29}^{P1}	-31,15
II_{29}^{P34}	30,70
II_{29}^{P31}	5,29
II_{29}^{P32}	4,11
II_{29}^{P33}	2,98

o II tem o mesmo sinal do maior esgotamento de potência ativa [3]. Já Ω_r contém as demais barras *swing*, ou seja, todas as barras *swing* que o sinal do II calculado pelo esgotamento de potência ativa seja o oposto ao sinal do maior II dos esgotamentos de potência ativa [3].

Então para o caso do sistema de 34 barras, os conjuntos são separados da seguinte maneira: $\Omega_e = \{1\}$, pois II_{29}^{P1} é o esgotamento que mais afeta a barra 29 e o único valor negativo entre todos os esgotamentos; $\Omega_r = \{31, 32, 33, 34\}$, pois os esgotamentos de potência ativa dessas barras tem o sinal positivo sendo o contrário ao sinal de maior esgotamento de potência ativa.

Logo, as barras *swing* estão separadas em qual deve aumentar e em qual deve compensar o aumento de potência ativa, o cálculo das variações é feito segundo (5.1) [3]:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{Ga} &= \frac{II_i^{Pa}}{\sum_e II_i^{Pe}} \times \Delta P_{Ge} & \text{se } II_i^{Pe} \neq 0 & \quad a, e \in \Omega_E \\
 \Delta P_{Ga} &= \frac{1}{N_e} \times \sum_e \Delta P_{Ge} & \text{se } II_i^{Pe} = 0 & \quad a, e \in \Omega_E \\
 \Delta P_{Gb} &= \frac{II_i^{Pb}}{\sum_e II_i^{Pr}} \times \sum_e \Delta P_{Gr} & \text{se } II_i^{Pr} \neq 0 & \quad a, r \in \Omega_R \\
 \Delta P_{Gb} &= \frac{1}{N_r} \times \sum_e \Delta P_{Gr} & \text{se } II_i^{Pr} = 0 & \quad a, r \in \Omega_R
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Onde:

- ΔP_{Ge} é o quanto se deseja variar de geração de potência ativa para o conjunto Ω_e ;
- $\sum_e II_i^{Pe}$ é o somatório de todos os II de esgotamento de potência ativa referentes as barras do conjunto Ω_e ;
- II_i^{Pa} é o II da barra que sofrerá a variação de potência ativa que pertence ao conjunto Ω_e ;
- ΔP_{Ga} é a parcela de ΔP_{Ge} que irá variar P_{Ga} ;
- ΔP_{Gr} é o quanto se deseja variar de geração de potência ativa para o conjunto Ω_r ($\Delta P_{Gr} = - \Delta P_{Ge}$);
- $\sum_e II_i^{Pr}$ é o somatório de todos os II de esgotamento de potência ativa referentes as barras do conjunto Ω_r ;

- II_i^{Pb} é o II da barra que sofrerá a variação de potência ativa que pertence ao conjunto Ω_r ;
- ΔP_{Gb} é a parcela de ΔP_{G_r} que irá variar P_{Gb} ;

Na Tabela 21 mostram-se as ações de controle preventiva de potência ativa para a melhora da margem de potência para a barra 29 (M_{29}) no sistema CEPEL-34. Nessa tabela mostram-se os valores de potência ativa das barras *swing* com as variações calculadas seguindo (5.1). Ao utilizar esse método o incremento de potência ativa do sistema é nulo, mantendo a potência ativa gerada constante.

Tabela 21: Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência ativa das barras *swing*

Ação	P_{G_1}	$P_{G_{31}}$	$P_{G_{32}}$	$P_{G_{33}}$	$P_{G_{34}}$	$M_{29}(\%)$	β_{29}°
1	21	14,67	13,14	12,83	22,99	-	-
101	26	14,06	12,67	12,48	19,43	-	-
201	31	13,45	12,19	12,14	15,87	-	-
221	32	13,32	12,10	12,07	15,15	-	-
238	32,85	13,22	12,01	12,01	14,55	-	-
239	32,9	13,21	12,01	12,01	14,51	3	179
240	32,95	13,21	12,00	12,00	14,48	4	178
0	33	13,20	12,00	12,00	14,44	5	178
242	33,05	13,19	12,00	12,00	14,40	6	178
261	34	13,08	11,90	11,93	13,73	13	175
281	35	12,95	11,81	11,86	13,01	17	173
301	36	12,83	11,71	11,79	12,30	19	172
321	37	12,71	11,62	11,72	11,59	20	172
341	38	12,59	11,52	11,65	10,88	21	171
361	39	12,46	11,43	11,59	10,16	22	171
381	40	12,34	11,33	11,52	9,45	22	171
401	41	12,22	11,24	11,45	8,74	21	171
421	42	12,09	11,14	11,38	8,03	21	172
441	43	11,97	11,05	11,31	7,31	19	173
461	44	11,85	10,95	11,24	6,60	16	174
481	45	11,73	10,86	11,17	5,89	9	177
487	45,3	11,69	10,83	11,15	5,67	2	179
488	45,35	11,68	10,82	11,15	5,64	-	-

Na Tabela 21, as células que apresentam "-" indicam que o fluxo não convergiu para aquela configuração de sistema. A ação de controle indicada como "0" representa o caso base do sistema. Na Figura 17 observa-se o efeito da ação de controle preventiva de geração de potência ativa em cima de M_{29} . Nessa figura o eixo vertical esquerdo representa os valores de M_{29} e β_{29} é representado pelo eixo lateral direito. O eixo horizontal representa P_{G_1} aumentando, sendo cada valor de P_{G_1} associado a uma ação de controle.

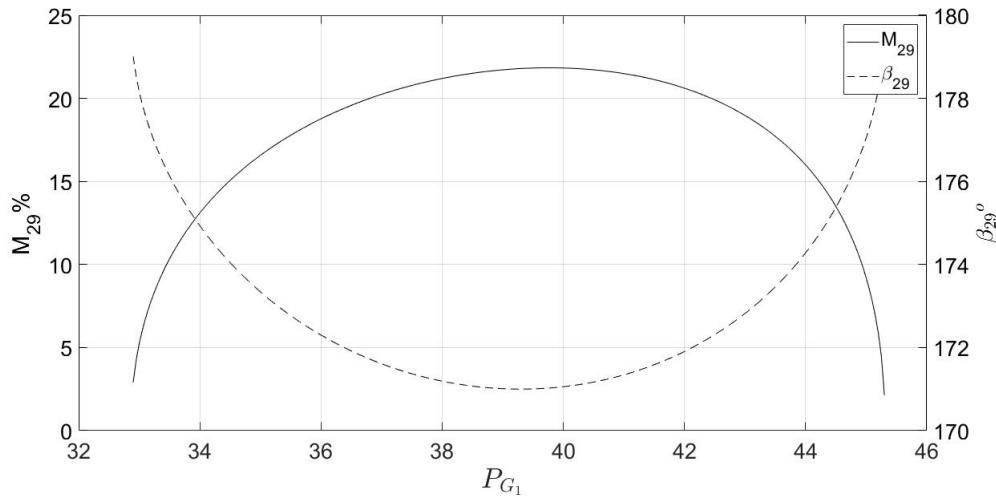


Figura 17: Ação de controle preventiva sobre a barra 29 atuando na potência ativa das barras *swing*

Para as primeiras ações de controle preventivas sobre a geração de potência ativa, não há convergência para o problema de fluxo de potência, porém ao aumentar P_{G1} , o fluxo de potência converge, fazendo assim alterações em M_{29} . Inicialmente, o aumento de P_{G1} é benéfico para M_{29} , pois a margem se afasta do ponto crítico, juntamente de β_{29} . Porém para a ação de controle 376, onde $P_{G1} = 39,75$ pu, M_{29} atinge seu valor máximo (β_{29} atinge seu valor mínimo) para essa configuração do sistema e após esse ponto, M_{29} começa a diminuir até chegar ao ponto de o fluxo de potência não convergir mais. Portanto, o método apresentado é inicialmente eficaz em afastar M_{29} do ponto crítico, porém até certo ponto, pois após esse ponto ele volta a aproximar M_{29} do ponto crítico. Vale ressaltar que próximo ao ponto de operação do caso base, aumentar P_{G1} afasta M_{29} e β_{29} de seus pontos críticos.

5.3.2

Barra de geração

A metodologia feita para a ação de controle de potência ativa para uma barra de geração é análoga à feita para a análise de controle de potência ativa para uma barra de carga. Portanto, utilizando o sistema de 34 barras do CEPEL como exemplo, a barra de geração que apresenta a pior margem de potência, é a barra 1 ($M_1 = -467,96$ %), logo as ações de controle preventivas de potência ativa são feitas para melhorar a margem da barra 1.

Na Tabela 10, sabe-se que o esgotamento de potência ativa que mais afeta a margem de potência da barra 1 é o esgotamento referente a barra 34

($II_1^{34} = -2,90\%$). Portanto, deve-se alterar o ponto de operação do caso base, de modo que se altere $P_{G_{34}}$. Porém, como a potência gerada pelo sistema não deve ser alterada, as barras que tem o sinal do II de esgotamento de potência ativa oposto ao da barra 34 devem compensar a variação de $P_{G_{34}}$. Na Tabela 22 mostra os valores de II para o esgotamento de potência ativa para a barra 1.

Tabela 22: Índices de influência ordenados de forma decrescente (em módulo) de esgotamento de potência ativa para a barra 1

Esgotamento	II
II_1^{P34}	-2,90
II_1^{P31}	2,38
II_1^{P33}	2,29
II_1^{P32}	2,18
II_1^{P1}	0,00

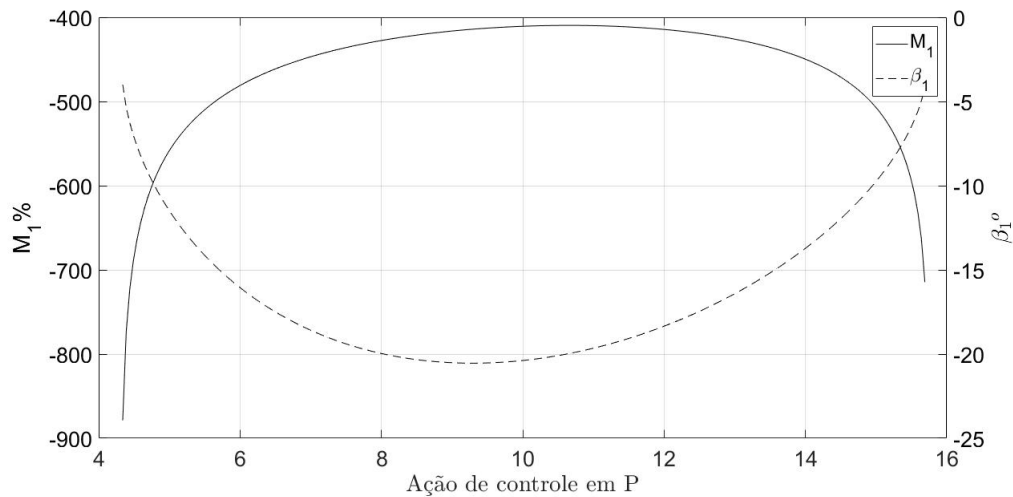
Portanto, o conjunto Ω_e tem apenas a barra 34, pois é único esgotamento que apresenta II negativo, já o conjunto Ω_e tem todas as demais barras *swing* (1, 31, 32 e 33), pois seus II são positivos.

Na Tabela 23 mostra as ações de controle preventiva de potência ativa sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras *swing*, utilizando (5.1). Nessa Tabela, as células que apresentam "-" indicam que o fluxo não convergiu para aquela configuração do sistema. A ação de controle indicada como "0" representa o caso base do sistema. Na Figura 18 mostra-se o efeito da ação de controle preventiva de geração de potência ativa em cima de M_1 . Nessa figura o eixo vertical esquerdo representa os valores de M_1 e β_1 é representado pelo eixo lateral direito. O eixo horizontal representa $P_{G_{34}}$ aumentando, sendo cada valor de $P_{G_{34}}$ associado a uma ação de controle.

Para as primeiras ações de controle preventivas sobre a geração de potência ativa, não há convergência para o problema de fluxo de potência, porém ao aumentar $P_{G_{34}}$, o fluxo de potência converge, fazendo assim alterações em M_1 . Inicialmente, o aumento de $P_{G_{34}}$ é benéfico para M_1 , pois ela aumenta, chegando próximo a ficar positivo, juntamente de β_1 . Porém para a ação de controle 165, onde $P_{G_{34}} = 10,64$ pu, M_1 atinge seu valor máximo (β_1 atinge seu valor mínimo) para essa configuração do sistema e após esse ponto, M_1 começa a diminuir até chegar ao ponto de o fluxo de potência não convergir mais. Portanto, o método apresentado é inicialmente eficaz em aproximar M_1 da região A de operação, porém ele não atinge a principal proposta, que era de levar a margem da barra crítica (nesse caso M_1) a valores positivos, diferente da ação de controle preventiva de potência reativa, que consegue elevar M_1 a valores positivos. E isso pode ser observado olhando os II de esgotamentos de

Tabela 23: Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras *swing*

Ação	P_{G_1}	$P_{G_{31}}$	$P_{G_{32}}$	$P_{G_{33}}$	$P_{G_{34}}$	$M_1(\%)$	β_1°
1	33	17,37	15,82	16,01	2,44	-	-
38	33	16,73	15,23	15,39	4,29	-	-
39	33	16,71	15,22	15,38	4,34	-879	-4
40	33	16,69	15,20	15,36	4,39	-773	-5
51	33	16,50	15,02	15,17	4,94	-567	-11
101	33	15,63	14,23	14,34	7,44	-437	-19
151	33	14,76	13,43	13,50	9,94	-411	-20
201	33	13,89	12,64	12,67	12,44	-418	-18
0	33	13,2	12	12	14,44	-468	-12
251	33	13,03	11,84	11,83	14,94	-502	-10
266	33	12,76	11,60	11,58	15,69	-714	-4
267	33	12,75	11,59	11,56	15,74	-	-

Figura 18: Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras *swing*

potência ativa e reativa: os II de potência reativa são muito maiores que o de potência ativa, ou seja, mexer na tensão do sistema trará muito mais benefícios para a margem do que mexer apenas na geração de potência ativa.

5.4

Ações de controle preventiva combinadas: potência ativa e potência reativa para barra de geração

Para o sistema CEPEL-34, as medidas de ações de controle preventivas de geração de potências reativas se mostraram eficazes ao elevar a margem de potência da barra 1 a valores positivos. Porém, as medidas de ações de controle

preventivas de geração de potências ativas não foram eficazes ao elevar M_1 até valores positivos. Nesse tópico é feita a combinação de ambas as medidas de controle citadas anteriormente.

Na Tabela 16, quando v_1 é igual a 1,14 pu, tem-se o primeiro ponto de operação em que M_1 é positivo ($M_1 = 4,31$ pu). Portanto, ações de controle preventiva de geração de potência ativa são aplicadas ao sistema tendo v_1 alterado para 1,14. Na Tabela 24 e na Figura 19 mostram-se os valores encontrados para essa simulação.

Tabela 24: Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras *swing* para v_1 aumentado ($v_1 = 1,14$)

Ação	P_{G_1}	$P_{G_{31}}$	$P_{G_{32}}$	$P_{G_{33}}$	$P_{G_{34}}$	$M_1(\%)$	β_1°
1	33	17,35	15,81	15,99	2,49	5	48
50	33	16,50	15,02	15,17	4,94	5	50
92	33	15,77	14,36	14,47	7,04	5	52
100	33	15,63	14,23	14,34	7,44	5	52
150	33	14,76	13,43	13,50	9,94	5	54
200	33	13,89	12,64	12,67	12,44	5	56
0	33	13,20	12,00	12,00	14,44	4	57
250	33	13,03	11,84	11,83	14,94	4	58
300	33	12,16	11,04	11,00	17,44	4	60
350	33	11,29	10,25	10,16	19,94	3	63

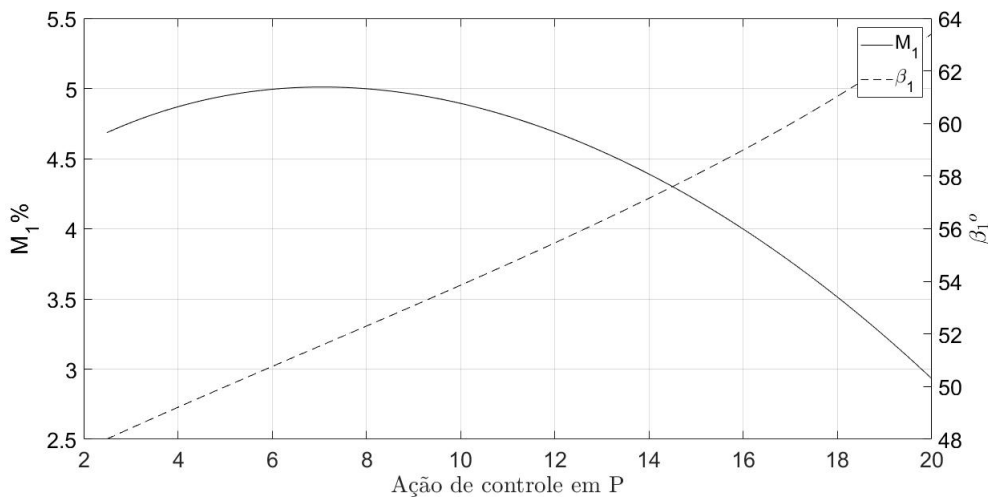


Figura 19: Ação de controle preventiva sobre a barra 1 atuando na potência ativa das barras *swing* para v_1 aumentado ($v_1 = 1,14$)

Para a ação de controle 92 ($P_{G_1} = 33$, $P_{G_{31}} = 15,77$, $P_{G_{32}} = 14,36$, $P_{G_{33}} = 14,47$, $P_{G_{34}} = 7,04$) M_1 atinge o seu valor máximo, que é de 5,01 %.

