

ANDRÉ MENDES GARCIA

**ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA APLICADO AO PROBLEMA DE
FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO CONSIDERANDO O
DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Ilha Solteira
2019

ANDRÉ MENDES GARCIA

ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA APLICADO AO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO CONSIDERANDO O DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia da
Universidade Estadual Paulista – UNESP,
Câmpus de Ilha Solteira, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Orientador

**Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo
Possagnolo**

Coorientador

Ilha Solteira

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G216a Garcia, André Mendes.
Algoritmo de busca dispersa aplicado ao problema de fluxo de potência
ótimo considerando o desligamento de linhas de transmissão / André Mendes
Garcia. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
207 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.
Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Co-orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Inclui bibliografia


Sandra Maria Clemente de Souza
DSTB/STRAUD
Bibliotecária
CRB 9-4740

1. Busca dispersa. 2. Meta-heurística. 3. Otimização. 4. Fluxo de potência
ótimo. 5. Desligamento de linhas de transmissão.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA APLICADO AO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO CONSIDERANDO O DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

AUTOR: ANDRÉ MENDES GARCIA

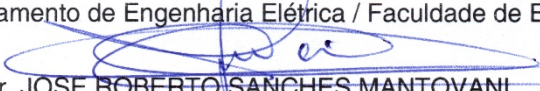
ORIENTADOR: RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

COORDENADOR: LEONARDO HENRIQUE FARIA MACEDO POSSAGNOLO

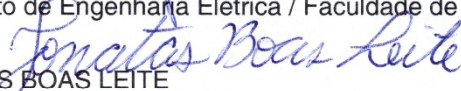
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

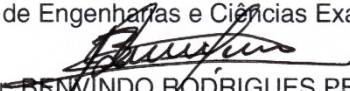
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Dr. JONATAS BOAS LEITE

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP


Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MENDONÇA DA ROCHA

Centro de Engenharias e Ciências Exatas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE


Prof. Dr. BENEDITO RODRIGUES PEREIRA JÚNIOR

Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 25 de outubro de 2019

Dedico este trabalho

Aos meus pais Arlindo Mendes Garcia e Maria
Corveloni Garcia, que sempre me incentivaram
nos estudos e que sempre acreditaram em
minha capacidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar a vida, abençoar meus pensamentos e atitudes, e por me permitir estudar nessa excelente e respeitada Instituição de Ensino.

Ao meu Amigo e Orientador Prof. Dr. Rubén Romero, por acreditar em meu trabalho, pela excelente orientação, dedicação, paciência e pela amizade construída durante a realização deste trabalho.

Ao meu Amigo e coorientador Dr. Leonardo H. Macedo, que dedicou seu valioso tempo em me ajudar e orientar em diversos momentos deste trabalho, compartilhando sua grande experiência e sabedoria.

Aos amigos do LaPSEE – Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, pela amizade e apoio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2015/21972-6.

“Quando penso que cheguei ao meu limite
descubro que tenho forças para ir além.”

Ayrton Senna

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é a implementação de uma metodologia que, utilizando a meta-heurística de busca dispersa (BD) resolva o problema de fluxo de potência ótimo (FPO) considerando o desligamento de linhas de transmissão (OTS) para a redução dos custos de operação. Com o objetivo de avaliar o potencial da meta-heurística, o algoritmo de BD foi implementado para otimizar funções multimodais restritas, metodologia denominada BD-FMR, e para resolver o problema de FPO, metodologia denominada BD-FPO. Foram realizados testes com onze problemas de funções multimodais restritas disponíveis na literatura especializada, utilizando a metodologia BD-FMR, sendo que os resultados obtidos são comparáveis com os melhores resultados disponíveis na literatura. O problema de FPO foi resolvido pela metodologia BD-FPO utilizando três sistemas teste de 6, 14 e 57 barras, sendo que os resultados não foram satisfatórios quando comparados com as soluções do modelo exato do problema obtidas pelo *solver* KNITRO. Entretanto, o algoritmo BD-FPO serviu de base para a implementação da metodologia principal deste trabalho. Por fim, a metodologia BD-OTS foi implementada em linguagem de programação C/C++, com a utilização de recursos de programação paralela através da biblioteca OpenMP. Neste trabalho a formulação utilizada para representar a operação da rede considera o modelo AC (corrente alternada), que consiste em um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM) devido a presença de variáveis discretas relacionadas com o estado de operação de uma linha, com a posição dos *taps* dos transformadores e com o estado de operação dos compensadores *shunt*. Na metodologia BD-OTS, a meta-heurística gerencia as variáveis inteiras e binárias, fornece para o modelo matemático essas variáveis na etapa do cálculo da função objetivo, transformando o modelo em um problema de programação não linear (PNL). O problema de PNL é então resolvido pelo *solver* KNITRO, utilizando o método de pontos interiores, o qual retorna para a meta-heurística todas as demais variáveis contínuas do problema. Foram utilizados onze sistemas teste, dois sistemas de 14 barras, três de 30 barras, dois de 57 barras, dois de 118 barras e dois de 162 barras. As soluções do problema

de OTS pela metodologia BD-OTS foram comparadas com resultados das soluções destes mesmos sistemas obtidos na literatura e pelos resultados calculados pelo *solver* KNITRO. A metodologia BD-OTS se mostrou uma ferramenta robusta e promissora, pois apresentou soluções factíveis em todos os sistemas e melhores resultados em nove sistemas. Dois resultados obtidos pela BD-OTS apresentaram valores de função objetivo praticamente iguais aos calculados pelo *solver*, e melhores que os da literatura. Além disso, as soluções obtidas pela BD-OTS forneceram topologias dos sistemas totalmente conexas, sem barras desconectadas das topologias dos sistemas, enquanto as soluções de OTS pelo *solver* apresentaram topologias desconexas.

Palavras-chave — Busca dispersa. Meta-heurística. Otimização. Fluxo de potência ótimo. Desligamento de linhas de transmissão.

ABSTRACT

The main objective of this work is the implementation of a methodology that, using the scatter search meta-heuristic (SS) solves the problem of optimal power flow (OPF) considering transmission switching (TS) to reduce the operation costs. In order to evaluate the potential of the meta-heuristic, the SS algorithm was implemented to optimize constrained multimodal functions, a methodology called BD-FMR, and to solve the OPF problem, a methodology called BD-FPO. Eleven constrained multimodal problems available in the specialized literature were solved using the BD-FMR method, and the results obtained are comparable with the best results available in the literature. The OPF problem was solved by the BD-FPO methodology using three test systems with 6, 14, and 57 buses, and the results were not satisfactory when compared to the solutions of the exact formulation of the problem obtained by the KNITRO solver. However, the BD-FPO algorithm served as the basis for the implementation of the main method of this work. Finally, the BD-OTS method was implemented in the C/C++ programming language, using parallel programming resources through the OpenMP library. In this work, the formulation used to represent the operation of the grid considers the alternating current (AC) model, which consists of a mixed-integer nonlinear programming (MINLP) problem due to the presence of discrete variables related to the operation state a line, transformer tap position and the operating state of the shunt compensators. In the BD-OTS method, the meta-heuristic manages the integer and binary variables, providing these variables to the mathematical model in the objective function calculation step, transforming the model into a nonlinear programming (NLP) problem. The NLP problem is then solved by the KNITRO solver using the interior point method, which returns to the meta-heuristic the values of all the continuous variables of the problem. Eleven systems, two 14-bus, three 30-bus, two 57-bus, two 118-bus, and two 162-bus systems were used in the tests. The solutions of the TS problem by the BD-OTS method were compared with the results of the solutions of these same systems obtained in the literature and the results calculated by the KNITRO solver. The BD-OTS method proved to be a robust and

promising tool as it obtained feasible solutions for all systems and better results for nine systems. Two results obtained by the BD-OTS algorithm presented objective function values practically equal to those calculated by the solver, and better than those in the literature. In addition, the solutions obtained by BD-OTS provided topologies with fully connected systems without buses disconnected from system, while the solutions obtained by the solver presented disconnected topologies.

Keywords—Meta-heuristic. Optimal power flow. Optimization. Scatter search. Transmission switching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo π de uma linha de transmissão	50
Figura 2 – Modelo de transformador em fase	51
Figura 3 – Regulação do <i>tap</i> do transformador em fase.....	53
Figura 4 – Modelo de transformador defasador	54
Figura 5 – Modelo matemático dos compensadores shunt.....	55
Figura 6 – Sistema ilustrativo de três barras	57
Figura 7 – Fluxograma da meta-heurística de busca dispersa.....	71
Figura 8 – Exemplo da formação dos subconjuntos S e Pool	78
Figura 9 – Modelo <i>Fork-Join</i> de programação OpenMP	88
Figura 10 – Função em C que gerencia a combinação das soluções na BD-FPO.....	89
Figura 11 – Cálculo da Função Objetivo da BD-OTS.....	96
Figura 12 – Fluxograma da meta-heurística BD-OTS	98
Figura 13 – Exemplos de topologias conexa e desconexa	102
Figura 14 – Fluxograma da estratégia para manter o sistema conexo.....	103
Figura 15 – Algoritmo recursivo que analisa barras desconectadas do sistema.....	104
Figura 16 – Algoritmo que reconecta barras para manter o sistema conexo.....	104
Figura 17 – Topologias do sistema nesta_case30_ieee fornecidas pelas metodologias AMPL+KNITRO e BD-OTS	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros das barras do sistema ilustrativo de três barras	57
Tabela 2 – Parâmetros das linhas do sistema ilustrativo de três barras	57
Tabela 3 – Resultados do FPO do sistema ilustrativo de três barras	57
Tabela 4 – Exemplo de frequência e probabilidade na seleção de sub-faixa.....	74
Tabela 5 – Exemplo de conjunto RefSet com apenas as cinco melhores soluções de P	76
Tabela 6 – Exemplo de conjunto P e as respectivas distâncias euclidianas de seus elementos com os elementos de RefSet	76
Tabela 7 – Variáveis do problema do FPO calculadas pela metodologia BD-FPO	82
Tabela 8 – Distribuição das combinações de soluções em núcleos do processador	90
Tabela 9 – Variáveis do problema do FPO calculadas pela BD-OTS.....	96
Tabela 10 – Detalhes gerais das funções multimodais restritas utilizadas	106
Tabela 11 – Resultados da meta-heurística BD para as funções multimodais restritas	107
Tabela 12 – Comparação dos resultados da BD com outros trabalhos	108
Tabela 13 – Características gerais dos sistemas teste utilizados pela BD-FPO – Parte 1.....	109
Tabela 14 – Características gerais dos sistemas teste utilizados pela BD-FPO – Parte 2.....	109
Tabela 15 – Comparação das funções objetivo referentes aos resultados da solução do problema de FPO por AMPL+KNITRO e BD-FPO	109
Tabela 16 – Balanço de potência da solução do sistema de 57 barras obtida pela metodologia BD-FPO.....	110

Tabela 17 – Balanço de potência da solução do sistema de 14 barras obtida pela metodologia BD-FPO.....	111
Tabela 18 – Perdas de potência ativa.....	111
Tabela 19 – Tempo gasto para obtenção das soluções do problema de FPO pelas abordagens AMPL+KNITRO e BD-FPO	111
Tabela 20 – Características gerais dos sistemas teste utilizados pela BD-OTS – Parte 1	113
Tabela 21 – Características Gerais dos Sistemas Teste utilizados pela BD-OTS – Parte 2...	113
Tabela 22 – Comparação dos valores das funções objetivo da solução dos sistemas teste pelo AMPL+KNITRO e BD-OTS.....	114
Tabela 23 – Variáveis binárias shunts gerenciadas pela meta-heurística.....	115
Tabela 24 – Linhas desligadas fornecidas pela meta-heurística na variável binária <i>swkij</i> ...	116
Tabela 25 – Posições dos taps fornecidas pela meta-heurística na variável inteira <i>tkij</i>	116
Tabela 26 – Desligamento de linhas pelas abordagens AMPL+KNITRO e BD-OTS	117
Tabela 27 – Tempo computacional gasto pelas abordagens AMPL+KNITRO e BD-OTS...	119
Tabela 28 – Comparação das funções objetivo entre os modelos DC sem e com desligamento de linhas de transmissão.....	121
Tabela 29 – Comparação das funções objetivo entre os resultados da literatura, os modelos AC, DC e BD-OTS	121
Tabela 30 – Resultados do modelo AC utilizando as linhas desligadas pelo modelo DC.....	122
Tabela 31 – Infactibilidades das soluções do modelo AC utilizando as linhas desligadas pelo modelo DC	122
Tabela 32 – Custos de operação dos modelos AC e DC utilizando as linhas desligadas no modelo de OTS DC	123
Tabela 33 – Resultado por barras do sistema de 6 barras (BD-FPO)	138
Tabela 34 – Resultado por linhas do sistema de 6 barras (BD-FPO)	138
Tabela 35 – Resultado por barras do sistema de 14 barras (BD-FPO)	138
Tabela 36 – Resultado por linhas do sistema de 14 barras (BD-FPO)	139
Tabela 37 – Resultado por barras do sistema de 57 barras (BD-FPO)	139
Tabela 38 – Resultado por linhas do sistema de 57 barras (BD-FPO)	139
Tabela 39 – Resultado por barras do sistema nesta_case14_ieee (BD-OTS).....	142
Tabela 40 – Resultado por linhas do sistema nesta_case14_ieee (BD-OTS)	142
Tabela 41 – Resultado por barras do sistema nesta_case14_ieee_api (BD-OTS)	143
Tabela 42 – Resultado por linhas do sistema nesta_case14_ieee_api (BD-OTS)	143
Tabela 43 – Resultado por barras do sistema nesta_case30_ieee (BD-OTS).....	143

Tabela 44 – Resultado por linhas do sistema nesta_case30_ieee (BD-OTS)	144
Tabela 45 – Resultado por barras do sistema nesta_case30_ieee_api (BD-OTS)	144
Tabela 46 – Resultado por linhas do sistema nesta_case30_ieee_api (BD-OTS)	145
Tabela 47 – Resultado por barras do sistema nesta_case30_fsr_api (BD-OTS)	145
Tabela 48 – Resultado por linhas do sistema nesta_case30_fsr_api (BD-OTS).....	146
Tabela 49 – Resultado por barras do sistema nesta_case57_ieee (BD-OTS)	146
Tabela 50 – Resultado por linhas do sistema nesta_case57_ieee (BD-OTS)	147
Tabela 51 – Resultado por barras do sistema nesta_case57_ieee_api (BD-OTS)	148
Tabela 52 – Resultado por linhas do sistema nesta_case57_ieee_api (BD-OTS)	148
Tabela 53 – Resultado por barras do sistema nesta_case118_ieee (BD-OTS)	150
Tabela 54 – Resultado por linhas do sistema nesta_case118_ieee (BD-OTS)	150
Tabela 55 – Resultado por barras do sistema nesta_case118_ieee_api (BD-OTS)	153
Tabela 56 – Resultado por linhas do sistema nesta_case118_ieee_api (BD-OTS)	154
Tabela 57 – Resultado por barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc (BD-OTS)	157
Tabela 58 – Resultado por linhas do sistema nesta_case162_ieee_dtc (BD-OTS)	158
Tabela 59 – Resultado por barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api (BD-OTS)	162
Tabela 60 – Resultado por linhas do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api (BD-OTS)	163
Tabela 61 – Relação de barras do sistema nesta_case6_ww	168
Tabela 62 – Barras de geração do sistema nesta_case6_ww	168
Tabela 63 – Relação de ramos do sistema nesta_case6_ww	168
Tabela 64 – Relação de barras do sistema nesta_case14_ieee.....	169
Tabela 65 – Barras de geração do sistema nesta_case14_ieee.....	169
Tabela 66 – Relação de ramos do sistema nesta_case14_ieee.....	169
Tabela 67 – Relação de barras do sistema nesta_case14_ieee__api.....	170
Tabela 68 – Barras de geração do sistema nesta_case14_ieee__api.....	170
Tabela 69 – Relação de ramos do sistema nesta_case14_ieee__api.....	170
Tabela 70 – Relação de barras do sistema nesta_case30_fsr__api	171
Tabela 71 – Barras de geração do sistema nesta_case30_fsr__api.....	171
Tabela 72 – Relação de ramos do sistema nesta_case30_fsr__api	171
Tabela 73 – Relação de barras do sistema nesta_case30_ieee.....	172
Tabela 74 – Barras de geração do sistema nesta_case30_ieee.....	173
Tabela 75 – Relação de ramos do sistema nesta_case30_ieee.....	173
Tabela 76 – Relação de barras do sistema nesta_case30_ieee__api.....	174
Tabela 77 – Barras de geração do sistema nesta_case30_ieee__api.....	174

Tabela 78 – Relação de ramos do sistema nesta_case30_ieee__api.....	175
Tabela 79 – Relação de barras do sistema nesta_case57_ieee.....	175
Tabela 80 – Barras de geração do sistema nesta_case57_ieee.....	176
Tabela 81 – Relação de ramos do sistema nesta_case57_ieee.....	176
Tabela 82 – Relação de barras do sistema nesta_case57_ieee__api.....	178
Tabela 83 – Barras de geração do sistema nesta_case57_ieee__api.....	179
Tabela 84 – Relação de ramos do sistema nesta_case57_ieee__api.....	179
Tabela 85 – Relação de barras do sistema nesta_case118_ieee.....	180
Tabela 86 – Barras de geração do sistema nesta_case118_ieee.....	182
Tabela 87 – Relação de ramos do sistema nesta_case118_ieee.....	183
Tabela 88 – Relação de barras do sistema nesta_case118_ieee__api.....	186
Tabela 89 – Barras de geração do sistema nesta_case118_ieee__api.....	188
Tabela 90 – Relação de ramos do sistema nesta_case118_ieee__api.....	189
Tabela 91 – Relação de barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc.....	192
Tabela 92 – Barras de geração do sistema nesta_case162_ieee_dtc.....	195
Tabela 93 – Relação de ramos do sistema nesta_case162_ieee_dtc.....	195
Tabela 94 – Relação de barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc__api.....	199
Tabela 95 – Barras de geração do sistema nesta_case162_ieee_dtc__api.....	202
Tabela 96 – Relação de ramos do sistema nesta_case162_ieee_dtc__api.....	202

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	<i>Alternating current</i>
ACO	<i>Ant colony optimization</i>
AG	Algoritmo genético
AGMH	Algoritmo genético melhorado híbrido
AHC	Algoritmo heurístico construtivo
ANN	<i>Artificial neural networks</i>
API	<i>Application programming interface</i>
B&B	<i>Branch and bound</i>
BD	Busca dispersa
BD-FMR	Busca dispersa para otimização de funções multimodais restritas
BD-FPO	Busca dispersa para resolver fluxo de potência ótimo
BD-OTS	Busca dispersa para resolver fluxo de potência ótimo com desligamento de linhas de transmissão
BFA	<i>Bacterial foraging algorithms</i>
COA	<i>Chaos optimization algorithms</i>
DC	<i>Direct current</i>
DOR	Despacho ótimo reativo
ED	Evolução diferencial
FP	Fluxo de potência
FPO	Fluxo de potência ótimo

FPR	Fluxo de potência restrito
GRASP	<i>Greedy randomized adaptative search procedure</i>
KKT	<i>Karush-Kuhn-Tucker</i>
MAE	Método de aproximação externa
MBO	<i>Monarch butterfly optimization</i>
MIP	<i>Mixed-integer problem</i>
MISOCP	Programação cônica de segunda ordem inteira mista
MPI	Método de pontos interiores
MSA	<i>Moth swarm algorithm</i>
OTS	<i>Optimal transmission switching</i>
PL	Programação linear
PLIM	Programação linear inteira mista
PNL	Programação não linear
PNLIM	Programação não linear inteira mista
PSO	<i>Particle swarm optimization</i>
QOJAYA	<i>Quasi-oppositional JAYA</i>
SA	<i>Simulated annealing</i>
SDH	<i>Steepest descent heuristic</i>
SEE	Sistemas de energia elétrica
TS	<i>Tabu search</i>
TS	<i>Transmission switching</i>
VNS	<i>Variable neighborhood search</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 3

R_{ij}	Resistência série do ramo ij
X_{ij}	Reatância série do ramo ij
B_{ij}^{shl}	Susceptância <i>shunt</i> do ramo ij
Z_{ij}	Impedância do elemento série do ramo ij
Y_{ij}	Admitância série do ramo ij
$\vec{I}_{ij}$	Fasor corrente no ramo ij
$\dot{S}_{ij}$	Fluxo de potência complexa no ramo ij
P_{ij}^{de}	Fluxo de potência ativa com origem na barra i e destino na barra j
Q_{ij}^{de}	Fluxo de potência reativa com origem na barra i e destino na barra j
P_{ij}^{para}	Fluxo de potência ativa com origem na barra j e destino na barra i
Q_{ij}^{para}	Fluxo de potência reativa com origem na barra j e destino na barra i
G_{ij}	Condutância série do ramo ij
B_{ij}	Susceptância série do ramo ij
V_i	Magnitude de tensão na barra i
θ_i	Ângulo de tensão na barra i

$\vec{V}_i$	Fasor tensão na barra i
a_{ij}	Tap do transformador em fase no ramo ij
$\vec{I}_{ij}$	Fasor corrente no ramo ij
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa no ramo ij
P_{ij}	Fluxo de potência ativa no ramo ij
nt_{ij}	Número inteiro de passos do <i>tap</i> do transformador no ramo ij
$\overline{nt}_{ij}$	Metade do número máximo de passos de <i>tap</i> do transformador no ramo ij
$r_{ij}^{\%}$	Regulação total máxima do transformador no ramo ij
Ω_b	Conjunto de barras do sistema
Ω_g	Conjunto de barras geradoras
Ω_l	Conjunto de ramos
c_0	Coefficiente de custo constante de geração
c_1	Coefficiente de custo linear de geração
c_2	Coefficiente de custo quadrático de geração
P_i^g	Potência ativa gerada na barra i
P_i^d	Potência ativa demandada na barra i
Q_i^g	Potência reativa gerada na barra i
Q_i^d	Potência reativa demandada na barra i
G_i^{sh}	Condutância <i>shunt</i> conectada à barra i
B_i^{sh}	Susceptância <i>shunt</i> conectada à barra i
ω_i	Variável binária de chaveamento do elemento <i>shunt</i> conectada à barra i
t_{ij}	Posição do <i>tap</i> do transformador no ramo ij
ϕ_{ij}	Valor do ângulo de defasagem introduzido pelo transformador defasador no ramo ij
$\overline{S}_{ij}$	Limite de fluxo de potência aparente do ramo ij
i^*	Barra de referência (<i>slack</i>)
sw_{ij}	Variável binária que define se uma linha de transmissão no ramo ij está ligada ou não
$\underline{V}$	Tensão mínima
$\overline{V}$	Tensão máxima
$\underline{P}_i^g$	Limite mínimo de geração de potência ativa na barra i
$\overline{P}_i^g$	Limite máximo de geração de potência ativa na barra i

$\underline{Q}_i^g$	Limite mínimo de geração de potência reativa na barra i
$\overline{Q}_i^g$	Limite máximo de geração de potência reativa na barra i

CAPÍTULO 4

P	Conjunto P de soluções
$PSize$	Tamanho do conjunto P de soluções
$RefSet$	Conjunto de soluções de referência
b	Tamanho do conjunto de soluções de referência
$b1$	Número de elementos do conjunto $RefSet$ responsáveis por representar soluções de qualidade
$b2$	Número de elementos do conjunto $RefSet$ responsáveis pela diversidade
F_i	Sub-faixa i de valores de uma variável contínua
$prob F_i$	Probabilidade da sub-faixa F_i de valores ser selecionada
$freq F_i$	Frequência com que a sub-faixa F_i foi utilizada
nr	Número de sub-faixas de valores de uma variável contínua
$d(x, y)$	Distância euclidiana entre as soluções x e y
S	Subconjuntos de elementos do conjunto $RefSet$
x'	Primeiro elemento do subconjunto S
x''	Segundo elemento do subconjunto S
$Pool$	Conjunto de soluções <i>trial</i> testes, obtidas a partir combinações entre os elementos dos subconjuntos S
α	Coefficiente de reflexão do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
χ	Coefficiente de expansão do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
γ	Coefficiente de contração do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
σ	Coefficiente de redução do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
$\mathbf{x}_r$	Ponto refletido do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
$\bar{\mathbf{x}}$	Centroide dos n melhores pontos do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
$\mathbf{x}_e$	Ponto expandido do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
$\mathbf{x}_c$	Ponto contraído para fora do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
$\mathbf{x}_{cc}$	Ponto contraído para dentro do algoritmo Simplex de Nelder-Mead
l	Número de restrições de igualdade
m	Número de restrições de desigualdade
ρ	Coefficiente de penalização

q	Expoente de penalização
ρ_i	Coeficiente de penalização para a i -ésima restrição de igualdade
ξ_i	Coeficiente de penalização para a i -ésima restrição de desigualdade
$\Omega_{g'}$	Conjunto de barras geradoras exceto a barra de referência
V_i'	Módulo da tensão na posição i do vetor da solução presente no conjunto P
V_i''	Módulo de tensão na posição i do vetor da solução presente no conjunto $RefSet$
$P_i^{g'}$	Potência ativa gerada na posição i do vetor da solução presente no conjunto P
$P_i^{g''}$	Potência ativa gerada na posição i do vetor da solução presente no conjunto $RefSet$
t_i'	Posição do <i>tap</i> na posição i do vetor da solução presente no conjunto P
t_i''	Posição do <i>tap</i> na posição i do vetor da solução presente no conjunto $RefSet$
ω_i'	Valor binário do <i>shunt</i> na posição i do vetor da solução presente no conjunto P
ω_i''	Valor binário do <i>shunt</i> na posição i do vetor da solução presente no conjunto $RefSet$
$nTaps$	Número de <i>taps</i> dos transformadores
$nShunts$	Número de <i>shunts</i>
d_{x_i}	Incremento na variável x_i
r	Número aleatório entre 0 e 1
$score_i$	Probabilidade utilizada para definir se uma variável binária assumirá o valor 1 ou 0 no método de combinação das soluções da BD
$VFobj_1$	Valor da função objetivo da solução x'
$VFobj_2$	Valor da função objetivo da solução x''

CAPÍTULO 5

sw'_{ij}	Valor binário do chaveamento da linha ij da solução presente no conjunto P
sw''_{ij}	Valor binário do chaveamento da linha ij da solução presente no conjunto $RefSet$
$score_{\omega_i}$	Probabilidade utilizada para definir se uma variável binária ω_i (status do <i>shunt</i>) assumirá o valor 1 ou 0 no método de combinação das soluções da BD
$score_{\omega_i}$	Probabilidade utilizada para definir se uma variável binária sw_i (status da linha) assumirá o valor 1 ou 0 no método de combinação das soluções da BD
v	Função custo de operação de geração de energia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	MOTIVAÇÃO	25
1.2	OBJETIVOS	26
1.3	CONTRIBUIÇÕES	27
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	TÉCNICAS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE FPO BASEADAS EM MÉTODOS CLÁSSICOS	31
2.2	TÉCNICAS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE FPO BASEADAS EM META-HEURÍSTICAS	34
2.3	DESLIGAMENTO ÓTIMO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	40
2.4	CONCLUSÃO	47
3	O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS — MODELAGEM MATEMÁTICA	49
3.1	MODELAGEM DOS DISPOSITIVOS ELÉTRICOS	49
3.1.1	Modelo matemático das linhas de transmissão	50
3.1.2	Modelo matemático dos transformadores em fase	51

3.1.2.1	Cálculo do tap dos transformadores em fase	53
3.1.3	Modelo matemático dos transformadores defasadores	53
3.1.4	Modelo matemático dos compensadores shunt	55
3.1.5	Expressões gerais do fluxo de potência	56
3.1.6	Desligamento ótimo de linhas de transmissão	56
3.2	FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO	58
3.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE FPO CONSIDERANDO O DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	60
3.4	MODELO MATEMÁTICO DC DE FPO PARA O PROBLEMA DE OTS	64
4	A META-HEURÍSTICA DE BUSCA DISPERSA	66
4.1	INTRODUÇÃO ÀS META-HEURÍSTICAS	66
4.2	BUSCA DISPERSA	69
4.3	APLICAÇÃO EM PROBLEMAS DE FUNÇÕES MULTIMODAIS	72
4.3.1	Construção do conjunto P	73
4.3.2	Construção do conjunto $RefSet$ inicial	74
4.3.3	Definição dos subconjuntos S e $Pool$	77
4.3.4	Atualização do conjunto $RefSet$	78
4.3.5	Método de melhoria local	79
4.3.6	Manipulação das restrições	81
4.4	APLICAÇÃO NO PROBLEMA DE FPO	81
4.4.1	Recursos de processamento paralelo	87
5	SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FPO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS USANDO A META-HEURÍSTICA DE BUSCA DISPERSA	91
5.1	MODELO MATEMÁTICO MODIFICADO	91
5.2	CÁLCULO DA FUNÇÃO OBJETIVO NA META-HEURÍSTICA BD-OTS	95
5.3	ETAPAS DA META-HEURÍSTICA BD-OTS	97
5.4	ESTRATÉGIA PARA MANTER O SISTEMA CONEXO	101

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	105
6.1	FUNÇÕES MULTIMODAIS RESTRITAS – BD-FMR	105
6.2	SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FPO PELA ABORDAGEM BD-FPO	108
6.3	SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FPO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (BD-OTS)	112
6.4	AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE OTS DC NO MODELO AC	120
7	CONCLUSÕES	124
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE A – PROBLEMAS TESTES COM FUNÇÕES MULTIMODAIS CONTÍNUAS E SUAS SOLUÇÕES	133
	APÊNDICE B – SOLUÇÕES DO PROBLEMA DE FPO PELO MÉTODO BD-FPO	138
	APÊNDICE C – SOLUÇÕES DO PROBLEMA DE FPO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PELO MÉTODO BD-OTS	142
	ANEXO A – CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DOS SISTEMAS IEEE	168

1 INTRODUÇÃO

A indústria de energia elétrica no mundo todo tem se deparado com mudanças significativas durante as três últimas décadas. Atualmente há muitos mercados não regulamentados, introduzido pela primeira vez no Chile em 1990, o que estabelece que os mercados sejam competitivos, reduzindo-se assim os custos de geração de energia. Entretanto, esses mercados não garantem que as demandas sejam supridas, seja por falta de planejamento ou, em muitos casos, pela capacidade limitada de transmissão, por ainda haver equipamentos com tecnologia desatualizada e antiquados no sistema. O aumento do preço dos combustíveis fósseis e a crescente preocupação com questões ambientais trouxeram a necessidade da inclusão de fontes renováveis, como a eólica e solar, introduzindo uma complexidade ainda maior no gerenciamento dos fluxos de energia (FRANK; STEPONAVICE; REBENNACK, 2012b).