Portanto, nessa estratégia, M_1 é ainda mais elevado, alterando menos o ponto de operação do sistema, concluindo seu objetivo inicial de aumentar a M_1 até um valor positivo.

5.5

Resumo do capítulo

Nesse capítulo é mostrada a proposta de melhorar os índices de estabilidade de tensão agindo sobre potência reativa (tensão) e/ou potência ativa do sistema, fazendo com que a margem de potência das barras analisadas seja melhor.

Mostrou-se as ações de controle preventivas que atuam de maneira indireta na potência reativa da barra *swing*, ou seja, atuando na tensão dessa barra. Isso é feito através do esgotamento de potência reativa, indicando quais as barras que mais influenciam na barra em análise (exceto a própria barra) e as ações de controle preventiva que atuam de maneira direta na geração de potência ativa das barras *swing* do sistema, também indicados pelos seus índices de influência nos esgotamentos.

Toda a análise é feita para o sistema de potência CEPEL-34. Nesse sistema, alterar a tensão mostrou ser mais eficaz do que alterar a geração de potência ativa, pois ao aumentar a tensão das barras *swing* as margens de potência aumentam mais do que o aumento proporcionado pela alteração da geração de potência ativa nas barras *swing*. Vale ressaltar que o aumento da potência ativa, só aumentará a margem de potência da barra em análise até certo ponto, e após esse ponto, a margem começara a diminuir. E a última análise feita foi a combinação entre as ações de controle preventiva de potência reativa e de potência ativa, da qual pode ser feito o ajuste fino para melhorar a margem de potência.

Portanto, as ações de controle preventivas são eficazes, pois ajudam a melhorar as condições de estabilidade de tensão do sistema.

6

Ação de controle preventivo via algoritmo genético

6.1

Introdução

No Capítulo 5 foram mostradas as inúmeras de ações de controle preventivas e, conseqüentemente, uma grande quantidade de respostas para a melhoria das margens. Há uma resposta para cada variação de tensão e/ou geração de potência ativa das barras *swing* no sistema CEPEL-34. Nesse capítulo é mostrada uma proposta de solução para a elevar a margem na barra crítica de um sistema através do algoritmo genético.

São avaliados dois sistemas de potência: CEPEL-34 e o sistema Nórdico (Ponto B de operação). No sistema CEPEL-34, são feitos testes para definir qual o melhor caso, ou seja, aquele que altera pouco o seu ponto de operação e consegue elevar a margem da barra crítica a um valor acima de 5%. Nesse cenário, é feita uma comparação dos resultados desse capítulo com os do método mostrado no Capítulo 5. Já no sistema Nórdico, aumenta-se a carga dele até alguma barra apresentar margem negativa. É utilizado o algoritmo genético para encontrar um novo ponto de operação, alterando-se muito pouco o ponto de ponto de operação e elevando a margem da barra critica até um valor acima de 5%.

O valor de 5% é estabelecido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), pois é um valor aceitável para o sistema elétrico.

Na Figura 20 apresentam-se todos os processos pela busca de solução, que o algoritmo genético realiza nesse problema.

Todas as simulações foram feitas no programa Matlab 2020b utilizando um computador com processador Intel Icore i3 - 3^a - geração.

6.2

Sistema CEPEL-34

Na Tabela 8 mostra-se o ponto de operação para o sistema CEPEL-34 e na Tabela 9 mostram-se os valores dos índices de estabilidade de tensão para esse sistema. Observa-se que, para essa configuração do sistema, a barra crítica é a barra 1, que tem margem M_1 igual a -468,96%. Então para melhorar M_1 ,

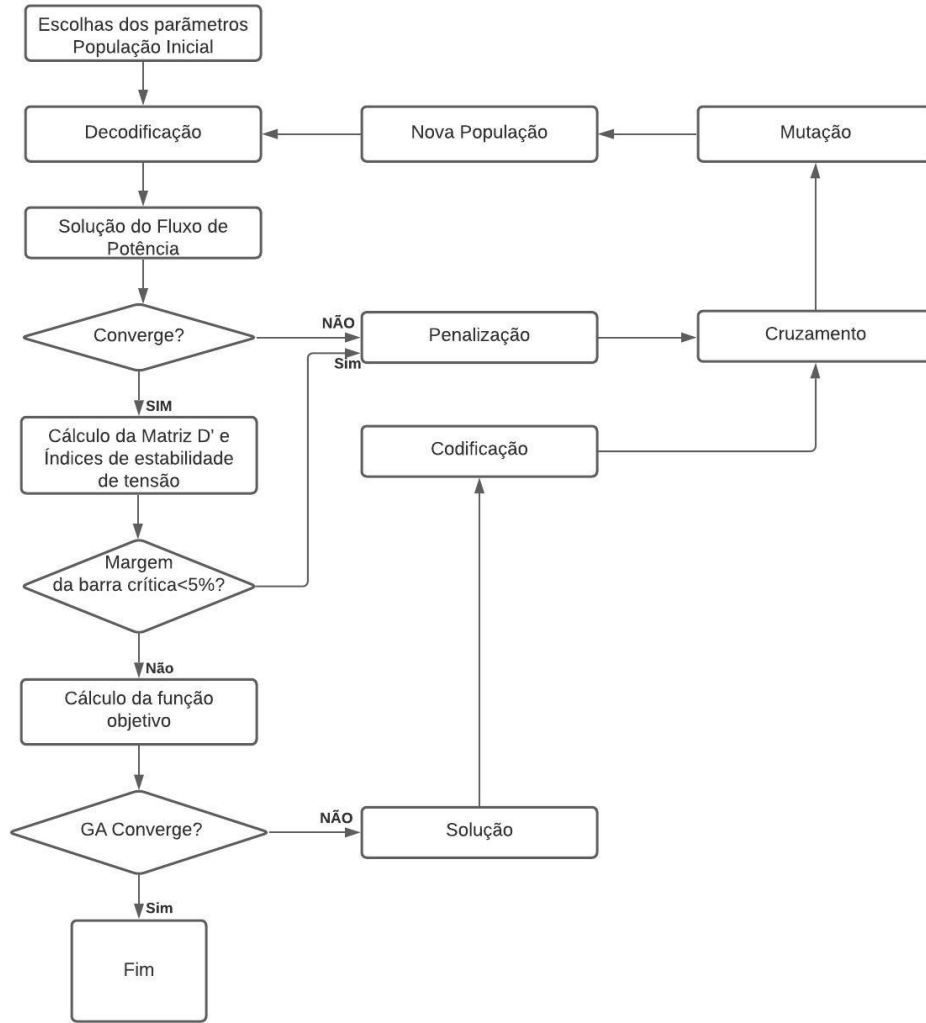


Figura 20: Fluxograma para a busca de solução para o problema de aumento da margem

podem ser alteradas as tensões das barras *swing* e/ou alteradas as gerações de potência ativa dessas barras e, portanto, a tensão e a potência ativa gerada são as variáveis do algoritmo genético. Tendo isso como base, são feitos os seguintes testes:

- Função objetivo: minimizar a distância de M_1 para o 5% e DMQ_V . Variáveis: $v_1, v_{31}, v_{32}, v_{33}$ e v_{34} . Uma penalidade é aplicada toda vez que M_1 for menor que 5%.
- Função objetivo: minimizar a distância de M_1 para o 5% e DMQ_V . Variáveis: $v_1, v_{31}, v_{32}, v_{33}, v_{34}, P_{G1}, P_{G31}, P_{G32}, P_{G33}$ e P_{G34} . Uma penalidade é aplicada toda vez que M_1 for menor que 5%.
- Função objetivo: minimizar a distância de M_1 para o 5%, DMQ_V e DMQ_{PG} . Variáveis: $v_1, v_{31}, v_{32}, v_{33}, v_{34}, P_{G1}, P_{G31}, P_{G32}, P_{G33}$ e P_{G34} .

Uma penalidade é aplicada toda vez que M_1 for menor que 5%.

- Função objetivo: minimizar a distância de M_1 para o 5%, DMQ_V , DMQ_{P_G} e DMQ_{Q_G} . Variáveis: v_1 , v_{31} , v_{32} , v_{33} , v_{34} , P_{G_1} , $P_{G_{31}}$, $P_{G_{32}}$, $P_{G_{33}}$ e $P_{G_{34}}$. Uma penalidade é aplicada toda vez que M_1 for menor que 5%.
- Função objetivo: minimizar a distância de M_1 para o 5%. Variáveis: v_1 , v_{31} , v_{32} , v_{33} , v_{34} , P_{G_1} , $P_{G_{31}}$, $P_{G_{32}}$, $P_{G_{33}}$ e $P_{G_{34}}$. Uma penalidade é aplicada toda vez que M_1 for menor que 5% e quando o DMQ_V , DMQ_{P_G} e DMQ_{Q_G} for maior que o caso apresentado em (5.4) (os valores dos desvios estão na Tabela 25).
- Função objetivo: minimizar a distância de M_1 para o 5%. Variáveis: v_1 , v_{31} , v_{32} , v_{33} , v_{34} , P_{G_1} , $P_{G_{31}}$, $P_{G_{32}}$, $P_{G_{33}}$ e $P_{G_{34}}$. Uma penalidade é aplicada toda vez que M_1 for menor que 5% e quando o DMQ_V e DMQ_{P_G} for maior que o caso apresentado em (5.4) (os valores dos desvios estão na Tabela 25).

onde DMQ_V , DMQ_{P_G} e DMQ_{Q_G} são calculados segundo (6.1).

$$\begin{aligned} DMQ_V &= \sqrt{\sum_{n=1}^{N_b} \frac{(v_{cbn} - v_n)^2}{v_n}} \times 100\% \\ DMQ_{P_G} &= \sqrt{\sum_{n=1}^{N_b} \frac{(P_{G_{cbn}} - P_{G_n})^2}{P_{G_n}}} \times 100\% \\ DMQ_{Q_G} &= \sqrt{\sum_{n=1}^{N_b} \frac{(Q_{G_{cbn}} - Q_{G_n})^2}{Q_{G_n}}} \times 100\% \end{aligned} \quad (6.1)$$

onde:

- v_{cbn} é tensão da barra n para o ponto de operação do caso base;
- v_n é a nova tensão da barra n;
- $P_{G_{cbn}}$ é a potência ativa da barra n para o ponto de operação do caso base;
- P_{G_n} é a nova potência ativa da barra n;
- $Q_{G_{cbn}}$ é a potência reativa da barra n para o ponto de operação do caso base;
- Q_{G_n} é a nova potência reativa da barra n;

Para que os valores dos desvios mínimos quadráticos não sejam muito grandes devido as suas ordens de grandeza, todos são colocados em porcentagem em relação ao valor do caso base.

Os valores dos desvios são importantes, pois eles mostram o afastamento ao ponto de operação inicial.

Tabela 25: Valores dos desvios mínimos quadráticos das tensões, potências ativas e potências reativas para o resultado encontrado em (5.4) para $v_1 = 1,14$ pu

v_1 (pu)	$DMQ_V(\%)$	$DMQ_{P_G}(\%)$	$DMQ_{Q_G}(\%)$	$DMQ_M(\%)$
1,14	62,51	60,32	241,77	1337,16

As tensões das barras *swing* variam entre 0,95 e 1,20 pu. Essas variáveis são declaradas como números inteiros que devem variar entre 95 e 120 e após isso, são divididas por 100, para que a variação da tensão seja em degraus de 0,01 pu.

Já as variáveis de potência ativa têm que obedecer a (5.1). Portanto, a variação é feita em degraus de 0,05 pu em barras que devem aumentar a sua geração de potência ativa. As demais barras devem compensar essa variação. Sendo assim, a variação é feita multiplicando o valor 0,05 por um número, que nas tabelas apresentadas no Capítulo 5 é a coluna "Ação". A variável ação é a quantidade de vezes que o degrau 0.05 é multiplicado. Portanto, (5.1) é alterada para (6.2).

$$\begin{aligned} \Delta P_{Ga} &= P_{Ga_0} - 240 * \Delta P_{Ge} - A\tilde{c}\tilde{a}\tilde{o} \times \frac{II_i^{Pa}}{\sum_e II_i^{Pe}} \times \Delta P_{Ge} & \text{se } II_i^{Pe} \neq 0 & \quad a, e \in \Omega_E \\ \Delta P_{Gb} &= P_{Gb_0} - 240 * \Delta P_{Gr} - A\tilde{c}\tilde{a}\tilde{o} \times \frac{II_i^{Pb}}{\sum_e II_i^{Pr}} \times \sum_e \Delta P_{Gr} & \text{se } II_i^{Pr} \neq 0 & \quad a, r \in \Omega_R \end{aligned} \quad (6.2)$$

Onde:

- P_{Ga_0} é o valor da potência ativa do gerador a para o caso base;
- P_{Gb_0} é o valor da potência ativa do gerador b para o caso base;

Como o intuito de cada teste é encontrar um novo ponto de operação viável com margem da barra crítica maior ou igual a 5%, não é necessária a busca por um ponto ótimo global. Por isso, para os Testes de 1 a 4, o tamanho da população é de 10 e o valor a tolerância da função objetivo é de 10^{-1} . Já para o Teste 5 a população é de 50 e a tolerância é de 10^{-1} . Esses valores foram encontrados após inúmeros testes.

Todos os testes feitos para a elevação da margem da barra crítica são mostrados nas próximas seções.

6.2.1

Teste 1

No Teste 1, a função objetivo do algoritmo genético é apresentada conforme (6.3), com cinco variáveis e tendo a sua representação cromossômica mostrada na Figura 21, com valores discretos dentro da faixa de $[0,95/1,20]$ pu.

$$\min f_{objetivo}(M_1, DMQ_V) \leftrightarrow f_{objetivo} = \sqrt{(0,05 - M_1)^2 + (0 - DMQ_V)^2} \quad (6.3)$$

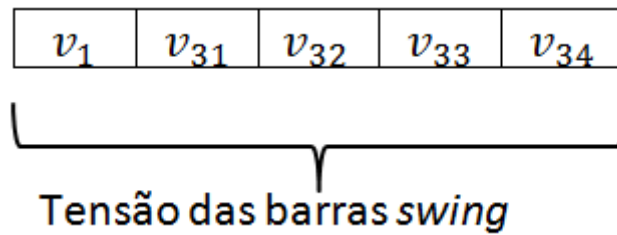


Figura 21: Representação cromossômica para a resolução do problema apresentado pelo Teste 1

O resultado obtido para a solução desse problema é apresentado na Tabela 26, a qual mostra o fluxo convergido com as tensões encontradas para o problema tendo essa configuração de solução. O tempo total para essa simulação é de 4,80 minutos.

Tabela 26: Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 1)

Barra	Tipo	Ângulo(rad)	Tensão (pu)	P_g	Q_g	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	1	0,10	1,13	32,27	4,33	5	48	0,0094	4,95E-04	0,3807	1,022
2	3	0,01	1,14	0	0	100	93	0,0152	0	0	8,36E-22
3	3	0,00	1,14	0	0	100	94	0,0155	0	0	2,39E-21
4	3	-0,04	1,08	0	0	100	100	0,0184	0	0	2,08E-19
5	3	-0,30	1,07	0	0			0,0296	0	0	0
6	3	-0,30	1,07	0	0			0,0296	0	0	0
7	3	-0,19	1,09	0	0	100	130	0,0280	0	0	9,15E-19
8	3	-0,02	1,11	0	0			0,0169	0	0	0
9	3	-0,02	1,12	0	0			0,0169	0	0	0
10	3	-0,37	1,07	0	0	100	141	0,0325	0	0	7,59E-19
11	3	-0,16	1,08	0	0			0,0284	0	0	1
12	3	-0,16	1,08	0	0			0,0284	0	0	1
13	3	-0,59	1,01	0	0	100	151	0,0214	0	0	2,39E-18
14	3	-0,67	1,06	0	0	100	149	0,0100	0	0	6,95E-19
15	3	-0,13	1,01	0	0	100	126	0,0237	0	0	1,73E-20
16	3	-0,13	1,01	0	0	100	126	0,0232	0	0	1,47E-19
17	3	0,18	1,08	0	0	100	91	0,0063	0	0	1,58E-08
18	3	0,19	1,08	0	0	100	89	0,0019	0	0	5,22E-24
19	3	0,12	1,08	0	0	92	98	0,0008	0	0	1,65E-03
20	3	0,13	1,08	0	0	100	96	0,0005	0	0	7,50E-24
21	3	0,25	1,11	0	0	100	86	0,0012	0	0	5,40E-11
22	3	0,18	1,11	0	0	100	100	0,0011	0	0	6,05E-10
23	3	0,11	1,11	0	0	87	111	0,0014	0	0	2,41E-04
24	3	-0,78	1,08	0	0	100	153	0,0015	0	0	8,54E-20
25	3	-0,81	1,10	0	0	73	150	0,0001	0	0	2,97E+00
26	2	-0,80	1,10	38,79	13,63	-46	-161	0,0000	0	0	0,552
27	3	-0,78	1,05	0	0	100	145	0,0035	0	0	7,59E-21
28	3	-0,71	0,98	0	0	100	150	0,0177	0	0	3,50E-19
29	3	-0,78	0,98	0	0	45	150	0,0144	0	0	5,87E+01
30	3	-0,18	1,08	0	0	100	114	0,0261	0	0	2,78E-20
31	1	0,30	1,12	12,91	1,19	80	69	0,0126	4,95E-04	3,37	146,614
32	1	0,30	1,07	11,73	0,80	81	71	0,0001	4,95E-04	0,650	0,013
33	1	0,25	1,00	11,73	-3,07	76	71	0,0031	4,95E-04	2,698	0,049
34	0	0,39	1,06	14,12	1,55	61	55	0,0001	4,95E-04	3,65E-01	0,058
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:								66	5	273	1456

Os valores de tensão e potência ativa são apresentadas na Tabela 27. O valor de M_1 é igual a 5,07%.

Tabela 27: Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras *swing* juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 1)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V %	DMQ_{P_G} %
1	1,13	33,00	0,94	0,0495
31	1,12	13,20	1,259	0,0495
32	1,07	12,00	0,013	0,0495
33	1,00	12,00	0,310	0,0495
34	1,06	14,44	0,011	0,0495

Nesse caso testado, a variação na tensão não obedece aos II de esgotamento de potência reativa (Tabela 18). Na Figura 22 mostra-se a diferença de tensão do caso base para o Teste 1 usando GA.

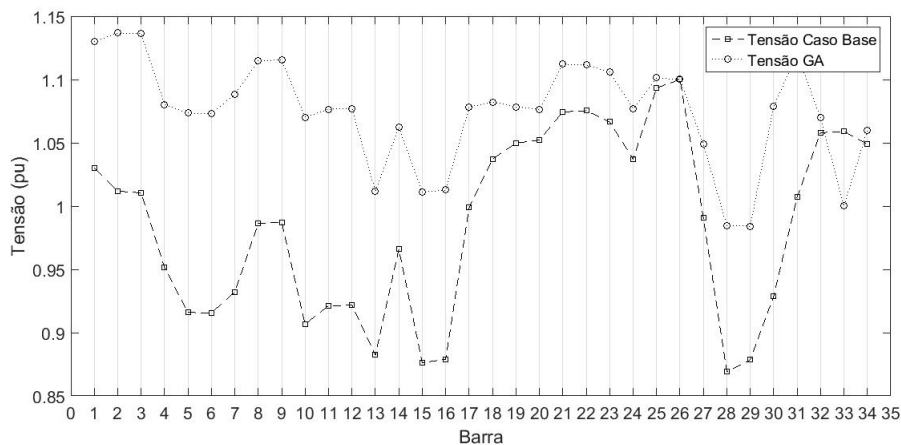


Figura 22: Níveis de tensão para o caso base e para a solução encontrada pelo GA para essa configuração do problema (Teste 1)

Entre as barras *swing*, a barra 31 é aquela que sofre a maior variação de tensão, que aumentou em 11,22%, enquanto as barras 1, 32, 33 e 34 tem as seguintes variações respectivamente: aumentou em 9,71%, aumentou em 1,13%, diminuiu em 5,57% e aumentou em 1,05%.

Portanto, o objetivo inicial de elevar M_1 até um valor maior ou igual a 5% e ter a menor variação possível no seu ponto de operação é atingido.

6.2.2 Teste 2

A diferença do Teste 2 para o Teste 1 é a inserção da potência ativa dos geradores como variável do GA. Essa inserção é feita seguindo (6.2) e, portanto, a função objetivo permanece a mesma (6.3), porém, com uma variável a mais

na busca pela solução desse problema. Na Figura 23 mostra-se a representação cromossômica desse teste.

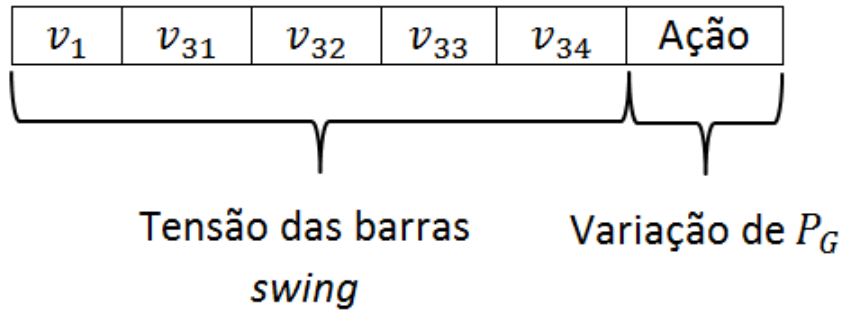


Figura 23: Representação cromossômica para a resolução do problema apresentado pelo Teste 2

Na Tabela 28 apresenta-se a solução encontrada para esse problema. O tempo total para essa simulação é de 5,03 minutos.

Tabela 28: Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 2)

Barra	Tipo	Ângulo(rad)	Tensão (pu)	P_g	Q_g	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	1	0,1988	1,170	32,33	9,69	5	106	0,0185	4,20E-04	0,0208	22,378
2	3	0,1145	1,161	0,00	0,00	100	96	0,0218	0	0	8,27E-22
3	3	0,1115	1,160	0,00	0,00	100	96	0,0219	0	0	2,36E-21
4	3	0,0697	1,095	0,00	0,00	100	103	0,0229	0	0	2,05E-19
5	3	-0,1910	1,043	0,00	0,00			0,0192	0	0	0
6	3	-0,1900	1,043	0,00	0,00			0,0193	0	0	0
7	3	-0,0838	1,075	0,00	0,00	100	134,02	0,0235	0	0	9,05E-19
8	3	0,0935	1,103	0,00	0,00			0,0140	0	0	0
9	3	0,0934	1,104	0,00	0,00			0,0140	0	0	0
10	3	-0,2629	1,057	0,00	0,00	100	145	0,0275	0	0	7,52E-19
11	3	-0,0456	1,064	0,00	0,00			0,0238	0	0	0
12	3	-0,0456	1,064	0,00	0,00			0,0238	0	0	0
13	3	-0,4896	1,001	0,00	0,00	100	154	0,0181	0	0	2,37E-18
14	3	-0,5710	1,055	0,00	0,00	100	152	0,0084	0	0	6,88E-19
15	3	-0,0174	0,984	0,00	0,00	100	131	0,0153	0	0	1,72E-20
16	3	-0,0116	0,985	0,00	0,00	100	130	0,0145	0	0	1,45E-19
17	3	0,3356	0,992	0,00	0,00	100	80	0,0000	0	0	1,94E-08
18	3	0,3532	1,007	0,00	0,00	100	80	0,0009	0	0	4,99E-24
19	3	0,2643	1,022	0,00	0,00	93	93	0,0007	0	0	1,74E-03
20	3	0,2731	1,021	0,00	0,00	100	91	0,0009	0	0	7,20E-24
21	3	0,3148	1,056	0,00	0,00	100	103	0,0003	0	0	8,97E-10
22	3	0,2722	1,055	0,00	0,00	100	101	0,0004	0	0	7,59E-10
23	3	0,1862	1,046	0,00	0,00	86	113	0,0004	0	0	8,62E-06
24	3	-0,6824	1,074	0,00	0,00	100	155	0,0012	0	0	8,46E-20
25	3	-0,7186	1,101	0,00	0,00	73	153	0,0000	0	0	2,09E-01
26	2	-0,7044	1,100	38,79	13,63	-63	-160	0,0000	0	0	1,308
27	3	-0,6821	1,044	0,00	0,00	100	148	0,0029	0	0	7,52E-21
28	3	-0,6160	0,975	0,00	0,00	100	153	0,0148	0	0	3,46E-19
29	3	-0,6875	0,975	0,00	0,00	44	153	0,0121	0	0	1,50E-01
30	3	-0,0688	1,050	0,00	0,00	100	117	0,0171	0	0	2,73E-20
31	1	0,5123	0,980	15,52	-2,73	69	50	0,0007	3,08E-02	0,85	0,399
32	1	0,5045	0,990	14,13	0,71	75	59	0,0041	3,13E-02	0,687	0,000
33	1	0,4343	0,970	14,24	-0,46	72	59	0,0071	3,49E-02	1,201	0,009
34	0	0,3892	1,020	6,70	2,04	79	70	0,0008	2,87E-01	2,29E-01	0,091
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:								61	62	173	495

A solução encontrada é apresentada na Tabela 29 e o valor de M_1 é igual a 5,10%. A coluna referente à P_G é o valor das potências ativas antes da resolução do problema do fluxo de potência. O número de variações, em degrau

de 0,05 pu de potência ativa, foi de 88 e a partir desse número, a coluna P_G é feita.

Tabela 29: Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras *swing* juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 2)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V %	DMQ_{P_G} %
1	1,17	33,00	1,85	0,042
31	0,98	15,84	0,072	3,08
32	0,99	14,42	0,41	3,13
33	0,97	14,54	0,71	3,49
34	1,02	6,84	0,076	28,7

A avaliação feita no Teste 2 é que a variação na tensão não obedece aos II de esgotamento de potência reativa (Tabela 22), exceto pela barra 1, do qual o II é nulo, mas alterar sua tensão é o que mais afeta M_1 . Já as variáveis de geração de potência ativa obedecem ao II de esgotamento de potência ativa, já que o cálculo das variações é feito sobre esses índices, exceto em casos que a variação da potência ativa é muito pequena.

Na Figura 24 mostra-se a diferença de tensão do caso base para o Teste 2 usando GA e na Figura 25 mostra-se a diferença entre a geração de potência ativa das barras *swing* para o caso base e para o Teste 2 usando GA.

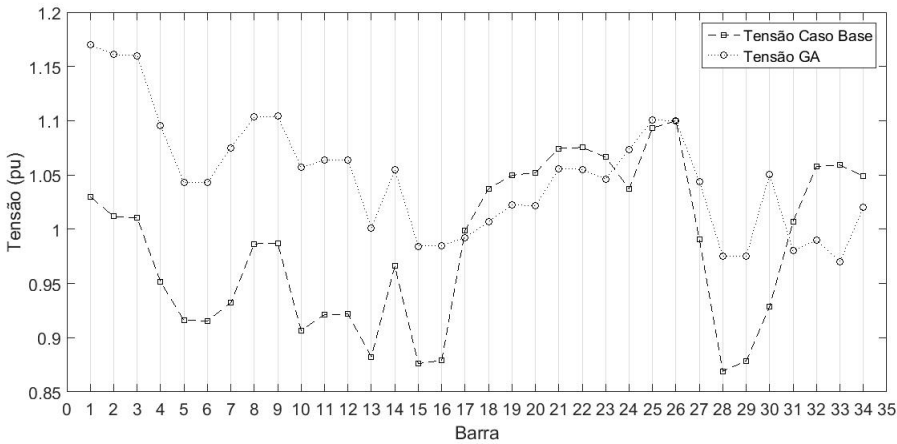


Figura 24: Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 2)

Entre as barras *swing*, a barra 1 é aquela que sofre a maior variação de tensão, aumentando em 13,59%, enquanto as barras 31, 32, 33 e 34 tem as seguintes variações respectivamente: diminui em 2,68%, diminui em 6,43%,

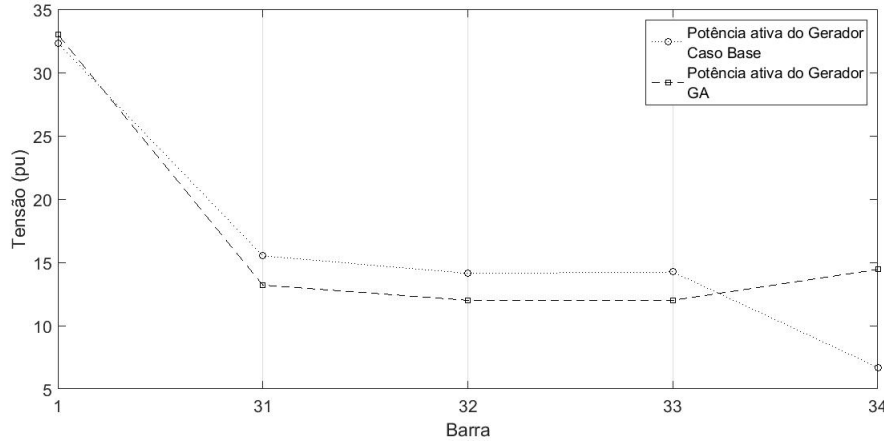


Figura 25: Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo (Teste 2)

diminui em 8,40% e diminui em 2,76%. A barra que mais altera o seu valor de tensão é a barra 1 seguido das barras 33, 32, 34 e 31.

Para a geração de potência ativa a barra que sofre a maior variação é a barra 34, que diminui em 53,6%. Em seguida, as barras que sofrem as maiores variações de geração de potência ativa são: 33, 32, 31 e 1, com respectivamente aumento de 18,7%, aumento de 17,7%, aumento de 17,5% e diminui 2,05%.

Portanto, o objetivo inicial de elevar M_1 até um valor maior ou igual a 5% e ter a menor variação possível no seu ponto de operação é atingido.

6.2.3 Teste 3

Para essa configuração de simulação, DMQ_{P_G} é inserido na função objetivo. Portanto, a nova função objetivo é apresentada em (6.4). A representação cromossômica é igual ao Teste 2 e, portanto, na Figura 23 é feita a representação cromossômica desse sistema.

$$\min f_{\text{objetivo}}(M_1, DMQ_V, DMQ_{P_G}) \leftrightarrow f_{\text{objetivo}} = \sqrt{(0,05 - M_1)^2 + (DMQ_V)^2 + (DMQ_{P_G})^2} \quad (6.4)$$

O resultado obtido na solução desse problema é apresentado na Tabela 30, que mostra o fluxo convergido para o resultado encontrado pelo Teste 3. O tempo total para essa simulação é de 4,91 minutos.

Os valores de tensão e potência ativa dos geradores (pré cálculo do fluxo de potência) são apresentada na Tabela 31 e o valor de M_1 é igual a 5,010%.

A variação na tensão não segue os II de esgotamento de potência reativa

Tabela 30: Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 3)

Barra	Tipo	Ângulo(rad)	Tensão (pu)	P_g	Q_g	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	1	-0,0195	1,190	32,38	12,04	5	127	0,0241	3,60E-04	0,0041	1,022
2	3	-0,1016	1,175	0,00	0,00	100	101	0,0259	0	0	8,19E-22
3	3	-0,1045	1,173	0,00	0,00	100	102	0,0260	0	0	2,33E-21
4	3	-0,1455	1,105	0,00	0,00	100	108	0,0260	0	0	2,02E-19
5	3	-0,4060	1,033	0,00	0,00			0,0164	0	0	0
6	3	-0,4051	1,033	0,00	0,00			0,0164	0	0	0
7	3	-0,2975	1,073	0,00	0,00	100	135,45	0,0228	0	0	8,91E-19
8	3	-0,1193	1,102	0,00	0,00			0,0136	0	0	0
9	3	-0,1194	1,102	0,00	0,00			0,0136	0	0	0
10	3	-0,4776	1,055	0,00	0,00	100	145	0,0267	0	0	7,44E-19
11	3	-0,2591	1,061	0,00	0,00			0,0231	0	0	1
12	3	-0,2591	1,062	0,00	0,00			0,0231	0	0	1
13	3	-0,7055	0,999	0,00	0,00	100	154,65	0,0175	0	0	2,34E-18
14	3	-0,7872	1,053	0,00	0,00	100	153	0,0081	0	0	6,81E-19
15	3	-0,2303	0,976	0,00	0,00	100	132	0,0130	0	0	1,70E-20
16	3	-0,2243	0,976	0,00	0,00	100	131,99	0,0122	0	0	1,42E-19
17	3	0,1416	0,962	0,00	0,00	100	92	0,0013	0	0	5,35E-09
18	3	0,1487	0,981	0,00	0,00	100	90	0,0030	0	0	4,74E-24
19	3	0,0608	0,996	0,00	0,00	90	101	0,0027	0	0	5,16E-04
20	3	0,0686	0,995	0,00	0,00	100	99	0,0030	0	0	6,85E-24
21	3	0,2136	0,995	0,00	0,00	100	84	0,0055	0	0	2,24E-10
22	3	0,1328	1,002	0,00	0,00	100	102	0,0047	0	0	3,32E-10
23	3	0,0508	0,985	0,00	0,00	83	115	0,0059	0	0	6,09E-04
24	3	-0,8990	1,073	0,00	0,00	100	157	0,0012	0	0	8,38E-20
25	3	-0,9353	1,101	0,00	0,00	71	154	0,0000	0	0	2,68E+00
26	2	-0,9211	1,100	38,79	13,63	-56	-158	0,0000	0	0	0,470
27	3	-0,8988	1,043	0,00	0,00	100	149	0,0028	0	0	7,44E-21
28	3	-0,8325	0,973	0,00	0,00	100	154	0,0143	0	0	3,42E-19
29	3	-0,9043	0,974	0,00	0,00	41	154	0,0117	0	0	4,72E+01
30	3	-0,2821	1,041	0,00	0,00	100	119	0,0147	0	0	2,69E-20
31	1	0,3000	0,950	13,09	-2,83	70	59	0,0032	7,45E-05	0,99	111,807
32	1	0,2821	0,970	11,90	0,97	76	67	0,0069	7,31E-05	0,586	0,002
33	1	0,2097	0,950	11,91	-0,24	74	69	0,0106	6,46E-05	1,104	0,034
34	0	0,3892	0,950	13,78	1,73	54	46	0,0089	2,13E-03	3,10E-01	0,008
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:								64	5	173	1285

Tabela 31: Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras *swing* juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 3)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V %	DMQ_{P_G} %
1	1,19	33,00	2,41	0,0360
31	0,95	15,61	0,32	0,00745
32	0,97	14,21	0,69	0,00731
33	0,95	14,32	1,06	0,00646
34	0,95	7,49	0,89	0,213

(Tabela 22). Alterar a tensão da barra 1 é o que mais afeta M_1 . Já as variáveis de geração de potência ativa não se alteram muito em relação ao caso base e, portanto elas não influenciam muito M_1 .

Na Figura 26 mostra-se a diferença de tensão do caso base para o Teste 3 e na Figura 27 mostra-se a diferença entre a geração de potência ativa das barras *swing* para o caso base para o Teste 3.