No Brasil, o setor elétrico passou por uma profunda reestruturação institucional e regulatória a partir de 1995, o que levou à mudança do modelo de monopólio para o modelo competitivo, e sendo assim, foram impostas novas regras de operação e planejamento dos sistemas elétricos, envolvendo a geração, transmissão e distribuição. Além disso, houve um aumento significativo da demanda de energia nas últimas décadas, o que tem obrigado os sistemas a operarem nos limites de suas capacidades. As tentativas de expansão dos sistemas também têm se deparado com problemas de características ambientais, sociais e financeiras (ARAÚJO, 2005).

Diante de todas essas dificuldades que o setor de energia elétrica enfrenta, faz-se necessário, cada vez mais, o uso de ferramentas e métodos de otimização que venham a contribuir com o planejamento e a operação dos sistemas de energia elétrica (SEE), sendo que a operação e controle desses sistemas, devem incluir questões de segurança e economia simultaneamente, além de considerar aspectos sociais e ambientais, respeitando a regulação e leis de cada região. Uma ferramenta predominante, utilizada no planejamento da operação de sistemas de energia elétrica, é o fluxo de potência ótimo (FPO), que foi introduzido por Carpentier (1962). Na década de 1980 iniciaram pesquisas em uma outra estratégia para também otimizar a operação de sistemas de energia elétrica, conhecida como estratégia de desligamento ótimo de linhas de transmissão (*optimal transmission switching* – OTS), como a proposta por Glavitsch (1985), a qual é estudada e utilizada até hoje.

O problema de FPO consiste basicamente em otimizar uma ou mais funções objetivo que definirão a melhor estratégia de operação de um sistema de energia elétrica assegurando o atendimento das restrições operacionais e físicas de todo o sistema. A função objetivo do problema de FPO pode ser definida para otimizar diversos critérios, e dependendo de sua aplicação, destacam-se por exemplo, a minimização de custos de geração de energia, redução das perdas nas linhas de transmissão, diminuição da emissão de poluentes, redução dos cortes de carga, dentre outras. Além disso, para assegurar a operação factível do sistema, a modelagem matemática do problema de FPO deve obedecer diversas restrições, tais como as restrições naturais de circuitos elétricos, *i.e.*, as duas leis de Kirchhoff, além dos limites operacionais relacionados com a geração de potência ativa, reativa, posição dos *taps* dos transformadores, magnitudes de tensões nas barras, fluxos nas linhas de transmissão, entre outras restrições. O problema de OTS, além de incorporar o problema de FPO, adicionalmente considera a otimização dos sistemas com a escolha adequada de linhas de transmissão a serem desligadas.

Neste trabalho uma metodologia utilizando a meta-heurística chamada busca dispersa (BD) é implementada para resolver o problema de fluxo de potência ótimo com desligamento de linhas de transmissão, objetivando a redução nos custos de operação.

1.1 MOTIVAÇÃO

A solução dos problemas de FPO e OTS consiste em otimizar uma função objetivo, que pode ser linear ou não linear, sujeita a restrições lineares ou também não lineares, dependendo da modelagem considerada para o problema. Além disso, o problema pode envolver variáveis

contínuas e discretas, o que dificulta o processo de solução. Na literatura, há basicamente três categorias de metodologias para resolver esse problema de otimização: metodologias clássicas de otimização, que resolvem o problema utilizando métodos matemáticas clássicos; metodologias estocásticas, também chamadas de não determinísticas, que se utilizam de métodos heurísticos e meta-heurísticas para resolver o problema. Também existem as metodologias híbridas, que integram os métodos clássicos de otimização com as meta-heurísticas.

Os métodos clássicos requerem que as funções sejam diferenciáveis, pois utilizam derivadas, gradientes e nem sempre isso é possível de ser garantido. Adicionalmente, nesse caso as dificuldades aumentam quando se tem variáveis discretas. Para contornar estas dificuldades, alguns métodos utilizam a relaxação dos modelos e também a linearização das restrições de operação, o que pode tornar as soluções não tão precisas para o problema do mundo real. De uma forma geral, dependendo do problema, os métodos clássicos apresentam dificuldades em encontrar as soluções ótimas globais, principalmente em problemas de grande porte e multimodais, *i.e.*, problemas que possuem várias soluções ótimas locais.

Os métodos não determinísticos, *e.g.*, as meta-heurísticas, não requerem convexidade do problema, e possuem mecanismos para tratar qualquer tipo de variável, seja contínua ou discreta. Empregam técnicas de diversificação e intensificação, o que pode contribuir para que ótimos globais possam ser alcançados. Desde meados da década de 1990, o campo da pesquisa operacional vem investigando cada vez mais os métodos não determinísticos para a solução do problema de FPO e OTS. Vários métodos não determinísticos têm sido propostos com eficiência. Entretanto, há ainda muito o que se pesquisar sobre estes métodos e também deve-se melhorá-los para resolver os problemas de FPO e OTS, principalmente em sistemas de grande porte, onde o ótimo global é muito mais difícil de ser alcançado.

1.2 OBJETIVOS

São objetivos deste trabalho:

- Desenvolver um algoritmo computacional baseado na meta-heurística de busca dispersa para resolver problemas de otimização de funções multimodais restritas, com variáveis contínuas;
- Desenvolver um protótipo de uma metodologia para resolver o problema de fluxo de potência ótimo de maneira totalmente independente de métodos clássicos. O algoritmo

computacional também é baseado na meta-heurística de busca dispersa, e a função objetivo do problema de FPO será a otimização dos custos de geração de energia, utilizando o modelo AC, com funções não lineares, restrições de igualdade e desigualdade, com variáveis contínuas e discretas;

- Implementar um algoritmo computacional baseado na meta-heurística de busca dispersa que resolva o problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão (OTS) utilizando o modelo AC.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições do trabalho são as seguintes:

- A revisão bibliográfica sobre o problema de FPO e OTS pode ser útil para pesquisadores do tema;
- Algoritmo eficiente utilizando a meta-heurística de busca dispersa para a solução de problemas de otimização de funções multimodais restritas;
- Introdução da meta-heurística de busca dispersa no contexto do problema de FPO;
- Protótipo de uma ferramenta utilizando a meta-heurística de BD para a solução do problema de FPO, independente de métodos clássicos, o qual poderá ser utilizado em trabalhos futuros;
- Ferramenta eficiente para a solução do problema de FPO considerando desligamento de linhas de transmissão, utilizando a meta-heurística de BD.

Cabe ressaltar que, não há na literatura trabalhos sobre OTS que ajusta simultaneamente as variáveis discretas do problema, ou seja, posição dos *taps* dos transformadores, estado operacional dos compensadores *shunt* e das linhas de transmissão, utilizando um modelo de programação não linear inteira mista (PNLIM).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em sete capítulos, três apêndices e um anexo, de forma a facilitar seu entendimento. De uma forma geral, a estrutura do trabalho se preocupa em descrever uma revisão bibliográfica com notas históricas e trabalhos sobre o assunto, apresen-

tando aspectos teóricos e suas formulações pertinentes, para melhor compreensão da metodologia proposta. Assim, é apresentada uma metodologia que utiliza a meta-heurística busca dispersa para resolver o problema de OTS, são estabelecidos e discutidos os resultados da aplicação da metodologia, e por fim, é apresentada a conclusão com propostas para trabalhos futuros. Neste contexto, segue a organização básica deste trabalho:

- **Capítulo 1:** No Capítulo 1, a introdução ao tema desta pesquisa é apresentada, bem como a motivação deste trabalho e os objetivos específicos;
- **Capítulo 2:** Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre os métodos de solução do problema de FPO e OTS existentes na literatura. São descritos trabalhos que tratam o problema de FPO e OTS com métodos clássicos de otimização, com meta-heurísticas e alguns métodos híbridos;
- **Capítulo 3:** A modelagem matemática do problema de FPO utilizada neste trabalho é apresentada. Primeiramente, a modelagem do problema de fluxo de potência (FP) é discutida, mostrando os modelos matemáticos das linhas de transmissão, transformadores em fase, transformadores defasadores, compensadores *shunt*, equações gerais dos fluxos de potência, e cálculo dos *taps* dos transformadores. Todos esses modelos matemáticos são utilizados na formulação dos problemas de FPO e OTS;
- **Capítulo 4:** O principal objetivo deste capítulo é apresentar detalhadamente a meta-heurística busca dispersa. Entretanto, fez-se necessário uma introdução ao tema de meta-heurísticas, sendo que algumas das meta-heurísticas mais frequentes da literatura e utilizadas são descritas resumidamente. Ainda nesse capítulo, com o objetivo de detalhar e ainda avaliar a meta-heurística de BD, são apresentados todos os detalhes da implementação da BD para resolver problemas multimodais, restritos e com variáveis contínuas. Também é apresentada a implementação de um protótipo utilizando a BD para a resolução do problema de FPO, incorporando variáveis contínuas e discretas;
- **Capítulo 5:** Neste capítulo, é apresentada a metodologia para solução do problema de OTS utilizando a BD, que é o objetivo principal desta tese;
- **Capítulo 6:** Este é o capítulo destinado à apresentação dos resultados e discussões obtidos pela aplicação das metodologias em sistemas testes. Primeiramente os resultados da aplicação da BD em onze problemas de otimização de funções multimodais restritas são apresentados, em seguida os resultados da metodologia BD-FPO que resolve o pro-

blema de FPO de maneira independente de métodos clássicos são apresentados utilizando três sistemas teste. Em seguida, os resultados da metodologia BD-OTS que resolve o problema de FPO considerando o desligamento de linhas de transmissão são apresentados com a solução de onze sistemas teste. Por fim, avalia-se a qualidade das soluções fornecidas pelos modelos de OTS DC disponíveis na literatura usando o modelo AC completo de FPO proposto nesse trabalho;

- **Capítulo 7:** Neste capítulo, as conclusões sobre toda a experiência obtida na realização deste trabalho são apresentadas e discutidas, bem como propostas para trabalhos futuros;
- **Apêndices:** No Apêndice A são apresentadas as modelagens matemáticas dos onze problemas de otimização de funções multimodais restritas utilizadas para a avaliação da BD, bem como todos os resultados da aplicação da BD nestes problemas. O Apêndice B é dedicado à apresentação de todos os resultados da aplicação BD-FPO nos três sistemas teste. O Apêndice C tem o mesmo objetivo do Apêndice B, porém utilizando a abordagem BD-OTS aplicada a onze sistemas testes.
- **Anexo:** No Anexo A são apresentadas em forma de tabelas todas as características dos sistemas IEEE testes utilizados para a avaliação das metodologias BD-FPO e BD-OTS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros trabalhos sobre a otimização da operação dos sistemas de potência datam do início da década de 1930 (STAHL, 1930). Durante aproximadamente três décadas a determinação da operação otimizada dos sistemas de potência era realizada obtendo-se a solução do problema de despacho econômico, sendo que a solução deste problema se baseava simplesmente em otimizar o custo da geração, sujeito ao balanço de potência ativa (KIRCHMAYER, 1958).

O problema de fluxo de potência ótimo (FPO) foi introduzido no trabalho de Carpentier (1962), o qual resolvia tanto o problema do despacho econômico quanto o fluxo de potência simultaneamente. A partir deste trabalho muito tem se pesquisado a respeito do problema de FPO, e há uma grande quantidade de técnicas e metodologias na literatura especializada para resolução desse problema. Há metodologias baseadas em métodos determinísticos, também chamados de métodos clássicos ou exatos, meta-heurísticas e metodologias híbridas que utilizam tanto os métodos clássicos quanto as meta-heurísticas.

No contexto da preocupação em melhorar a operação de sistemas de potência, considerando o desligamento de linhas de transmissão (*transmission switching* – TS), as primeiras pesquisas iniciaram-se na década de 1980. O primeiro trabalho que trata desse assunto é o de Glavitsch (1985), em que a preocupação não era de forma explícita a minimização dos custos de produção de energia, mas sim como um mecanismo de controle da operação. A utilização da estratégia do desligamento de linhas de transmissão para a otimização dos custos de geração,

estratégia essa chamada de desligamento ótimo de linhas de transmissão (ou do inglês *optimal transmission switching* – OTS) é encontrada de maneira clara pela primeira vez no trabalho de Fisher *et al.* (2008).

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar alguns dos trabalhos mais relevantes sobre a solução do problema de FPO, apresentando separadamente os trabalhos por tipos de técnicas usadas. Primeiramente serão apresentados os trabalhos que utilizam métodos clássicos e exatos, e em seguida as soluções por meta-heurísticas. Por fim são apresentados alguns dos trabalhos que tratam o problema do desligamento ótimo de linhas.

2.1 TÉCNICAS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE FPO BASEADAS EM MÉTODOS CLÁSSICOS

O método proposto por Carpentier (1962) embora resolvesse o problema de FPO, esse ainda não possuía essa denominação. As soluções obtidas por esse método atendiam às condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) usando variáveis duais, e apresentava problemas de desempenho e garantias de satisfazer as condições de otimalidade.

Em Dommel e Tinney (1968) o modelo proposto por Carpentier (1962) foi pela primeira vez chamado de FPO. Nesse trabalho, o método de Newton foi adotado para obter os fluxos de potência, e o método do gradiente reduzido foi utilizado para minimizar uma função objetivo penalizada. Não se precisava de muitas iterações para convergir, porém, o método possuía muita dependência do parâmetro que determinava o tamanho do passo referente à atualização das variáveis de controle, o qual ocasionava oscilações no processo de busca da solução ótima para valores altos, e valores muito pequenos ocasionavam uma convergência muito lenta.

O trabalho de Sun *et al.* (1984) conseguiu resolver o problema de FPO com melhores condições de convergência que o trabalho de Dommel e Tinney (1968). Nesse caso, o método de Newton explícito foi utilizado, e cada iteração do algoritmo minimizava uma aproximação quadrática da função Lagrangeana, sendo que as restrições de desigualdade eram adicionadas como termos de penalidade quadráticos à função objetivo do problema.

Um método adotando a implementação esparsa é apresentado no trabalho de Burchett, Happ e Vierath (1984) utilizando derivadas de segunda ordem. Testes foram realizados em sistemas de 350 a 2000 barras em computadores de grande porte para a época, sendo que foi observado um bom desempenho do método. O método se mostrou mais eficiente quando comparado com outros métodos que utilizaram a Lagrangeana aumentada.

Várias técnicas utilizando o método de pontos interiores (MPI) têm sido utilizadas em aplicações de sistemas de potência, e em especial na solução do problema de FPO (GRANVILLE, 1994; HUA WEI *et al.*, 1998; TORRES; QUINTANA, 1998).

A implementação do MPI utilizada no trabalho de Granville (1994) teve o objetivo de resolver o problema de despacho ótimo de reativos. O MPI utilizado é baseado no algoritmo primal-dual, e foram realizados testes numéricos em sistemas de grande porte (de 1832 a 3467 barras), sendo que a técnica se mostrou eficaz na solução de problemas de FPO.

No trabalho de Sasaki, Kubokawa e Yokoyama (1998) o MPI utilizado era baseado nas condições de KKT perturbadas no problema primal. Através do conceito de direção centralizada, esse algoritmo foi estendido para o problema clássico de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo aproximado. Para lidar com as restrições de desigualdade, uma equação de correção reduzida é definida. Além disso, um diferencial deste trabalho foi utilizar uma estrutura de dados diferente do método de Newton convencional, até então utilizado em problemas de FPO, para reorganizar a equação de correção. Os testes realizados em sistemas de 14 e 1047 barras mostraram que o método proposto se comportou de maneira robusta, rápida e promissora para a época quando aplicado a sistemas de grande porte.

No artigo de Torres e Quintana (1998), a solução do problema de FPO é feita pelo MPI primal-dual e utilizam-se coordenadas retangulares para representação das equações de operação da rede. Isso fornece muitas vantagens, tais como, a função objetivo e as restrições são quadráticas, tornando a manipulação numérica mais fácil, fácil montagem das matrizes e incorporação de informações de ordem superior sem custos no procedimento preditor-corretor, o que geralmente melhora o desempenho do MPI, a matriz hessiana é constante e a expansão de Taylor é exata para o termo de segunda ordem. Testes nos sistemas de 30, 57, 118 e 300 barras mostraram que utilizar tanto coordenadas retangulares quanto polares para resolver o problema de FPO fornece bom desempenho. Uma desvantagem encontrada nesse trabalho foi a necessidade de se lidar com limites de tensão simples como limites funcionais.

Uma maneira alternativa para a solução do problema de FPO foi apresentada em Farivar e Low (2012), onde há duas etapas de relaxação. Na primeira os ângulos das correntes e das tensões são relaxados, e na segunda o problema resultante é aproximado por um problema cônico, e dessa forma esse problema pode ser resolvido de maneira eficiente. Com isso, foi provado que para redes radiais essas duas etapas de relaxamento são sempre exatas. Dessa forma, essa estratégia garante uma solução ótima global para o problema de FPO em redes radiais.

Em Lavaei e Low (2012) é proposta a otimização utilizando programação semidefinida convexa, a qual representa o problema dual convexo de uma forma equivalente ao problema de

FPO. A solução ótima global do problema de FPO pode ser obtida em tempo polinomial a partir deste problema dual convexo, desde que o *gap* de dualidade seja zero. Nesse trabalho é fornecida a condição necessária e suficiente para que o *gap* de dualidade seja zero, e essa condição é testada e satisfeita nos sistemas de 14, 30, 57, 118 e 300 barras conhecidos da literatura e em sistemas de grande porte gerados aleatoriamente.

No trabalho de Soler, Asada e Costa (2013) o problema do despacho ótimo reativo (DOR) é tratado, o qual é uma forma particular do problema de FPO. Nesse problema as variáveis de controle determinam os ajustes dos equipamentos de controle de potência reativa, e similar ao problema completo de FPO, é não linear, não convexo, possui restrições de igualdade e desigualdade, contém variáveis contínuas e discretas. A estratégia da proposta nesse trabalho é fornecer um modelo equivalente que considera as variáveis discretas no domínio contínuo e que seja resolvido por algoritmos de programação não linear (PNL). Para isso, a função objetivo é penalizada quando as variáveis discretas não assumem os valores discretos, e para a solução do problema utilizou-se o método de pontos interiores através do *solver* IPOPT. Foram realizados testes com os sistemas de 14, 30, 118 e 300 barras, e os resultados comparados com a modelagem padrão do problema de DOR utilizando os algoritmos clássicos de *branch and bound* (B&B) e o método de aproximação externa (MAE), mostraram que na maioria dos testes a abordagem deste trabalho apresentou melhor desempenho.

Como o problema de FPO é não convexo, não linear, e possui variáveis contínuas e discretas, como já citado anteriormente, isso torna sua solução difícil e de complexidade *NP-hard*. Uma grande quantidade de trabalhos e pesquisas desde Carpentier (1962) trata o problema de FPO utilizando estratégias de relaxação da formulação, e várias técnicas foram propostas, como já pôde ser observado nesse capítulo. Uma das técnicas mais populares de relaxação é chamada de *direct current optimal power flow* (DC OPF), ou seja, fluxo de potência ótimo em corrente contínua, e consiste em linearizar as equações de fluxo de potência (FP) AC. Low (2014) realiza uma revisão bibliográfica sobre esse assunto e discute com bastante detalhe dois modelos de FP, o modelo de injeção de barra e o modelo de fluxo de ramos. Para cada modelo é formulado o problema de FPO com relaxação convexa, e além disso, comprova-se a equivalência entre ambos, o normal e o relaxado. Apresenta-se também as condições suficientes que garantem que essa relaxação seja exata, ou seja, condições para que a solução ótima global do FPO seja obtida a partir da solução ótima dos modelos relaxados.

2.2 TÉCNICAS DE SOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE FPO BASEADAS EM META-HEURÍSTICAS

Os métodos baseados em meta-heurísticas, também chamados de métodos de busca aleatória, métodos estocásticos ou métodos não determinísticos, têm ganhado grande popularidade na resolução do problema de FPO devido à sua vantagem em relação aos métodos clássicos, dadas as características do problema de ser não convexo, não linear, multimodal, com variáveis contínuas e discretas. Desde meados da década de 1990, vários métodos não determinísticos têm sido propostos para superar as dificuldades que os métodos clássicos possuem em encontrar o ótimo global quando aplicados a problemas com características semelhantes às do problema de FPO. Dentre os métodos não determinísticos propostos, várias meta-heurísticas foram utilizadas para resolver o problema de FPO. Algumas dessas meta-heurísticas são (FRANK; STEPONAVICE; REBENNACK, 2012a):

- i. *Ant colony optimization* (ACO) – Otimização por colônia de formigas;
- ii. *Bacterial foraging algorithms* (BFA) – Otimização por cultura de bactérias;
- iii. *Chaos optimization algorithms* (COA) – Algoritmo de otimização do caos;
- iv. *Particle swarm optimization* (PSO) – Otimização por enxame de partículas;
- v. *Simulated annealing* (SA) – Recozimento simulado;
- vi. *Tabu search* (TS) – Busca tabu;
- vii. E vários algoritmos evolutivos, tais como diversas versões do *Genetic algorithm* (GA) – Algoritmos genéticos (AG).

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos de destaque que tratam o problema de FPO utilizando meta-heurística.

No trabalho de Iba (1994) é apresentada uma abordagem para tratar o problema do FPO reativo baseada no algoritmo genético (AG). O AG implementado diferencia-se dos AG tradicionais em alguns aspectos, tais como: ele faz a busca em vários caminhos para obter o ótimo global; utiliza várias funções objetivos simultaneamente; trata os genes dos cromossomos como variáveis contínuas e discretas, sendo elas a posição dos *taps* dos transformadores, bancos de capacitores/reatores *shunts* e tensões de referências; utiliza dois operadores genéticos, realizando a recombinação (*crossover*) considerando a topologia de rede e realizando a manipulação baseada nas regras estocásticas “se-então”. Após obter as variáveis discretas, na etapa inicial e durante as iterações do AG, um fluxo de potência é calculado. Essa abordagem foi testada em

sistemas de 51 e 224 barras, o que mostrou sua viabilidade e eficácia. Segundo o autor, o método não é tão rápido quanto os métodos clássicos, mas que isso poderia ser superado com o avanço dos computadores.

Em Yuryevich e Wong (1999), um algoritmo evolutivo é proposto para resolver o problema de FPO. Um diferencial nesse trabalho é que para melhorar velocidade de convergência e também a habilidade de se trabalhar com sistemas de grande porte, é utilizada a informação do gradiente obtida pelo método *steepest descent* ou método do gradiente na fase de melhoria local. A representação de uma solução dessa abordagem consiste no conjunto das seguintes variáveis: geração de potência ativa em todas as barras de geração, exceto na barra de referência, magnitude de tensão em todas as barras de geração e a posição dos *taps* dos transformadores. As demais variáveis do problema são obtidas através de um algoritmo de fluxo de potência. Testes foram realizados em um sistema de 30 barras e os mesmos convergiram com eficiência e precisão para a solução ótima do problema.

Bakirtzis *et al.* (2002) propuseram um algoritmo genético melhorado para resolver o problema de FPO considerando variáveis de controle contínuas e discretas. As variáveis contínuas são representadas pelas potências ativas geradas e magnitudes de tensões nas barras geradoras, já as variáveis discretas representam as operações dos *taps* dos transformadores e dos dispositivos *shunt* chaveados. As infactibilidades das restrições operacionais, *i.e.*, violações do limite de capacidade das linhas, limite de magnitude de tensão nas barras e limite de geração de reativos dos geradores, são utilizadas para penalizar a função objetivo. Nessa abordagem, no cálculo da função objetivo, um fluxo de potência é utilizado para se obter as demais variáveis do problema. Dois sistemas foram utilizados para testar o algoritmo, um de 30 barras e o outro denominado RTS96 de 3 áreas com 73 barras, sendo que ambos foram resolvidos vinte vezes. A principal vantagem deste método, segundo os autores, é a flexibilidade do modelo, que pode trabalhar com funções não convexas e com variáveis discretas. Uma outra vantagem é a facilidade de codificar o algoritmo utilizando processamento paralelo. Ainda segundo os autores, a principal desvantagem deste método é que o algoritmo é estocástico, o que não garante que a solução obtida seja ótima global. Uma outra desvantagem é que o tempo de execução e a qualidade da solução se deteriora com o aumento do tamanho do cromossomo, ou seja, em sistemas de grande porte.

Um algoritmo baseado na meta-heurística ACO foi apresentado por Lee e Vlachogiannis (2005) para a otimização de sistemas de potência. Foram realizados três testes, sendo que, no primeiro o algoritmo ACO foi aplicado a um problema de fluxo de potência restrito (FPR) em

dois sistemas testes, de 14 e 136 barras. Os resultados foram comparados com resultados fornecidos por métodos probabilísticos de FPR e métodos de aprendizagem por reforço, demonstrando superioridade e flexibilidade do algoritmo ACO. Em seguida, o algoritmo ACO foi também aplicado ao problema de controle de potência reativa, utilizando um sistema de 14 barras, para minimizar as perdas de potência ativa sujeito às restrições operacionais e limites das variáveis durante todo o período de planejamento. Por fim, a aplicação é realizada no planejamento operacional ativo e reativo utilizando um sistema teste de 30 barras, onde os resultados foram comparados com resultados obtidos de um algoritmo de *simulated annealing*, o que demonstrou melhor performance. Nessa abordagem, todas as incógnitas do problema, *i.e.*, magnitude e ângulos de tensão em todas as barras, posição dos *taps* dos transformadores, potências ativa e reativa nas barras de geração, fluxos de potência nas linhas de transmissão e variáveis binárias referentes à operação dos bancos de capacitores *shunts*, são gerenciadas pela meta-heurística.

No trabalho de Esmín, Lambert-Torres e Zambroni de Souza (2005), foi proposto um método híbrido utilizando a meta-heurística *particle swarm optimization* para minimização de perdas em sistemas de transmissão. O método foi nomeado de PSO com mutação e é dividido em duas etapas. Na primeira etapa, a área crítica do sistema de potência é identificada considerando instabilidade de tensão, através da técnica de vetor tangente. Após identificar essa área, na segunda etapa os *shunts* são configurados em cada barra para compensar a potência reativa, utilizando a técnica de PSO. Para calcular o fluxo de potência, um programa de computador existente é integrado ao método. Testes foram realizados utilizando um sistema de 118 barras, e segundo os autores, os resultados comparados com resultados de outros trabalhos, foram promissores, confirmando o potencial do método.

Na tese de Amorim (2006), o FPO é tratado em sistemas multimercados através de um algoritmo evolutivo multiobjetivo. O algoritmo utilizado foi o *nondominated sorting genetic algorithm* (NSGA), que difere do algoritmo genético tradicional apenas pelo método de seleção utilizado, e foi proposto para trabalhar com os conceitos de dominância e manutenção da diversidade da população, simultaneamente. As variáveis de controle utilizadas formam um cromossomo da população, e são: potência ativa gerada em todas as barras de geração, magnitude de tensão nas barras de tensão controlada, posição dos *taps* dos transformadores e os seletores dos bancos de capacitores e reatores *shunts*. Após a geração da população é resolvido um fluxo de potência para cada indivíduo através do método de Newton. Essa metodologia foi testada através da simulação de dois sistemas testes: RTS-96 composto por 72 barras e o sistema IEEE-354 de 354 barras. Para ambos sistemas a metodologia convergiu para soluções otimizadas de boa qualidade.

A meta-heurística de *simulated annealing* foi utilizada no trabalho de Sousa *et al.* (2011) para resolver o problema de FPO no contexto do despacho econômico, minimizando o custo total de geração de energia. Durante a execução do algoritmo, as gerações de potência ativa são gerenciadas pela meta-heurística, enquanto as demais variáveis do sistema (magnitude e ângulo de tensões nas barras e gerações de potência reativa), são obtidas a partir do cálculo do fluxo de potência através do método de Newton-Raphson. A principal contribuição deste trabalho é a geração de vizinhança específica de acordo com as características do problema de FPO considerado. O método foi testado nos sistemas de 6 e 30 barras, e os resultados obtidos, comparados com outras metodologias bem conhecidas da literatura, mostraram a eficácia do método proposto, ou seja, a comparação com outros trabalhos mostrou que com essa metodologia é capaz de obter boas soluções em tempos de execução extremamente competitivos. Segundo os autores, a principal desvantagem do método é a dificuldade em ajustar os parâmetros da meta-heurística de SA em cada caso teste, o que é fundamental para obter bons resultados, sendo que para realizar um bom ajuste dos parâmetros é necessário fazer uma análise de sensibilidade no problema.