A barra 1 é a que tem a maior variação de tensão, aumentando em 15,53%, enquanto as barras 31, 32, 33 e 34 tem as seguintes variações respectivamente: diminui em 5,66%, diminui em 8,32%, diminui em 10,29% e diminui em 9,44%. Portanto, as barras que sofrem maior alteração de tensão são: 1,

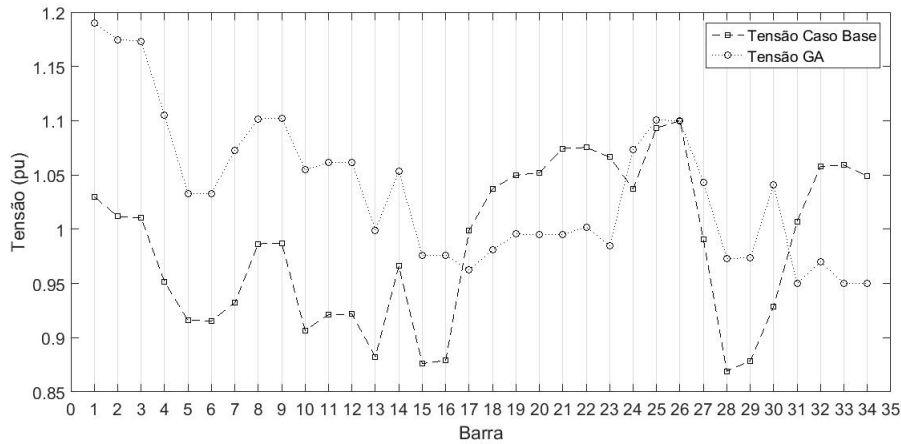


Figura 26: Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 3)

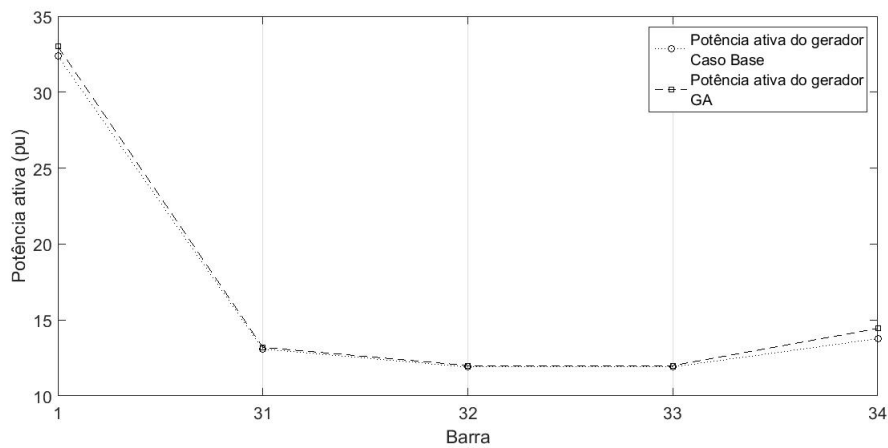


Figura 27: Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 3)

33, 34, 32 e 31.

Em relação à geração de potência ativa a barra que sofre a maior variação é a barra 34, diminuindo em 4,61%. Em seguida, as barras que sofrem as maiores variações de geração de potência ativa são: 1, 31, 32 e 33, com respectivamente, diminuição de 1,90%, diminuição de 0,86%, diminuição de 0,85% e diminuição de 0,80%. Logo, a variação em relação ao caso base é muito pequena.

Portanto, o objetivo inicial de elevar M_1 até um valor maior ou igual a 5% e ter a menor variação possível no seu ponto de operação é atingido.

6.2.4

Teste 4

O Teste 4 consiste em adicionar na função objetivo a minimização de DMQ_{Q_G} . Portanto, a nova função objetivo é mostrada em (6.5). Esse não tem alterações em relação as variáveis, logo a representação cromossômica permanece igual a mostrada na Figura 23.

$$\min f_{objetivo}(M_1, DMQ_V, DMQ_{P_G}, DMQ_{Q_G}) \leftrightarrow f_{objetivo} = \sqrt{(0,05 - M_1)^2 + (0 - DMQ_V)^2 + (0 - DMQ_{P_G})^2 + (0 - DMQ_{Q_G})^2} \quad (6.5)$$

O ponto de operação encontrado pelo GA nessa configuração do problema é apresentado na Tabela 32, a qual apresenta os valores de tensão, potência ativa, margem, desvios mínimos da tensão, potência ativa e reativa geradas. O tempo total dessa simulação é de 4,44 minutos.

Tabela 32: Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 4)

Barra	Tipo	Ângulo(rad)	Tensão (pu)	P_g	Q_g	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	1	0,0878	1,120	32,27	2,84	5	41	0,0076	5,01E-04	0,5617	1,023
2	3	-0,0024	1,131	0,00	0,00	100	92	0,0139	0	0	8,36E-22
3	3	-0,0056	1,131	0,00	0,00	100	93	0,0142	0	0	2,39E-21
4	3	-0,0491	1,078	0,00	0,00	100	99	0,0176	0	0	2,08E-19
5	3	-0,3058	1,084	0,00	0,00			0,0336	0	0	0
6	3	-0,3050	1,084	0,00	0,00			0,0336	0	0	0
7	3	-0,2046	1,093	0,00	0,00	100	129	0,0300	0	0	9,16E-19
8	3	-0,0337	1,120	0,00	0,00			0,0182	0	0	0
9	3	-0,0337	1,120	0,00	0,00			0,0182	0	0	0
10	3	-0,3769	1,076	0,00	0,00	100	140	0,0347	0	0	7,60E-19
11	3	-0,1679	1,082	0,00	0,00			0,0304	0	0	1
12	3	-0,1679	1,082	0,00	0,00			0,0304	0	0	1
13	3	-0,5953	1,016	0,00	0,00	100	150	0,0228	0	0	2,40E-18
14	3	-0,6743	1,065	0,00	0,00	100	148	0,0106	0	0	6,95E-19
15	3	-0,1421	1,020	0,00	0,00	100	125	0,0270	0	0	1,73E-20
16	3	-0,1371	1,022	0,00	0,00	100	125	0,0266	0	0	1,47E-19
17	3	0,1627	1,089	0,00	0,00	100	93	0,0081	0	0	1,53E-08
18	3	0,1656	1,105	0,00	0,00	100	90	0,0042	0	0	5,23E-24
19	3	0,0980	1,115	0,00	0,00	92	99	0,0039	0	0	1,85E-03
20	3	0,1038	1,115	0,00	0,00	100	97	0,0036	0	0	7,52E-24
21	3	0,2370	1,144	0,00	0,00	100	86	0,0042	0	0	5,37E-11
22	3	0,1681	1,146	0,00	0,00	100	100	0,0043	0	0	9,89E-10
23	3	0,1096	1,141	0,00	0,00	88	110	0,0049	0	0	5,65E-04
24	3	-0,7832	1,078	0,00	0,00	100	152	0,0016	0	0	8,55E-20
25	3	-0,8190	1,102	0,00	0,00	74	149	0,0001	0	0	3,01E+00
26	2	-0,8047	1,100	38,79	13,63	-41	-162	0,0000	0	0	0,588
27	3	-0,7829	1,051	0,00	0,00	100	144	0,0037	0	0	7,59E-21
28	3	-0,7179	0,988	0,00	0,00	100	149	0,0188	0	0	3,50E-19
29	3	-0,7876	0,988	0,00	0,00	46	150	0,0154	0	0	6,08E+01
30	3	-0,1915	1,089	0,00	0,00	100	114	0,0296	0	0	2,78E-20
31	1	0,2758	1,100	12,28	-1,85	80	70	0,0085	4,90E-03	0,09	146,071
32	1	0,2643	1,090	11,16	0,50	82	74	0,0009	4,95E-03	0,773	0,017
33	1	0,2081	1,070	11,13	-0,26	81	76	0,0001	5,29E-03	1,113	0,087
34	0	0,3892	1,100	15,93	2,68	59	54	0,0024	1,06E-02	9,79E-02	0,038
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:								69	16	162	1461

Analisando os resultados encontrados para os desvios, nota-se que em comparação aos casos anteriores, DMQ_V e DMQ_{P_G} são maiores e DMQ_{Q_G} é menor, pois o método utilizado para a função multiobjetivo busca encontrar o melhor ponto entre todos os resultados possíveis, elevando o desvio da tensão e da potência ativa e diminuindo o desvio da potência reativa.

Na Tabela 33 pode-se observar os resultados encontrado nessa configuração do problema. O valor de M_1 é igual a 5,26%. A coluna referente à P_G é o valor das potências ativas antes do cálculo do fluxo de potência. O número de variações, em degrau de 0,05 pu de potência ativa, foi de 277 e a partir desse número a coluna P_G foi feita.

Tabela 33: Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras *swing* juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 4)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V %	DMQ_{P_G} %
1	1,12	33,00	0,76	0,050
31	1,10	12,57	0,85	0,49
32	1,09	11,43	0,09	0,49
33	1,07	11,40	0,01	0,53
34	1,10	16,24	0,24	1,06

Esse caso não acompanha os II de esgotamento de potência reativa mostrados na Tabela 22. Já as variáveis de geração de potência ativa obedecem ao II de esgotamento de potência ativa, já que o cálculo das variações é feito sobre esses índices.

Na Figura 28 mostra-se a diferença de tensão do caso base para o Teste 4 e na Figura 29 mostra-se a diferença entre a geração de potência ativa das barras *swing* para o caso base e para o Teste 4.

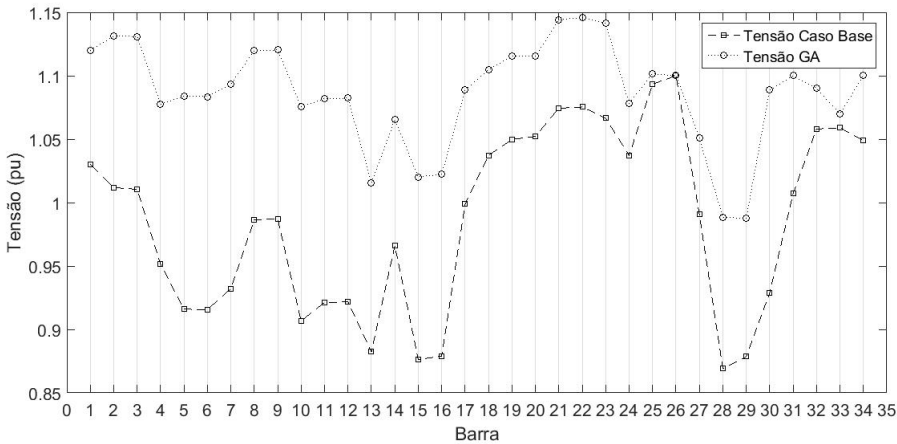


Figura 28: Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA Teste 4)

Entre as barras *swing*, a barra 31 ainda é aquela que sofre a maior variação de tensão, ela aumenta em 9,2%, enquanto as barras 1, 32, 33 e 34 tem as seguintes variações respectivamente: aumenta em 8,74%, aumenta em 3,02%,

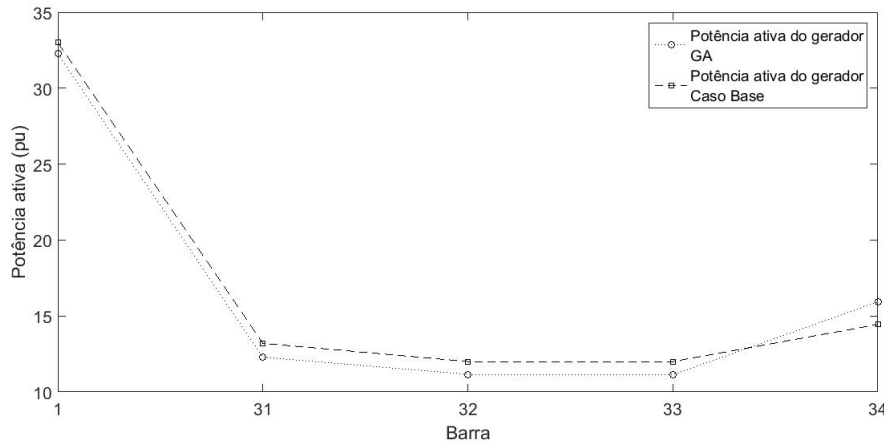


Figura 29: Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 4)

aumenta em 1,04% e aumenta em 4,86%. Portanto, a ordem das barras que mais obtiveram seus valores alterados é: 1, 34, 32 e 31.

Quanto à geração de potência ativa a barra que sofre a maior variação é a barra 34, que aumenta em 10,29%. Em seguida, as barras que sofrem as maiores variações de geração de potência ativa são: 33, 32, 31 e 1, com respectivamente diminuição de 7,27%, diminuição de 7,04%, diminuição de 7,00% e diminuição de 2,24%.

Portanto, o objetivo inicial de aumentar M_1 até um valor próximo a 5% e ter a menor variação possível no seu ponto de operação é atingido.

6.2.5 Teste 5

Em todos os casos testados até aqui, a solução procurada não fazia nenhum tipo de referência aos resultados encontrados no Capítulo 5, ou seja, não havia a comparação entre os resultados do algoritmo genético e os resultados encontrados no Capítulo 5. Nesse Teste 5 procura-se uma solução que além de elevar M_1 até um valor maior ou igual a 5%, os desvios mínimos quadráticos da tensão, da potência ativa e reativa têm que ser menores do que aqueles encontrados no Capítulo 5. Portanto, a nova função objetivo contempla apenas a minimização de M_1 , e é mostrada em (6.6). Toda vez que algum DMQ encontrado pelo GA for maior que o DMQ encontrado na Seção 5.4, mostrados na Tabela 25, uma penalização é aplicada a função objetivo, como demonstrado na Seção 2.2.7.

$$\min f_{\text{objetivo}}(M_1) \leftrightarrow f_{\text{objetivo}} = M_1 \quad (6.6)$$

O resultado encontrado para esse teste é apresentado na Tabela 34. O tempo total para essa simulação é de aproximadamente 30,9 minutos.

Tabela 34: Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 5)

Barra	Tipo	Ângulo(rad)	Tensão (pu)	P_g	Q_g	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	1	0,1420	1,150	32,29	7,09	5	70	0,0136	4,69E-04	0,1393	1,022
2	3	0,0553	1,149	0,00	0,00	100	95	0,0183	0	0	8,33E-22
3	3	0,0523	1,148	0,00	0,00	100	95	0,0184	0	0	2,38E-21
4	3	0,0098	1,087	0,00	0,00	100	102	0,0204	0	0	2,07E-19
5	3	-0,2500	1,057	0,00	0,00			0,0236	0	0	0
6	3	-0,2491	1,056	0,00	0,00			0,0236	0	0	0
7	3	-0,1448	1,080	0,00	0,00	100	132	0,0253	0	0	9,12E-19
8	3	0,0306	1,108	0,00	0,00			0,0152	0	0	0
9	3	0,0306	1,109	0,00	0,00			0,0151	0	0	0
10	3	-0,3219	1,062	0,00	0,00	100	143	0,0295	0	0	7,57E-19
11	3	-0,1071	1,069	0,00	0,00			0,0256	0	0	1
12	3	-0,1071	1,069	0,00	0,00			0,0256	0	0	1
13	3	-0,5461	1,005	0,00	0,00	100	153	0,0195	0	0	2,39E-18
14	3	-0,6267	1,058	0,00	0,00	100	151	0,0090	0	0	6,93E-19
15	3	-0,0797	0,996	0,00	0,00	100	128	0,0188	0	0	1,73E-20
16	3	-0,0741	0,997	0,00	0,00	100	128	0,0181	0	0	1,46E-19
17	3	0,2542	1,036	0,00	0,00	100	86	0,0014	0	0	1,72E-08
18	3	0,2665	1,045	0,00	0,00	100	85	0,0001	0	0	5,16E-24
19	3	0,1871	1,044	0,00	0,00	92	96	0,0000	0	0	1,82E-03
20	3	0,1950	1,042	0,00	0,00	100	94	0,0001	0	0	7,41E-24
21	3	0,2763	1,067	0,00	0,00	100	90	0,0000	0	0	2,18E-10
22	3	0,2211	1,070	0,00	0,00	100	101	0,0000	0	0	4,52E-10
23	3	0,1432	1,060	0,00	0,00	86	112	0,0000	0	0	2,45E-05
24	3	-0,7374	1,075	0,00	0,00	100	154	0,0013	0	0	8,52E-20
25	3	-0,7735	1,101	0,00	0,00	73	152	0,0000	0	0	2,91E+00
26	2	-0,7592	1,100	38,79	13,63	-542	-160	0,0000	0	0	0,480
27	3	-0,7371	1,046	0,00	0,00	100	146	0,0031	0	0	7,57E-21
28	3	-0,6713	0,979	0,00	0,00	100	152	0,0160	0	0	3,49E-19
29	3	-0,7422	0,979	0,00	0,00	45	152	0,0131	0	0	5,62E+01
30	3	-0,1305	1,063	0,00	0,00	100	116	0,0209	0	0	2,76E-20
31	1	0,3979	1,060	14,31	-0,13	76	61	0,0028	7,04E-03	0,82	130,925
32	1	0,3942	1,040	13,02	1,63	78	66	0,0003	7,19E-03	0,365	0,006
33	1	0,3400	0,970	13,08	-2,45	73	64	0,0071	8,11E-03	2,287	0,029
34	0	0,3892	1,010	10,12	0,47	70	62	0,0014	8,97E-02	7,73E-01	0,169
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:								62	33	209	1392

O objetivo de se obter os desvios menores é obtido, pois DMQ_V é 62,23, DMQ_{P_g} é 33,54 e DMQ_{Q_g} é 209,5, sendo menores dos que os apresentados na Tabela 25.

Na Tabela 35 mostram-se os resultados para essa configuração do problema. O valor de M_1 é igual a 5,01%. A coluna referente a P_G é o valor das potências ativas antes do cálculo do fluxo de potência. O número de variações, em degrau de 0,05 pu de potência ativa, foi de 181 e a partir desse número, a coluna P_G é feita.

O Teste 5 também não acompanha os II de esgotamento de potência reativa mostrados na Tabela 22. Já para as variáveis de geração de potência ativa, as variações acompanham ao II de esgotamento de potência ativa.

Na Figura 30 mostra-se a diferença de tensão do caso base para o Teste 5 e na Figura 31 mostra a diferença entre a geração de potência ativa das barras *swing* para o caso base e para o Teste 5.

Entre as barras *swing*, a barra 1 é a que tem maior variação de tensão, aumentando em 11,6%, enquanto as barras 31, 32, 33 e 34 tem as seguintes

Tabela 35: Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras *swing* juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 5)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V %	DMQ_{P_G} %
1	1,15	33,00	1,36	0,0469
31	1,06	14,6	0,28	0,704
32	1,04	13,3	0,03	0,719
33	0,97	13,4	0,71	0,811
34	1,01	10,3	0,14	8,97

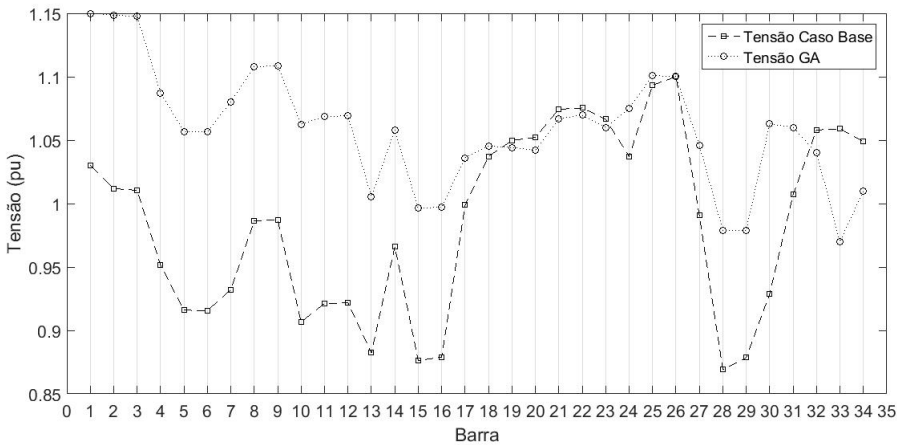


Figura 30: Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 5)

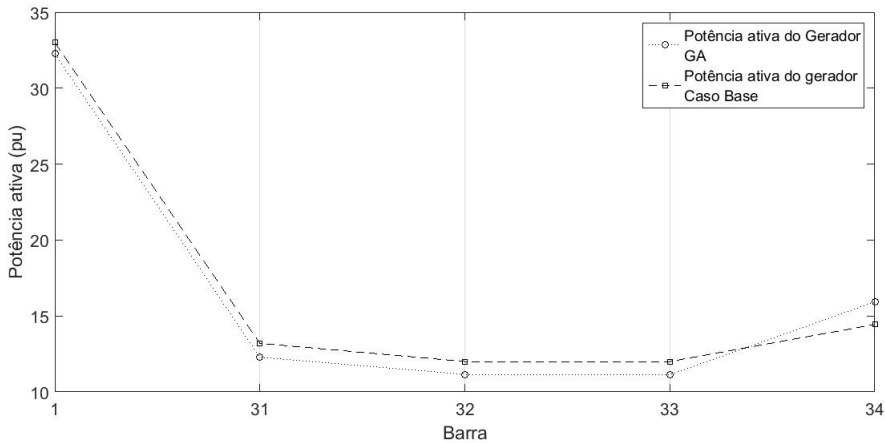


Figura 31: Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA para essa configuração do problema (Teste 5)

variações respectivamente: aumenta em 5,26%, diminui em 1,70%, diminui em 8,4% e diminui em 3,72%. A barra que mais altera o seu valor de tensão é a barra 1 seguida das barras 33, 31, 34 e 32.

Para a geração de potência ativa, a barra que sofre a maior variação é a barra 34, que diminui em 29,9% e ela ser a barra que sofre a maior variação é previsto, pois é o esgotamento de potência ativa que mais influência M_1 . Em seguida, as barras que sofrem as maiores variações de geração de potência ativa são: 33, 32, 31 e 1, com respectivamente aumento de 9,00%, aumento de 8,47%, aumento de 8,39% e diminui 2,17%.

Portanto, o objetivo inicial de aumentar M_1 até um valor maior ou igual a 5% é atingido, juntamente dos desvios mínimos quadrados de tensão, potência ativa e reativa são menores aos encontrados na Seção 5.4, tendo um menor desvio do ponto de operação.

6.2.6

Teste 6

Esse caso diferencia-se do anterior excluindo da penalização DMQ_{Q_G} . A função objetivo permanece a mesma apresentada em (6.6).

O resultado encontrado para o Teste 6 é apresentado na Tabela 36. O tempo total para essa simulação é de aproximadamente 25,22 minutos.

O objetivo de se obter os desvios menores é obtido, pois DMQ_V é igual 61,78 e DMQ_{P_G} é igual a 39,62, sendo menores dos que apresentados na Tabela 25.

Na Tabela 37 mostram-se os resultados para essa configuração do problema. O valor de M_1 é igual a 5,00%. A coluna referente a P_G é o valor das potências ativas antes do cálculo do fluxo de potência. O número de variações, em degrau de 0,05 pu de potência ativa, foi de 143 e a partir desse número, a coluna P_G é feita.

O teste 6 também não acompanha os II de esgotamento de potência reativo mostrados na Tabela 22. Já as variáveis de geração de potência ativa acompanham ao II de esgotamento de potência ativa.

Na Figura 32 mostra-se a diferença de tensão do caso base para o Teste 6 e na Figura 33 mostra-se a diferença entre a geração de potência ativa das barras *swing* para o caso base e para o Teste 6.

A barra 1 é a que sofre a maior variação de tensão, tendo um aumento de 11,6%, já as barras 31, 32, 33 e 34 tem as seguintes variações respectivamente: diminui em 0,69%, diminui em 3,59%, diminui em 4,63% e aumenta em 3,91%. A barra que mais altera o seu valor de tensão é a barra 1 seguido das barras 33, 34, 32 e 31.

Tabela 36: Fluxo de potência convergido após a resolução do GA (Teste 6)

Barra	Tipo	Ângulo(rad)	Tensão (pu)	P_g	Q_g	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	1	0,1762	1,150	32,30	7,12	5	69	0,0136	4,50E-04	0,1373	1,021
2	3	0,0895	1,148	0,00	0,00	100	94	0,0182	0	0	8,33E-22
3	3	0,0865	1,148	0,00	0,00	100	95	0,0184	0	0	2,38E-21
4	3	0,0439	1,087	0,00	0,00	100	101	0,0204	0	0	2,07E-19
5	3	-0,2161	1,056	0,00	0,00			0,0235	0	0	0
6	3	-0,2152	1,056	0,00	0,00			0,0235	0	0	0
7	3	-0,1108	1,080	0,00	0,00	100	132	0,0252	0	0	9,12E-19
8	3	0,0647	1,108	0,00	0,00			0,0151	0	0	0
9	3	0,0646	1,108	0,00	0,00			0,0151	0	0	0
10	3	-0,2880	1,062	0,00	0,00	100	143	0,0294	0	0	7,57E-19
11	3	-0,0731	1,068	0,00	0,00			0,0255	0	0	1
12	3	-0,0731	1,069	0,00	0,00			0,0255	0	0	1
13	3	-0,5123	1,005	0,00	0,00	100	153	0,0194	0	0	2,39E-18
14	3	-0,5930	1,058	0,00	0,00	100	151	0,0090	0	0	6,93E-19
15	3	-0,0457	0,996	0,00	0,00	100	128	0,0187	0	0	1,73E-20
16	3	-0,0402	0,997	0,00	0,00	100	128,22	0,0180	0	0	1,46E-19
17	3	0,2895	1,023	0,00	0,00	100	84	0,0006	0	0	1,87E-08
18	3	0,3020	1,040	0,00	0,00	100	84	0,0000	0	0	5,15E-24
19	3	0,2207	1,059	0,00	0,00	93	94	0,0001	0	0	2,27E-03
20	3	0,2284	1,059	0,00	0,00	100	92	0,0000	0	0	7,42E-24
21	3	0,2966	1,111	0,00	0,00	100	92	0,0012	0	0	6,67E-10
22	3	0,2479	1,106	0,00	0,00	100	100	0,0008	0	0	1,37E-09
23	3	0,1745	1,102	0,00	0,00	87	111	0,0011	0	0	3,33E-04
24	3	-0,7037	1,075	0,00	0,00	100	154	0,0013	0	0	8,52E-20
25	3	-0,7398	1,101	0,00	0,00	73	152	0,0000	0	0	2,93E+00
26	2	-0,7255	1,100	38,79	13,63	-56	-160	0,0000	0	0	0,468
27	3	-0,7034	1,046	0,00	0,00	100	146	0,0031	0	0	7,57E-21
28	3	-0,6375	0,979	0,00	0,00	100	152	0,0159	0	0	3,49E-19
29	3	-0,7085	0,979	0,00	0,00	45	152	0,0130	0	0	5,70E+01
30	3	-0,0965	1,063	0,00	0,00	100	116	0,0208	0	0	2,76E-20
31	1	0,4473	1,000	14,57	-4,06	71	55	0,0000	1,08E-02	3,45	114,638
32	1	0,4353	1,020	13,26	0,22	77	63	0,0013	1,10E-02	0,896	0,004
33	1	0,3681	1,010	13,33	-0,36	75	65	0,0021	1,23E-02	1,156	0,043
34	0	0,3892	1,090	9,39	3,99	74	67	0,0015	1,22E-01	4,67E-04	0,242
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:								62	40	237	1335

Tabela 37: Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras *swing* juntamente dos desvios mínimos referentes a essas variáveis (Teste 6)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V %	DMQ_{P_G} %
1	1,15	33,00	1,36	0,045
31	1,00	14,88	0,0048	1,08
32	1,02	13,54	0,129	1,10
33	1,01	13,62	0,21	1,23
34	1,09	9,59	0,15	12,2

A barra 34 é a barra que tem a maior alteração da geração de potência ativa, diminuindo em 35,0%. Em seguida, as barras que sofrem as maiores variações de geração de potência ativa são: 33, 32, 31 e 1, com, respectivamente, aumento de 11,1%, aumento de 10,48%, aumento de 10,37% e diminuição de 2,12%.

Portanto, o objetivo inicial de aumentar M_1 até um valor maior ou igual a 5% é atingido. Os desvios mínimos quadrados de tensão, potência ativa e reativa são menores aos encontrados em (5.4), tendo um menor desvio do ponto de operação.

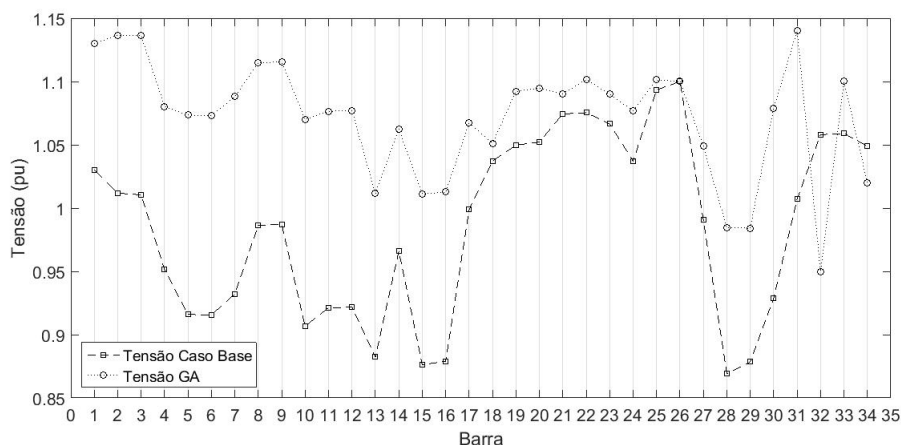


Figura 32: Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 6)

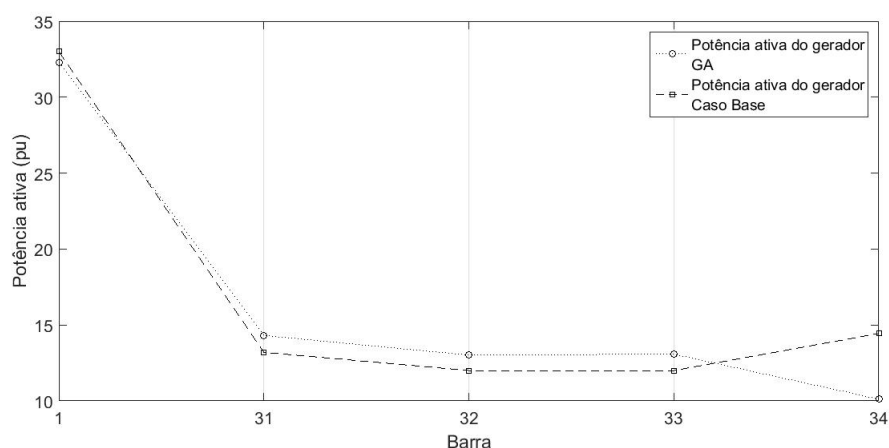


Figura 33: Geração de potência ativa no ponto de operação para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 6)

6.2.7

Resumo dos testes

Todos os testes feitos são apresentados, de maneira resumida, nessa seção do capítulo. Nas Tabela 38 e 39 apresentam-se os principais resultados encontrados, juntamente do caso base e dos resultados encontrados na Seção 5.4.

Em todos os casos nota-se que outras margens, além da barra crítica, melhoram, como por exemplo, a barra 29 e a barra 31, que antes da ação de controle pelo GA eram 5,25% e 6,08% respectivamente, e passam a ser entre 41% a 46% e 65% a 80%.

Tabela 38: Tensões e potência encontrados pelo GA juntamente com as do caso base e dos resultados na Seção 5.4

Caso	v_1	v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	Ação	P_{G1}	P_{G31}	P_{G32}	P_{G33}	P_{G34}
Base	1,03	1,007	1,058	1,059	1,049	-	33,00	13,20	12,00	12,00	14,44
Manual	1,14	1,007	1,058	1,06	1,049	93	32,28	15,42898	14,04	14,16	6,89
1	1,13	1,12	1,07	1	1,06	-	32,27	12,90797	11,73	11,73	14,12
2	1,17	0,98	0,99	0,97	1,02	88	32,33	15,52	14,13	14,24	6,70
3	1,19	0,95	0,97	0,95	0,95	232	32,38	13,08772	11,90	11,91	13,78
4	1,12	1,1	1,09	1,07	1,1	277	32,27	12,27781	11,16	11,13	15,93
5	1,15	1,04	1,04	0,97	1,01	158	32,29	13,01899	13,02	13,08	10,12
6	1,15	1	1,02	1,01	1,09	143	32,30	14,57132	13,26	13,33	9,39

Tabela 39: Margens e desvios encontrados pelo GA nos testes anteriores juntamente os do caso base e dos resultados na Seção 5.4

Caso	M(1) %	M(29)%	DMQ V%	DMQ Pg%	DMQ Qg%	DMQ M%	t(h)
Base	-468	5	0	0	0	0	-
Manual	5	46	63	60	242	1337	-
1	5	45	66	5	273	1456	4,80
2	5	44	61	62	173	495	5,03
3	5	41	64	5	173	1285	4,91
4	5	46	70	16	162	1461	4,45
5	5	45	62	34	209	1392	30,93
6	5	45	62	40	237	1335	25,22

Os Testes 1 e 3 são aqueles que apresentam os melhores resultados para os desvios de tensão e potência ativa e, portanto, são os melhores resultados possíveis. As outras simulações tem uma alta variação de potência ativa, afastando muito o resultado encontrado para o caso base. Então nesse sistema, alterar a tensão resulta em melhores margens de potência.

6.3

Sistema Nórdico - Ponto B

O sistema Nórdico (ou Nordic32) é um sistema de 74 barras, porém em [10] é apresentado com 3 barras de geração a mais. As barras 15, 16 e 18, são duplicadas, gerando assim um total de 77 barras, chamado de ponto B de operação. Esse ponto de operação apresenta 23 barras de geração, 22 barras de carga, 32 barras de controle de reativa ou barra de passagem. O sistema possui 102 ramos de transmissão, entre os quais 22 de distribuição e 20 transformadores de elevação. Apresenta 23 barras *swing*, (barras 1 a 20 e 75 a 77) e 54 barras PQ (barras 21 a 74). Na Figura 34 apresenta-se o diagrama unifilar do sistema Nórdico e na Figura 35 mostra-se a duplicação dos geradores.

O ponto de operação apresentado em [10] é utilizado para o cálculo de fluxo de potência elevando-se a carga do sistema até chegar a um ponto de operação próximo ao limite de estabilidade de tensão. O novo ponto

de operação é encontrado utilizando as formulações de solução de fluxo de potência apresentado na Seção 2.1.3.3. As barras *swing* são as barras que compensam o aumento de carga e as perdas ativas do sistema. O ponto de operação e os valores dos índices de estabilidade de tensão são mostrados na Tabela 40.

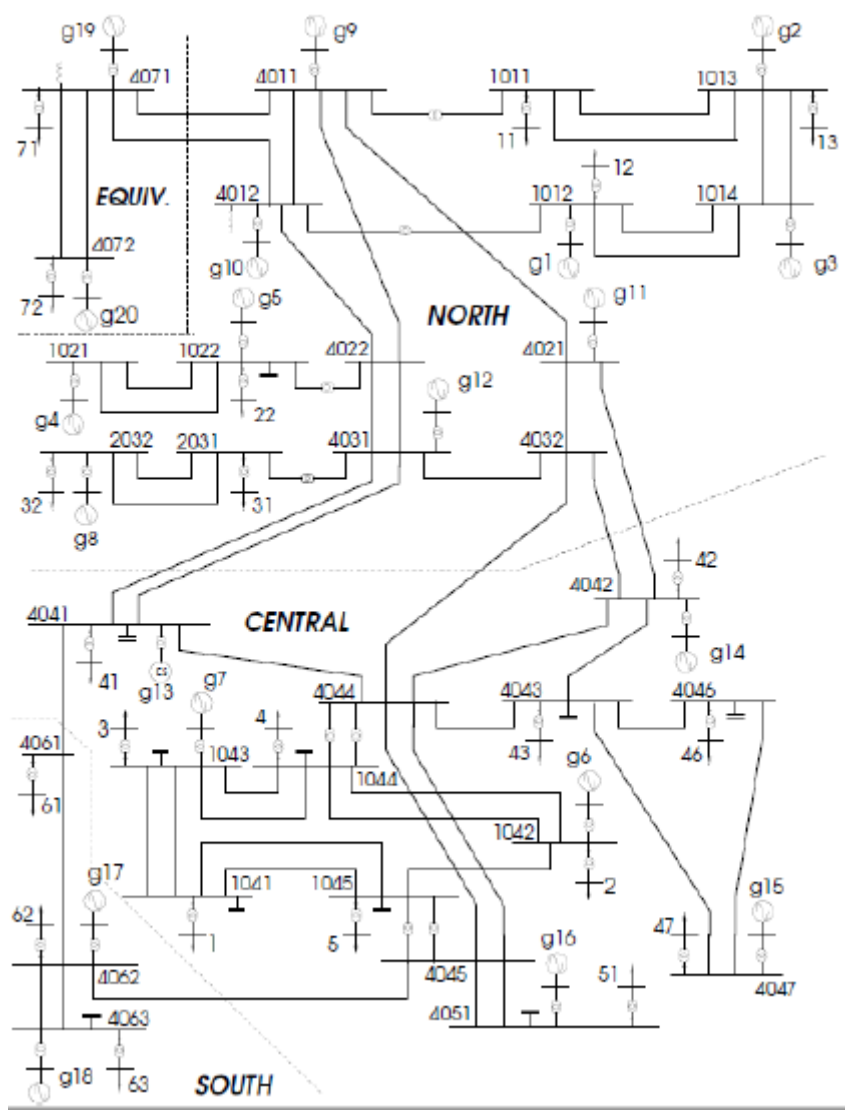


Figura 34: Diagrama unifilar do sistema Nórdico [10]

A barra de carga que mais se aproxima do seu limite de estabilidade de tensão é a barra 53, tendo margem de 8%. Porém ela não é a barra que apresenta o pior índice de estabilidade. A barra 7 tem o menor valor de margem que é igual a -183%. Portanto, a barra crítica para esse sistema é a barra 7, enquanto que a barra 53 é a barra crítica de carga.