A meta-heurística algoritmo de fogos de artifícios foi utilizada na tese de Oriondo (2016) para resolver o problema de FPO. Essa meta-heurística especializada para resolver o problema de FPO foi denominada de algoritmo dos fogos de artifício de busca dinâmica com mutação de covariância (AFABDMC). As variáveis do problema de FPO controladas pela meta-heurística foram as variáveis discretas: estado de operação dos bancos de capacitores *shunts* e a posição do comutador de *taps* dos transformadores. Com os valores destas variáveis discretas obtidos, o problema de FPO passa a ser um problema de PNL. Dessa forma, utilizou-se o solver KNITRO para resolver esse PNL e fornecer os valores contínuos das demais variáveis da formulação do FPO, ou seja, magnitudes e ângulos de tensão das barras, potência ativa e reativa das barras de geração. Foram realizados testes com sistemas de 14, 30, 57 e 118 barras, e segundo o autor, os resultados obtidos indicam que a metodologia proposta é capaz de encontrar soluções de boa qualidade para o problema de FPO.

No artigo de Surender Reddy e Bijwe (2016) são propostas duas abordagens utilizando meta-heurísticas para resolver o problema de FPO. Explorando o fato de que a principal desvantagem de uma meta-heurística que resolve o problema de FPO é o tempo excessivo necessário para resolver um grande número de fluxos de potência, as abordagens propostas nesse trabalho utilizam o conceito de modelo de fluxo de potência incremental baseado nas sensibilidades e também nos limites inferiores e superiores dos valores da função objetivo, o que resulta

na redução do número de problemas de fluxos de potência a serem calculados, e, consequentemente aumenta-se a velocidade dos algoritmos para encontrar a solução final. As variáveis de controle utilizadas nessa abordagem são: geração de potência ativa nas barras de geração, exceto da barra de referência, magnitude de tensão nas barras geradoras, posição dos *taps* dos transformadores e a potência reativa de compensadores *shunt*. Já as variáveis de estado, obtidas a partir do cálculo do fluxo de potência pelo método de Newton-Raphson são: magnitude de tensão nas barras de carga, geração de potência reativa nas barras de geração, geração de potência ativa na barra de referência e os fluxos de potência aparente nas linhas de transmissão. Essas abordagens foram utilizadas nesse trabalho usando um algoritmo genético melhorado híbrido e, em alguns casos testes, utilizou-se o algoritmo de evolução diferencial (ED). Entretanto, segundo os autores essas abordagens são genéricas e podem ser adaptadas a qualquer meta-heurística para o problema de FPO. Os testes realizados usando essas abordagens em sistemas de 30, 118 e 300 barras confirmaram a eficiência do método quando comparado com outras meta-heurísticas.

Um novo algoritmo de otimização chamado *moth swarm algorithm* (MSA) – algoritmo de enxame de mariposas, inspirado na orientação dos insetos em direção à lua, é proposto por Mohamed *et al.* (2017) para resolver o problema de FPO restrito. Nesse algoritmo, os recursos de aprendizado associativo com memória imediata e *crossover* para diversidade populacional com mutação *Lévy* foram propostos para melhorar a qualidade e habilidade de exploração, respectivamente. Além disso, foram utilizados passos Gaussianos adaptativos e movimento em espiral. As variáveis de controle utilizadas nessa abordagem são: geração de potência ativa nas barras de geração, exceto da barra de referência, magnitude de tensão nas barras geradoras, posição dos *taps* dos transformadores e a potência reativa de compensadores *shunt*. Já as variáveis de estado, obtidas a partir do cálculo do fluxo de potência são: magnitude de tensão nas barras de carga, geração de potência reativa nas barras de geração, geração de potência ativa na barra de referência e os fluxos de potência aparente nas linhas de transmissão. Foram realizados testes com os sistemas de 30, 57 e 118 barras utilizando o algoritmo proposto, sendo que a eficácia e superioridade do algoritmo MSA foi demonstrada comparando-se os resultados com os resultados de várias publicações recentes.

Em Attia, El Sehiemy e Hasanien (2018), um novo algoritmo para resolver o problema de FPO foi proposto, baseado no algoritmo modificado de seno-cosseno (AMSC). O principal objetivo do algoritmo AMSC foi o de reduzir o tempo computacional para encontrar uma solução ótima e factível do problema de FPO. Nessa abordagem, saltos são impostos no algoritmo original de seno-cosseno para evitar soluções ótimas locais. Neste trabalho também é utilizado

o cálculo do fluxo de potência para obter as variáveis de estado, ou seja: geração de potência ativa na barra de referência, magnitude de tensão nas barras carga, geração de potência reativa nas barras de geração e os fluxos de potência aparente nas linhas de transmissão, enquanto que as variáveis de controle do método são: geração de potência ativa nas barras de geração, exceto na barra de referência, magnitude de tensão nas barras de geração, posição dos *taps* dos transformadores e a potência reativa de compensadores *shunt*. Testes foram realizados com os sistemas de 30 e 118 barras usando a abordagem proposta e também do algoritmo original de senocosseno, comparando-se com outros métodos de otimização.

No trabalho de Warid *et al.* (2018) é proposto um algoritmo baseado na meta-heurística JAYA para resolver o problema de FPO. JAYA, palavra que significa Vitória, é uma nova meta-heurística baseada em população para resolver problemas de otimização restritos e irrestritos e que foi definida por Venkata Rao (2016). O algoritmo de Warid *et al.* (2018) é chamado de *quasi-oppositional JAYA* (QOJAYA), utiliza uma estratégia inteligente baseada em aprendizado, a qual é integrada ao algoritmo original JAYA para aumentar sua velocidade de convergência e qualidade da solução. Nesse algoritmo, um procedimento para o cálculo do fluxo de potência também é utilizado para obter as variáveis de estado do problema. O algoritmo é examinado e validado realizando testes em um sistema de 30 barras, e segundo os autores, os resultados mostraram que o algoritmo proposto QOJAYA é superior ao algoritmo JAYA original em termos de qualidade da solução e tempo de execução. Além disso, comparado com diversas meta-heurísticas propostas na literatura, o algoritmo QOJAYA também se mostrou superior em termos de qualidade e soluções factíveis. Os autores concluem que o algoritmo QOJAYA é uma ferramenta robusta, rápida e confiável para resolver problemas de FPO.

Yadav e Ghoshal (2018) também apostaram em uma nova meta-heurística para resolver o problema de FPO. A meta-heurística proposta é chamada de *monarch butterfly optimization* (MBO) – otimização por borboletas monarcas, e é inspirada na migração de borboletas do norte dos Estados Unidos e sul do Canadá para o México durante o final do verão/outono. A meta-heurística MBO é baseada em população e foi proposta por Wang, Deb e Cui (2015). As variáveis de controle consideradas são: geração de potência ativa nas barras de geração, exceto na barra de referência, magnitude de tensão nas barras de geração, posição dos *taps* dos transformadores e a potência reativa de compensadores *shunt*. As variáveis de estado são: geração de potência ativa na barra de referência, magnitude de tensão nas barras carga, geração de potência reativa nas barras de geração e os fluxos de potência aparente nas linhas de transmissão. Testes foram realizados com os sistemas de 30 e 118 barras, e os resultados comparados com algumas meta-heurísticas presentes na literatura que também resolvem o problema de FPO, mostraram

que o algoritmo MBO apresentou melhores resultados. De acordo com os autores, essa técnica também pode ser utilizada para resolver o problema de FPO multiobjetivo.

O problema de FPO foi tratado através de um algoritmo genético multiobjetivo na tese de Araujo (2018). O algoritmo utilizado foi baseado na meta-heurística *nondominated sorting genetic algorithm II* (NSGA II) e o objetivo foi o de planejamento e despacho ótimo de fontes de potência ativa, considerando as incertezas das cargas e fontes de energia renováveis não despacháveis utilizando uma abordagem probabilística. A estrutura do cromossomo deste AG contém as variáveis controladas pela metodologia que são: potência ativa gerada nas barras de geração, o que corresponde à geração dos geradores despacháveis, magnitude de tensão nas barras de geração, posição dos *taps* dos transformadores e os seletores dos bancos de capacitores e reatores *shunts*. As restrições de fluxo de potência são calculadas para cada indivíduo através do método de Newton no caso determinístico e pelo método estimado de dois pontos no caso probabilístico. Os resultados de testes realizados em sistemas de 30 e 118 barras mostraram a eficiência e robustez da metodologia.

Em Deng, Rotaru e Sykulski (2019) é proposta uma estratégia assistida pelo método de *Krigagem* para reduzir o tempo computacional dos algoritmos evolucionários que resolvem o problema de FPO. Primeiramente dois algoritmos utilizando o método de *Krigagem* foram desenvolvidos: algoritmo genético (KAGA) e o PSO (KAPSO). Ambos os algoritmos foram integrados com a biblioteca MATPOWER do software MATLAB para a geração dos fluxos de potência. A capacidade e robustez desses algoritmos foram comprovadas submetendo-os a testes utilizando funções não restritas conhecidas da literatura. Em seguida os algoritmos KAGA e KAPSO foram utilizados para resolver o problema de FPO utilizando para testes os sistemas de 30 e 118 barras para redução dos custos de geração e perdas de potência ativa. Os resultados mostraram que a proposta KAPSO supera especialmente em termos de performance outros algoritmos. Conclui-se que, considerando a qualidade das soluções obtida pelos algoritmos propostos, a estratégia assistida por *Krigagem* oferece um método promissor para melhorar o desempenho de algoritmos que tratam o problema de FPO.

2.3 DESLIGAMENTO ÓTIMO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Como já discutido brevemente no início desse capítulo, o primeiro trabalho considerando a estratégia do desligamento de linhas de transmissão foi o de Glavitsh (1985), onde o desligamento de linhas de transmissão tinha o objetivo de melhorar o controle da operação de

sistemas de potência, e não é explícita a ideia de utilizar essa estratégia como uma forma de otimizar os custos de geração de energia. Desde então, vários trabalhos foram publicados a respeito desse assunto, entretanto, a utilização dessa estratégia para a otimização dos custos de geração de energia só foi tratada de maneira explícita no trabalho de Fisher *et al.* (2008), que foi considerado um marco inicial e a base conceitual por muitos anos do problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão visando a operação econômica dos sistemas de energia elétrica. Nesse trabalho o modelo escolhido foi o DC para representar a operação da rede elétrica, e o modelo matemático foi resolvido utilizando o *solver* CPLEX. Um sistema de 118 barras, 186 linhas de transmissão, 19 geradores e 99 barras de demanda foi utilizado para a avaliação da metodologia. A melhor solução encontrada considerou o desligamento de 38 linhas de transmissão, e a redução dos custos de operação foi de 24,87% em relação aos custos de operação sem o desligamento de linhas. Foi observado ainda que com o desligamento de menos linhas como, por exemplo, o desligamento de apenas 5 linhas, a redução dos custos de operação seria de 21,73%, deixando claro que devem ser incorporadas nessa técnica de desligamento ótimo de linhas, estratégias que desliguem um número reduzido de linhas de transmissão. Alguns trabalhos após a publicação de Fisher *et al.* (2008) foram selecionados e serão apresentados e discutidos a seguir.

No trabalho de Potluri, Member e Hedman (2012), o controle da topologia das linhas de transmissão utilizando o modelo AC é investigado. O sistema IEEE de 118 barras, 24 geradores e 186 linhas de transmissão é usado para realização de testes, e na formulação matemática do modelo, o desligamento de linhas é incorporado através de uma variável binária, indicando para cada linha se está ligada ou não. Em uma primeira etapa do trabalho, o modelo AC é resolvido pelo software KNITRO, e, através de uma estratégia de força bruta para desligar linhas, os custos de geração da solução sem desligar linhas e da solução com desligamento de linhas são comparados. Os resultados mostraram que com o desligamento de linhas houve uma redução nos custos de geração de 1,89% a 4,43%, dependendo do número de linhas desligadas e também do nível de carregamento do sistema. Em seguida, soluções do modelo DC do problema foram utilizadas no modelo AC para verificação da factibilidade das soluções. Os resultados mostraram que as linhas desligadas que proporcionaram economia significativa no modelo DC não necessariamente produziram os mesmos resultados no modelo AC. A análise de quinze soluções mostrou que em dois casos o modelo AC foi infactível, em oito casos o modelo AC proporcionou custo maior, e em cinco casos houve uma economia muito insignificante em relação à economia apresentada pelo modelo DC. Nestas duas etapas iniciais do trabalho, o desligamento de linhas foi realizado utilizando a estratégia de força bruta, e numa terceira e última etapa foi

apresentada uma heurística baseada em uma lista de prioridades com todas as linhas de transmissão e classificadas do menor para o maior valor com base no preço marginal locacional. Essa heurística foi desenvolvida para o modelo DC, entretanto nesse trabalho foi aplicada ao modelo AC. Os resultados comparados com a estratégia da força bruta provam que é possível obter boas soluções factíveis com tempos computacionais aceitáveis utilizando a heurística para o desligamento de linhas de transmissão.

No artigo de Khanabadi *et al.* (2013) o desligamento ótimo de linhas de transmissão é utilizado como uma ferramenta de gerenciamento de congestionamentos com o objetivo de obter uma maior eficiência no mercado de eletricidade. Para evitar o congestionamento das linhas sem violar a segurança de tensão, o desligamento de linhas é incorporado a um problema de FPO AC, contendo variáveis contínuas e discretas, e é resolvido utilizando a decomposição de Benders. Nessa proposta o problema mestre tem o objetivo de obter a solução do problema de FPO AC, e caso não haja congestionamento nas linhas o processo é encerrado. Se houver congestionamento nas linhas, é obtida a solução do problema de FPO DC como um problema inteiro misto (*mixed-integer problem* – MIP) com variáveis binárias para identificar possíveis linhas candidatas ao desligamento. A factibilidade da solução deste problema de FPO DC é checada e se houver qualquer violação de restrições do modelo AC, volta-se à etapa inicial. Caso contrário, uma análise de contingência N–1 é executada e se não houver violações, considera-se que foram identificadas as linhas a serem desligadas. Caso o resultado não passe na análise de contingência N–1 e/ou houver violações das restrições do modelo AC, volta-se a resolver o problema mestre. Ainda nesse trabalho também, discute-se que o desligamento ótimo de linhas baseado no modelo matemático DC pode comprometer a segurança do sistema e em alguns casos resultar em um colapso de tensão devido às deficiências do modelo matemático simplificado. Para avaliar a aplicabilidade e eficácia do método proposto, são utilizados os sistemas IEEE de 57 e 300 barras.

Em Capitanescu e Wehenkel (2014) um algoritmo heurístico escalonável do tipo guloso é proposto para reduzir o custo de geração de energia por meio do desligamento de linhas de transmissão considerando o modelo AC do problema de FPO. A ideia principal do algoritmo é fornecer uma sequência de linhas a serem desligadas, uma a uma, até que não se consiga mais uma diminuição significativa dos custos de geração. A cada passo do algoritmo, uma linha candidata a ser removida é identificada através da exploração do status da linha na solução de um problema de FPO relaxado. Dessa forma, o algoritmo depende da resolução de uma sequência de problemas de FPO formulados usando PNL. O sistema IEEE de 118 barras amplamente utilizado na literatura para comparações é utilizado para avaliação do algoritmo. Os resultados

mostraram que, em comparação com a solução do problema de FPO sem desligamento de linhas, houve uma redução de custo de 4,82% utilizando PNLIM e de 4,03% utilizando a heurística com nível de carga normal, 10,51% utilizando PNLIM e 9,14% pela heurística com nível de carga alto, e 17,60% utilizando PNLIM e 4,61% pela heurística com nível de carga muito alto. Os problemas de otimização PNLIM e PNL foram modelados no software GAMS e resolvidos pelos *solvers* BONMIN e IPOPT, respectivamente. A principal contribuição do algoritmo heurístico proposto é a de retirar a complexidade do problema original de PNLIM. Os resultados dos testes com o sistema IEEE de 118 barras mostraram que a metodologia proposta fornece soluções de boa qualidade em um tempo computacional pequeno, uma vez que os tempos em segundos para as soluções citadas foram respectivamente utilizando PNLIM e heurística: 637-17, 264-26 e 428-27.

A acurácia do desligamento ótimo de linhas baseado nos modelos DC e AC do problema de FPO utilizando heurística para a redução dos custos de geração de energia, é tratada em Soroush e Fuller (2014). Nesse artigo uma heurística apresentada em Fuller *et al.* (2012) e que é baseada no problema DC de OTS é modificada para o modelo AC. Segundo os autores, a heurística baseada no modelo DC para o problema de OTS pode apresentar aproximações que em determinadas circunstâncias são inaceitáveis. A modificação foi realizada em uma grandeza de sensibilidade usada para desligar uma linha de transmissão no modelo DC, que foi reformulada para considerar o modelo AC. Foram realizados testes com sistemas IEEE de 118 e 300 barras. Os testes realizados com o sistema IEEE de 118 barras mostraram a heurística modificada para o modelo AC apresentou melhor qualidade considerando uma carga elevada para o sistema, mas desempenhos parecidos quando a carga do sistema é baixa ou normal. Já os resultados dos testes realizados com o sistema de 300 barras mostraram um desempenho bastante parecido entre os modelos DC e AC. Nesse caso, observou-se que a heurística que utiliza o modelo DC apresentou um custo razoavelmente melhor que a que utiliza o modelo AC. Entretanto, utilizando as linhas desligadas sugeridas pelo modelo DC no modelo AC, há um aumento do custo de geração, mostrando as limitações do uso de modelos aproximados em sistemas de energia elétrica.

Como se pode observar na literatura há muitos trabalhos que utilizam o modelo DC para resolver o problema de OTS, dada a sua simplicidade e relativa facilidade de solução. Entretanto, as magnitudes de tensão e os fluxos de potência reativa, negligenciados no problema de FPO DC linearizado, são parâmetros importantíssimos para a confiabilidade dos sistemas reais. O trabalho de Barrows, Blumsack e Hines (2014) apresenta uma metodologia para corrigir so-

luções obtidas do problema de OTS utilizando o modelo DC, de forma que essas soluções passem a ser comprovadamente factíveis em ambos os modelos, DC e AC. O método basicamente consiste em reconfigurar a topologia do sistema forçando linhas desligadas a permanecerem em serviço com base em cinco critérios de seleção: (i) resistência máxima da linha, (ii) mínima resistência, (iii) máxima reatância, (iv) mínima reatância, e (v) seleção aleatória. Testes foram realizados com o sistema IEEE RTS-96, amplamente utilizado na literatura especializada, e revelaram que, religando linhas com alta resistência são geradas soluções factíveis do problema de FPO AC em poucas iterações, reduzindo ainda mais os custos de geração.

Em Coffrin *et al.* (2014), é realizado um estudo sistemático sobre o problema de OTS. Uma revisão de literatura é feita e várias formulações de OTS são consideradas para computar os limites primal e dual em uma variedade de sistemas de energia elétrica. Os resultados demonstraram que o uso do modelo DC é inadequado para resolver o problema de OTS, e que técnicas de otimização não linear inteira mista encontram limites primal e dual de alta qualidade.

No trabalho de Bai *et al.* (2015) é proposto um método de programação cônica para o problema de OTS. Um modelo de programação cônica de segunda ordem inteira mista é formulado para permitir a inclusão de potência reativa e restrições de segurança de tensão, o que melhora significativamente a factibilidade das soluções de OTS no modelo AC. A eficácia da proposta é demonstrada utilizando o sistema IEEE de 57 barras.

Henneaux e Kirschen (2016) afirmam que na literatura há muitos trabalhos mostrando que o critério de segurança N-1 pode ser inserido no problema de OTS como uma restrição do problema, sendo que a redução dos custos de operação pode ser obtida respeitando-se esse critério de confiabilidade de operação. Entretanto, o impacto das mudanças na topologia de um sistema de energia elétrica utilizando métricas probabilísticas de segurança ainda não tem sido estudado. Nesse trabalho analisa-se se é possível manter um equilíbrio econômico positivo com OTS, considerando não apenas o custo de geração, mas também o custo socioeconômico esperado das interrupções na oferta. Isso é feito em duas etapas: primeiramente é computado o critério de segurança N-1, e em seguida é realizada uma estimativa probabilística da confiabilidade de uma solução de OTS. São utilizados dois sistemas teste, e os resultados mostram que as soluções de OTS tendem a degradar significativamente as medidas probabilísticas de segurança. Os autores concluem que uma análise de segurança probabilística deve ser sempre realizada antes de implementar uma solução de OTS.

No trabalho de Bai *et al.* (2017) é proposto um novo método para solução do problema de OTS considerando a factibilidade do modelo AC. O método usa dois níveis de iteratividade,

sendo que no primeiro nível é utilizada programação cônica de segunda ordem inteira mista para prover soluções do problema candidatas, enquanto em um outro nível é realizada a verificação da factibilidade das soluções no modelo AC. É também desenvolvida uma técnica para melhorar a eficiência computacional, mantendo a precisão dos resultados. A eficácia da abordagem proposta é validada utilizando os sistemas IEEE de 57 e 118 barras. É demonstrado também que essa abordagem pode ser utilizada em sistemas de grande porte da vida real, e isso é ilustrado usando um sistema de energia real Chinês com 532 barras e 807 linhas. Os testes mostraram que a proposta pode ser usada não só para reduzir o custo de geração, mas também para corrigir violações de tensão nas operações do sistema de energia.

O trabalho de Jiang *et al.* (2017) propõe um método baseado na combinação do algoritmo genético com o método de pontos interiores primal-dual, para resolver o problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão baseado no modelo AC, com o objetivo de garantir a segurança de tensão conseguindo melhor flexibilidade da operação do sistema de potência com menores custos. O modelo matemático considera as gerações de energia eólica e fotovoltaica integradas, pois segundo os autores, sistemas de potência utilizando energia eólica e fotovoltaica, integradas em grande escala, podem produzir problemas de congestionamento nas linhas de transmissão e problemas de segurança de tensão, principalmente quando a topologia do sistema é fixa. No método proposto, o algoritmo genético é responsável pelas variáveis discretas do modelo, incluindo as variáveis que definem os status das linhas de transmissão, enquanto o método de pontos interiores primal-dual é responsável por determinar o valor das variáveis contínuas do modelo matemático. Para mostrar a eficácia da proposta o sistema IEEE de 118 barras modificado é utilizado, e os resultados mostraram que o método proposto é benéfico para a flexibilidade e economia na operação do sistema de energia, bem como a acomodação da geração de energia renovável.

Kocuk, Dey e Sun (2017) afirmam que existem diversos motivos para utilizar a modelagem AC no problema de otimização OTS. Dentre os motivos, o mais pertinente é que a topologia ótima encontrada em uma solução de OTS usando o modelo DC nem sempre é factível no modelo AC e, além disso, a redução dos custos de operação do sistema de energia elétrica obtida da solução de um problema de OTS usando o modelo DC pode estar superestimada. Com base nesse e outros argumentos é apresentada uma proposta para solução para o problema de OTS utilizando o modelo AC, em que o problema de OTS é formulado como um problema de programação não linear inteiro misto e é transformado em um problema de programação cônica de segunda ordem inteira mista (MISOCP). Essa proposta inclui um algoritmo heurístico sofisticado que encontra soluções de elevada qualidade, mas não apresenta garantia de encontrar

soluções ótimas. Nesse algoritmo é possível conhecer o *gap* da proposta de solução encontrada, pois são geradas propostas de soluções factíveis de excelente qualidade e também se conhece uma limitante inferior para o problema de OTS. Para avaliar a metodologia proposta, foram realizados testes com os sistemas IEEE de 118 e 300 barras, para os quais foram encontradas soluções com *gap* entre 0,10% e 0,19%, com tempos computacionais entre 50 e 60 minutos.

Em Salkuti (2018) é apresentada uma metodologia de gerenciamento de congestionamento baseada em função multiobjetivo utilizando estratégias de OTS, considerando a minimização do custo operacional total e a maximização da confiabilidade probabilística como dois objetivos conflitantes. O problema de OTS proposto é baseado na formulação do problema FPO AC, como um problema de PNLIM, e é resolvido usando o método de decomposição Benders para identificar as linhas que devem ser religadas para aliviar o congestionamento do sistema. Nesse trabalho o índice de confiabilidade probabilístico de perda de carga é utilizado para indicar a probabilidade de um sistema de potência ser capaz para prover a carga demandada em tempo hábil. O problema de otimização é resolvido utilizando um método híbrido, incorporando programação evolucionária e estocástica. A eficácia da abordagem foi examinada utilizando os sistemas IEEE de 30 e 300 barras, sendo que os resultados mostraram que utilizando a abordagem OTS proposta é possível obter redução considerável de custos de operação sem a degradação na confiabilidade do sistema.

Em Tinoco (2018) diversas contribuições ao problema de OTS são propostas, sendo que são abordados alguns tópicos relacionados ao problema de OTS para otimizar os custos de operação de um sistema de energia elétrica. O desenvolvimento de estratégias para reduzir o número relativamente elevado de linhas de transmissão que são desligadas na solução de um problema de OTS é discutido, pois o desligamento de muitas linhas de transmissão pode produzir redução insignificante do custo de operação. Um segundo tópico abordado é a produção de soluções de OTS que possuam barras desconectadas da topologia do sistema, produzindo ilha-mento do sistema elétrico ou a formação de setores do sistema de energia elétrica operando de forma independente. Um modelo matemático também é desenvolvido para representar linhas iguais conectadas em paralelo entre duas barras por uma linha simples equivalente. Por fim, o paradoxo de Braess é tratado, onde é iniciada uma análise teórica para encontrar argumentos consistentes que permitam explicar os motivos pelos quais o desligamento de uma linha de transmissão melhora a operação de um sistema de energia elétrica, contradizendo a lógica fundamental existente entre os engenheiros de operação, que é a de pensar que a adição de linhas de transmissão em um SEE deveria melhorar seu desempenho.

No trabalho de Hagh *et al.* (2018) afirma-se que os métodos de OTS baseados nas equações do problema de FPO utilizadas até o momento podem expor a segurança do sistema em alguns casos. Com base nisso, propõe-se um novo método sequencial para investigar a segurança do sistema em circunstâncias pós a aplicação dos métodos de OTS, com base no critério de convergência $N-1$. O método proposto, o qual utiliza a formulação de OTS baseada no problema de FPO AC, classifica as linhas candidatas como uma estratégia operacional para atingir a redução máxima do custo de operação, considerando funções de segurança das linhas de transmissão e fornece soluções mais precisas com o critério de segurança $N-1$ em tempos computacionais razoáveis. A potencialidade da proposta foi avaliada utilizando os sistemas IEEE de 57 e 118 barras, e provou que os resultados obtidos da aplicação de um problema de OTS original podem ser alterados devido à segurança do sistema.

2.4 CONCLUSÃO

Com a realização dessa revisão de literatura verifica-se que há muitos trabalhos que utilizam métodos clássicos para a resolução dos problemas de FPO e OTS. Há também diversos trabalhos que incorporam métodos clássicos aos métodos estocásticos, heurísticas e/ou meta-heurísticas. Não foi observado nenhum trabalho em que o problema de FPO ou OTS fosse resolvido de forma completa por alguma meta-heurística, dada a complexidade do problema. Observou-se também que o modelo AC de operação da rede vem sendo usado com mais frequência nos problemas de FPO e OTS apenas há poucos anos, sendo que o modelo DC era predominantemente utilizado nas propostas de soluções desses problemas.

Considerando que as meta-heurísticas vêm ganhando cada vez mais evidência na literatura e que resultados de excelente qualidade têm sido alcançados com esses algoritmos, tanto na área de sistema de energia elétrica quanto em diversas outras áreas, verifica-se aqui a necessidade de explorá-las cada vez mais. Existem inúmeras meta-heurísticas, algumas com habilidades para resolver problemas com variáveis contínuas, outras com habilidades para resolver problemas com variáveis discretas e outras com habilidades para resolver problemas que integram qualquer tipo de variável.

A meta-heurística de busca dispersa é uma dessas meta-heurísticas que possui habilidades de resolver problemas que contenha qualquer tipo de variável. Entretanto, como pode ser observado na literatura, a busca dispersa ainda é pouco explorada na área de sistemas de energia elétrica. Nessa revisão de literatura não foi encontrado nenhum trabalho que utilizou a busca

dispersa para a resolução do problema de FPO e/ou OTS. Porém, a BD vem sendo cada vez mais utilizada em diversos trabalhos de áreas distintas na literatura e com resultados promissores. Sendo assim, optou-se neste trabalho por explorar as potencialidades da meta-heurística de busca dispersa, principalmente para a resolução do problema de FPO e OTS.

3 O PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS — MODELAGEM MATEMÁTICA

O presente capítulo tem o principal objetivo de apresentar a formulação matemática do problema de fluxo de potência ótimo com desligamento de linhas de transmissão utilizado neste trabalho. Para melhor compreensão do problema e da metodologia proposta, será apresentada primeiramente a formulação básica do problema de fluxo de potência e em seguida a definição de FPO será discutida, e por fim, a formulação matemática do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão será detalhada.

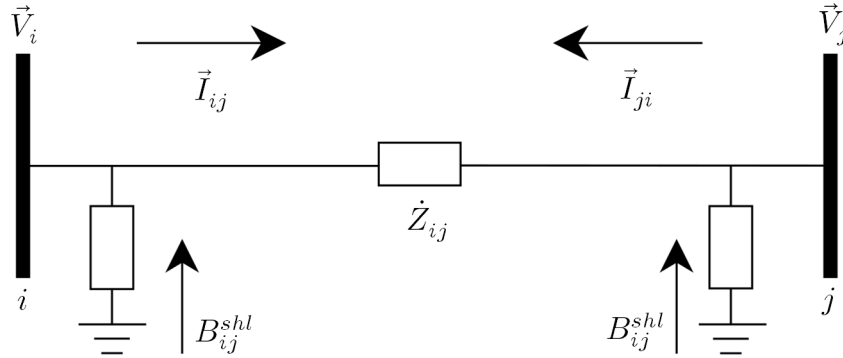
3.1 MODELAGEM DOS DISPOSITIVOS ELÉTRICOS

De acordo com Monticelli (1983), o problema de fluxo de potência em redes de energia elétrica consiste na determinação do estado de operação da rede, da distribuição dos fluxos e de outras grandezas pertinentes. A modelagem apresentada aqui é considerada estática, uma vez que a rede é representada por um conjunto de equações e inequações algébricas, sendo que as variações com o tempo são desconsideradas. Essas equações e inequações algébricas são não lineares e correspondem respectivamente às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes. O modelo matemático do FP é obtido partindo-se das modelagens das linhas de transmissão e transformadores, como seguem nas próximas seções.