Sendo assim, é feita a análise de esgotamento de recursos para a barra crítica, ou seja, a barra 7. Os índices de influência encontrados são mostrados na Tabela 41.

Tabela 40: Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema Nórdico, caso-base

Barra	Tipo	Ang (°)	v (pu)	P_G	Q_G	Margem (%)	$\beta(^{\circ})$
1	1	23,9	1,07	7,11	1,56	78	59
2	1	27,1	1,06	3,56	0,54	83	67
3	1	33,2	1,06	6,52	0,56	70	57
4	1	37,5	1,03	4,74	0,80	30	20
5	1	12,3	1,03	2,37	1,41	78	65
6	1	-38	1,01	4,27	2,89	23	86
7	1	-52	1,01	2,13	3,50	-183	-93
8	1	13,3	1,05	8,89	4,25	28	29
9	1	19,1	1,00	7,93	3,39	80	55
10	1	22	1,02	7,11	3,68	80	59
11	1	-4,7	1,02	2,96	1,59	74	73
12	1	-6,2	1,02	3,68	3,11	71	79
13	1	-33	1,02	0,00	3,60	75	132
14	1	-26	1,05	7,47	6,87	29	147
15	1	-34	1,05	6,40	6,28	53	137
16	1	-32	1,05	7,11	4,88	48	113,44
17	1	-21	1,01	6,28	2,73	58	82
18	1	-21	1,03	6,28	4,36	64	82
19	1	9,35	1,03	3,56	2,89	85	73
20	0	0	1,02	16,30	10,82	42	102
53	3	-80	0,70	0,00	0,00	8	173
54	3	-53	0,93	0,00	0,00	58	112
55	3	-70	0,76	0,00	0,00	40	164
56	3	-54	0,81	0,00	0,00	40	161
57	3	-57	0,80	0,00	0,00	39	159
58	3	9,52	0,96	0,00	0,00	90	93
59	3	13,6	0,97	0,00	0,00	90	90
60	3	19,1	0,99	0,00	0,00	91	93
61	3	0,05	0,91	0,00	0,00	84	97
62	3	-16	0,86	0,00	0,00	88	106
63	3	0,95	0,96	0,00	0,00	84	85
64	3	-38	0,85	0,00	0,00	71	141
65	3	-40	0,87	0,00	0,00	75	141
66	3	-48	0,86	0,00	0,00	54	153
67	3	-49	0,88	0,00	0,00	58	145
68	3	-42	0,93	0,00	0,00	88	109
69	3	-45	0,92	0,00	0,00	59	132
70	3	-40	0,89	0,00	0,00	65	124
71	3	-34	0,93	0,00	0,00	80	106
72	3	-29	0,97	0,00	0,00	70	96
73	3	-0,5	0,95	0,00	0,00	91	101
74	3	-6,6	0,97	0,00	0,00	90	122
75	1	-32	1,05	7,11	4,88	48	113
76	1	-17	1,03	6,28	2,56	62	76
77	1	-29	1,05	6,40	3,54	61	104

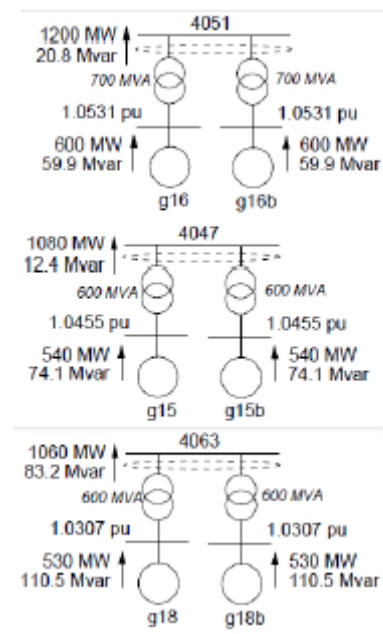


Figura 35: Geradores duplicados [10]

Tabela 41: Índices de influência para o esgotamento de recursos referentes a barra 7 - valores menores que 0,5 são ocultados na Tabela

II_7	
Q14	77,69
Q15	46,95
Q6	42,63
Q16	36,80
Q75	36,80
Q13	31,11
Q77	17,06
Q8	16,57
Q12	16,08
Q11	14,19
Q17	11,39
Q18	4,64
Q4	3,55
Q5	3,28
Q9	2,67
Q76	1,57
Q10	1,19
P20	1,08
Q20	0,96
Q1	0,86
P8	-0,61

Como anteriormente, o objetivo é encontrar um novo ponto de operação do sistema que apresente a margem da barra crítica maior ou igual a 5%, variando as tensões e/ou variando o despacho de potência ativa das barras *swing*.

São feitos dois testes com o GA para o intuito de melhorar a margem da barra crítica M_7 . O Teste 1 utiliza apenas as tensões das barras *swing* como variáveis e minimiza DMQ_V . Esse teste utiliza um tamanho populacional de 30 (número encontrado após vários testes). Já o Teste 2 utiliza, além da tensão, a geração de potência ativa das barras *swing* como variáveis, através da formulação apresentada em (6.2) e procurando minimizar DMQ_{PG} . Esse teste utiliza um tamanho populacional de 40. As características desses dois testes são as mesmas apresentadas nos Testes 1 e 3 do sistema CEPEL-34. A utilização deles se dá ao fato de terem tido um melhor desempenho na busca pelos resultados comparados aos demais.

6.3.1

Teste 1

No Teste 1 busca-se um valor de M_7 maior ou igual a 5%, sem que o ponto de operação original varie muito. Portanto a função objetivo do GA visa minimizar DMQ_V e encontrar um valor maior que 5% para M_7 . A função objetivo é apresentada em (6.7). A representação cromossômica é apresentada na Figura 36 tendo a tensão como variável, com os limites entre [0,95/ 1,10] pu.

$$\min f_{objetivo}(M_7, DMQ_V) \leftrightarrow f_{objetivo} = \sqrt{(0,05 - M_7)^2 + DMQ_V^2} \quad (6.7)$$

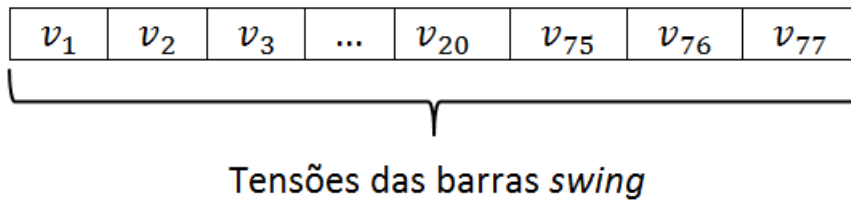


Figura 36: Representação cromossômica do GA (Teste 1 - Sistema Nórdico)

O ponto de operação obtido para a solução desse problema é apresentado na Tabela 42. O tempo total de simulação foi de 62,0 minutos.

A solução encontrada é apresentada na Tabela 43. O valor de M_7 é igual a 7,43% e M_{53} passa a valer 13,9%.

Tabela 42: Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema Nórdico, no resultado encontrado pelo GA (Teste 1)

Barra	Tipo	Ang	Tensão	P_g	Q_g	Margem(pu)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	1	0,41	1,07	7,11	1,12	79	61	3,50685E-06	3,34E-09	0,080150267	2,23E-05
2	1	0,48	1,02	3,56	0,17	82	66	0,001225331	3,34E-09	0,476687766	1,22E-04
3	1	0,60	0,98	6,52	-1,05	65	53	0,00563031	3,34E-09	8,290806546	4,91E-03
4	1	0,64	1,04	4,74	0,7	31	22	3,48099E-05	3,34E-09	0,016075115	1,87E-03
5	1	0,21	1,05	2,37	1,55	78	67	0,000416493	3,34E-09	0,009613672	3,53E-05
6	1	-0,68	1,03	4,27	3,01	29	77	0,000476348	3,34E-09	0,001681906	5,96E-02
7	1	-0,92	1,05	2,13	3,77	7	171	0,00126046	3,34E-09	0,005713584	1,08E+00
8	1	0,24	1,04	8,89	4,11	28	29	8,71443E-05	3,34E-09	0,001043177	9,92E-05
9	1	0,32	1,03	7,93	4,55	80	57	0,00097578	3,34E-09	0,117219894	5,04E-06
10	1	0,36	1,09	7,11	7	78	63	0,005351145	3,34E-09	0,818623756	4,02E-04
11	1	-0,06	0,96	2,96	0,64	74	70	0,003569507	3,34E-09	0,353345381	7,05E-07
12	1	-0,11	1,03	3,68	3,36	71	78	9,61169E-05	3,34E-09	0,006791884	4,83E-05
13	1	-0,58	0,99	0	2,83	81	124	0,000704832	3,34E-09	0,045759831	6,44E-03
14	1	-0,45	1	7,47	5,02	46	122	0,001854353	3,34E-09	0,072554622	3,18E-01
15	1	-0,60	1,08	6,4	8,3	56	121	0,001088905	3,34E-09	0,102927492	2,41E-03
16	1	-0,57	1,07	7,11	5,78	51	99	0,00026064	3,34E-09	0,034497795	4,93E-03
17	1	-0,37	1,03	6,28	3,19	59	78	0,000433168	3,34E-09	0,027655348	5,51E-04
18	1	-0,38	1,04	6,28	4,5	64	79	8,14144E-05	3,34E-09	0,001082311	1,17E-04
19	1	0,16	1,04	3,56	2,93	85	73	9,42596E-05	3,34E-09	0,000236918	4,97E-06
20	0	0,00	1,02	16,3	10,3	42	102	2,169E-06	3,34E-09	0,002128975	2,97E-04
53	3	-1,37	0,73	0,00	0,00	14	168	0,00			4,62E-01
54	3	-0,92	0,95	0,00	0,00	61	106	0,00			1,79E-03
55	3	-1,22	0,79	0,00	0,00	50	156	0,00			5,84E-02
56	3	-0,95	0,82	0,00	0,00	46	156	0,00			2,41E-02
57	3	-0,99	0,81	0,00	0,00	45	153	0,00			2,97E-02
58	3	0,16	0,97	0,00	0,00	90	93	0,00			3,75E-06
59	3	0,23	0,98	0,00	0,00	90	90	0,00			5,73E-06
60	3	0,33	0,96	0,00	0,00	91	94	0,00			2,45E-05
61	3	0,00	0,92	0,00	0,00	85	96	0,00			4,10E-05
62	3	-0,29	0,86	0,00	0,00	88	105	0,00			1,33E-06
63	3	0,02	0,95	0,00	0,00	84	84	0,00			5,56E-06
64	3	-0,66	0,84	0,00	0,00	72	137	0,00			3,91E-04
65	3	-0,71	0,86	0,00	0,00	77	135	0,00			2,99E-04
66	3	-0,84	0,87	0,00	0,00	58	147	0,00			5,13E-03
67	3	-0,85	0,89	0,00	0,00	61	138	0,00			2,79E-03
68	3	-0,74	0,95	0,00	0,00	89	106	0,00			4,82E-05
69	3	-0,79	0,92	0,00	0,00	61	123	0,00			1,70E-03
70	3	-0,70	0,90	0,00	0,00	66	119	0,00			4,11E-04
71	3	-0,60	0,95	0,00	0,00	81	102	0,00			8,60E-05
72	3	-0,51	0,98	0,00	0,00	71	94	0,00			1,01E-04
73	3	-0,01	0,96	0,00	0,00	92	101	0,00			2,92E-06
74	3	-0,11	0,97	0,00	0,00	90	122	0,00			1,99E-07
75	1	-0,56	1,03	7,11	3,69	53	98	0,00	1,51E-06	5,02E-02	1,30E-02
76	1	-0,30	1,03	6,28	2,18	63	74	0,00	1,51E-06	1,33E-01	2,08E-04
77	1	-0,52	1,04	6,40	2,72	64	95	0,00	1,51E-06	1,88E-01	2,53E-03
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:								17,32	0,03	323,49	121,77

No Teste 1, a tensão que sofre a maior variação é a da barra 9. Nesse caso, alterar a tensão da própria barra crítica não afeta, com muita significância, M_7 . Na Figura 37 mostra-se a diferença de tensão do caso base para o Teste 1 usando GA.

Entre as barras *swing*, a barra 9 é aquela que sofre a maior variação

Tabela 43: Solução encontrada pelo GA para as tensões e potências ativas das barras *swing* juntamente dos DMQ referentes a essas variáveis (Teste 1)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V (%)	DMQ_{P_G} (%)
1	1,07	6	3,51E-06	1,51E-06
2	1,02	3	2,59E-04	1,51E-06
3	0,98	5,5	2,23E-07	1,51E-06
4	1,04	4	3,48E-05	1,51E-06
5	1,05	2	1,14E-04	1,51E-06
6	1,03	3,6	6,30E-05	1,51E-06
7	1,05	1,8	3,50E-05	1,51E-06
8	1,04	7,5	3,63E-08	1,51E-06
9	1,03	6,685	1,70E-03	1,51E-06
10	1,09	6	1,79E-05	1,51E-06
11	0,96	2,5	3,46E-04	1,51E-06
12	1,03	3,1	9,61E-05	1,51E-06
13	0,99	0	2,79E-04	1,51E-06
14	1	6,3	2,29E-05	1,51E-06
15	1,08	5,4	5,49E-04	1,51E-06
16	1,07	6	4,42E-05	1,51E-06
17	1,03	5,3	4,33E-04	1,51E-06
18	1,04	5,3	4,03E-04	1,51E-06
19	1,04	3	9,43E-05	1,51E-06
20	1,02	13,75	6,96E-05	1,51E-06
75	1,03	6	4,77E-04	1,51E-06
76	1,03	5,4	1,58E-03	1,51E-06
77	1,04	5,3	6,18E-04	1,51E-06

de tensão, ela aumenta em 4,12%, sendo seguida da barra 76 que aumenta em 3,98%, que tem o segundo maior II de esgotamento de potência reativa. Portanto, essas barras são as que mais afetam M_7 .

Portanto, o objetivo inicial de elevar M_7 até um valor maior ou igual a 5% e ter a menor variação possível no seu ponto de operação é atingido.

6.3.2 Teste 2

Diferentemente do caso anterior, o Teste 2 utiliza a potência ativa como variável juntamente com a tensão. A função objetivo também é modificada para englobar a minimização de DMQ_{P_G} . Portanto, a nova função objetivo é

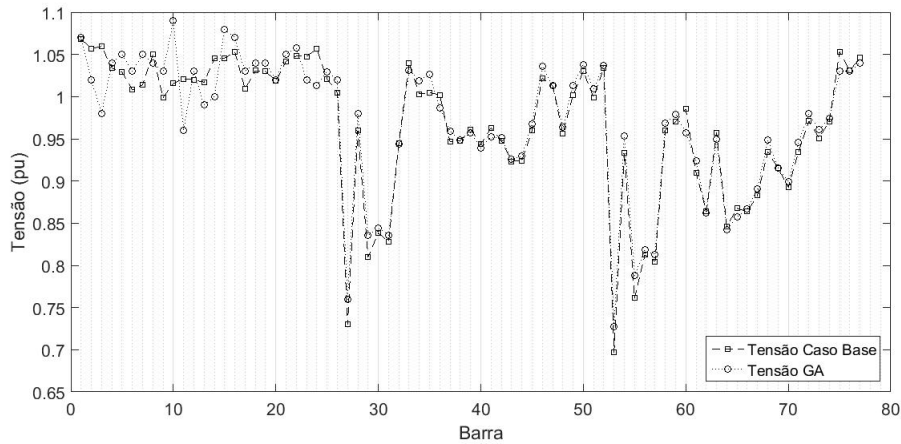


Figura 37: Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA (Teste 1)

apresentada em (6.8) e a representação cromossômica é mostrada na Figura 38.

$$\min f_{objetivo}(M_7, DMQ_V, DMQ_{P_G}) \leftrightarrow f_{objetivo} = \sqrt{(0,05 - M_7)^2 + DMQ_V^2 + DMQ_{P_G}^2} \quad (6.8)$$

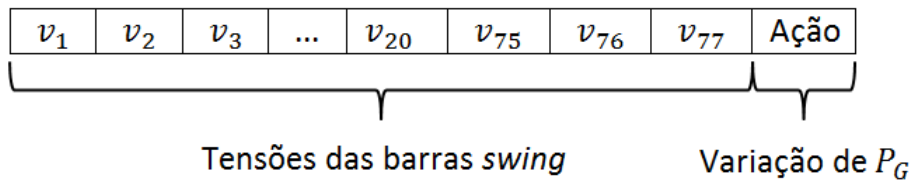


Figura 38: Representação cromossômica do GA (Teste 2)

No Teste 2, o no ponto de operação é apresentado na Tabela 44. O tempo total de simulação foi de 39,4 minutos.