3.1.1 Modelo matemático das linhas de transmissão

No problema de FPO, a modelagem das linhas de transmissão é feita utilizando o modelo equivalente π , como é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Modelo π de uma linha de transmissão



Fonte: Monticelli (1983).

São considerados apenas três parâmetros: a resistência em série R_{ij} , a reatância em série X_{ij} entre as barras i e j , e a susceptância *shunt* B_{ij}^{shl} da linha. Dessa forma, a impedância do elemento série entre as barras i e j é $\dot{Z}_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$, e a admitância série é $\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$.

A corrente $\vec{I}_{ij}$ e os fluxos de potência podem ser calculados da seguinte maneira:

$$\vec{I}_{ij} = \dot{Y}_{ij}(\vec{V}_i - \vec{V}_j) + jB_{ij}^{shl}\vec{V}_j = \dot{Y}_{ij}\vec{V}_i - \dot{Y}_{ij}\vec{V}_j + jB_{ij}^{shl}\vec{V}_j \quad (1)$$

$$\dot{S}_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = \vec{V}_i^* \vec{I}_{ij} \quad (2)$$

A partir das equações (1) e (2), são obtidos os fluxos de potência ativa e reativa, como pode ser visto nas equações de (3) a (6):

$$P_{ij}^{de} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (3)$$

$$Q_{ij}^{de} = -V_i^2 (B_{ij} + B_{ij}^{shl}) + V_i V_j (B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (4)$$

$$P_{ij}^{para} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (5)$$

$$Q_{ij}^{para} = -V_j^2 (B_{ij} + B_{ij}^{shl}) + V_i V_j (B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (6)$$

Os fluxos de potência ativa são representados pelas expressões (3) e (5), em que P_{ij}^{de} indica o fluxo de potência ativa com origem na barra i e destino na barra j , e P_{ij}^{para} indica o fluxo de potência ativa no sentido inverso, ou seja, com origem na barra j e destino na barra i .

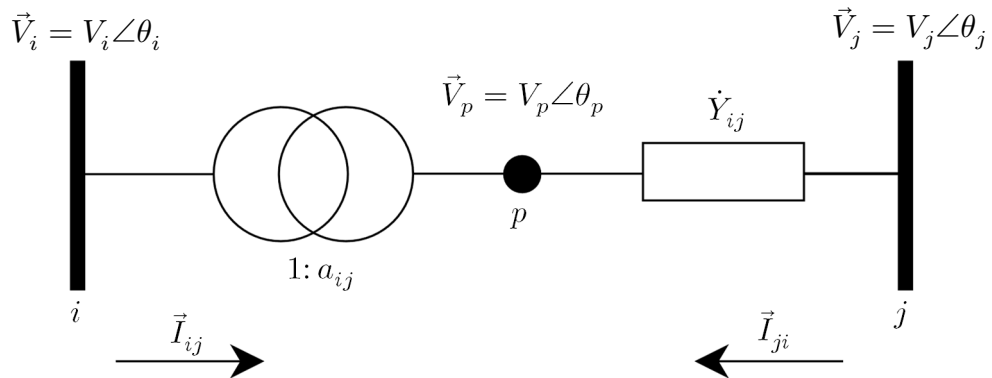
Já os fluxos de potência reativa são representados pelas expressões (4) e (6), denotados por Q_{ij}^{de} e Q_{ij}^{para} . Como no caso dos fluxos de potência ativa, aqui também a sequência dos índices i e j indicam a origem e destino dos fluxos.

Ainda nas expressões de (3) a (6), os elementos G_{ij} , B_{ij} e B_{ij}^{shl} representam respectivamente a condutância, a susceptância em série e a susceptância *shunt* no ramo ij . V_i consiste na magnitude de tensão na barra i e θ_i o ângulo de tensão na barra i .

3.1.2 Modelo matemático dos transformadores em fase

O modelo de transformador em fase considera um nó fictício intermediário p entre as barras i e j , uma admitância em série $\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, um autotransformador ideal 1: a_{ij} e a relação entre as tensões complexas $\vec{V}_i$ e $\vec{V}_p$, como pode ser observado na Figura 2 (MONTICELLI, 1983).

Figura 2 – Modelo de transformador em fase



Fonte: Monticelli (1983).

O termo a_{ij} , correspondente ao *tap* do transformador no ramo ij mostrado na Figura 2, é definido pela expressão (7):

$$a_{ij} = \frac{\vec{V}_p}{\vec{V}_i} = \frac{V_p \angle \theta_p}{V_i \angle \theta_i} \quad (7)$$

Como esse modelo de transformador contém um autotransformador ideal, as potências complexas na entrada e na saída são iguais, isso significa que não há perdas de potências ativa e reativa. A expressão (8) apresenta isso.

$$\vec{V}_i \vec{I}_{ij}^* + \vec{V}_p \vec{I}_{ji}^* = 0 \quad (8)$$

Tomando como base o fato que $\theta_i = \theta_p$ e utilizando-se as expressões (7) e (8), obtém-se (9).

$$\frac{\vec{I}_{ij}}{\vec{I}_{ji}} = -\frac{|\vec{I}_{ij}|}{|\vec{I}_{ji}|} = a_{ij} \quad (9)$$

Dessa forma, a corrente $\vec{I}_{ij}$ e o fluxo de potência complexa podem ser calculados com as expressões (10) e (11):

$$\vec{I}_{ij} = -a_{ij} \dot{Y}_{ij} (\vec{V}_j - \vec{V}_p) = a_{ij}^2 \dot{Y}_{ij} \vec{V}_i - a_{ij} \dot{Y}_{ij} \vec{V}_j \quad (10)$$

$$\dot{S}_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = \vec{V}_j^* \vec{I}_{ij} \quad (11)$$

Os fluxos de potência ativa e reativa podem ser obtidos a partir das expressões (7), (9) e (10), como apresentado em (12)–(15).

$$P_{ij}^{de} = (a_{ij} V_i)^2 G_{ij} - a_{ij} V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (12)$$

$$Q_{ij}^{de} = -(a_{ij} V_i)^2 B_{ij} + a_{ij} V_i V_j (B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (13)$$

$$P_{ij}^{para} = V_j^2 G_{ij} - a_{ij} V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (14)$$

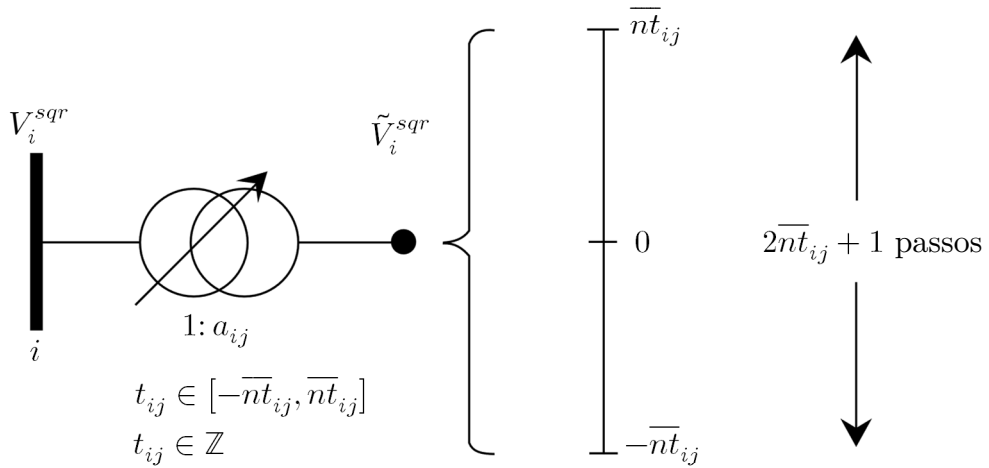
$$Q_{ij}^{para} = -V_j^2 B_{ij} + a_{ij} V_i V_j (B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)) \quad (15)$$

As expressões (12) e (13) apresentam os fluxos de potência ativa e reativa respectivamente, sendo que o sentido do fluxo é da barra i para a barra j . Já as expressões (14) e (15) também representam respectivamente os fluxos de potência ativa e reativa, só que em sentido contrário, da barra j para a barra i . Nas expressões de (12) a (15), os elementos G_{ij} e B_{ij} representam a condutância e susceptância em série do ramo ij . A variável V_i consiste na magnitude de tensão na barra i , e θ_i é o ângulo da tensão na barra i . O *tap* do transformador em fase no ramo ij é representado por a_{ij} . O valor do *tap* do transformador a_{ij} vale “1” quando a relação de transformação é nominal, ou um valor diferente de “1”, e discreto, quando a posição do comutador de *taps* está fora da nominal.

3.1.2.1 Cálculo do tap dos transformadores em fase

A regulação do *tap* do transformador em fase é em função do número de passos, t_{ij} , e esse número é discreto. A Figura 3 ilustra essa regulação, sendo que a posição dos *taps* varia de $-\overline{nt}_{ij}$ a $\overline{nt}_{ij}$ sendo que o número total de passos é dado por $2\overline{nt}_{ij} + 1$.

Figura 3 – Regulação do *tap* do transformador em fase



Fonte: Monticelli (1983).

O valor do *tap*, a_{ij} , é obtido em função da posição do *tap* escolhida, como mostra a expressão (16).

$$a_{ij} = 1 + \frac{r_{ij}^{\%} t_{ij}}{\overline{nt}_{ij}} \quad (16)$$

O valor de $r_{ij}^{\%}$ representa a regulação total máxima do transformador no ramo ij , $\overline{nt}_{ij}$ é a metade do número máximo de passos de *tap* do transformador no ramo ij e t_{ij} define a posição do *tap*, que deve obedecer seus limites apresentados em (17).

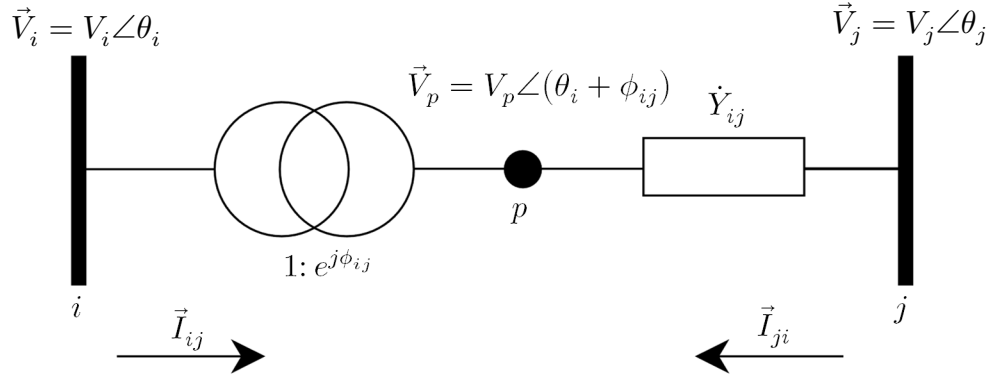
$$-\overline{nt}_{ij} \leq t_{ij} \leq \overline{nt}_{ij} \quad (17)$$

3.1.3 Modelo matemático dos transformadores defasadores

O modelo de transformador defasador considera um nó fictício intermediário p entre as barras i e j , uma admitância em série $\dot{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, um autotransformador defasador ideal

com relação 1: $e^{j\phi_{ij}}$ e a relação entre as tensões complexas $\vec{V}_i$ e $\vec{V}_p$, como pode ser observado na Figura 4 (MONTICELLI, 1983).

Figura 4 – Modelo de transformador defasador



Fonte: Monticelli (1983).

O termo $e^{j\phi_{ij}}$, mostrado na Figura 4, é definido pela expressão (18):

$$e^{j\phi_{ij}} = \frac{\vec{V}_p}{\vec{V}_i} = \frac{V_p \angle \theta_p}{V_i \angle \theta_i} \quad (18)$$

Considere a seguinte equivalência:

$$\theta_p = \theta_i + \phi_{ij} \quad (19)$$

Considerando agora que as magnitudes das tensões complexas $\vec{V}_p$ e $\vec{V}_i$ são iguais, e substituindo-se em (8) e (18), obtém-se:

$$\frac{\vec{I}_{ij}}{\vec{I}_{ji}} = -\frac{|\vec{I}_{ij}|}{|\vec{I}_{ji}|} = -e^{j\phi_{ij}} \quad (20)$$

A corrente $\vec{I}_{ij}$ e o fluxo de potência complexa podem ser calculados da mesma maneira que foi feito para o transformador em fase, como apresentado em (21) e (22):

$$\vec{I}_{ij} = -e^{j\phi_{ij}} \dot{Y}_{ij} (\vec{V}_j - \vec{V}_p) = \dot{Y}_{ij} \vec{V}_i - e^{j\phi_{ij}} \dot{Y}_{ij} \vec{V}_j \quad (21)$$

$$\dot{S}_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = \vec{V}_j^* \vec{I}_{ij} \quad (22)$$

As expressões dos fluxos de potência ativa e reativa podem ser obtidas a partir das expressões (21) e (22), como apresentado em (23)–(26):

$$P_{ij}^{de} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij})) \quad (23)$$

$$Q_{ij}^{de} = -V_i^2 (B_{ij} + B_{ij}^{shl}) + V_i V_j (B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) - G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij})) \quad (24)$$

$$P_{ij}^{para} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij})) \quad (25)$$

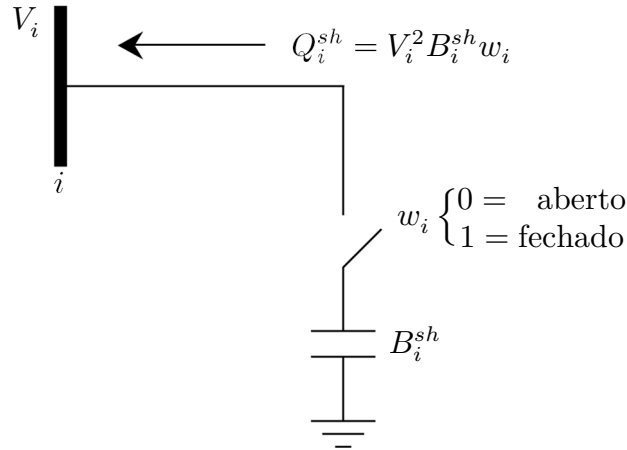
$$Q_{ij}^{para} = -V_j^2 (B_{ij} + B_{ij}^{shl}) + V_i V_j (B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) + G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij})) \quad (26)$$

Como no caso das expressões do modelo de transformador em fase, as expressões (23) e (24) representam os fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, sendo que o fluxo é no sentido da barra i para a barra j . O sentido inverso dos fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, é representado pelas expressões (25) e (26). Nas expressões de (23) a (26), G_{ij} e B_{ij} representam respectivamente a condutância e a susceptância em série do ramo ij , B_{ij}^{shl} é a susceptância *shunt*, V_i é a magnitude de tensão na barra i , e θ_i o ângulo de tensão na barra i . O ângulo introduzido pelo transformador defasador no ramo ij é representado por ϕ_{ij} .

3.1.4 Modelo matemático dos compensadores shunt

A Figura 5 ilustra o funcionamento de um compensador *shunt*.

Figura 5 – Modelo matemático dos compensadores *shunt*



Fonte: Elaboração do Autor.

A equação da injeção de potência reativa na barra i por um compensador *shunt* é apresentada em (27).

$$Q_i^{sh} = V_i^2 B_i^{sh} \omega_i \quad (27)$$

Nesse modelo, Q_i^{sh} é o valor da injeção de potência reativa pelo compensador *shunt* na barra i , V_i é a magnitude da tensão na barra i , B_i^{sh} é a susceptância do compensador *shunt* instalado na barra i , e ω_i é a variável binária que indica o estado de operação do compensador

shunt na barra i : se $\omega_i = 0$ o compensador está desconectado, e a injeção de potência reativa é zero, e se $\omega_i = 1$ o compensador *shunt* está conectado ao sistema, e a injeção de potência na barra i é $Q_i^{sh} = V_i^2 B_i^{sh}$.

3.1.5 Expressões gerais do fluxo de potência

As expressões gerais dos fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, transformadores em fase e transformadores defasadores podem ser obtidas a partir das expressões (3)–(6), correspondentes aos fluxos de potência do modelo π de linha de transmissão, expressões (12)–(15), correspondentes aos fluxos de potência do transformador em fase, e das expressões (23)–(26), correspondentes aos fluxos de potência do transformador defasador. Dessa forma, as expressões gerais do fluxo de potência ativa e reativa são representadas pelas expressões (28)–(31).

$$P_{ij}^{de} = (a_{ij}V_i)^2 G_{ij} - a_{ij}V_iV_j \left(G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right) \quad (28)$$

$$Q_{ij}^{de} = -(a_{ij}V_i)^2 B_{ij} + a_{ij}V_iV_j \left(B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) - G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right) \quad (29)$$

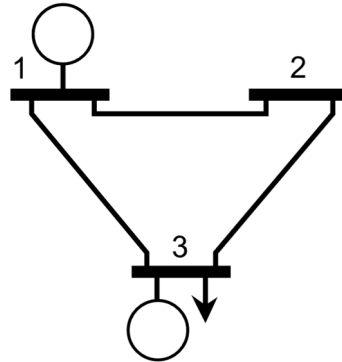
$$P_{ij}^{para} = V_j^2 G_{ij} - a_{ij}V_iV_j \left(G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right) \quad (30)$$

$$Q_{ij}^{para} = -V_j^2 B_{ij} + a_{ij}V_iV_j \left(B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) + G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{ij}) \right) \quad (31)$$

Das expressões (28)–(31), os elementos P_{ij}^{de} e Q_{ij}^{de} representam os fluxos de potência ativa e reativa respectivamente, considerando o sentido do fluxo da barra i para a barra j , P_{ji}^{para} e Q_{ji}^{para} os fluxos de potência ativa e reativa respectivamente, agora com o sentido do fluxo inverso, ou seja, com sentido da barra j para a barra i .

3.1.6 Desligamento ótimo de linhas de transmissão

Para ilustrar a vantagem do desligamento de linhas de transmissão na redução dos custos de geração, é utilizado como exemplo o sistema ilustrativo de três barras mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Sistema ilustrativo de três barras

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Os parâmetros referentes às barras do sistema mostrado na Figura 6 são apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2 os parâmetros referentes às linhas são mostrados.

Tabela 1 – Parâmetros das barras do sistema ilustrativo de três barras

Barra	Tipo	c_i^l (US\$/h)	$\underline{V}$ (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)	P_i^d (MW)	Q_i^d (MVar)	$\underline{P}_i^g$ (MW)	$\bar{P}_i^g$ (MW)	$\underline{Q}_i^g$ (MVar)	$\bar{Q}_i^g$ (MVar)
1	Geração	1	0,9	1,1	0	0	0	1000	-1000	1000
2	—		0,9	1,1	0	0	0	0	0	0
3	Geração/Carga	10	0,9	1,1	100	0	0	1000	0	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 2 – Parâmetros das linhas do sistema ilustrativo de três barras

Linha	R_{ij} (p.u.)	X_{ij} (p.u.)	$\bar{S}_{ij}$ (MVA)
1-2	0,00	0,05	999
1-3	0,10	0,10	999
2-3	0,00	0,05	1

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Na Tabela 3, apresenta-se os resultados do problema de FPO para o sistema exemplo de três barras. São considerados seis casos com diferentes linhas de transmissão conectadas ao sistema.

Tabela 3 – Resultados do FPO do sistema ilustrativo de três barras

Caso	Linhas Ligadas	Custo de Geração (US\$/h)
(i)	Todas	986,44
(ii)	Nenhuma	1000,00
(iii)	1-3	110,10
(iv)	1-2; 1-3	110,10
(v)	1-3; 2-3	110,10
(vi)	2-3	1000,00
(vii)	1-2; 2-3	991,11

Fonte: Elaboração do Autor.

No Caso (i) todas as três linhas estão em operação e o custo de geração é 986,44 US\$/h. Nos casos, (ii) e (vi), em que a barra 1 é desconectada do sistema, o gerador mais caro da barra 3 deve atender toda a demanda, e o custo de operação é 1000,00 US\$/h. Nos Casos (iii), (iv) e (v) a barra 1 está conectada à barra de carga 3, e dessa forma, a demanda é atendida com um custo menor de 110,10 US\$/h, sendo que nesse caso, o custo das perdas na linha 1–3 é de 10,10 US\$/h.

Esses resultados vão contra o senso comum, a partir do qual conclui-se erroneamente que quanto maior o número de linhas conectadas em um sistema de energia elétrica, maior será a capacidade de transmissão da rede, e consequentemente menores custos de geração poderão ser alcançados (BLUMSACK, 2006).

Quando todas as linhas estão conectadas ao sistema, no Caso (i), a equação (32), que representa a aplicação da segunda lei de Kirchhoff no laço não fundamental formado pelas linhas 1–2, 1–3 e 2–3 deve ser atendida pelo modelo.

$$\vec{V}_{13} + \vec{V}_{21} + \vec{V}_{32} = 0 \quad (32)$$

Como a capacidade de transmissão da linha 2–3 é muito menor que a capacidade das outras duas linhas, então a abertura angular $\theta_{32} = \theta_3 - \theta_2$ será pequena, de forma que o fluxo de potência na linha 1–3 será restringido para que (32) seja atendida.

Quando a linha 1–3 permanece ligada no sistema e uma das outras duas linhas (ou as duas outras linhas) é desligada do sistema, como nos Casos (iii), (iv) e (v), o laço não fundamental formado pelas linhas 1–2, 1–3 e 2–3 não estará mais presente no sistema, e dessa forma não haverá a necessidade de se atender (32). Dessa forma o desligamento de linhas aumenta a capacidade de transmissão do sistema, levando a soluções com custos menores de geração.

No caso (vii) a barra 1 está conectada ao sistema e também não há a existência do laço não fundamental, pois a linha 1–3 está desligada. Entretanto, devido à capacidade reduzida de transmissão da linha 2–3, o custo de geração é alto.

3.2 FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Pode-se definir o problema de fluxo de potência ótimo como uma generalização do problema de fluxo de potência. O problema de fluxo de potência não é um problema de otimização já que nesse caso, pretende-se resolver um sistema algébrico não linear em que o número de equações é igual ao número de incógnitas. Portanto, esse tipo de problema tem, em princípio,

uma solução única. Por outro lado, o problema de fluxo de potência ótimo apresenta um conjunto de restrições que determinam uma região factível onde, existe um número infinito de soluções. Portanto, pretende-se encontrar uma solução que otimize uma função objetivo.

Como já discutido no Capítulo 2 deste trabalho, o problema de FPO foi formulado inicialmente no trabalho de Carpentier (1962), o qual além de resolver o problema do despacho econômico, resolvia também de forma implícita o problema de fluxo de potência.

Dependendo do tipo de problema de FPO, pode-se utilizar apenas uma função objetivo ou várias funções objetivo combinadas. A seguir, apresentam-se alguns dos objetivos considerados no problema de FPO:

- Minimizar os custos de geração de potência ativa;
- Minimizar as perdas nas linhas de transmissão;
- Minimizar a emissão de poluição na geração;
- Minimizar o número de ações de controle;
- Minimizar a injeção de potência reativa;
- Minimizar o corte de carga;
- Minimizar o desvio de potência ativa gerada;
- Minimizar o desvio de ângulo de defasamento;
- Minimizar o desvio das magnitudes de tensão nas barras.

Na modelagem matemática do problema de otimização é necessário impor as leis naturais de circuitos elétricos e os limites físicos de operação dos equipamentos. Dessa forma, as soluções do problema de FPO devem obedecer às seguintes restrições:

- Equações de fluxo de potência que representam a necessidade de cumprir com a primeira e a segunda lei de Kirchhoff;
- Limites de geração de potência ativa;
- Limites de geração de potência reativa;
- Limites dos *taps* dos transformadores;
- Limites das magnitudes das tensões nas barras;
- Limites de fluxo de potência nas linhas de transmissão;
- Limites na diferença de fase nos transformadores defasadores;
- Limites dos ângulos de tensão nas barras.

A solução do problema de FPO, que objetiva minimizar uma ou mais funções objetivo, obedecendo as restrições citadas anteriormente, consiste em ajustar as seguintes variáveis de controle:

- Geração de potência ativa nas barras de geração;
- Magnitude de tensão nas barras de geração;
- Posição dos *taps* dos transformadores em fase;
- Ângulo de defasamento dos transformadores defasadores;
- Estado dos reatores e capacitores chaveados.

A característica do modelo matemático do problema de FPO depende do tipo da função objetivo a ser utilizada e de suas restrições selecionadas. Dessa forma a formulação do FPO pode ser caracterizada como:

- **Problema de programação linear (PL):** em que a função objetivo e as restrições são lineares, e as variáveis de controle contínuas;
- **Problema de programação não linear (PNL):** em que a função objetivo e as restrições são não lineares e as variáveis de controle contínuas;
- **Problema de programação linear inteira mista (PLIM):** em que a função objetivo e as restrições são lineares e as variáveis de controle são discretas e contínuas;
- **Problema de programação não linear inteira-mista (PNLIM):** em que a função objetivo e as restrições são não lineares e as variáveis de controle são discretas e contínuas.

3.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE FPO CONSIDERANDO O DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste trabalho, o objetivo do problema de FPO é minimizar os custos de geração de potência ativa considerando o desligamento de linhas de transmissão. As restrições consideradas no problema são:

- Equações de fluxo de potência de forma a considerar a primeira e segunda lei de Kirchhoff;
- Limites de geração de potência ativa;
- Limites de geração de potência reativa;
- Limites dos *taps* dos transformadores em fase;

- Limites das magnitudes das tensões nas barras;
- Limites de fluxo de potência nas linhas de transmissão;
- Limites dos ângulos de tensão nas barras.

Este problema é caracterizado como um problema de programação não linear inteira-mista (PNLIM), uma vez que, a função objetivo, as restrições do balanço de potência ativa e reativa do sistema, de acordo com a lei das correntes de Kirchhoff, e as expressões dos fluxos de potência ativa e reativa são não lineares. Além disso, as variáveis de controle dos *taps* dos transformadores são inteiras, as variáveis de chaveamento do *shunt* são binárias e as variáveis que definem se uma determinada linha está ligada ou não também são binárias.

As expressões (33)–(49) representam a modelagem matemática do problema.

$$\min v = \sum_{i \in \Omega_g} [c_i^q (P_i^g)^2 + c_i^l P_i^g + c_i^c] \text{ (US\$/h)} \quad (33)$$

sujeito a:

$$P_i^g - P_i^d - \sum_{kji \in \Omega_l} P_{kji}^{para} - \sum_{kij \in \Omega_l} P_{kij}^{de} - V_i^2 G_i^{sh} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (34)$$

$$Q_i^g - Q_i^d - \sum_{kji \in \Omega_l} Q_{kji}^{para} - \sum_{kij \in \Omega_l} Q_{kij}^{de} + V_i^2 B_i^{sh} \omega_i = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (35)$$

$$P_{kij}^{de} = sw_{kij} \left[G_{kij} \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right)^2 V_i^2 - \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (G_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) + B_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (36)$$

$$P_{kij}^{para} = sw_{kij} \left[G_{kij} V_j^2 - \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (G_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) - B_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (37)$$

$$Q_{kij}^{de} = sw_{kij} \left[-(B_{kij} + B_{kij}^{shl}) \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right)^2 V_i^2 + \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (B_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) - G_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (38)$$

$$Q_{kij}^{para} = sw_{kij} \left[-(B_{kij} + B_{kij}^{shl}) V_j^2 + \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (B_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) + G_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (39)$$

$$\forall kij \in \Omega_l$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \overline{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (40)$$

$$\underline{P}_i^g \leq P_i^g \leq \overline{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (41)$$

$$\underline{Q}_i^g \leq Q_i^g \leq \overline{Q}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (42)$$

$$(P_{kij}^{de})^2 + (Q_{kij}^{de})^2 \leq \overline{S}_{kij}^2 \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (43)$$

$$(P_{kij}^{para})^2 + (Q_{kij}^{para})^2 \leq \overline{S}_{kij}^2 \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (44)$$

$$-\overline{nt}_{kij} \leq t_{kij} \leq \overline{nt}_{kij} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (45)$$

$$\theta_{i^*} = 0 \quad (46)$$

$$\omega_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (47)$$

$$sw_{kij} \in \{0,1\} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (48)$$

$$t_{kij} \in \mathbb{Z} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (49)$$

Nesse modelo, os conjuntos são:

- Ω_b : Conjunto de barras do sistema, indexado pelo índice i , sendo que i^* é a barra de referência;
- Ω_g : Conjunto de barras geradoras, indexado pelo índice i ;
- Ω_l : Conjunto de linhas, indexado pelo índice kij que representa a linha ou transformador k no ramo ij , sendo que k é utilizado para representar componentes em paralelo em um mesmo ramo ij .