Os novos valores de tensão, potência ativa e DMQ são apresentados na Tabela 45. O valor de M_7 é de 5,69%. Já M_{53} tem seu valor aumentado para 13,9%.

Entre as barras *swing*, a que sofre a maior variação de tensão é a barra 9, que na Tabela 41 está entre os maiores II para o esgotamento de potência reativa. A segunda barra que sofre maior variação é a barra 5. Nesse caso, alterar a tensão da própria barra crítica não afeta com muita significância M_7 . Na Figura 39 mostra-se a diferença de tensão entre o caso base e o resultado encontrado para o Teste 2.

Tabela 44: Ponto de operação e índices de estabilidade de tensão do sistema Nórdico, para o resultado encontrado pelo GA (Teste 2)

Barra	Ang	Tensão	P_g	Q_g	Margem(%)	$\beta(^{\circ})$	DMQ_V	DMQ_{P_g}	DMQ_{Q_g}	DMQ_M
1	0,428	1,04	7,11	0,38	78	60	6,87E-04	7,84E-07	5,73E-01	7E-05
2	0,487	1,01	3,55	-0,57	81	66	1,98E-03	4,77E-07	4,29E+00	3E-04
3	0,592	1,05	6,52	0,73	69	57	8,04E-05	4,89E-07	9,63E-02	4E-05
4	0,676	1,03	4,75	0,88	30	20	1,42E-05	1,15E-06	8,74E-03	2E-04
5	0,239	0,97	2,37	0,56	78	63	3,29E-03	5,45E-07	3,66E-01	5E-06
6	-0,650	1,03	4,26	2,98	29	76	4,76E-04	1,48E-06	8,80E-04	7E-02
7	-0,884	1,03	2,13	3,48	6	173	2,49E-04	3,37E-07	4,70E-05	1E+00
8	0,273	1,02	8,92	3,83	26	27	8,06E-04	7,58E-06	9,79E-03	3E-03
9	0,328	1,07	7,92	7,48	78	59	5,08E-03	6,04E-07	1,46E+00	5E-04
10	0,388	1,02	7,11	3,75	80	61	1,79E-05	8,39E-07	4,41E-04	1E-06
11	-0,075	1,06	2,97	2,01	75	75	1,46E-03	2,07E-06	6,94E-02	2E-04
12	-0,090	1,03	3,68	3,31	72	78	9,61E-05	2,93E-06	4,08E-03	1E-04
13	-0,554	0,99	0,00	2,74	81	121	7,05E-04	1,03E-08	5,71E-02	8E-03
14	-0,444	1,08	7,47	8,06	47	120	1,12E-03	3,67E-07	3,02E-02	3E-01
15	-0,557	1,02	6,40	4,77	62	117	5,95E-04	9,13E-08	5,77E-02	3E-02
16	-0,531	1,04	7,12	4,51	53	96	1,52E-04	5,86E-09	5,70E-03	1E-02
17	-0,340	1,03	6,29	3,42	59	76	4,33E-04	2,30E-06	6,26E-02	4E-04
18	-0,341	1,03	6,29	4,53	64	78	4,61E-07	2,42E-06	1,59E-03	4E-05
19	0,173	0,98	3,53	1,55	86	72	2,36E-03	4,20E-05	2,13E-01	1E-04
20	0,000	1,01	16,21	11,12	41	103	6,96E-05	3,54E-05	7,57E-04	5E-04
53	-1,338	0,72	0,00	0,00	14	168	1,44E-03			5E-01
54	-0,887	0,95	0,00	0,00	61	105	3,72E-05			1E-03
55	-1,185	0,78	0,00	0,00	50	156	7,67E-04			6E-02
56	-0,917	0,82	0,00	0,00	47	154	2,75E-04			4E-02
57	-0,955	0,81	0,00	0,00	46	152	1,68E-04			4E-02
58	0,171	0,97	0,00	0,00	90	93	1,08E-04			4E-06
59	0,243	0,96	0,00	0,00	90	91	1,50E-04			5E-06
60	0,340	0,97	0,00	0,00	91	93	2,14E-07			6E-10
61	0,013	0,90	0,00	0,00	84	97	1,09E-04			2E-05
62	-0,269	0,86	0,00	0,00	88	104	3,66E-04			4E-05
63	0,046	0,93	0,00	0,00	83	85	1,90E-04			3E-05
64	-0,634	0,85	0,00	0,00	72	134	3,71E-04			2E-03
65	-0,677	0,88	0,00	0,00	78	132	4,40E-04			1E-03
66	-0,805	0,87	0,00	0,00	59	145	2,65E-05			9E-03
67	-0,817	0,88	0,00	0,00	62	136	1,45E-05			4E-03
68	-0,705	0,93	0,00	0,00	88	105	2,48E-04			1E-05
69	-0,753	0,91	0,00	0,00	61	121	9,51E-05			2E-03
70	-0,672	0,90	0,00	0,00	66	117	4,47E-04			1E-03
71	-0,565	0,94	0,00	0,00	81	101	3,59E-04			2E-04
72	-0,480	0,97	0,00	0,00	71	93	8,28E-05			2E-04
73	-0,007	0,94	0,00	0,00	91	101	1,89E-04			5E-06
74	-0,117	0,96	0,00	0,00	90	121	1,64E-04			6E-06
75	-0,531	1,04	7,09	5,69	53	96	4,42E-05	7,92E-06	2,78E-02	7E-03
76	-0,259	1,01	6,24	0,93	62	73	9,04E-04	4,43E-05	4,07E-01	4E-04
77	-0,478	1,04	6,39	3,44	63	91	2,34E-04	5,68E-06	8,47E-04	2E-03
Desvio Mínimo Quadrático do ponto de operação em relação ao caso base:							16	1,01	270	124

Tabela 45: Solução encontrada pelo GA para a tensão e potência ativa das barras *swing* juntamente dos DMQ referentes a essas variáveis (Teste 2)

Barra	Tensão(pu)	P_G (pu)	DMQ_V %	DMQ_{P_G} %
1	1,03	6,00	1,27E-03	1,69E-07
2	1,06	3,00	8,06E-06	8,05E-07
3	1,04	5,50	3,39E-04	7,68E-07
4	1,04	3,98	3,48E-05	2,81E-05
5	1,03	1,99	9,44E-07	2E-05
6	1,01	3,61	3,94E-06	1,71E-07
7	1,02	1,80	3,50E-05	1,38E-06
8	1,06	7,44	9,44E-05	9,03E-05
9	1,04	6,69	1,70E-03	4,64E-07
10	1	6,01	2,39E-04	1,12E-07
11	1,01	2,49	1,16E-04	3,87E-05
12	1,04	3,08	3,84E-04	4,76E-05
13	1,03	0,00	1,63E-04	8,28E-06
14	1,09	6,28	1,85E-03	1,71E-05
15	1,01	5,40	1,15E-03	3,49E-06
16	1,01	5,99	1,67E-03	7,92E-06
17	1,04	5,27	9,44E-04	4,12E-05
18	1,05	5,27	3,51E-04	4,24E-05
19	1,05	3,04	3,77E-04	0,000184
20	1,03	13,93	1,27E-04	0,00015
75	1,06	5,99	4,42E-05	7,92E-06
76	1	5,27	9,04E-04	4,43E-05
77	1,03	5,39	2,34E-04	5,68E-06

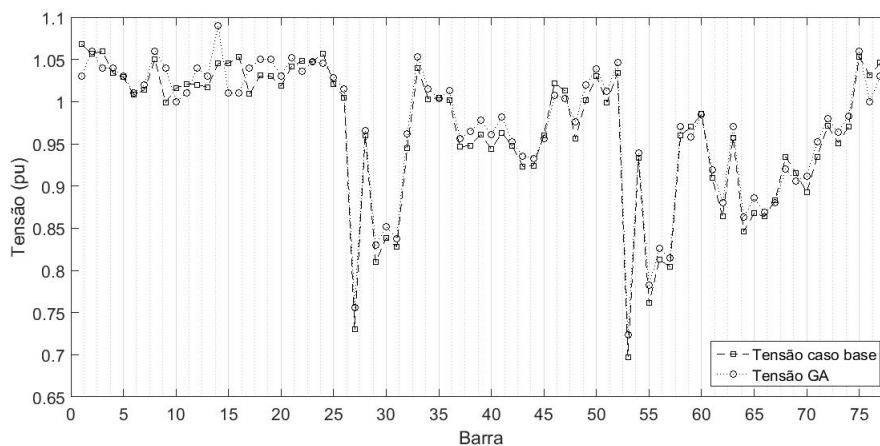


Figura 39: Níveis de tensão para o caso base e para o a solução encontrada pelo GA para essa configuração do problema (Teste 2)

O despacho de potência ativa que tem a maior variação é a barra 19 seguida da barra 20. Observa-se que as variáveis de potência ativa têm valores

muito próximos aos seus valores no caso base. A variação não acompanha os II de potência ativa.

Portanto, o objetivo inicial de elevar M_7 até um valor maior ou igual a 5% e ter a menor variação possível no seu ponto de operação é atingido.

6.3.3

Resumo dos testes

Na Tabela 46 mostram-se os principais valores de tensão do sistema, da margem das barras 7 e 53, juntamente dos DMQ da tensão e da potência ativa.

Tabela 46: Resumo dos resultados encontrados para os testes 1 e 2 com a intenção de melhoria em M_7

Caso	v_7	v_9	v_{14}	v_{15}	Ação	P_{G19}	P_{G19}	M_7 %	M_{53} %	DMQ_V %	DMQ_{PG} %	DMQ_{QG} %	DMQ_M %	t(h)
Base	1,01	1,00	1,05	1,05	-	3,56	16,30	-182,73	8,28	-	-	-	-	-
1	1,05	1	1	1,08	-	3,56	16,30	7,43	13,90	17,32	0,05	323,49	121,77	61,98
2	1,03	1,07	1,08	1,02	98	3,53	16,21	5,55	13,94	15,52	1,01	270,30	124,27	39,44

Em todos os teste consegue-se elevar M_7 a valores acima de 5% (Teste 1 apresenta M_7 de 7,43% e Teste 2 apresenta M_7 de 5,55%). Como consequência, também melhoram os valores de M_{53} (Teste 1 apresenta M_{53} de 13,90% e Teste 2 apresenta M_{53} de 13,94%). Em ambos os testes consegue-se alterar pouco o ponto de operação do sistema.

Os resultados encontrados mostram que nesse casos, alterar a tensão é mais significativo do que alterar o despacho de potência ativa, isso acontece porque índices associados aos esgotamentos de potências reativas são maiores que os do esgotamento de potência ativa.

Portanto, o GA é uma ferramenta que pode ser utilizada para melhorar as margens das barras críticas em um sistema.

6.4

Resumo do capítulo

Nesse capítulo é mostrada a utilização de GA para a elevação da margem de potência em barras críticas em dois sistemas diferentes: CEPEL-34 e Nórdico - Ponto de operação B. Também é apresentado o conceito do desvio mínimo quadrático que se torna uma medida de distância do ponto de operação do caso base (pré ação de controle) para os casos de ação de controle do GA.

No primeiro sistema (CEPEL-34) foram feitos seis testes em condições diferentes. Os quatro primeiros testes buscam apenas melhorar as condições de estabilidade de tensão, alterando o mínimo possível do ponto de operação. No Teste 1, a tensão é utilizada como variável e o DMQ_V é utilizado na função objetivo, com o intuito de minimizá-lo. Já no Teste 2, insere-se o despacho de potência ativa como variável. No Teste 3, insere-se DMQ_{PG} na

função objetivo com o intuito de minimizá-lo. No Teste 4, há a inserção de DMQ_{QG} na função objetivo, com o intuito de minimizá-lo. Nos Testes 5 e 6 são feitas comparações entre os resultados encontrados na Seção 5.4 com o GA e, portanto, os DMQ são excluídos da função objetivo. Sendo assim, no Teste 5, uma penalidade é aplicada toda vez que algum DMQ do GA é maior que o DMQ encontrado na Seção 5.4. Já no Teste 6, o DMQ_{QG} é retirado da lista de penalizações, sobrando apenas a comparação entre os DMQ_V e DMQ_{PG} . Todas as simulações conseguem atingir o objetivo inicial de elevar a margem da barra crítica até um valor maior ou igual a 5%, mas nos Testes 1 e 3 os pontos de operação apresentam menor variação. Portanto, os modelos dos Testes 1 e 3 são considerados os mais adequados para esse sistema e ponto de operação.

Para o segundo sistema (Nórdico - ponto de operação B) foram feitos dois testes, os que apresentaram as melhores respostas no sistema CEPEL-34. No Teste 1, utiliza-se apenas a tensão como variável e coloca-se na função objetivo minimizar DMQ_V . Já no Teste 2 é incluído o despacho de potência ativa como variável e na função objetivo é incluído a minimização de DMQ_{PG} . Entre esses dois testes, o primeiro obtém resultados mais satisfatórios, pois a variação da tensão e da potência ativa são menores. Como utiliza apenas a tensão como variável, o esforço computacional é menor.

Em ambos os casos, os resultados encontrados não obedecem aos valores dos índices de influência calculados para os esgotamentos de potência reativa, pois o problema é proposto para encontrar um novo ponto de operação que eleve as margens a valores acima de 5%, com um tempo de simulação curto para serem tomadas as medidas de controle necessárias. Caso esse tempo fosse desconsiderado, poderia ser feita a busca pelo ótimo global, que o resultado teria a tendência em seguir os valores dos índices de influência.

Portanto, a utilização de GA para a melhoria da condição de estabilidade de tensão é satisfatória, pois consegue elevar as margens das barras críticas a valores aceitáveis de operação, alterando o mínimo possível o ponto de operação do sistema.

O fluxo de potência é a ferramenta para se encontrar o ponto de operação de um sistema elétrico. Encontrar esse ponto de operação é fundamental para o estudo da estabilidade de tensão, pois a condição da qual se encontra essa estabilidade é feita nesse ponto de operação. Como um sistema real comporta vários geradores, uma modelagem que utiliza essa premissa é mais fidedigna da realidade e, portanto, a modelagem com múltiplas barras *swing* é utilizada.

Após a determinação do ponto de operação, são determinados os índices de estabilidade de tensão. Em seguida são calculados índices associados aos esgotamentos de recursos para saber-se qual variável de controle deve ser alterada para melhorar os índices apresentados. São considerados três tipos distintos de esgotamento: o esgotamento de potência reativa, o de potência ativa e o *tap* de transformadores.

Os índices associados aos esgotamentos foram calculados em dois sistemas: Sistema 6 barras e CEPEL-34. Esses cálculos são feitos para identificar os efeitos dos esgotamentos em relação aos índices de estabilidade de tensão. No sistema de 6 barras não observam-se índices ruins, ou seja, valores negativos ou próximos a zero. Já no sistema CEPEL-34 apresentam-se índices para barra de carga e barra de geração muito próximos ao valor crítico e valores negativos, ou seja, valores muito próximos ao ponto C e região de operação B da curva SV. Os índices associados ao esgotamento indicam quais as tensões e gerações de potência ativa são mais influentes para as margens das barras críticas do sistema. Esgotamentos com índices de influência negativos indicam que o esgotamento do recurso em questão é prejudicial para aquelas barras. Já valores positivos indicam que o esgotamento é benéfico para aquelas barras.

Com os índices de influência dos esgotamentos determinado, são tomadas medidas de ações de controle preventivas no sistema CEPEL-34. Nesse caso foram aplicados dois tipos distintos de ação de controle: as de potência reativa e as de potência ativa. Como na formulação do problema do fluxo de potência não entra diretamente a potência reativa, o controle é feito variando a tensão da barra. Para a barra de carga, mostrou-se que alterar a tensão da barra que tem o maior índice de influência de esgotamento de potência reativa sobre a barra de carga, melhor a margem de potência naquela barra de carga. Já para

a barra de geração, aumentar a tensão da própria barra em análise melhora o índice de estabilidade de tensão daquela barra, chegando a passar para a região de operação A. Porém, isso seria contraditório a princípio, pois o esgotamento de potência reativa na própria barra é nulo, da forma que esses índices são calculados. Ao alterar-se as demais tensões das barras, melhore a margem, não altera a região de operação. Como não se pode alterar a geração de potência ativa total do sistema, a alteração dessa geração em uma barra deve ser compensada por outras barras, portanto a ação de controle preventivo de potência ativa é feita observando qual foi o esgotamento que mais afetou aquela barra (prejudicialmente ou não) e alterando a geração dessa barra, enquanto que as demais unidades geradoras compensam essa variação, também através dos índices de influência de esgotamento de potência ativa. Para a barra de carga esse tipo de ação de controle é inicialmente benéfico, afastando a margem dessa barra do ponto crítico, porém ao aumentar muito, a margem dessa barra volta a se aproximar do ponto crítico. Já para a barra de geração, o mesmo acontece, porém como essa barra está na região B de operação, ela não consegue passar para a região A, não sendo satisfatória essa ação. Portanto, para esse sistema, a ação de controle preventiva de potência reativa é melhor que a ação de controle preventiva de potência ativa e isso era esperado, pois os índices de influência associados ao esgotamento de recurso reativo é maior que os associados ao esgotamento de recurso ativo. Há também um terceiro tipo de ação de controle preventivo: a combinação entre os dois citados anteriormente. Para esse caso, escolhe uma tensão que já tenha transferido a região de operação B para a região A e aplica-se a ação de controle preventivo de potência ativa.