Os parâmetros são:

- c_i^q , c_i^l , e c_i^c : Coeficientes de custo de geração quadrático, linear e constante, respectivamente, na barra i ;
- P_i^d : Potência ativa demandada na barra i ;
- Q_i^d : Potência reativa demandada na barra i ;

- G_i^{sh} e B_i^{sh} : Condutância e susceptância *shunt* conectadas à barra i ;
- G_{kij} e B_{kij} : Condutância e susceptância série da linha k no ramo ij ;
- B_{kij}^{shl} : Susceptância *shunt* da linha kij ;
- $r_{kij}^{\%}$: Passo de regulação para o *tap* do transformador k no ramo ij ;
- $\overline{nt}_{kij}$: Número de *taps* do transformador k no ramo ij ;
- $\overline{S}_{kij}$: Limite de fluxo de potência aparente da linha k no ramo ij ;
- $\underline{V}$: Limite mínimo magnitude de tensão;
- $\overline{V}$: Limite máximo magnitude de tensão;
- $\underline{P}_i^g$: Limite mínimo de geração de potência ativa na barra i ;
- $\overline{P}_i^g$: Limite máximo de geração de potência ativa na barra i ;
- $\underline{Q}_i^g$: Limite mínimo de geração de potência reativa na barra i ;
- $\overline{Q}_i^g$: Limite máximo de geração de potência reativa na barra i .

As variáveis contínuas são:

- P_i^g : Potência ativa gerada na barra i ;
- Q_i^g : Potência reativa gerada na barra i ;
- V_i : Magnitude de tensão na barra i ;
- θ_i : Ângulo de tensão na barra i ;
- ϕ_{kij} : Ângulo de defasagem do transformador defasador k no ramo ij .

E as variáveis discretas são:

- ω_i : Variável binária de chaveamento do *shunt* conectado à barra i ;
- t_{kij} : Posição do *tap* do transformador k no ramo ij ;
- sw_{kij} : Variável binária que determina se a linha k no ramo ij está ligada ou não.

No modelo matemático apresentado, a equação (33) representa a função de custo de geração, as equações (34) e (35) representam os balanços de potência ativa e reativa do sistema, de acordo com a lei das correntes de Kirchhoff. Já as equações (36)–(39) representam os cálculos dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas, em conformidade à lei das tensões de Kirchhoff para cada laço fundamental. As expressões (40), (41) e (42) representam os limites de tensão e geração de potência ativa e reativa, respectivamente. Os limites de capacidade das linhas de transmissão são impostos pelas expressões (43) e (44). Por fim, a expressão (45) denota os limites das posições dos *taps* dos transformadores e a expressão (46) impõe que o ângulo

de tensão na barra de referência (*slack*) deve ser zero. As restrições (47)–(49) indicam a natureza discreta das variáveis de operação relacionadas com os compensadores *shunt*, estado de operação das linhas e posição dos *taps* nos transformadores.

3.4 MODELO MATEMÁTICO DC DE FPO PARA O PROBLEMA DE OTS

Na literatura muitos trabalhos utilizam o modelo matemático DC para resolver o problema de FPO, com e sem o desligamento de linhas de transmissão, por ser um modelo relaxado e conseqüentemente de mais fácil de resolução. Entretanto, as soluções fornecidas pelos modelos DC nem sempre são factíveis para o modelo AC.

O objetivo dessa seção é apresentar uma formulação para o problema de FPO com desligamentos de linhas de transmissão usando o modelo DC para a operação da rede. As soluções dessa formulação serão avaliadas no modelo AC, ou seja, as linhas desligadas na solução do problema de OTS DC serão parâmetros do modelo de FPO AC, com o objetivo de verificar a factibilidade da operação da rede.

As expressões (50)–(56) apresentam a modelagem matemática DC do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão, para minimização dos custos de geração.

$$\min v = \sum_{i \in \Omega_g} [c_i^g (P_i^g)^2 + c_i^l P_i^g + c_i^c] \text{ (US\$/h)} \quad (50)$$

sujeito a:

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{kji \in \Omega_l} P_{kji} - \sum_{kij \in \Omega_l} P_{kij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (51)$$

$$|X_{kij} P_{kij} - (\theta_i - \theta_j)| \leq M(1 - sw_{kij}) \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (52)$$

$$|P_{kij}| \leq \bar{S}_{kij} sw_{kij} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (53)$$

$$\underline{P}_i^g \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (54)$$

$$\theta_{i^*} = 0 \quad (55)$$

$$sw_{kij} \in \{0,1\} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (56)$$

Nessa formulação, os conjuntos são:

- Ω_b : Conjunto de barras do sistema, indexado pelo índice i , sendo que i^* é a barra de referência;

- Ω_g : Conjunto de barras geradoras, indexado pelo índice i ;
- Ω_l : Conjunto de linhas, indexado pelo índice kij que representa a linha ou transformador k no ramo ij , sendo que k é utilizado para representar componentes em paralelo em um mesmo ramo ij .

Os parâmetros são:

- c_i^q , c_i^l , e c_i^c : Coeficientes de custo de geração quadrático, linear e constante, respectivamente, na barra i ;
- X_{kij} : Reatância da linha k no ramo ij ;
- M : Big-M da formulação disjuntiva;
- P_i^d : Potência ativa demandada na barra i ;
- $\bar{S}_{kij}$: Limite de fluxo de potência aparente da linha k no ramo ij ;
- $\underline{P}_i^g$: Limite mínimo de geração de potência ativa na barra i ;
- $\bar{P}_i^g$: Limite máximo de geração de potência ativa na barra i .

As variáveis contínuas são:

- P_{kij} : Fluxo de potência ativa da linha k no ramo ij ;
- P_i^g : Potência ativa gerada na barra i ;
- θ_i : Ângulo de tensão na barra i .

A variável discreta é:

- sw_{kij} : Variável binária que determina se a linha k no ramo ij está ligada ou não.

No modelo (50)–(56) a equação (50) representa a função de custo de geração. A equação (51) representa o balanço de potência ativa, de acordo com a lei das correntes de Kirchhoff. O cálculo do fluxo de potência ativa nas linhas é representado pela equação (52), impondo a segunda lei de Kirchhoff ao modelo. As expressões (53) e (54) representam os limites de capacidade das linhas de transmissão e os limites de geração de potência ativa. Por fim, a expressão (55) impõe que o ângulo de tensão na barra de referência (*slack*) deve ser zero e (56) indica a natureza binária da variável sw_{kij} .

4 A META-HEURÍSTICA DE BUSCA DISPERSA

No presente capítulo, a meta-heurística de busca dispersa (BD) é apresentada em detalhes. Primeiramente será discutida uma breve introdução às meta-heurísticas, descrevendo sucintamente seu histórico e algumas das meta-heurísticas mais relevantes da literatura. Em seguida a meta-heurística de busca dispersa é detalhada. Com o objetivo de avaliar a potencialidade da meta-heurística de BD e apresentar com detalhes cada etapa do seu algoritmo, serão demonstradas duas abordagens utilizando a BD, uma para otimizar funções multimodais contínuas, não lineares e com restrições, e a outra para resolver o problema de FPO com base na formulação apresentada nas expressões de (33) a (49), sem considerar o desligamento de linhas, ou seja, desconsiderando as variáveis sw_{kij} .

4.1 INTRODUÇÃO ÀS META-HEURÍSTICAS

A palavra ‘heurística’ vem da palavra grega ‘*heuriskein*’ e tem o significado de descobrir, encontrar. As heurísticas são técnicas de otimização que foram muito utilizadas na década de 1960 e 1970 para resolver problemas complexos de otimização matemática. É considerada uma abordagem que geralmente encontra soluções de boa qualidade para problemas complexos, especialmente em problemas não lineares, discretos e não convexos, ou seja, em problemas que não podem ser resolvidos de forma eficiente por métodos exatos. De acordo com Glover e

Kochenberger (2003), os algoritmos heurísticos geralmente encontram soluções ótimas locais, pois em problemas de grande porte e muito complexos, os algoritmos heurísticos possuem muita dificuldade em encontrar soluções ótimas globais, principalmente pelo fato da enorme quantidade de possibilidades combinatórias quando o tamanho do problema cresce, e também quando o problema apresenta uma modelagem matemática muito complexa. Há diversas técnicas heurísticas de otimização, as técnicas mais utilizadas são o algoritmo heurístico construtivo (AHC) e o algoritmo *steepest descent heuristic* (SDH) – algoritmo heurístico de busca através de vizinhança.

O algoritmo heurístico construtivo (AHC) resolve problemas complexos e é muito utilizado, de forma isolado ou integrado, a meta-heurísticas mais sofisticadas. O AHC mais popular e utilizado é o algoritmo com estratégia de projeto guloso, chamado de algoritmo guloso ou *greedy*. Geralmente o AHC guloso é utilizado para gerar uma solução inicial de boa qualidade de um problema complexo. Sua estratégia é montar uma solução elemento por elemento com base na sensibilidade da função objetivo do problema, ou seja, em cada passo do AHC guloso, o elemento escolhido para compor a solução é o mais “apetitoso”, ou seja, é o elemento mais próximo do que se acredita que na solução final proporcionará um valor ótimo para a função objetivo.

Já o algoritmo heurístico de busca através de vizinhança (SDH) do inglês *steepest descent heuristic*, diferentemente do AHC, parte de uma solução completa e factível, chamada também de solução corrente ou incumbente. Em seguida são geradas novas soluções factíveis através de um espaço de busca pré-definido, onde a melhor solução vizinha passa a ser a solução incumbente. Nesse contexto, utiliza-se aqui o termo estrutura de vizinhança, o que consiste na maneira pela qual as soluções vizinhas são encontradas. Essas estruturas de vizinhanças são totalmente dependentes do tipo de problema que se esteja resolvendo.

As meta-heurísticas são técnicas de otimização mais sofisticadas que integram uma ou mais heurísticas, ou até mesmo outras meta-heurísticas para tentar encontrar uma solução ótima global. Como já discutido, as heurísticas são técnicas que geralmente encontram soluções ótimas locais e possuem dificuldades em encontrar soluções ótimas globais, enquanto as meta-heurísticas possuem estratégias para sair de ótimos locais, explorando um espaço de busca maior, para assim tentar chegar a um ótimo global. De acordo com a definição de Glover e Kochenberger (2003), meta-heurísticas são técnicas de solução que gerenciam uma interação entre as estratégias de busca local e as estratégias de nível superior para criar um processo de otimização com capacidade de sair de soluções ótimas locais e realizar uma busca robusta através de espaço de busca.

Existe uma grande quantidade de meta-heurísticas desenvolvidas e presentes na literatura, e neste trabalho serão citadas as mais relevantes. Algumas meta-heurísticas são baseadas em fenômenos naturais como, por exemplo, o *simulated annealing* (SA) – recozimento simulado, outras são inspiradas na biologia e baseadas em populações, como o caso do algoritmo genético (AG) e suas variantes, e recebem a denominação de algoritmos evolutivos (AE), pois o processo inicia-se com uma população inicial de soluções e essa é conduzida a uma população melhorada, com o objetivo de encontrar a solução ótima. Há outras meta-heurísticas evolutivas que não se baseiam em fenômenos biológicos, como o caso da meta-heurística *scatter search* (SS) – busca dispersa (BD).

Outros algoritmos evolutivos e bioinspirados são baseados em enxames, como o caso do *particle swarm optimization* (PSO) – otimização por enxame de partículas e o *ant colony optimization* (ACO) – otimização por colônia de formigas, e, nesse caso o processo de otimização é baseado no comportamento coletivo de sistemas auto organizados, distribuídos, autônomos, flexíveis e dinâmicos, o que pode levar a uma solução ótima (SERAPIÃO, 2009).

Uma outra categoria de meta-heurísticas não leva em consideração fenômenos naturais e nem se inspira em algum processo biológico, como é o caso da meta-heurística *tabu search* (TS) – busca tabu, meta-heurística *greedy randomized adaptive search procedure* (GRASP) – procedimento de busca aleatório e adaptativo guloso, e por fim *variable neighborhood search* (VNS) – busca em vizinhança variável.

A meta-heurística conhecida como algoritmo genético (AG) foi proposta por Holland na década de 1970, porém apenas na década de 1980 sua utilização foi mais intensa na resolução de problemas complexos (MICHALEWICZ, 1994). É um algoritmo evolucionário que se baseia fundamentalmente no processo de seleção natural e evolução das espécies. Como esse processo de seleção natural e evolução das espécies é bastante complexo para ser simulado, o AG se inspira em apenas uma parcela dos componentes que fazem parte desse processo. Inicialmente esse algoritmo utilizava apenas codificação binária para compor a solução, atualmente o AG foi adaptado para utilizar qualquer tipo de variável, seja binária, inteira, contínua ou até mesmo outro tipo de informação que não seja numérico, o que possibilitou a resolução de uma gama maior de problemas e produzindo resultados melhores.

Uma das primeiras meta-heurísticas utilizadas com muito sucesso na otimização de problemas complexos, proposta por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983), foi o *simulated annealing* (SA) – recozimento simulado. A inspiração para o desenvolvimento dessa meta-heurística veio das semelhanças entre a técnica de construção de cristais perfeitos utilizando a técnica chamada

annealing e a otimização de problemas complexos. A técnica chamada *annealing* consiste basicamente em esquentar um material a temperaturas elevadas, onde haverá muita movimentação molecular e que levará a um novo arranjo de átomos do material esquentado. A partir desse estado, há uma grande possibilidade de que o material se torne um cristal perfeito através do processo de resfriamento de maneira controlada, com o objetivo de que a movimentação molecular diminua. Caso esse resfriamento não seja realizado de maneira correta, o material se torna em um cristal imperfeito.

Em 1989, Fred Glover desenvolveu a meta-heurística *tabu search* (TS) – busca tabu, na qual se baseou apenas em conhecimentos da otimização matemática, ou seja, não se inspirou em fenômenos da natureza e/ou biológicos como muitas outras meta-heurísticas (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003). No algoritmo de TS a estratégia de busca é realizada percorrendo o espaço de busca de forma eficiente e seletiva, integrando a esse processo estratégias de intensificação e de diversificação. Intensificar significa realizar uma busca mais intensa em torno da solução corrente, e diversificar significa sair de uma região do espaço de busca e, alternar para uma região distante com o objetivo de escapar de ótimos locais para novamente aplicar intensificação. Há diferentes formas de implementar um algoritmo de TS, desde sua forma mais básica até uma forma bastante complexa, sendo que nesse último caso o algoritmo básico funciona como um módulo de otimização de uma estrutura de TS mais complexa.

A meta-heurística *particle swarm optimization* (PSO) – otimização por enxame de partículas, é uma meta-heurística baseada em população e foi desenvolvida por Kennedy e Eberhart (1995). A inspiração dessa meta-heurística vem da observação da atividade de busca otimizada por alimentos que bandos de pássaros e cardumes de peixes realizam. Dessa forma, o PSO realiza simulações destas atividades, que naturalmente são simples, mas matematicamente são complexas. O objetivo dos pesquisadores foi o de tentar entender como os pássaros se mantêm aninhados e alteram suas direções repentinamente, dispersando-se e novamente reagrupando-se sem haver nenhum tipo de colisão. O modelo de otimização é fundamentado na distância individual entre as aves e na sincronia do comportamento do bando, que está relacionada com o esforço dos pássaros em manter uma distância ótima entre eles e seus vizinhos.

4.2 BUSCA DISPERSA

O método de busca dispersa (BD) é um método evolucionário que tem sido amplamente utilizado em problemas de otimização. Os primeiros conceitos e princípios fundamentais do

método foram propostos na década de 1970 e baseados em formulações anteriores à década de 1960, que combinavam regras de decisão e problemas restritos. O método utiliza estratégias de intensificação, diversificação de busca e tem demonstrado ser eficaz em vários problemas de otimização (LAGUNA; MARTÍ, 2003).

Especificamente, o método da busca dispersa foi proposto por Glover em 1977 como uma heurística para resolver problemas de programação inteira (GLOVER, 1977).

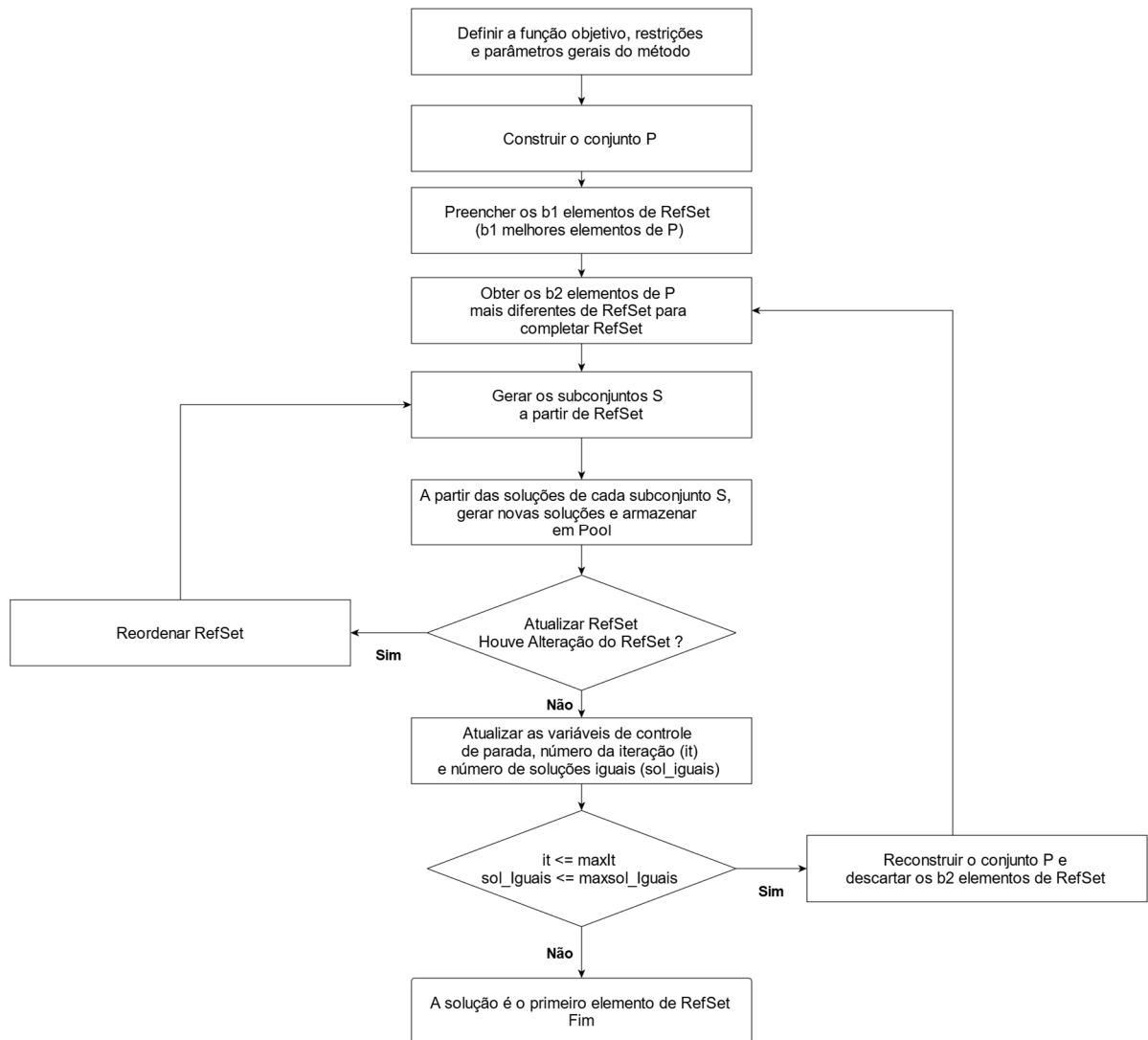
No início da década de 1990, foi incorporada ao método a meta-heurística de busca tabu, sendo que foram utilizadas formas de memória adaptativa e critérios de aspiração. Também, estendeu-se o método para resolver outros tipos de problemas, como problemas de otimização de funções não lineares contínuas e problemas de permutação (LAGUNA; MARTÍ, 2003).

Já em 1998, um modelo padrão para o método foi proposto por Glover, Kuo e Dhir (1998), e esse modelo serviu de base para a maioria das implementações de busca dispersa até hoje. A seguir, seguem os passos básicos desse modelo:

1. Gerar um conjunto inicial de soluções com diversidade e aplicar um método de melhoria local nessas soluções. A partir desse conjunto, determinar um subconjunto de referência, formado por uma parcela de soluções de alta qualidade e outra por soluções com diversidade;
2. Obter novas soluções a partir de combinações realizadas a partir das soluções do conjunto de referência;
3. Aplicar um método de melhoria nas soluções obtidas do passo anterior;
4. Selecionar uma coleção de soluções de melhor qualidade obtidas no passo anterior e adicionar ao conjunto de referência. Repetir os passos 2, 3 e 4 até que não se consiga mais melhorar as soluções. Diversificar o conjunto de referência voltando ao passo 1. Encerrar o processo ao atingir um critério de parada pré-determinado.

Atualmente o método apresenta uma grande variedade de implementações e diversas estratégias avançadas podem ser incorporadas em suas etapas para melhoria dos resultados e desempenho. Dependendo da implementação, pode-se resolver qualquer tipo de problema de otimização, tais como problemas de otimização combinatória, funções inteiras, contínuas e binárias, restritas ou irrestritas.

A Figura 7 apresenta o algoritmo básico do método da busca dispersa, o qual pode ser utilizado em qualquer tipo de problema de otimização.

Figura 7 – Fluxograma da meta-heurística de busca dispersa

Fonte: Elaboração do autor.

As principais etapas do algoritmo são: construção do conjunto P de soluções, preenchimento inicial do conjunto de referência $RefSet$, geração dos subconjuntos S , $Pool$ e atualização de $RefSet$.

A primeira etapa do algoritmo consiste na definição do problema, ou seja, determinação das variáveis do problema e seus limites, função objetivo e restrições (quando houver). Também, nessa etapa inicial alguns parâmetros importantes para o funcionamento do método são definidos como segue:

- $PSize$: Tamanho do conjunto P de soluções;
- $b1$: Número de elementos do conjunto $RefSet$ responsáveis por representar soluções de qualidade;
- $b2$: Número de elementos do conjunto $RefSet$ responsáveis pela diversidade;

- b : $b = b1 + b2$, tamanho do conjunto *RefSet* de soluções.

Após a etapa inicial, o conjunto P de soluções é construído, e com base nele o conjunto *RefSet* inicial também é obtido. Os subconjuntos S_i de soluções são formados a partir dos elementos de *RefSet* para a montagem do conjunto de soluções *trial* (testes), chamado de *Pool*. Para cada solução do conjunto *Pool*, um método de melhoria local é aplicado.

O conjunto *RefSet* é atualizado com as b melhores soluções entre os conjuntos *RefSet* e *Pool*. Se houver atualização do conjunto *RefSet*, o fluxo do algoritmo é desviado novamente para a construção de novos subconjuntos S . Caso não haja atualização do conjunto *RefSet*, um novo conjunto P de soluções é construído, e depois são geradas novas soluções preservando as $b1$ soluções de *RefSet* e substituindo as $b2$ soluções usando o novo conjunto P .

O processo se encerra a partir de um número máximo de iterações ou a partir do momento em que um determinado número de soluções iguais foi obtido sequencialmente sem melhoria. A solução final, é o primeiro elemento do conjunto *RefSet*, pois *RefSet* quando sofre alteração é sempre reordenado em ordem da melhor solução para a pior.

A seguir, as principais etapas do algoritmo são descritas detalhadamente para problemas de otimização de funções contínuas multimodais com restrições.

4.3 APLICAÇÃO EM PROBLEMAS DE FUNÇÕES MULTIMODAIS

Nesta seção é apresentado o método da busca dispersa (BD-FMR) para otimizar funções contínuas multimodais com restrições, representadas pelas expressões (57)–(60):

$$\min f(x) \tag{57}$$

sujeito a:

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{58}$$

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \tag{59}$$

$$a_i \leq x_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{60}$$

Em que $f(x)$, $g_i(x)$, $h_i(x)$ são funções contínuas lineares e/ou não lineares definidas em R^n , e $x \in R^n$ é um vetor contendo as variáveis do problema. Os limites de cada variável são definidos pelos vetores a e b .

Os problemas multimodais apresentam múltiplas soluções ótimas, sendo algumas, ou apenas uma ótima global. Essa característica do problema dificulta a resolução, principalmente por métodos exatos que são altamente dependentes do ponto inicial.

Vários trabalhos disponíveis na literatura resolvem problemas desse tipo, de diversas formas, incluindo métodos exatos, heurísticas e meta-heurísticas. Koziel e Michalewicz (1999) apresentam uma estratégia para mapear o espaço de busca de problemas numéricos e restritos para ser utilizada em algoritmos evolutivos. A proposta é testada em diversos problemas, apresentando bons resultados. Runarsson e Yao (2000) propõem uma nova forma de se incorporar penalidades na função de avaliação deste tipo de problema. Os resultados demonstram que a proposta apresenta um melhor desempenho do que utilizar métodos de penalização tradicionais. Farmani e Wright (2003) apresentam uma proposta de fitness auto adaptativo para ser utilizada em algoritmos evolutivos. Venkatraman e Yen (2005) propõem uma estrutura genérica de duas fases para resolver problemas restritos com algoritmos genéticos com boa performance independente das características do problema.

O principal motivo de se escolher o algoritmo de busca dispersa para resolver esse tipo de problema é que esse método obteve excelentes resultados para vários problemas disponíveis na literatura. Adicionalmente, como pode ser visto no livro de Laguna e Martí (2003), o método de BD pode ser utilizado para resolver tanto problemas com funções contínuas restritas, como também problemas que envolvam variáveis discretas, características do problema de FPO.

4.3.1 Construção do conjunto P

Na maioria dos algoritmos de BD o tamanho do conjunto P ($PSize$) de soluções é considerado como o máximo entre 100 e $5b$, em que b é o tamanho do conjunto $RefSet$ (LAGUNA; MARTÍ, 2003).

A construção do conjunto P de soluções deve levar em conta a diversidade das soluções e não apenas a qualidade. Para isso, nesse exemplo a geração dos elementos do conjunto P emprega randomização controlada utilizando memória baseada em frequência. Nessa técnica, para cada variável do problema são consideradas nr sub-faixas de igual tamanho entre seu limite inferior e superior, sendo que nr aqui foi considerado igual a 4. Assim, o valor de cada variável de uma solução do problema é obtido primeiramente selecionando uma sub-faixa, e em seguida um valor aleatório dentro dessa sub-faixa. A seleção da sub-faixa na primeira solução é totalmente aleatória. A partir da segunda solução, a probabilidade da seleção de uma sub-

faixa é inversamente proporcional à frequência em que ela já foi selecionada em soluções anteriores. A equação (61) mostra a expressão para obter essa probabilidade:

$$\text{prob } F_i(k) = \frac{(k-1) - \text{freq } F_i(k-1)}{\sum_{j=1}^{nr=4} [(k-1) - \text{freq } F_j(k-1)]} \quad (61)$$

Em que:

- $\text{prob } F_i$: Probabilidade da sub-faixa F_i ser selecionada, para $i = 1, 2, \dots, nr = 4$;
- k : Número da solução atual;
- $\text{freq } F_i$: Frequência com que a sub-faixa F_i foi utilizada;
- nr : Número de sub-faixas.

Para ilustrar, considere o exemplo em que o algoritmo esteja obtendo a décima primeira solução do conjunto P , e, para uma determinada variável os valores da Tabela 4 são considerados.

Tabela 4 – Exemplo de frequência e probabilidade na seleção de sub-faixa

Sub-Faixa i	Frequência $\text{freq } F_i$	Probabilidade $\text{prob } F_i$	Faixas da Roleta	Valores Aleatórios
1	3	0,23	0,23	0 a 0,23
2	5	0,17	0,40	0,24 a 0,40
3	0	0,33	0,73	0,41 a 0,73
4	2	0,27	1,00	0,74 a 1

Fonte: Elaboração do autor.

Para selecionar uma sub-faixa, um mecanismo fazendo analogia a uma roleta é considerado utilizando os valores de probabilidades de cada sub-faixa. Um valor aleatório entre 0 e 1 é sorteado, e com base nos valores da coluna “Faixas da Roleta” da Tabela 4, a faixa é selecionada. Note na coluna “Valores Aleatórios” da Tabela 4, os prováveis valores obtidos aleatoriamente em que as sub-faixas podem ser selecionadas. Em cada solução obtida do conjunto P , um método de melhoria local é aplicado.

4.3.2 Construção do conjunto *RefSet* inicial

O conjunto de referência *RefSet* deve conter $b = b1 + b2$ elementos, sendo $b1$ elemen-

tos representantes das soluções de maior qualidade e os $b2$ elementos representantes das soluções de diversidade. O número total de elementos b do conjunto *RefSet* deve ser considerado relativamente pequeno, pois a partir desses elementos é que os subconjuntos S , e posteriormente o conjunto *Pool*, serão gerados. Dessa forma, um grande número de elementos pode ser gerado e então comprometer o desempenho do algoritmo. Para esse exemplo, os valores de $b = 10$, sendo $b1 = 5$ e $b2 = 5$ são razoáveis, entretanto, em uma situação real de otimização, é necessário testar a função e efetuar pequenas variações nesses parâmetros para tentar obter melhores resultados.

Todos os elementos de *RefSet* são extraídos do conjunto P , sendo que a porção $b1$ são os $b1$ elementos de maior qualidade do conjunto P , e a porção $b2$ são os elementos do conjunto P mais diversos em relação aos já alocados no conjunto *RefSet*.

Para obter os $b2$ elementos com diversidade, é utilizada a distância euclidiana (62) entre os elementos já constantes do conjunto *RefSet* e os elementos do conjunto P .

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (62)$$

Em que:

- n : Número de variáveis do problema.

Dessa forma, para cada elemento constante no conjunto P , exceto os já constantes em *RefSet*, é encontrada a menor distância euclidiana entre os elementos constantes no conjunto *RefSet*. Seleciona-se o elemento de P que possuir a maior distância entre as mínimas.