A ação de controle citada busca mapear todos os resultados possíveis para depois serem tomadas algumas medidas (tais como alteração da tensão da barra *swing* e/ou redespacho de potência ativa). É utilizado o algoritmo genético com o intuito de encontrar um novo ponto de operação do sistema para que os índices de estabilidade de tensão sejam adequados. Primeiramente o GA é utilizado no sistema CEPEL-34, a fim de encontrar um novo ponto de operação que tenha duas condições principais: elevar a margem da barra crítica até um valor positivo (que nesse caso foi escolhido 5%) e alterar pouco o ponto de operação inicial do caso base (através dos desvios mínimos quadráticos é feita essa comparação ao ponto de operação antes da ação de controle e após a ação de controle). Foram feitos seis testes diferentes para encontrar a melhor solução possível, chegando a dois testes que se saíram melhor: i) utilizar apenas a tensão das barras *swing* como variável do GA juntamente com minimizar o desvio da tensão, ii) utilizar a tensão e geração de potência ativa como

variáveis e minimizar os desvios da tensão e da potência ativa. Esses dois testes conseguem pequenos desvios do caso base e aumentar a margem da barra crítica até valores acima de 5%. Nos testes não havia a preocupação em achar a melhor margem possível, e sim apenas encontrar um valor próximo positivo.

Foi utilizado um segundo sistema para o uso do GA. O sistema elétrico utilizado foi o sistema Nórdico - Ponto de operação B. O ponto de operação utilizado apresenta uma barra de geração com o valor da margem negativo e, portanto, o GA é utilizado para encontrar um novo ponto de operação que melhore essa margem até um valor acima de 5%. Para isso foram feitos dois testes, utilizando os modelos que foram os melhores encontrados para o sistema CEPEL-34. Em ambos os testes os resultados encontrados foram satisfatórios, pois conseguiram elevar a margem da barra crítica até um valor acima de 5% e alterar pouco o ponto de operação inicial.

A utilização do GA mostrou-se promissora para a melhoria das condições de estabilidade de tensão.

7.1

Trabalhos Futuros

Esse trabalho mostra que a utilização de GA é inicialmente satisfatória para a melhora das condições de estabilidade de tensão.

Para trabalhos futuros, a otimização do processo do uso de GA, a ponto de ser feito em tempo real a sua utilização. Outros tipos de processos de otimização também poderão ser empregados para a melhoria das condições de estabilidade, tais como o enxame de abelhas, programação genético, ou outros afins.

Referências bibliográficas

- [1] KUNDUR,P.. **Power system stability and control**. McGraw-Hill, California, 1994.
- [2] MONTICELLI, J. A. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. Edgar Blucher Ltda, São Paulo, 1983.
- [3] SANTOS, L. C. S. **Avaliação do efeito do esgotamento de recursos de controle sobre a estabilidade de tensão e cálculo de ações de controle preventiva**. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2018.
- [4] CASTRO, M. R. V.. **Modelagem do controle de tensão por geradores e de múltiplas barras swing na avaliação das condições de estabilidade de tensão**. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos - Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. Brasport, 2nd edition, 2008.
- [6] CLARIVATE ANALYTICS. **Web Of Service**. Online; accessed 25 february 2021.
- [7] LIMA, D. C.; PRADA, R. B.; TEIXEIRA, M. V. P.. **Aplicação de algoritmos genéticos para melhoria das condições de estabilidade de tensão**. CLAGTEE, 2019.
- [8] IKEDA, P. A.;. **Introdução aos algoritmos genéticos**. Rio de Janeiro, 2009.
- [9] PALOMINO, E. G. C;.. **Reforço das condições de estabilidade de tensão na operação do sistema elétrico**. Rio de Janeiro, 2002.
- [10] THIERRY VAN CUTSEM. **The nordic test system for voltage stability assessment**. 2014.

A

Apêndice A

Tabela 47: Informações dos dados das barras para CEPEL-34

Barra	Tipo	v(pu)	$\theta(^{\circ})$	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	P_D (MW)	Q_D (Mvar)	B (pu)
1	V	1,030	0	3300	1128,0	8	0	0
2	PQ	1,012	0	0	0	0	0	0
3	PQ	1,011	0	0	0	0	0	0
4	PQ	0,952	0	0	0	0	0	-6,6
5	PQ	0,916	0	0	0	0	0	-1,5
6	PQ	0,915	0	0	0	0	0	-1,5
7	PQ	0,932	0	0	0	0	0	-3,3
8	PQ	0,987	0	0	0	0	0	-3,3
9	PQ	0,987	0	0	0	0	0	-3,3
10	PQ	0,907	0	0	0	0	0	-6,6
11	PQ	0,922	0	0	0	0	0	0
12	PQ	0,922	0	0	0	0	0	0
13	PQ	0,883	0	0	0	0	0	-3,3
14	PQ	0,966	0	0	0	0	0	0
15	PQ	0,953	0	0	0	0	0	0
16	PQ	0,879	0	0	0	0	0	0
17	PQ	0,999	0	0	0	4,44	0	0
18	PQ	1,037	0	0	0	0	0	0
19	PQ	1,050	0	0	0	1461,00	-339,0	0
20	PQ	1,052	0	0	0	0	0	0
21	PQ	1,074	0	0	0	2,83	0	-3
22	PQ	1,075	0	0	0	2,83	0	-2
23	PQ	1,067	0	0	0	678,60	120,8	-3
24	PQ	1,037	0	0	0	0	0	0
25	PQ	1,093	0	0	0	6150,00	-2400,0	0
26	PV	1,100	0	3879	1363,0	0	0	0
27	PQ	0,991	0	0	0	0	0	0
28	PQ	0,951	0	0	0	0	0	0
29	PQ	0,879	0	0	0	3425,00	561,4	0
30	PQ	0,929	0	0	0	0	0	0
31	V	1,007	0	1320	-143,0	1,71	0	0
32	V	1,058	0	1200	411,9	0	0	0
33	V	1,059	0	1200	477,1	0	0	0
34	V θ	1,049	22,3	1444	390,1	0	0	0

Tabela 48: Informações dos dados dos ramos de transmissão de CEPEL-34

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	B^{sh} (Mvar)
2	1	1,0140	0,0000	0,3500	
2	3		0,0052	0,0500	11,033
2	3		0,0051	0,0500	10,870
2	3		0,0050	0,0500	10,688
2	3		0,0050	0,0500	10,538
3	4	1,0500	0,0000	0,1569	
4	5		0,0760	1,8400	927,800
4	6		0,0760	1,8500	929,100
5	7		0,0000	-0,7490	
6	7		0,0000	-0,7490	
7	8		0,0000	-0,7780	
7	9		0,0000	-0,7780	
8	10		0,0640	1,5300	760,000
9	10		0,0630	1,5300	755,700
10	11		0,0000	-0,9150	
10	12		0,0000	-0,9150	
11	13		0,0720	1,7500	877,500
12	13		0,0720	1,7500	873,000
14	13	1,0400	0,0000	0,3457	
14	24		0,0826	1,0400	32,000
14	24		0,0826	1,0400	32,000
15	7	0,9248	0,0000	0,3467	
15	16		0,0100	0,0500	1,135
15	16		0,0100	0,0500	1,135
16	17		0,1540	1,9400	236,970
17	18		0,0560	0,6970	85,746
17	31	0,9681	0,0165	11,3620	
18	19		0,0624	0,7848	96,592
18	32	1,0130	0,0000	1,0500	
19	16		0,1910	2,4140	294,920
19	22		0,1620	2,0480	250,170
20	19		0,0100	0,1260	15,428
20	19		0,0100	0,1300	15,160

De barra	Para barra	tap	R(%)	X(%)	B^{sh} (Mvar)
20	33	1,0340	0,0000	1,0800	
21	17		0,1720	2,1700	265,160
21	34	1,0570	0,0165	11,3620	
22	21		0,1020	1,2680	155,240
22	23		0,2250	3,0330	381,460
23	21		0,2820	3,8520	493,700
24	25		0,0284	0,3520	10,830
24	25		0,0284	0,3520	10,830
24	27		0,0223	0,2800	14,462
25	26		0,0070	0,0880	2,707
25	26		0,0070	0,0880	2,707
27	29	0,9933	0,0000	0,7200	
28	13	0,9724	0,0000	0,8990	
28	13	0,9724	0,0000	0,8990	
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	29		0,0812	0,8000	7,560
28	30		1,6000	9,0000	300,000
30	16	1,0660	0,0000	0,8990	

Tabela 49: Dados de barra para o sistema Nórdico - Ponto B de operação

Barra	Tipo	v(pu)	$\theta(^{\circ})$	P_D (MW)	Q_D (Mvar)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	B (pu)
1	V	1,0300	0	0	600,4576	-22	0	
2	V	1,0600	0	0	300,083	-18,8	0	
3	V	1,0400	0	0	550,1637	-7,87	0	
4	V	1,0400	0	0	398,3469	-15,4	0	
5	V	1,0300	0	0	199,3403	-26,9	0	
6	V	1,0100	0	0	360,5719	133,2	0	
7	V	1,0200	0	0	180	51,33	0	
8	V	1,0600	0	0	743,7451	130	0	
9	V	1,0400	0	0	668,8297	38,11	0	
10	V	1,0000	0	0	600,5039	154,8	0	

Barra	Tipo	v(pu)	$\theta(^{\circ})$	P_D (MW)	Q_D (Mvar)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	B (pu)
11	V	1,0100	0	0	248,7376	-74,1	0	
12	V	1,0400	0	0	308,2237	-55,7	0	
13	V	1,0300	0	0	9,98E-05	-118	0	
14	V	1,0900	0	0	628,1314	36,34	0	
15	V	1,0100	0	0	539,6244	74,99	0	
16	V	1,0100	0	0	599,0141	59,73	0	
17	V	1,0400	0	0	527,2187	-23,5	0	
18	V	1,0500	0	0	527,1678	111	0	
19	V	1,0500	0	0	304,4307	116,5	0	
20	V θ	1,0300	0	0	1393,459	377,7	0	
21	PQ	1,086	0	0	0	0	0	
22	PQ	1,077	0	0	0	0	0	
23	PQ	1,064	0	0	0	0	0	
24	PQ	1,067	0	0	0	0	0	
25	PQ	1,042	0	0	0	0	0	
26	PQ	1,104	0	0	0	0	0,5	
27	PQ	1,018	0	0	0	0	2,5	
28	PQ	1,016	0	0	0	0	0	
29	PQ	1,034	0	0	0	0	2	
30	PQ	1,015	0	0	0	0	2	
31	PQ	1,013	0	0	0	0	2	
32	PQ	1,086	0	0	0	0	0	
33	PQ	1,088	0	0	0	0	0	
34	PQ	1,048	0	0	0	0	0	
35	PQ	1,043	0	0	0	0	-1	
36	PQ	1,118	0	0	0	0	0	
37	PQ	1,055	0	0	0	0	0	
38	PQ	1,104	0	0	0	0	0	
39	PQ	1,121	0	0	0	0	0	
40	PQ	1,109	0	0	0	0	2	
41	PQ	1,098	0	0	0	0	0	
42	PQ	1,087	0	0	0	0	2	
43	PQ	1,099	0	0	0	0	0	
44	PQ	1,106	0	0	0	0	0	
45	PQ	1,079	0	0	0	0	1	

Barra	Tipo	v(pu)	$\theta(^{\circ})$	P_D (MW)	Q_D (Mvar)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	B (pu)
46	PQ	1,088	0	0	0	0	0	
47	PQ	1,100	0	0	0	0	1	
48	PQ	1,071	0	0	0	0	0	
49	PQ	1,074	0	0	0	0	0	
50	PQ	1,063	0	0	0	0	0	
51	PQ	1,050	0	0	0	0	-4	
52	PQ	1,058	0	0	0	0	0	
53	PQ	0,994	0	148,2	0	0	0	
54	PQ	0,993	0	71	0	0	0	
55	PQ	0,994	0	83,8	0	0	0	
56	PQ	0,998	0	252	0	0	0	
57	PQ	0,998	0	190,4	0	0	0	
58	PQ	1,006	0	68,8	0	0	0	
59	PQ	1,001	0	83,8	0	0	0	
60	PQ	1,005	0	34,4	0	0	0	
61	PQ	1,007	0	79,9	0	0	0	
62	PQ	1,001	0	24,7	0	0	0	
63	PQ	1,005	0	39,6	0	0	0	
64	PQ	1,004	0	131,4	0	0	0	
65	PQ	0,999	0	127,4	0	0	0	
66	PQ	1,001	0	254,6	0	0	0	
67	PQ	1,001	0	211,8	0	0	0	
68	PQ	1,003	0	44	0	0	0	
69	PQ	1,002	0	258,2	0	0	0	
70	PQ	1,007	0	122,5	0	0	0	
71	PQ	1,008	0	83,8	0	0	0	
72	PQ	1,009	0	264,6	0	0	0	
73	PQ	1,001	0	83,8	0	0	0	
74	PQ	0,996	0	396,1	0	0	0	
75	V	1,060	0	0	599,0141	59,73	0	
76	V	1,000	0	0	527,0904	111	0	
77	V	1,030	0	0	539,3456	74,99	0	

Tabela 50: Informações das linhas do sistema Nórdico -
Ponto B de operação

De barra	Para barra	B^{sh} (Mvar)	R(%)	X(%)	tap
21	23	0,01000	0,07000	0,0069	1,000
21	23	0,01000	0,07000	0,0069	1,000
22	24	0,01402	0,09000	0,00905	1,000
22	24	0,01402	0,09000	0,00905	1,000
23	24	0,00698	0,05000	0,00505	1,000
23	24	0,00698	0,05000	0,00505	1,000
25	26	0,03000	0,20000	0,01515	1,000
25	26	0,03000	0,20000	0,01515	1,000
27	29	0,01000	0,06000	0,0061	1,000
27	29	0,01000	0,06000	0,0061	1,000
27	31	0,01497	0,12000	0,0125	1,000
27	31	0,01497	0,12000	0,0125	1,000
28	30	0,03799	0,28000	0,03	1,000
28	30	0,03799	0,28000	0,03	1,000
28	31	0,05000	0,30000	0,03	1,000
29	30	0,01000	0,08000	0,00795	1,000
29	30	0,01000	0,08000	0,00795	1,000
32	33	0,01200	0,09000	0,0076	1,000
32	33	0,01200	0,09000	0,0076	1,000
34	35	0,00100	0,00800	0,10055	1,000
34	36	0,00600	0,06000	0,89975	1,000
34	37	0,00400	0,04000	0,60065	1,000
34	51	0,00500	0,04500	0,7012	1,000
35	37	0,00400	0,03500	0,5253	1,000
35	51	0,00500	0,05000	0,74895	1,000
36	39	0,00400	0,04000	0,60065	1,000
36	41	0,01000	0,06000	1,50045	1,000
37	38	0,00400	0,04000	0,60065	1,000
37	38	0,00400	0,04000	0,60065	1,000
38	39	0,00100	0,01000	0,1508	1,000
38	40	0,00600	0,04000	1,19885	1,000
38	40	0,00600	0,04000	1,19885	1,000
39	41	0,01000	0,04000	1,0003	1,000

De barra	Para barra	B^{sh} (Mvar)	R(%)	X(%)	tap
39	43	0,00600	0,05000	1,19885	1,000
40	43	0,00300	0,03000	0,44985	1,000
40	48	0,00600	0,04500	0,65095	1,000
41	42	0,00200	0,01500	0,2488	1,000
41	43	0,00200	0,02000	0,2991	1,000
42	43	0,00100	0,01000	0,1508	1,000
42	45	0,00100	0,01000	0,1508	1,000
42	46	0,00200	0,02000	0,2991	1,000
43	44	0,00200	0,02000	0,2991	1,000
43	44	0,00200	0,02000	0,2991	1,000
44	47	0,00400	0,04000	0,60065	1,000
44	47	0,00400	0,04000	0,60065	1,000
44	49	0,01100	0,08000	1,19885	1,000
45	46	0,00100	0,01500	0,2488	1,000
48	49	0,00200	0,02000	0,2991	1,000
49	50	0,00300	0,03000	0,44985	1,000
49	50	0,00300	0,03000	0,44985	1,000
51	52	0,00300	0,03000	1,50045	1,000
51	52	0,00300	0,03000	1,50045	1,000
22	1	0	0,01875	0	1,000
23	2	0	0,02500	0	1,000
24	3	0	0,02143	0	1,000
25	4	0	0,02500	0	1,000
26	5	0	0,06000	0	1,050
28	6	0	0,03750	0	1,050
29	7	0	0,07500	0	1,050
33	8	0	0,01765	0	1,050
34	9	0	0,01500	0	1,050
35	10	0	0,01875	0	1,050
36	11	0	0,05000	0	1,050
38	12	0	0,04286	0	1,050
40	13	0	0,03333	0	1,050
41	14	0	0,02143	0	1,050
46	15	0	0,01250	0	1,050
47	16	0	0,02143	0	1,050
49	17	0	0,02500	0	1,050

De barra	Para barra	B^{sh} (Mvar)	R(%)	X(%)	tap
50	18	0	0,01250	0	1,050
51	19	0	0,03000	0	1,050
52	20	0	0,00333	0	1,050
34	21	0	0,00800	0	0,950
35	22	0	0,00800	0	0,950
37	26	0	0,01200	0	0,930
38	32	0	0,01200	0	1,000
43	30	0	0,01000	0	1,080
43	30	0	0,01000	0	1,080
44	31	0	0,01000	0	1,090
44	31	0	0,01000	0	1,090
21	58	0	0,02500	0	1,060
22	59	0	0,01667	0	1,060
23	60	0	0,05000	0	1,040
26	61	0	0,01786	0	1,080
27	53	0	0,00833	0	1,010
28	54	0	0,01667	0	1,010
29	55	0	0,02174	0	1,020
30	56	0	0,00625	0	1,000
31	57	0	0,00714	0	1,000
32	62	0	0,05000	0	1,070
33	63	0	0,02500	0	1,070
40	64	0	0,00926	0	1,090
41	65	0	0,01250	0	1,080
42	66	0	0,00556	0	1,070
45	67	0	0,00714	0	1,060
46	68	0	0,05000	0	1,060
47	69	0	0,00625	0	1,080
48	70	0	0,01000	0	1,050
49	71	0	0,01667	0	1,050
50	72	0	0,00847	0	1,030
51	73	0	0,01667	0	1,030
52	74	0	0,00250	0	1,050
47	75	0	0,02143	0	1,050
50	76	0	0,02500	0	1,050
46	77	0	0,02500	0	1,050