Para ilustrar, considere o seguinte exemplo (Tabela 5 e Tabela 6), em que a função possui apenas duas variáveis, o conjunto P foi construído pela primeira vez e o conjunto *RefSet* foi preenchido com as cinco melhores soluções de P .

Neste momento, as soluções de 6 a 10 de *RefSet* (Tabela 5) devem ser preenchidas com as soluções mais diversas do conjunto P em relação às soluções já alocadas em *RefSet*. A Tabela 6 mostra parte das soluções do conjunto P e as respectivas distâncias euclidianas entre os elementos r de *RefSet*, em que os símbolos r_i da Tabela 6 representam a distância euclidiana entre a n -ésima solução do conjunto P e a i -ésima solução do conjunto *RefSet*.

Tabela 5 – Exemplo de conjunto *RefSet* com apenas as cinco melhores soluções de *P*

Solução	x1	x2
1	-0,7216	0,5207
2	-0,8019	0,643
3	-0,779	0,6069
4	-0,5271	0,2779
5	-0,5601	0,3138
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0

Fonte: Elaboração do autor.

Como pode ser observado na Tabela 6, a procura pelos elementos mais diversos deve ser realizada a partir da solução 6 de *P*. Também se observa que a maior distância mínima corresponde ao elemento 63 do conjunto *P*, e sendo assim, esse elemento deve ser inserido no conjunto *RefSet*. Nesse caso, o elemento 63 é descartado de *P*, e as distâncias mínimas são novamente recalculadas para a busca do elemento 7 de *RefSet*, e assim por diante. Obviamente, a maior parcela dos cálculos prévios é aproveitada. Assim, para identificar o elemento 7, apenas devem ser calculadas as distâncias de cada proposta de solução ainda armazenada em *P* com a solução recentemente incrementada em *RefSet* (proposta de solução 63).

Tabela 6 – Exemplo de conjunto *P* e as respectivas distâncias euclidianas de seus elementos com os elementos de *RefSet*

Conjunto <i>P</i>			Distância entre os Elementos de <i>P</i> e <i>RefSet</i>					
Sol	x1	x2	r1	r2	r3	r4	r5	Min
1	-0,722	0,521						
2	-0,802	0,643						
3	-0,779	0,607						
4	-0,527	0,278						
5	-0,560	0,314						
6	0,892	0,796	1,637	1,701	1,682	1,511	1,530	1,511
7	0,490	0,240	1,243	1,353	1,321	1,017	1,052	1,017
8	-0,525	0,275	0,314	0,460	0,418	0,003	0,052	0,003
...	...	...	...	...	...	...	...	...
63	0,992	0,992	1,777	1,827	1,812	1,678	1,693	1,678
...	...	...	...	...	...	...	...	...
100	0,784	0,595	1,508	1,587	1,563	1,349	1,374	1,349

Fonte: Elaboração do autor.

4.3.3 Definição dos subconjuntos S e $Pool$

Os subconjuntos S são constituídos de elementos de $RefSet$, os quais serão combinados e as novas soluções geradas são armazenadas em $Pool$. Várias técnicas e tipos de combinação podem ser utilizadas para gerar novas soluções. Uma das mais simples é a combinação formada por dois elementos, mas poderia ser combinações de três elementos, derivados dos subconjuntos S com dois elementos incluindo a melhor solução do $RefSet$ que ainda não faz parte deste subconjunto, ou combinações de quatro elementos, derivados dos subconjuntos S com três elementos incluindo a melhor solução do $RefSet$ que também ainda não faz parte deste subconjunto.

Uma outra maneira de formar o conjunto $Pool$ é utilizar a heurística de *path relinking*. Essa técnica consiste basicamente em, a partir de uma solução inicial, atingir outra solução chamada guia realizando diversas combinações entre elas. Nesse processo, diversas novas soluções são geradas durante a trajetória entre a solução inicial e a guia, e estas novas soluções geradas são utilizadas para compor o conjunto $Pool$.

Neste trabalho, cada subconjunto S_i é formado por dois elementos de $RefSet$. Assim, todos os elementos de $RefSet$ são agrupados dois a dois para formar todos os subconjuntos S . Considerando que o total de elementos de $RefSet$ é $b = 10$, tem-se 45 subconjuntos S , de acordo com a expressão (63).

$$C_{b,2} = \frac{b(b-1)}{2} \quad (63)$$

O conjunto $Pool$ é formado pela combinação dos elementos de cada subconjunto S (x' e x''). Essa combinação de elementos é realizada utilizando as expressões (64)–(66), e dessa forma, cada subconjunto S irá gerar três novas propostas de soluções testes que irão compor o conjunto $Pool$. Sendo assim, o conjunto $Pool$ terá 135 elementos, uma vez que cada um dos 45 subconjuntos S gera 3 novas soluções.

$$c_1 = x' - d \quad (64)$$

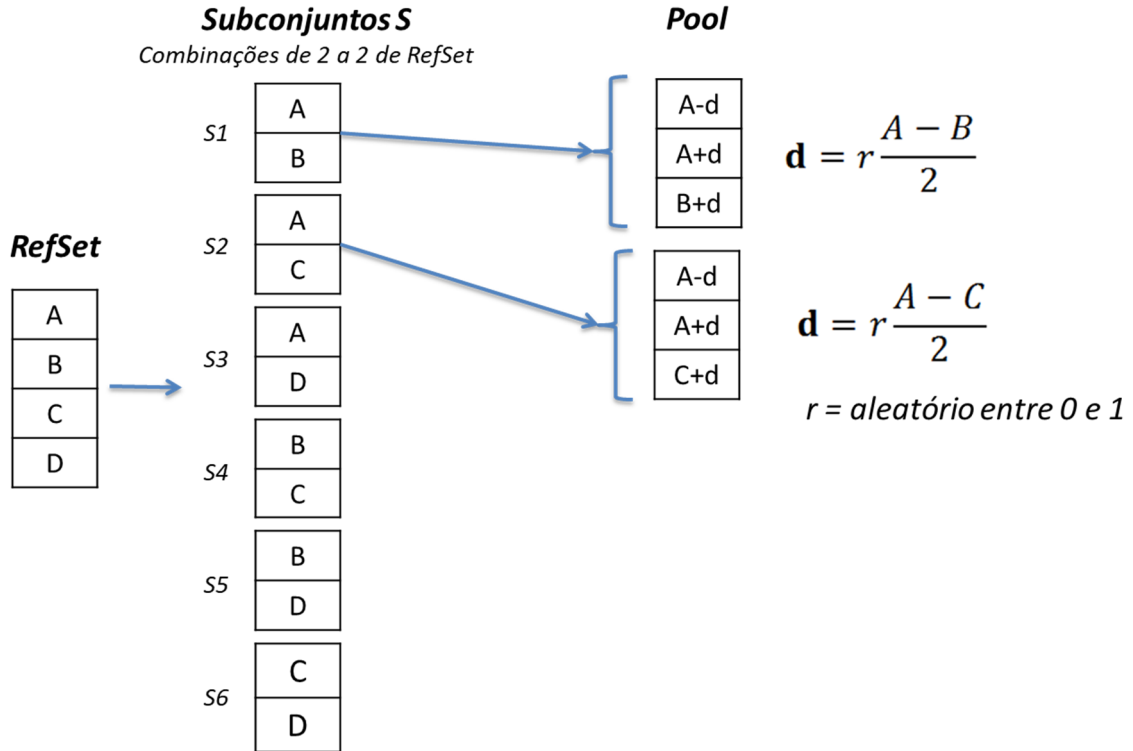
$$c_2 = x' + d \quad (65)$$

$$c_3 = x'' + d \quad (66)$$

Em que $d = r \frac{x'' - x'}{2}$ corresponde a um incremento e r é um número aleatório entre 0 e

A Figura 8 ilustra um exemplo simples da formação dos subconjuntos S e a combinação de seus elementos para a geração dos elementos do conjunto $Pool$.

Figura 8 – Exemplo da formação dos subconjuntos S e $Pool$



Fonte: Elaboração do autor.

Caso algum valor da solução combinada c_i fique abaixo do limite inferior da variável, o limite inferior é assumido, e caso fique acima do limite superior da variável, o limite superior é assumido.

O algoritmo básico da meta-heurística BD propõe que após obter as três soluções testes, um método de melhoria local deve ser aplicado em cada uma destas soluções para ser incorporadas ao conjunto $Pool$. Entretanto, dependendo do problema, há um custo computacional considerável para aplicar a melhoria local nas soluções dessa etapa, e sendo assim, isso pode ser dispensável.

4.3.4 Atualização do conjunto $RefSet$

Após concluir a montagem do conjunto $Pool$, o conjunto $RefSet$ é atualizado com as b melhores soluções da união dos dois conjuntos $Pool \cup RefSet$.

4.3.5 Método de melhoria local

O método de melhoria local é utilizado na maioria dos algoritmos de busca dispersa, em duas fases do método, na construção dos conjuntos P e $Pool$. Dependendo do número de variáveis e consequentemente visando um melhor desempenho do método, pode-se utilizar a melhoria local com menos frequência, ou seja, apenas na construção do conjunto P , ou apenas na construção do conjunto $Pool$, ou em alguma etapa do método que seja executada poucas vezes, como, por exemplo, aplicando o método de melhoria local no conjunto $RefSet$ após sua atualização, ou ainda em apenas no elemento de melhor qualidade de $RefSet$.

Existe uma grande variedade de opções de técnicas de melhoria local, e a técnica utilizada depende da natureza dos dados do problema em questão. Pode-se utilizar nessa etapa, por exemplo, outras meta-heurísticas, tais como otimização por exame de partículas (KENNEDY; EBERHART, 1995), busca em vizinhança variável (MLADENOVIC, 1997), dentre outras.

Neste trabalho, duas técnicas de melhoria local são consideradas. A primeira técnica é baseada na sensibilidade da função objetivo. Considerando uma determinada solução, esse método de melhoria local consiste primeiramente em acrescentar um pequeno valor d à primeira variável da função, caso a qualidade da função objetivo melhore, a variável é incrementada até seu limite superior ou até o momento em que a função objetivo não melhore mais. Caso a função objetivo não melhore na primeira tentativa, o procedimento é feito no sentido inverso, o pequeno valor d é subtraído da variável e caso a função objetivo melhore, a variável é decrementada até seu limite inferior ou até que a função objetivo não melhore mais. Esse procedimento é aplicado em todas as variáveis do problema. A escolha do valor de d é feita realizando testes em cada função a ser otimizada pelo método. Geralmente o valor inicial é $d = 0,01$.

A segunda técnica de melhoria local empregada é o algoritmo simplex de Nelder-Mead (LAGARIAS et al., 1998), em que inicialmente quatro parâmetros são especificados:

- α : Coeficiente de reflexão, $\alpha > 0$;
- χ : Coeficiente de expansão, $\chi > 1$ e $\chi > \alpha$;
- γ : Coeficiente de contração, $0 < \gamma < 1$;
- σ : Coeficiente de redução, $0 < \sigma < 1$.

Na maioria dos casos, os valores escolhidos são: $\alpha = 1$, $\chi = 2$, $\gamma = 1/2$ e $\sigma = 1/2$. O passo inicial do método é gerar $n + 1$ soluções (vértices) para o problema que formam um simplex não degenerado.

Os passos do algoritmo, em cada iteração, são os seguintes (LAGARIAS et al., 1998):

1. Ordene os $n + 1$ vértices para satisfazer $f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_2) \leq \dots \leq f(\mathbf{x}_{n+1})$;
2. Calcule o ponto refletido $\mathbf{x}_r$:

$$\mathbf{x}_r = \bar{\mathbf{x}} + \alpha(\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{n+1}) \quad (67)$$

Em que:

$\bar{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{x}_i / n$ é o centroide dos n melhores pontos

Se $f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_r) \leq f(\mathbf{x}_n)$, aceite o ponto refletido $\mathbf{x}_r$ (substitua $\mathbf{x}_{n+1}$ por $\mathbf{x}_r$) e termine a iteração (volte ao passo 1).

3. Se $f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_1)$, calcule o ponto expandido $\mathbf{x}_e$:

$$\mathbf{x}_e = \bar{\mathbf{x}} + \chi(\mathbf{x}_r - \bar{\mathbf{x}}) \quad (68)$$

Se $f(\mathbf{x}_e) < f(\mathbf{x}_r)$, aceite $\mathbf{x}_e$ e termine a iteração; caso contrário, aceite $\mathbf{x}_r$ e termine a iteração.

Se $f(\mathbf{x}_r) \geq f(\mathbf{x}_n)$, faça uma contração entre $\bar{\mathbf{x}}$ e o melhor entre $\mathbf{x}_{n+1}$ e $\mathbf{x}_r$:

- a. Se $f(\mathbf{x}_n) \leq f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_{n+1})$, calcule o ponto contraído para fora $\mathbf{x}_c$:

$$\mathbf{x}_c = \bar{\mathbf{x}} + \gamma(\mathbf{x}_r - \bar{\mathbf{x}}) \quad (69)$$

Se $f(\mathbf{x}_c) \leq f(\mathbf{x}_r)$, aceite $\mathbf{x}_c$ e termine a iteração; caso contrário, vá ao passo 5.

- b. Se $f(\mathbf{x}_r) \geq f(\mathbf{x}_{n+1})$, calcule o ponto contraído para dentro $\mathbf{x}_{cc}$:

$$\mathbf{x}_{cc} = \bar{\mathbf{x}} - \gamma(\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{n+1}) \quad (70)$$

Se $f(\mathbf{x}_{cc}) \leq f(\mathbf{x}_{n+1})$, aceite $\mathbf{x}_{cc}$ e termine a iteração; caso contrário, vá ao passo 5.

4. Calcule f nos n pontos $\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_1 + \sigma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1)$, para $i = 2, \dots, n + 1$. Os vértices do simplex na próxima iteração são $\mathbf{x}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_{n+1}$.

Como o algoritmo simplex de Nelder-Mead foi projetado para encontrar a solução de problemas irrestritos, neste trabalho, caso uma variável ultrapasse algum limite, o seu valor é fixado nesse limite. Além disso, a função objetivo é penalizada com as restrições de igualdade e desigualdade, como descrita na subseção seguinte.

4.3.6 Manipulação das restrições

Como pode ser visto em Zini (2009), existem vários métodos para tratar de problemas de otimização com restrições, e estes podem ser categorizados em métodos baseados em funções de penalização, métodos baseados na preferência de soluções factíveis sobre as infactíveis e métodos baseados em otimização multiobjetivo. Na implementação do algoritmo de busca dispersa para otimização de funções contínuas restritas, o método baseado em funções de penalização pode ser utilizado com eficiência. Nesse método, o valor de cada restrição não satisfeita é somado ao valor da função objetivo, penalizando assim a solução infactível com esse valor. Dessa forma, o problema definido pelas expressões (57)–(60) é substituído pela expressão (71), a qual ilustra a otimização da função objetivo penalizada.

$$\min Pf = f + \rho \left(\sum_{i=1}^l |h_i|^q + \sum_{i=1}^m (\max\{0, g_i\})^q \right) \quad (71)$$

Em que:

- f : Corresponde ao valor da função objetivo original da solução x ;
- Pf : Corresponde ao valor da função objetivo penalizada da solução x ;
- ρ : Coeficiente de penalização, com $\rho > 0$;
- q : Expoente de penalização, sendo $q \geq 1$;
- h_i : Restrições de igualdade;
- g_i : Restrições de desigualdade.

Os valores de q e ρ podem ser obtidos realizando testes com o problema em questão. Com base em testes realizados utilizando problemas conhecidos da literatura especializada, valores razoáveis para esses parâmetros são $q = 2$ e $\rho = 10^7$.

4.4 APLICAÇÃO NO PROBLEMA DE FPO

Nessa seção é apresentada uma abordagem utilizando a meta-heurística de BD para resolver o problema de FPO de maneira totalmente independente, ou seja, sem a utilização de métodos clássicos, sendo que a meta-heurística irá gerenciar todas as variáveis do problema. Sua implementação foi feita utilizando a linguagem de programação C/C++ com recursos de programação paralela por meio da biblioteca OpenMP.

Essa abordagem recebe a denominação de BD-FPO, e a formulação matemática utilizada para o problema de FPO é a mesma apresentada nas expressões (33)–(49), sem considerar o desligamento de linhas, ou seja, desconsiderando as variáveis sw_{kij} . Como pode ser observado, o problema de funções multimodais (57)–(60) possui a mesma estrutura do problema de FPO (33)–(49), com exceção das variáveis discretas. Nesse caso, para resolver o problema de FPO utilizando a BD, apenas algumas modificações na abordagem da seção anterior foram necessárias para considerar as variáveis discretas, como será demonstrado a seguir.

As incógnitas do problema de FPO que a metodologia BD-FPO resolve são apresentadas na Tabela 7. Além disso, a metodologia BD-FPO também calcula os fluxos de potência, ou seja, as variáveis P_{kij}^{de} , P_{kij}^{para} , Q_{kij}^{de} e Q_{kij}^{para} do problema, definidas respectivamente pelas expressões (36)–(39).

A construção do conjunto P nesse caso utiliza a mesma metodologia apresentada na Seção 4.3, ou seja, utilizando randomização controlada com memória baseada em frequência para as variáveis contínuas. Já os valores das variáveis ω_i e t_i são obtidos de maneira totalmente aleatória. Nesse trabalho foi considerado $PSize = 100$. Para o conjunto $RefSet$ foi utilizada a configuração $b = 10$, sendo $b1 = 2$ e $b2 = 8$.

Tabela 7 – Variáveis do problema do FPO calculadas pela metodologia BD-FPO

Variável	Descrição	Tipo
V_i	Magnitude de tensão na barra i	Contínua
P_i^g	Potência ativa gerada na barra i	Contínua
Q_i^g	Potência reativa gerada na barra i	Contínua
θ_i	Ângulo de tensão na barra i	Contínua
ω_i	Variável binária de chaveamento do <i>shunt</i> i	Binária
t_i^1	Posição do <i>tap</i> do transformador i , entre -16 e 16	Inteira

Fonte: Elaboração do autor.

Os elementos de diversidade do conjunto $RefSet$ são obtidos agora considerando as variáveis binárias e inteiras. A distância euclidiana entre os elementos de $RefSet$ e os elementos de P é calculada utilizando (72).

¹ Nesse capítulo considera-se que as variáveis referentes ao ajuste dos *taps* dos transformadores estão organizadas em um vetor indexado pelo índice i , diferentemente do Capítulo 3, em que cada transformador era indexado por kij .

$$\begin{aligned}
d = & \sqrt{\sum_{i \in \Omega_b} (V_i' - V_i'')^2} + \sqrt{\sum_{i \in \Omega_b} (\theta_i' - \theta_i'')^2} + \sqrt{\sum_{i \in \Omega_g} (P_i^{g'} - P_i^{g''})^2} + \\
& \sqrt{\sum_{i \in \Omega_g} (Q_i^{g'} - Q_i^{g''})^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{nTaps} (t_i' - t_i'')^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{nShunts} |\omega_i' - \omega_i''|}
\end{aligned} \tag{72}$$

Em que:

- Ω_b : Conjunto de barras do sistema;
- Ω_g : Conjunto de barras geradoras;
- V_i' : Módulo de tensão na barra i da solução presente no conjunto P ;
- V_i'' : Módulo de tensão na barra i da solução presente no conjunto $RefSet$;
- $P_i^{g'}$: Potência ativa gerada na barra i da solução presente no conjunto P ;
- $P_i^{g''}$: Potência ativa gerada na barra i da solução presente no conjunto $RefSet$;
- t_i' : Posição do *tap* no transformador i da solução presente no conjunto P ;
- t_i'' : Posição do *tap* no transformador i da solução presente no conjunto $RefSet$;
- ω_i' : Valor binário do *shunt* i da solução presente no conjunto P ;
- ω_i'' : Valor binário do *shunt* i da solução presente no conjunto $RefSet$;
- $nTaps$: Número de *taps* dos transformadores;
- $nShunts$: Número de *shunts* no sistema.

Para cada elemento constante no conjunto P , é encontrada a menor distância euclidiana (72) entre os elementos constantes no conjunto $RefSet$. Seleciona-se o elemento de P que possuir a maior distância entre as mínimas.

Os subconjuntos S são constituídos de elementos de $RefSet$, os quais são combinados e as novas soluções geradas são armazenadas em $Pool$. A combinação aqui também é realizada utilizando combinação de dois a dois elementos de S (x' e x''), gerando-se assim três soluções testes que são incluídas em $Pool$. As expressões (73)–(75) ilustram essa combinação para as variáveis contínuas e inteiras do problema.

Combinação das variáveis contínuas de magnitude de tensão:

$$\begin{aligned}
V_i \text{ da combinação 1} &= V_i' - d_{V_i} \\
V_i \text{ da combinação 2} &= V_i' + d_{V_i} \\
V_i \text{ da combinação 2} &= V_i'' + d_{V_i} \\
&\forall i \in \Omega_b
\end{aligned} \tag{73}$$

Combinação das variáveis contínuas dos ângulos de tensão:

$$\begin{aligned}\theta_i \text{ da combinação 1} &= \theta'_i - d_{\theta_i} \\ \theta_i \text{ da combinação 2} &= \theta'_i + d_{\theta_i} \\ \theta_i \text{ da combinação 3} &= \theta''_i + d_{\theta_i} \\ \forall i &\in \Omega_b\end{aligned}\tag{74}$$

Combinação das variáveis inteiras que definem a posição dos *taps*:

$$\begin{aligned}t_i \text{ da combinação 1} &= t'_i - \text{round}(d_{t_i}) \\ t_i \text{ da combinação 2} &= t'_i + \text{round}(d_{t_i}) \\ t_i \text{ da combinação 3} &= t''_i + \text{round}(d_{t_i}) \\ \text{para } i &= 1, 2, \dots nTaps\end{aligned}\tag{75}$$

Em que:

- $d_{x_i} = r \frac{x''_i - x'_i}{2}$: Corresponde a um incremento da variável “ x_i ”, que pode ser V_i, θ_i ou t_i ;
- r : Número aleatório entre 0 e 1;
- V'_i : Módulo de tensão na barra i da solução x' do subconjunto S ;
- V''_i : Módulo de tensão na barra i da solução x'' do subconjunto S ;
- θ'_i : Ângulo de tensão na barra i da solução x' do subconjunto S ;
- θ''_i : Módulo de tensão na barra i da solução x'' do subconjunto S ;
- $P_i^{g'}$: Potência ativa gerada na barra i da solução x' do subconjunto S ;
- $P_i^{g''}$: Potência ativa gerada na barra i da solução x'' do subconjunto S ;
- t'_i : Posição do *tap* do transformador i da solução x' do subconjunto S ;
- t''_i : Posição do *tap* do transformador i da solução x'' do subconjunto S ;
- Ω_g : Conjunto de barras de geração;
- $\Omega_{g'}$: Conjunto de barras de geração exceto a barra de referência;
- $nTaps$: Número de posições dos *taps* dos transformadores.

Caso algum valor de c_i fique abaixo do limite inferior da variável na respectiva barra/ramo, o limite inferior é assumido, e caso fique acima do limite superior, o limite superior é assumido. Após obter três soluções testes, as soluções são incorporadas ao conjunto *Pool*.

A técnica utilizada para calcular a parcela de combinação das variáveis binárias das soluções é através do cálculo de um valor, chamado aqui de *score* para cada variável binária, com base no valor da função objetivo de cada solução a ser combinada (LAGUNA; MARTÍ, 2003).

O cálculo desse valor *score* é demonstrado na expressão (76).

$$score_i = \frac{VFobj_1 \times \omega'_i + VFobj_2 \times \omega''_i}{VFobj_1 + VFobj_2}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, nShunts \quad (76)$$

Em que:

- $VFobj_1$: Valor da função objetivo da solução x' ;
- $VFobj_2$: Valor da função objetivo da solução x'' ;
- ω'_i : Valor do i -ésimo *shunt* (0 ou 1) da solução x' ;
- ω''_i : Valor do i -ésimo *shunt* (0 ou 1) da solução x'' ;
- $nShunts$: Número de *Shunts* do sistema.

O valor dos *shunts* de cada uma das soluções *trial* teste é determinado de acordo com a expressão (77):

$$\omega_i = \begin{cases} 1, & \text{se } r \leq score(i) \\ 0, & \text{se } r > score(i) \end{cases} \quad (77)$$

para $i = 1, 2, \dots, nShunts$

Em que:

- r : Valor aleatório entre 0 e 1;
- ω_i : Valor do i -ésimo *shunt* de cada solução *trial*;

A atualização do conjunto *RefSet* é idêntica à maneira utilizada na otimização de funções multimodais restritas, ou seja, após concluir a montagem do conjunto *Pool*, o conjunto *RefSet* é atualizado com as b melhores soluções da união dos dois conjuntos $Pool \cup RefSet$.

A melhoria local nesse caso, diferentemente do método BD-FMR, é realizada após a inclusão dos elementos de diversidade no conjunto *RefSet*, e é aplicada a todos seus elementos. Isso porque há uma grande demanda de tempo de processamento para realizar a melhoria local, e aplicá-la com mais frequência no algoritmo seria inviável. O algoritmo simplex de Nelder-Mead é utilizado nas variáveis de magnitude e ângulo de tensão em todas as barras. Para as variáveis que representam a posição dos *taps* dos transformadores, é aplicado o método com base na sensibilidade da função objetivo. Aumenta-se em uma unidade o valor de um *tap* e se a função objetivo melhorar continua-se aumentando enquanto a melhoria continuar, até o valor máximo. Caso o valor da função objetivo não melhore aumentando, faz-se o contrário, diminui-se em uma unidade o valor de um *tap* e enquanto a melhoria continuar, continua-se diminuindo, até o valor mínimo. Isso é realizado para todos os ramos com transformadores.

Já no caso dos *shunts*, o valor binário é trocado de 0 para 1 ou de 1 para 0 e o valor da função objetivo é avaliado. Caso haja melhoria da função objetivo, mantém-se a troca, e caso não, o valor original é assumido. Isso é realizado para todos os *shunts* do sistema.

As variáveis referentes à potência ativa e potência reativa nas barras geradoras são obtidas no cálculo da função objetivo, mais precisamente no cálculo das restrições do sistema referentes ao balanço de potência ativa e reativa.

Com base nas leis de Kirchhoff, expressões (34) e (35), as seguintes igualdades têm que ser verdadeiras para que haja o balanço de potência.

$$P_i^g = P_i^d + \sum_{kji \in \Omega_l} P_{kji}^{para} + \sum_{kij \in \Omega_l} P_{kij}^{de} + V_i^2 G_i^{sh} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (78)$$

$$Q_i^g = Q_i^d + \sum_{kji \in \Omega_l} Q_{kji}^{para} + \sum_{kij \in \Omega_l} Q_{kij}^{de} - V_i^2 B_i^{sh} \omega_i \quad \forall i \in \Omega_b \quad (79)$$

Nas barras de carga, P_i^g e Q_i^g assumem o valor zero. Já nas barras de geração são verificados os limites das variáveis P_i^g e Q_i^g . Caso o termo à direita da igualdade das expressões (78) e (79) fiquem fora dos limites das respectivas variáveis P_i^g e Q_i^g , são assumidos os limites inferior ou superior, dependendo do caso. Caso o termo à direita da igualdade fique dentro dos limites das respectivas variáveis, esse valor é assumido.

A função objetivo dessa abordagem também é penalizada, de forma semelhante à abordagem BD-FMR, de acordo com (80).

$$\min Pf = f + \sum_{i=1}^l \rho_i |h_i|^q + \sum_{i=1}^m \xi_i (\max\{0, g_i\})^q \quad (80)$$

Em que:

- f : Corresponde ao valor da função objetivo, expressão (33);
- Pf : Valor da função objetivo penalizada;
- ρ_i : Coeficiente de penalização para a i -ésima restrição de igualdade;
- ξ_i : Coeficiente de penalização para a i -ésima restrição de desigualdade;
- q : Expoente de penalização, sendo $q = 1$;
- h_i : Restrições de igualdade correspondentes às leis de Kirchhoff, das expressões (34) e (35);
- g_i : Restrições de desigualdade, correspondentes aos limites de fluxo de potência aparente nas linhas de transmissão, das expressões (43) e (44);
- l : Número de restrições de igualdade;
- m : Número de restrições de desigualdade.

Nesse caso optou-se em utilizar o expoente de penalização $q = 1$ para explorar melhor os valores de violação das restrições entre zero e um. Com a realização dos testes foi possível

observar que com um coeficiente de penalização maior para as restrições de desigualdade, o algoritmo teve um comportamento melhor.

Utilizou-se também coeficientes de penalização distintos para as restrições de igualdades (ρ_i) e desigualdades (ξ_i). Isso porque, também com a realização dos testes, verificou-se que escolhendo coeficientes de penalização maiores para restrições com valores maiores e coeficientes menores para restrições com valores menores, o método conseguia convergência mais rápida para uma solução factível.

Os limites das variáveis (i) posição dos *taps*, (ii) magnitudes e (iii) ângulos de tensão foram gerenciados na meta-heurística, ou seja, na etapa da construção do conjunto P , e na etapa de combinação das soluções para a geração do conjunto $Pool$.

4.4.1 Recursos de processamento paralelo

Nessa abordagem é utilizado o recurso de programação paralela por meio da biblioteca OpenMP, a qual pode ser utilizada na linguagem Fortran ou C/C++. A biblioteca OpenMP é de uso livre e consiste em uma API (*application programming interface* – interface de programação de aplicativos) a qual possui um conjunto de funções e diretivas para o compilador que permite a criação de programas paralelos com compartilhamento de memória, através da criação automática e automatizada de um conjunto de *Threads* (OPEN MULTI-PROCESSING – OPENMP, 2019).

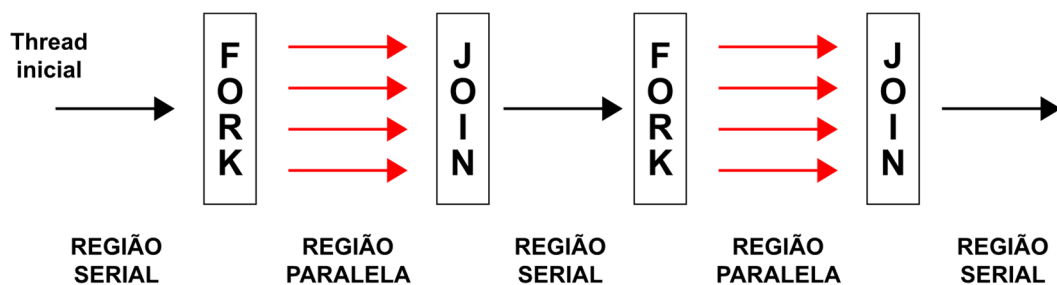
O conceito de *Thread* pode ser basicamente definido como a linha de execução de um programa na memória, onde um programa que não é paralelo possui apenas uma *Thread*, pois possui apenas uma linha de execução. Já um programa com recursos de paralelismo no código pode possuir diversas *Threads*, ou seja, diversas linhas de execução na memória. O modelo de programação OpenMP baseia-se no modelo do tipo *fork-join*, ou seja, várias *Threads* são criadas a partir de um ponto do código (*fork*) e em um determinado outro ponto do código as *Threads* adicionais criadas no (*fork*) são eliminadas (*join*). A Figura 9 ilustra o modelo *fork-join* da OpenMP.

O paralelismo na metodologia BD-FPO é utilizado em dois pontos, na etapa de combinação das soluções da BD e na etapa de aplicação da melhoria local nas soluções.

A etapa de combinação das soluções é fundamental para qualquer implementação da meta-heurística de BD e possui um custo computacional relativamente alto, dependendo do

problema. Nessa implementação da BD-FPO, os pares do conjunto $S(x' \text{ e } x'')$ a serem combinados são distribuídos a todos os núcleos do processador através de *Threads*, para que as combinações sejam executadas em paralelo. Dessa forma, obviamente, quanto maior o número de núcleos que o processador possuir, mais rápida será a etapa de combinação das soluções. Como o conjunto *RefSet* possui dez elementos, e nessa implementação as combinações são realizadas de dois a dois elementos de *RefSet*, têm-se 45 combinações, gerando-se três soluções *trial* cada, para compor o conjunto *Pool*.

Figura 9 – Modelo *Fork-Join* de programação OpenMP



Fonte: Elaboração do autor.

Na Figura 10 é listado o código da função da BD-FPO em C que gerencia a combinação das soluções da meta-heurística. Como pode ser observado, na linha 3 do código é iniciado o paralelismo (*Fork*) através da diretiva `#pragma omp parallel` do compilador, e na linha 32 a região paralela é finalizada (*Join*). A matriz BD.S contém o mapeamento de todas as combinações a serem feitas entre os elementos de *RefSet*. Sendo assim, essa matriz possui 45 linhas e 2 colunas cada linha. As colunas armazenam os índices dos elementos de *RefSet* a serem combinados. Dentro da região paralela, as 45 combinações a serem realizadas são distribuídas em *Threads* aos núcleos que o processador possuir, onde o número de núcleos é obtido pela função `omp_get_num_threads()`, listado na linha 9 (Figura 10).

Na linha 27 do código mostrado na Figura 10 é feita a chamada da função *Combine()* que efetua a combinação entre dois elementos i e j de *RefSet* e retorna por parâmetro de referência aos elementos do conjunto *Pool*, armazenado no vetor *BD.Pool*.

Note que todas as *Threads* criadas na região paralela são idênticas, a única diferença é o *id* de cada *Thread* que é obtido pela função `omp_get_thread_num()`, listada na linha 8 do código. Através deste *id* é possível distribuir as combinações em cada núcleo através das variáveis *ini* e *fim*, utilizadas para o controle da estrutura de repetição *for* listado na linha 20.

Figura 10 – Função em C que gerencia a combinação das soluções na BD-FPO

```

1 void Combinar_Sols()
2 {
3     #pragma omp parallel
4     {
5         int ip;
6         int i, j, k;
7
8         int id = omp_get_thread_num();
9         int nt = omp_get_num_threads();
10
11         int size = (int) BD.nS/nt;
12         int ini = id * size;
13         int fim = ini + size;
14
15         if( id == nt-1 )
16         {
17             fim = BD.nS; // número de sub-conjuntos S = 45
18         }
19
20         for( k = ini; k < fim; k++)
21         {
22             i = BD.S[k][0];
23             j = BD.S[k][1];
24
25             ip = 3 * k;
26
27             Combine( BD.RefSet[i], BD.RefSet[j],
28                     BD.Pool[ip], BD.Pool[ip+1], BD.Pool[ip+2]);
29
30             } // for k
31
32         } // #pragma omp parallel
33
34         // Reordenando Pool
35         QuickSort(BD.Pool, 0, BD.nPool-1);
36
37 } // void Combinar_Sols_NOVO();

```

Fonte: Elaboração do autor.

A Tabela 8 exemplifica a distribuição das combinações de soluções entre os núcleos do processador. Considerando que o processador tenha 4 núcleos, três núcleos irão realizar 11 combinações e o quarto núcleo 12 combinações, pois nesse caso, a divisão das 45 combinações pelo número de núcleos (4) não é inteira. A variável *size* contém o total de combinações que serão realizadas por núcleo e é calculada na linha 11 do código listado na Figura 10.

Utilizando esse mesmo raciocínio de divisão de tarefas por núcleo, a melhoria local, que é realizada após a inclusão dos elementos de diversidade no conjunto *RefSet*, é aplicada a todos seus elementos, onde essa aplicação é distribuída entre os núcleos do processador.

Tabela 8 – Distribuição das combinações de soluções em núcleos do processador

id	Núcleo	ini (id * size)	fim (ini + size)-1
0	1	0	10
1	2	11	21
2	3	22	32
3	4	33	44

Fonte: Elaboração do autor.

O próximo capítulo apresentará a metodologia principal desta tese, em que a meta-heurística BD é utilizada para resolver o problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão.

5 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FPO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS USANDO A META-HEURÍSTICA DE BUSCA DISPERSA

Neste capítulo é apresentada a metodologia para a solução do problema de fluxo de potência ótimo considerando o desligamento de linhas de transmissão usando a meta-heurística de busca dispersa, objetivo principal deste trabalho. Nessa abordagem, denominada de BD-OTS, a meta-heurística BD irá gerenciar apenas as variáveis discretas da modelagem matemática, enquanto as variáveis contínuas do problema serão obtidas utilizando o *solver* KNITRO, pelo método de pontos interiores. A modelagem matemática do problema foi feita utilizando a linguagem AMPL e o algoritmo da meta-heurística BD foi implementado na linguagem de programação C/C++ utilizando recursos de programação paralela através da biblioteca OpenMP.

5.1 MODELO MATEMÁTICO MODIFICADO

Quando são fixadas as variáveis inteiras e binárias do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão, o problema resultante é um PNL. Dessa forma, as variáveis discretas obtidas pela BD são fornecidas como parâmetros para o modelo matemático, o qual é passado ao *solver* KNITRO, e que resolverá o PNL através do método de pontos interiores. Nessa situação, dependendo dos valores dessas variáveis discretas fornecidas pela BD, o PNL resultante pode ser infactível ou de difícil convergência.

Para resolver esse problema, e obter soluções mesmo que infactíveis para o PNL, optou-se por considerar gerações artificiais de potência ativa e reativa em cada barra de carga do sistema, gerações essas que devem ser penalizadas na função objetivo, como corte de carga. Obviamente, uma solução com qualquer valor de geração artificial é infactível. As expressões (81)–(102) apresentam a modelagem matemática do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão incluindo o corte de carga, para minimização dos custos de produção de energia.

$$\min v = \sum_{i \in \Omega_g} [c_i^g (P_i^g)^2 + c_i^l P_i^g + c_i^c] + \rho \times CC \text{ (US$/h)} \quad (81)$$

em que:

$$CC = \sum_{i \in \Omega_b | P_i^d \geq 0} gP_i + \sum_{i \in \Omega_b | P_i^d < 0} -gP_i + \sum_{i \in \Omega_b | Q_i^d \geq 0} gQ_i + \sum_{i \in \Omega_b | Q_i^d < 0} -gQ_i \quad (82)$$

sujeito a:

$$0 \leq gP_i \leq P_i^d \quad \forall i \in \Omega_b | P_i^d \geq 0 \quad (83)$$

$$P_i^d \leq gP_i \leq 0 \quad \forall i \in \Omega_b | P_i^d < 0 \quad (84)$$

$$0 \leq gQ_i \leq Q_i^d \quad \forall i \in \Omega_b | Q_i^d \geq 0 \quad (85)$$

$$Q_i^d \leq gQ_i \leq 0 \quad \forall i \in \Omega_b | Q_i^d < 0 \quad (86)$$

$$P_i^g - P_i^d - \sum_{kji \in \Omega_l} P_{kji}^{para} - \sum_{kij \in \Omega_l} P_{kij}^{de} - V_i^2 G_i^{sh} + gP_i = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (87)$$

$$Q_i^g - Q_i^d - \sum_{kji \in \Omega_l} Q_{kji}^{para} - \sum_{kij \in \Omega_l} Q_{kij}^{de} + V_i^2 B_i^{sh} \omega_i + gQ_i = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (88)$$

$$P_{kij}^{de} = sw_{kij} \left[G_{kij} \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right)^2 V_i^2 - \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (G_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) + B_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (89)$$

$$P_{kij}^{para} = sw_{kij} \left[G_{kij} V_j^2 - \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (G_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) - B_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (90)$$

$$Q_{kij}^{de} = sw_{kij} \left[-(B_{kij} + B_{kij}^{shl}) \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right)^2 V_i^2 + \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (B_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) - G_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (91)$$

$$Q_{kij}^{para} = sw_{kij} \left[-(B_{kij} + B_{kij}^{shl}) V_j^2 + \left(1 + \frac{r_{kij}^{\%} t_{kij}}{nt_{kij}} \right) V_i V_j (B_{kij} \cos(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij}) + G_{kij} \sin(\theta_i - \theta_j + \phi_{kij})) \right] \quad (92)$$

$$\forall kij \in \Omega_l$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \overline{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (93)$$

$$\underline{P}_i^g \leq P_i^g \leq \overline{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (94)$$

$$\underline{Q}_i^g \leq Q_i^g \leq \overline{Q}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (95)$$

$$(P_{kij}^{de})^2 + (Q_{kij}^{de})^2 \leq \overline{S}_{kij}^2 \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (96)$$

$$(P_{kij}^{para})^2 + (Q_{kij}^{para})^2 \leq \overline{S}_{kij}^2 \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (97)$$

$$\theta_{i^*} = 0 \quad (98)$$

$$-\overline{nt}_{kij} \leq t_{kij} \leq \overline{nt}_{kij} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (99)$$

$$\omega_i \text{ fixado em 0 ou 1} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (100)$$

$$sw_{kij} \text{ fixado em 0 ou 1} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (101)$$

$$t_{kij} \text{ inteiro e fixado no intervalo } -\overline{nt}_{kij} \leq t_{kij} \leq \overline{nt}_{kij} \quad \forall kij \in \Omega_l \quad (102)$$

Nesse modelo, os conjuntos são:

- Ω_b : Conjunto de barras do sistema, indexado pelo índice i , sendo que i^* é a barra de referência;
- Ω_g : Conjunto de barras geradoras, indexado pelo índice i ;
- Ω_l : Conjunto de linhas, indexado pelo índice kij que representa a linha ou transformador k no ramo ij , sendo que k é utilizado para representar componentes em paralelo em um mesmo ramo ij ;

Os parâmetros são:

- c_i^q, c_i^l , e c_i^c : Coeficientes de custo de geração quadrático, linear e constante, respectivamente, na barra i ;
- P_i^d : Potência ativa demandada na barra i ;
- Q_i^d : Potência reativa demandada na barra i ;
- G_i^{sh} e B_i^{sh} : Condutância e susceptância *shunt* conectadas à barra i ;
- G_{kij} e B_{kij} : Condutância e susceptância série da linha k no ramo ij ;
- B_{kij}^{shl} : Susceptância *shunt* da linha kij ;
- $r_{kij}^{\%}$: Passo de regulação para o *tap* do transformador k no ramo ij ;
- $\overline{nt}_{kij}$: Número de *taps* do transformador k no ramo ij ;
- $\overline{S}_{kij}$: Limite de fluxo de potência aparente da linha k no ramo ij ;
- $\underline{V}$: Limite mínimo de tensão;
- $\overline{V}$: Limite máximo de tensão;
- $\underline{P}_i^g$: Limite mínimo de geração de potência ativa na barra i ;
- $\overline{P}_i^g$: Limite máximo de geração de potência ativa na barra i ;
- $\underline{Q}_i^g$: Limite mínimo de geração de potência reativa na barra i ;
- $\overline{Q}_i^g$: Limite máximo de geração de potência reativa na barra i ;
- ρ : Coeficiente de penalização do corte de carga. Considerou-se $\rho = 10^6$;

As variáveis contínuas são:

- P_i^g : Potência ativa gerada na barra i ;
- Q_i^g : Potência reativa gerada na barra i ;
- gP_i : Corte de carga de potência ativa na barra i ;
- gQ_i : Corte de carga de potência reativa na barra i ;
- V_i : Magnitude de tensão na barra i ;
- θ_i : Ângulo de tensão na barra i ;
- ϕ_{kij} : Ângulo de defasagem do transformador defasador k no ramo ij ;
- CC : Somatório dos cortes de carga de potência ativa e reativa nas barras;

Os parâmetros fornecidos pela meta-heurística e fixado no modelo são:

- ω_i : Parâmetro binário de chaveamento do *shunt* conectado à barra i , fixado em 0 ou 1;

- t_{kij} : Parâmetro inteiro referente à posição do *tap* do transformador k no ramo ij , fixado em um dos 33 valores possíveis do intervalo $-\overline{nt}_{kij} \leq t_{kij} \leq \overline{nt}_{kij}$, onde $\overline{nt}_{kij} = 16$;
- sw_{kij} : Variável binária que determina se a linha k no ramo ij está ligada ou não;

Neste modelo matemático modificado, a equação (81) representa a função de custo de geração incluindo os cortes de carga ativa e reativa, o qual é representado pela equação (82). As equações (83)–(86) representam os limites dos cortes de carga ativa e reativa nas barras do sistema.

As equações (87) e (88) representam os balanços de potência ativa e reativa do sistema respectivamente, de acordo com a lei das correntes de Kirchhoff. Os cálculos dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos são representados pelas equações (89)–(92), em conformidade à lei das tensões de Kirchhoff para cada laço fundamental. As expressões (93), (94) e (95) representam os limites de tensão nas barras, e potência ativa e reativa geradas nas barras de geração, respectivamente.

Os limites de capacidade das linhas de transmissão são expressos por (96) e (97), e a expressão (98) impõe que o ângulo de tensão na barra de referência (*slack*) deve ser zero.

Por fim, as expressões (100), (101) e (102) representam os parâmetros discretos fornecidos pela meta-heurística, os quais são fixados no modelo matemático. A expressão (100) representa o parâmetro binário de chaveado do *shunt*, fixado em 0 ou 1, a expressão (101) denota também um parâmetro binário que determina a operação da linha, fixado em 0 ou 1, e a expressão (102) representa um parâmetro de natureza inteira que determina a posição do *tap* nos transformadores, onde o valor é fixado com um dos valores possíveis dentro do limite imposto em (99).

5.2 CÁLCULO DA FUNÇÃO OBJETIVO NA META-HEURÍSTICA BD-OTS

As variáveis que a meta-heurística BD deve representar em uma proposta de solução na metodologia BD-OTS, com base na formulação matemática do problema, (81)–(102), são as apresentadas na Tabela 9.

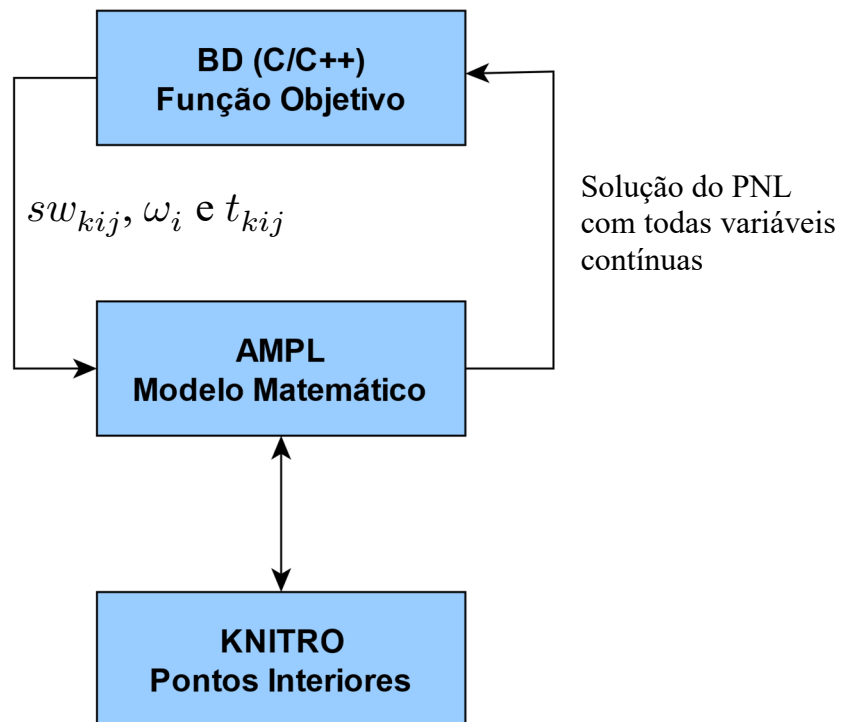
Tabela 9 – Variáveis do problema do FPO calculadas pela BD-OTS

Variável	Descrição	Tipo
sw_{kij}	Variável binária que determina se a linha k do ramo ij está ligada (1) ou desligada (0)	Binária
ω_i	Variável binária de chaveamento do <i>shunt</i> conectado à barra i	Binária
t_{kij}	Posição do <i>tap</i> do transformador na linha k do ramo ij , $\in [-16,16]$	Inteira

Fonte: Elaboração do autor.

O processo do cálculo da função objetivo utilizada pela meta-heurística BD-OTS é ilustrado na Figura 11. Como pode ser observado nessa figura, as variáveis sw_{kij} , ω_i e t_{kij} descritas na Tabela 9 são passadas como parâmetros ao modelo matemático pelo AMPL API, que realiza a interface entre o programa em C/C++ e o modelo escrito em AMPL, no qual o *solver* KNITRO é chamado para resolver o problema através do método de pontos interiores. Após a solução do modelo matemático pelo *solver*, os valores de todas as variáveis contínuas do modelo matemático, incluindo o valor da função objetivo, são fornecidos pelo AMPL API à meta-heurística.

A função objetivo é calculada em duas etapas da meta-heurística. Na construção/reconstrução do conjunto P e na construção do conjunto $Pool$ (Figura 12). A cada solução encontrada para ser incorporada a esses dois conjuntos, a função objetivo dessa solução é calculada.

Figura 11 – Cálculo da Função Objetivo da BD-OTS

Fonte: Elaboração do autor.

A seguir são detalhadas as principais etapas da meta-heurística BD para o problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão.

5.3 ETAPAS DA META-HEURÍSTICA BD-OTS

O método da busca dispersa aplicado ao problema de fluxo de potência ótimo com desligamento de linhas de transmissão (BD-OTS) apresentado aqui é semelhante ao método de BD para resolver o problema de FPO apresentado na Seção 4.4. Entretanto, nesse caso, apenas as variáveis discretas do modelo matemático são gerenciadas pela meta-heurística. Sendo assim, nessa seção serão explicadas apenas as diferenças fundamentais que essa abordagem apresenta em relação à abordagem apresentada na Seção 4.4.

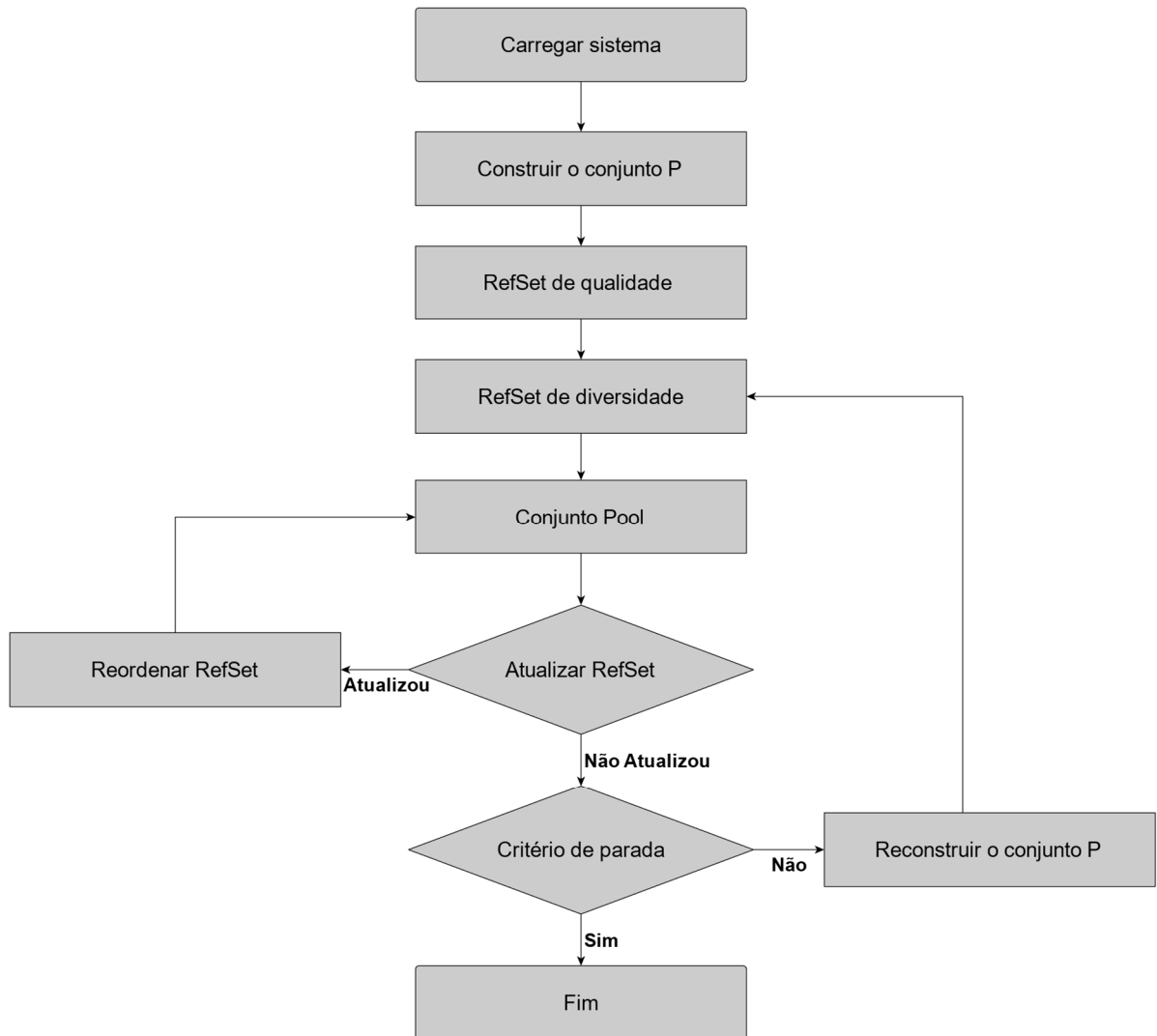
Para melhor entendimento das etapas dessa metodologia é apresentado na Figura 12 o fluxograma da meta-heurística BD-OTS, o qual é uma versão resumida do fluxograma da BD apresentado na Figura 7 da Seção 4.

Na etapa inicial do algoritmo da Figura 12 todas as informações do sistema de energia são lidas. As informações do sistema encontram-se em um arquivo texto, um para cada sistema, e estão no formato de leitura do AMPL.

A construção do conjunto P também utiliza a randomização controlada com memória baseada em frequência, entretanto esse processo é utilizado apenas para as variáveis inteiras, t_{kij} , que representam a posição dos *taps* dos transformadores. Já os valores das variáveis binárias ω_i (chaveamento *shunts*) e sw_{kij} (que determina o estado de operação das linhas) são obtidos de maneira totalmente aleatória. Nessa abordagem foi considerado $PSize = 100$, e para o conjunto $RefSet$ foi utilizada a configuração $b = 10$, sendo $b1 = 1$ e $b2 = 9$.

Os $b1$ melhores elementos do conjunto P são incorporados ao conjunto $RefSet$, representantes da parcela de elementos de qualidade de $RefSet$.

Os elementos de diversidade do conjunto $RefSet$ são obtidos considerando apenas variáveis discretas. A distância euclidiana entre os elementos de $RefSet$ e os elementos de P é calculada utilizando a expressão (103).

Figura 12 – Fluxograma da meta-heurística BD-OTS

Fonte: Elaboração do autor.

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^{nTaps} (t'_i - t''_i)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^{nShunts} |\omega'_i - \omega''_i|} + \sqrt{\sum_{i=1}^{nLinhas} |sw'_i - sw''_i|} \quad (103)$$

Em que:

- Ω_l : Conjunto de linhas do sistema;
- t'_i : Posição do *tap* do i -ésimo transformador da solução presente no conjunto P ;
- t''_i : Posição do *tap* do i -ésimo transformador da solução presente no conjunto $RefSet$;
- ω'_i : Valor binário do i -ésimo *shunt* da solução presente no conjunto P ;
- ω''_i : Valor binário do i -ésimo *shunt* da solução presente no conjunto $RefSet$;
- sw'_i : Valor binário do chaveamento da linha i da solução presente no conjunto P ;

- sw_i'' : Valor binário do chaveamento da linha i da solução presente no conjunto $RefSet$;
- $nTaps$: Número de $taps$ dos transformadores;
- $nShunts$: Número de $shunts$;
- $nLinhas$: Número de linhas.

Para cada elemento constante no conjunto P , é encontrada a menor distância euclidiana (103) entre os elementos do conjunto $RefSet$. Seleciona-se o elemento de P que possuir a maior distância entre as mínimas.

A combinação das soluções para gerar o conjunto $Pool$ também é realizada utilizando combinação de dois a dois elementos de $RefSet$ (conjunto $S(x' \text{ e } x'')$), gerando-se assim três soluções testes, conforme exemplificado na Figura 8 mostrada no Capítulo 4. Entretanto, nesse caso utiliza-se apenas as variáveis discretas para realizar as combinações.

A expressão (104) é utilizada para realizar a combinação das variáveis inteiras ($taps$) entre as soluções x' e x'' .

$$\begin{aligned}
 t_i \text{ da combinação 1} &= t_i' - \text{round}(d_{t_i}) \\
 t_i \text{ da combinação 2} &= t_i' + \text{round}(d_{t_i}) \\
 t_i \text{ da combinação 3} &= t_i'' + \text{round}(d_{t_i}) \\
 &\text{para } i = 1, 2, \dots, nTaps
 \end{aligned} \tag{104}$$

Em que:

- $d_{t_i} = r \frac{t_i'' - t_i'}{2}$: Corresponde a um incremento da variável t_i correspondente à posição do tap do transformador da linha i ;
- r : Número aleatório entre 0 e 1;
- t_i' : Posição do tap do i -ésimo transformador da solução x' do subconjunto S ;
- t_i'' : Posição do tap do i -ésimo transformador da solução x'' do subconjunto S ;
- $nTaps$: Número de posições dos $taps$ dos transformadores.

Caso o valor de alguma das três combinações mostradas na expressão (104) fique fora do seu limite, ou seja, fora do intervalo $[-16, 16]$, o valor mínimo ou máximo será assumido, dependendo do caso.

A combinação das variáveis binárias também utiliza a técnica utilizada por Laguna e Martí (2003). Nesse caso, como se tem duas variáveis binárias, tem-se dois valores $score$, como apresentados nas expressões (105) para as variáveis ω_i e (106) para as variáveis sw_i .

$$score_{\omega_i} = \frac{VFobj_1 * \omega'_i + VFobj_2 * \omega''_i}{VFobj_1 + VFobj_2} \quad (105)$$

para $i = 1, 2, \dots, nShunts$

$$score_{sw_i} = \frac{VFobj_1 * sw'_i + VFobj_2 * sw''_i}{VFobj_1 + VFobj_2} \quad (106)$$

para $i = 1, 2, \dots, total \text{ de linhas}$

Em que:

- $VFobj_1$: Valor da função objetivo da solução x' ;
- $VFobj_2$: Valor da função objetivo da solução x'' ;
- ω'_i : Valor do i -ésimo *shunt* (0 ou 1) da solução x' ;
- ω''_i : Valor do i -ésimo *shunt* (0 ou 1) da solução x'' ;
- sw'_i : Valor (0 ou 1) que determina se a i -ésima linha da solução x' estará ligada ou não;
- sw''_i : Valor (0 ou 1) que determina se a i -ésima linha da solução x'' estará ligada ou não;
- $nShunts$: Número de *Shunts* do sistema.

O valor dos *shunts* de cada uma das soluções *trial* é determinado de acordo com a expressão (107), e os valores das variáveis sw_i de acordo com a expressão (108).

$$\omega_i = \begin{cases} 1, & \text{se } r \leq score_{\omega}(i) \\ 0, & \text{se } r > score_{\omega}(i) \end{cases} \quad (107)$$

para $i = 1, 2, \dots, nShunts$

$$sw_i = \begin{cases} 1, & \text{se } r \leq score_{sw}(i) \\ 0, & \text{se } r > score_{sw}(i) \end{cases} \quad (108)$$

para $i = 1, 2, \dots, total \text{ de linhas}$

Em que:

- r : Valor aleatório entre 0 e 1;
- ω_i : i -ésimo *shunt* de cada solução *trial*;
- sw_i : Chaveamento da linha i de cada solução *trial*;

Nessa etapa de combinação das soluções é utilizado o recurso de programação paralela através da biblioteca OpenMP, de maneira idêntica à utilizada na metodologia BD-FPO, conforme foi detalhado na Seção 4.4.

Após concluir a montagem do conjunto *Pool* utilizando as combinações das soluções, o conjunto *RefSet* é atualizado com as b melhores soluções da união entre os dois conjuntos $Pool \cup RefSet$.

Se houver atualização do conjunto *RefSet*, esse é reordenado da solução de melhor qualidade para a pior, e um novo conjunto *Pool* é construído através das combinações das soluções do *RefSet* atualizado.

Caso o conjunto *RefSet* não seja atualizado, ou seja, caso a união dos conjuntos $Pool \cup RefSet$ não produza soluções melhores que as já constantes no *RefSet*, é verificado o critério de parada, que nesse caso consiste em um número máximo de iterações e/ou um número máximo de iterações sem obter soluções de melhor qualidade.

Se o critério de parada não for satisfeito, um novo conjunto *P* é construído, e as *b2* soluções do conjunto *RefSet* são substituídas pelas soluções mais diversas do conjunto *P* em relação as *b1* soluções de *RefSet*.

No final do processo a solução do problema encontra-se no primeiro elemento/solução do conjunto *RefSet*, pois esse conjunto é reordenado da solução de melhor qualidade para a pior sempre que sofre atualizações.

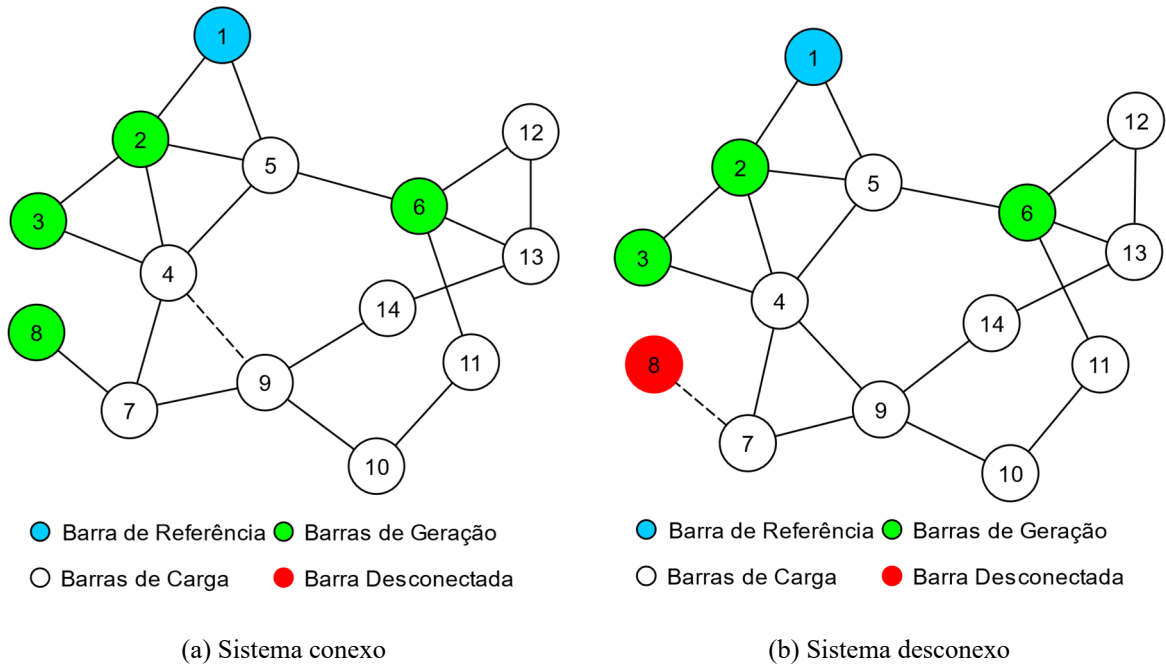
Diferentemente das outras implementações da meta-heurística de BD desse trabalho, nessa abordagem não se utilizou o processo de melhoria local das soluções. Isso se deve ao fato de que o cálculo da função objetivo tem um custo computacional relativamente alto, levando em consideração a quantidade de vezes em que ele já é executado na meta-heurística.

5.4 ESTRATÉGIA PARA MANTER O SISTEMA CONEXO

No problema do desligamento ótimo de linhas de transmissão é necessário que nenhuma barra fique desconectada do sistema e/ou algum conjunto de barras fique ilhado, de forma a não piorar os índices de confiabilidade da rede desnecessariamente.

A Figura 13 mostra, respectivamente, um sistema de 14 barras conexo e outro desconexo. As linhas tracejadas representam linhas de transmissão desligadas e as contínuas indicam as que estão ligadas.

Como pode ser observado na Figura 13 (a), a topologia possui uma linha desligada entre a barra 4 e 9, porém o sistema está conexo, ou seja, não há nenhuma barra ou conjunto de barras desconectado da topologia do sistema. Já na topologia da Figura 13 (b) a linha que conecta a barra 7 à barra 8 está desligada, e nesse caso a barra 8 está desconectada do sistema.

Figura 13 – Exemplos de topologias conexa e desconexa

Fonte: Elaboração do autor.

Na meta-heurística BD-OTS é implementada uma estratégia para que as soluções obtidas forneçam sempre um sistema conexo. Toda vez que uma solução é obtida, seja na etapa da construção/reconstrução do conjunto P ou na construção do conjunto $Pool$, a solução é submetida a essa estratégia que fará o religamento de linhas caso seja necessário. A Figura 14 mostra o fluxograma do algoritmo dessa estratégia.

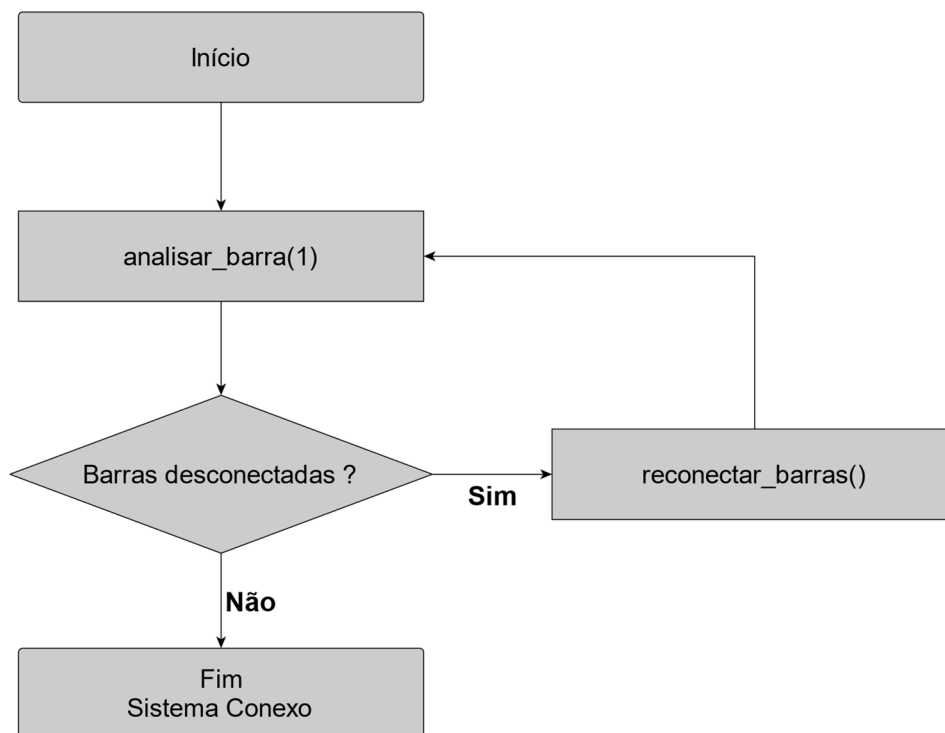
Como pode ser observado na Figura 14, a estratégia apresentada possui duas etapas principais, `analisar_barra(1)` e `reconectar_barras()`. Na primeira etapa (`analisar_barra(1)`) um algoritmo recursivo analisa cada barra do sistema, iniciando a partir da barra 1, e alimenta um vetor binário em que cada posição i deste vetor indica se a barra i está conectada ou não à topologia. O pseudocódigo deste algoritmo é mostrado na Figura 15.

A informação das barras desconectadas do sistema, através deste vetor, é em seguida passada à segunda etapa da estratégia (`reconectar_barras()`), na qual irá de maneira gulosa religar apenas uma linha do sistema. Na Figura 16 o pseudocódigo do algoritmo da segunda etapa (`reconectar_barras()`) é apresentado.

Como pode ser observado no algoritmo da Figura 16, é realizada uma varredura nas barras do sistema a partir da primeira, e quando for encontrada uma barra desconectada, é realizada uma outra varredura nas linhas do sistema a procura de uma linha desligada e que esteja relacionada à barra desconectada. Quando essa linha for encontrada, ela é religada e o processo

se encerra. O objetivo de religar apenas uma linha nesse algoritmo, é devido ao fato de que essa ação pode conectar outras barras do sistema, no caso por exemplo, conectar um grupo de barras ilhado pelo motivo dessa linha estar antes desligada.

Figura 14 – Fluxograma da estratégia para manter o sistema conexo



Fonte: Elaboração do autor.

Após religar uma linha do sistema, a primeira etapa é novamente chamada para verificar se há barras desconectadas, e esse processo (Figura 14) se repete até não existir mais barras desconectadas.

A avaliação das meta-heurísticas de tipo BD apresentadas nesse trabalho será apresentada no próximo capítulo. Primeiramente os resultados da metodologia BD-FMR que otimiza funções multimodais restritas serão apresentados, em seguida, os resultados da solução do problema de FPO pela metodologia BD-FPO, seguidos pelos resultados do problema de OTS pela metodologia BD-OTS. Por fim, a avaliação dos resultados do problema de OTS utilizando o modelo DC no modelo AC será realizada com o objetivo de mostrar que nem todas as soluções do problema de OTS utilizando o modelo DC são factíveis na prática.

Figura 15 – Algoritmo recursivo que analisa barras desconectadas do sistema

```

Função analisar_barra(i)
início
    k = procurar uma linha ligada (sw=1), não analisada ainda,
        que contenha a barra i e que não foi marcada como conectada

    se encontrar a linha então
        j = obter a outra barra da linha

        marcar a linha k como analisada

        marcar as barras i e j como conectadas

        analisar_barra(i)

        analisar_barra(j)

    fim-se
fim

```

Fonte: Elaboração do Autor.

Figura 16 – Algoritmo que reconecta barras para manter o sistema conexo

```

Função reconectar_barras()
início

    conectou = Falso
    i = 1

    Enquanto (i <= n° de barras) e (conectou == Falso), faça

        se a barra i estiver desconectada

            j = 1

            Enquanto (j <= n° de linhas) E (conectou == Falso), faça

                se (linha j estiver desligada) E (barra i pertencer a essa linha)

                    Religar a linha j
                    conectou = Verdadeiro

                fim-se

                j = j + 1

            fim-Enquanto

        fim-se

        i = i + 1

    fim-Enquanto

fim

```

Fonte: Elaboração do Autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados resultados dos testes realizados utilizando as implementações do algoritmo de busca dispersa. Primeiramente serão apresentados os testes realizados com a implementação que resolve problemas de funções multimodais restritas (BD-FMR). Em seguida, são apresentados os resultados dos testes realizados com dois sistemas IEEE para solução do problema de FPO por meio da metodologia BD-FPO. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos testes realizados com onze sistemas IEEE utilizando a metodologia BD-OTS, para solução do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão.

6.1 FUNÇÕES MULTIMODAIS RESTRITAS – BD-FMR

Com o objetivo de se avaliar a potencialidade da meta-heurística de BD para resolver problemas de otimização considerando funções multimodais restritas, o algoritmo utilizando a metodologia apresentada na Seção 4.3 foi implementado e testado com onze funções multimodais restritas conhecidas da literatura. Essas funções foram utilizadas em diversos trabalhos, e os resultados destes trabalhos, que podem ser encontrados em Koziel e Michalewicz (1999), são comparados aqui com os resultados obtidos pela BD. O algoritmo de BD foi implementado

em MATLAB® e a execução do algoritmo foi realizada em um microcomputador com processador Intel® Core™ i5-7400 de 3,00 GHz e 8 GB de RAM.

As funções utilizadas possuem diversas características, o que proporciona um cenário bem diversificado para os testes. A Tabela 10 mostra as características gerais destas funções.

Tabela 10 – Detalhes gerais das funções multimodais restritas utilizadas

Problema	n	Tipo de Função Objetivo	Relação Região Factível/Espaço de busca (%)	Desigualdades Lineares	Igualdades Não Lineares	Desigualdades Não Lineares	Número de Restrições Ativas na Solução
$\min G_1$	13	Quadrática	0,0111	9	0	0	6
$\max G_2$	20	Não linear	99,8474	0	0	2	1
$\max G_3$	20	Polinomial	0,0000	0	1	0	1
$\min G_4$	5	Quadrática	52,1230	0	0	6	2
$\min G_5$	4	Cúbica	0,0000	2	3	0	3
$\min G_6$	2	Cúbica	0,0066	0	0	2	2
$\min G_7$	10	Quadrática	0,0003	3	0	5	6
$\max G_8$	2	Não linear	0,8560	0	0	2	0
$\min G_9$	7	Polinomial	0,5121	0	0	4	2
$\min G_{10}$	8	Linear	0,0010	3	0	3	6
$\min G_{11}$	2	Quadrática	0,0000	0	1	0	1

Fonte: Koziel e Michalewicz (1999).

A coluna 4 da Tabela 10, que representa a relação entre a região factível e o espaço de busca, foi obtida experimentalmente através da geração de um milhão de pontos aleatórios do espaço de busca do problema, como apresentado em Koziel e Michalewicz (1999). As funções testes são listadas no Apêndice A deste trabalho.

Como foi discutido na Seção 4.3, a metodologia utiliza dois métodos de melhoria local, um baseado na sensibilidade da função objetivo e o outro no método simplex de Nelder-Mead. Como pode ser visto na Tabela 11, apenas para os problemas G_1 , G_2 e G_8 foi utilizado o método baseado na sensibilidade da função objetivo, para as demais funções foi utilizado o método simplex. Essa escolha foi feita com base na realização de vários testes com o algoritmo aplicado aos problemas.

Ainda observando a Tabela 11, nota-se que embora o tempo gasto na solução de alguns problemas foi alto, com poucas iterações e, conseqüentemente, um curto período de tempo, foi possível obter soluções de boa qualidade. A exemplo disso, observa-se o caso G_5 (Tabela 11), o qual possui função objetivo cúbica, duas restrições de desigualdade lineares e três restrições de igualdade não lineares, o que dificulta muito a convergência para a solução ótima. Nesse

caso, com apenas uma iteração e com tempo de 2 milissegundos, conseguiu-se praticamente a solução ótima do problema.

Tabela 11 – Resultados da meta-heurística BD para as funções multimodais restritas

Problema	Melhoria Local	Solução de Qualidade			Melhor Solução		
		Iterações	Tempo (s)	Valor	Iterações	Tempo (s)	Valor
$\min G_1$	Sensibilidade da FO	1	0,353	-14,98249	2	0,434	-15
$\max G_2$	Sensibilidade da FO	11	40,693	0,80109	20	70,970	0,80276
$\max G_3$	Simplex	1	115,075	0,9990816854	2	586,353	1,0000000056
$\min G_4$	Simplex	–	–	–	1	3,874	-30665,53867
$\min G_5$	Simplex	1	0,283	5126,4981116045	10	1,106	5126,4981096162
$\min G_6$	Simplex	–	–	–	1	0,605	-6961,88176
$\min G_7$	Simplex	1	43	24,30789	51	570,255	24,30623
$\max G_8$	Sensibilidade da FO	–	–	–	1	0,213	0,0958250413
$\min G_9$	Simplex				1	9,729	680,6300608794
$\min G_{10}$	Simplex	1	133,052	7047,9874555756	9	730,295	7047,8207201713
$\min G_{11}$	Simplex	–	–	–	1	1,364	0,7499999750

Fonte: Elaboração do autor.

Um aspecto observado foi a influência do método de combinação das soluções para geração do conjunto *Pool*, descrito na Seção 4.3, na convergência das soluções. Observou-se que em alguns casos, como, por exemplo, no problema G_1 , o algoritmo convergiu para a solução ótima sem utilizar nenhum método de melhoria local. Entretanto, o tempo gasto para isso foi maior. Isso indica que o método de combinação das soluções para a geração do conjunto *Pool* contribuiu bastante para o sucesso do algoritmo de BD.

Observou-se também que, o número $b1$ de elementos representantes das soluções de qualidade do conjunto *RefSet* influenciou bastante nos casos G_2 , G_5 , G_7 , G_9 , G_{10} e G_{11} em que foi necessário aumentar o número de elementos de diversidade. Sendo assim, para esses casos foram utilizados os valores $b1 = 1$ e $b2 = 9$. Para o problema G_6 utilizou-se $b1 = 2$ e $b2 = 8$. Para os demais problemas foram utilizados os valores $b1 = 5$ e $b2 = 5$.

A comparação dos resultados das funções objetivos da meta-heurística de BD proposta nesse trabalho com os resultados de outros trabalhos que utilizaram algoritmos evolutivos é apresentada na Tabela 12. Como pode ser observado nessa tabela, a meta-heurística de BD apresentou valores melhores da função objetivo nos problemas G_6 e G_{10} . Nos demais problemas, os valores ficaram muito próximos.

Tabela 12 – Comparação dos resultados da BD com outros trabalhos

Problema	Melhor Solução Conhecida: Koziel e Michalewicz (1999)	Koziel e Michalewicz (1999)	Runarssone Yao (2000)	Farmani e Wright (2003)	Venkatramane Yen (2005)	Zini (2009)	Busca Dispersa
$\min G_1$	-15	-14,7864	-15	-15	-14,9999	-14,99990	-15
$\max G_2$	0,803553	0,799530	0,803515	0,802970	0,803190	0,80318350	0,80276
$\max G_3$	1,0	0,9997	1,0000	1,0000	1,000	1,0000	1,00000000
$\min G_4$	-30665,5	-30664,900	-30665,539	-30665,500	-30665,5312	-30665,53924	-30665,53867
$\min G_5$	5126,4976	NC	5126,4970	5126,9890	5126,63049	5126,33096	5126,4981096162
$\min G_6$	-6961,8138	-6952,100	-6961,814	-6961,800	-6961,17856	-6961,74716	-6961,88176
$\min G_7$	24,3062091	24,620	24,307	24,480	24,410977	24,404733	24,30623
$\max G_8$	0,095825	0,095825	0,095825	0,095825	0,095825	0,095825	0,0958250413
$\min G_9$	680,6300573	680,91	680,63	680,64	680,7622	680,73512	680,6300608794
$\min G_{10}$	7049,330923	7147,90	7054,32	7061,34	7060,5528	7060,11542	7047,8207201713
$\min G_{11}$	0,75000455	0,75	0,75	0,75	0,7490	0,74991	0,7499999750

Fonte: Elaboração do autor.

Com esses resultados conclui-se que, o método de BD obteve resultados comparáveis aos melhores métodos que resolveram esses mesmos problemas. Entretanto, prova-se aqui o potencial do método para resolver problemas de funções multimodais contínuas e restritas. Em se tratando de um método que pode ser facilmente adaptado para resolver problemas que possuam variáveis contínuas e discretas, esse método se torna bastante promissor para resolver o problema de FPO.

A metodologia BD-FMR, juntamente com os resultados mostrados nessa seção, foi publicado no L Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, realizado em 2018 (GARCIA; MACEDO; ROMERO, 2018).

A solução completa de todos os onze problemas testes, bem como suas respectivas formulações matemáticas podem ser encontradas no Apêndice A deste trabalho.

6.2 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FPO PELA ABORDAGEM BD-FPO

Nesta seção são apresentados os resultados da solução do problema de FPO utilizando a abordagem BD-FPO apresentada na Seção 4.4. O algoritmo de BD foi implementado na linguagem C/C++ e a execução do algoritmo foi realizada em um microcomputador com processador Intel® Core™ i5-7400 de 3,00 GHz e 8 GB de RAM.

A metodologia BD-FPO foi testada com três sistemas teste, de 6, 14 e 57 barras, disponíveis em Coffrin, Gordon e Scott (2016), sendo que suas características gerais podem ser verificadas na Tabela 13 e na Tabela 14, e suas características completas podem ser vistas no Anexo A deste trabalho.

Tabela 13 – Características gerais dos sistemas teste utilizados pela BD-FPO – Parte 1

Sistema	Nº de Barras	Nº de Linhas	Barras de Geração	Barras de Carga	Nº de Transformadores	Nº de Shunts
nesta_case6_ww	6	11	3	3	1	0
nesta_case14_ieee	14	20	5	9	3	1
nesta_case57_ieee	57	80	7	50	17	3

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 14 – Características gerais dos sistemas teste utilizados pela BD-FPO – Parte 2

Sistema	Carga Ativa Total (MW)	Carga Reativa Total (MVar)	Capacidade de Geração Ativa (MW)	Capacidade de Geração Reativa (MVar)
nesta_case6_ww	210,000	210,500	530,000	300,000
nesta_case14_ieee	259,000	73,500	425,000	130,000
nesta_case57_ieee	1250,800	336,400	1377,000	611,000

Fonte: Elaboração do autor.

A fim de comparar os resultados, esses mesmos sistemas foram resolvidos com o *solver* KNITRO, o qual utiliza o método de pontos interiores, considerando a modelagem matemática do problema de FPO apresentada nas expressões (81)–(102) implementada na linguagem AMPL, considerando-se sempre ligadas todas as linhas dos sistemas.

A Tabela 15 mostra os valores das funções objetivos em (US\$/hora) obtidos a partir das soluções do problema de FPO para os três sistemas teste utilizando a metodologia de BD-FPO e o *solver* KNITRO.

Tabela 15 – Comparação das funções objetivo referentes aos resultados da solução do problema de FPO por AMPL+KNITRO e BD-FPO

Sistema	AMPL+KNITRO		BD-FPO	
	Função Objetivo (US\$/hora)	Factibilidade	Função Objetivo (US\$/hora)	Factibilidade
nesta_case6_ww	3127,5704	Factível	3137,0032	Factível
nesta_case14_ieee	243,9903	Factível	207,4335	Infactível
nesta_case57_ieee	1173,0094	Factível	993,5857	Infactível

Fonte: Elaboração do autor.

Como pode ser observado na Tabela 15, a metodologia BD-FPO não conseguiu soluções factíveis para o problema em dois casos, nos sistemas de 14 e 57 barras, e o modelo utilizando

o *solver* conseguiu soluções factíveis para os três casos. A infactibilidade se deu pelo balanço de potência nas barras, sendo que todos os outros limites, incluindo os limites de fluxo de potência aparente nas linhas de transmissão foram respeitados. A Tabela 16 e a Tabela 17 mostram os balanços de potência nas barras para as soluções dos sistemas de 57 e 14 barras obtidas pela metodologia BD-FPO, respectivamente.

Nota-se que, embora os balanços de potência não foram fechados, valores estes que deveriam ser todos zeros, os balanços apresentam valores absolutos entre 0 e 0,483503, sendo que o valor máximo de balanço alcançado foi de 0,483503 em valor absoluto na barra 10 do sistema de 57 barras.

Tabela 16 – Balanço de potência da solução do sistema de 57 barras obtida pela metodologia BD-FPO

Barra	Balanço Ativo (p.u.)	Balanço Reativo (p.u.)	Barra	Balanço Ativo (p.u.)	Balanço Reativo (p.u.)	Barra	Balanço Ativo (p.u.)	Balanço Reativo (p.u.)
1	0	0	20	-0,0189501	-0,0113264	39	-0,0000023	-0,0002829
2	0,0000199	0	21	-0,0177613	-0,0221726	40	0,0002878	-0,0148688
3	0,0065131	0	22	-0,0036395	-0,2623530	41	-0,0060412	-0,0040809
4	-0,0025667	-0,0000147	23	-0,0357165	-0,1806631	42	-0,0702035	-0,0434374
5	-0,0000177	-0,0468207	24	-0,0003560	0,0000646	43	-0,0156045	-0,0039487
6	0,0000026	0,0000000	25	-0,0013787	0,0026059	44	-0,0082813	0,0013424
7	-0,0000269	0,0000098	26	-0,0068732	0,0004134	45	-0,0089601	0,0049717
8	0,0000000	0,0000000	27	-0,1249065	0,0437367	46	-0,0696134	-0,0129991
9	0,0000007	0,0000000	28	-0,0001997	0,3158482	47	-0,2977843	-0,0035668
10	-0,4835030	-0,0000078	29	-0,0001877	0,0000103	48	-0,0588413	-0,0002642
11	-0,0567433	-0,0009296	30	-0,2053372	-0,0000083	49	-0,0476056	-0,0000115
12	0,0000244	0,0000000	31	-0,0001368	-0,0046398	50	-0,0001069	0,0748200
13	-0,0484500	-0,0000078	32	0,0006117	-0,0194928	51	-0,0864286	0,0002246
14	-0,0276393	0,0000012	33	0,0038377	-0,0078879	52	-0,0009515	-0,2479108
15	0,0000018	0,0026576	34	0,0029129	-0,0026582	53	-0,1322834	-0,0378173
16	-0,0000250	-0,0000068	35	0,0016755	-0,2048718	54	-0,0850864	-0,0007927
17	-0,0000161	-0,0000004	36	0,0007380	-0,0007063	55	-0,0088909	-0,0025129
18	-0,1114701	-0,0025549	37	0,0000454	-0,0015221	56	-0,0139476	-0,0481759
19	-0,0290146	-0,0070235	38	-0,0094853	-0,0061552	57	-0,0007803	-0,0004177

Fonte: Elaboração do autor.

Já os balanços de potência do sistema de 14 barras (Tabela 17) apresentaram valores melhores em relação aos balanços de potência do sistema de 57 barras (Tabela 16).

A Tabela 18 mostra as perdas de potência ativa e como pode ser observado, não há uma grande diferença entre as perdas de potência entre as soluções do FPO pela meta-heurística e pelo *solver*, além disso, o foco principal deste problema de FPO é minimizar os custos de geração, e não as perdas de potência.

Um outro fator que deve ser discutido, é o tempo de execução dos algoritmos. A Tabela 19 apresenta os tempos gastos na solução do problema de FPO pelas duas abordagens.

Tabela 17 – Balanço de potência da solução do sistema de 14 barras obtida pela metodologia BD-FPO

Barra	Balanço Ativo (p.u.)	Balanço Reativo (p.u.)	Barra	Balanço Ativo (p.u.)	Balanço Reativo (p.u.)
1	0	0	8	-0,0099995	-0,0054296
2	0	0	9	0,0099640	0,0083173
3	0,0002817	0,0041566	10	-0,0386617	-0,0016158
4	-0,0092388	-0,0067571	11	-0,0950313	-0,0096054
5	-0,0063526	-0,0011894	12	-0,0861021	-0,0498333
6	0,0099713	0,0099671	13	-0,0619127	-0,0449112
7	-0,0099995	-0,0054296	14	-0,0092841	-0,0091736

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 18 – Perdas de potência ativa

Sistema	AMPL+KNITRO (MW)	BD-FPO (MW)
nesta_case6_ww	6,8006	6,871405
nesta_case14_ieee	12,2568	10,3413334
nesta_case57_ieee	15,3553	11,8453039

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 19 – Tempo gasto para obtenção das soluções do problema de FPO pelas abordagens AMPL+KNITRO e BD-FPO

Sistema	AMPL+KNITRO (s)	BD-FPO (s)
nesta_case6_ww	0,08	29,00
nesta_case14_ieee	0,16	93,69
nesta_case57_ieee	0,45	968,20

Fonte: Elaboração do autor.

Como pode ser observado na Tabela 19, o tempo gasto pela abordagem BD-FPO é bastante superior em relação ao AMPL+KNITRO. Isso se deve ao fato de que o algoritmo de busca dispersa trabalha com população de soluções em que, a partir do conjunto *RefSet*, gera-se um conjunto *Pool* bem maior, com combinações de dois a dois elementos de *RefSet*, como foi descrito na Seção 4.3 deste trabalho. Além disso, a melhoria local utilizando o método simplex de Nelder-Mead, como também já descrito no Capítulo 4, também demanda um tempo razoável de execução. No Apêndice B são mostradas todas as informações referentes às soluções obtidas pela metodologia BD-FPO.

Com os resultados apresentados, pode-se concluir que, embora a metodologia BD-FPO não conseguiu soluções factíveis do problema de FPO, a factibilidade ficou próxima de ser obtida. A construção dessa metodologia foi extremamente útil para que a construção da metodologia para solução do FPO com desligamento de linhas de transmissão (BD-OTS), objetivo principal deste trabalho, fosse possível.

6.3 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FPO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO (BD-OTS)

Os resultados e discussões a respeito dos testes realizados utilizando a metodologia BD-OTS, a qual resolve o problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão, detalhada no Capítulo 5, são apresentados nesta seção.

O algoritmo de BD utilizado na metodologia BD-OTS foi implementado na linguagem C/C++, a modelagem matemática foi feita utilizando a linguagem AMPL, sendo que os subproblemas de PNL foram resolvidos com o *solver* KNITRO e a execução dos testes foi realizada em um microcomputador com processador Intel® Core™ i5-7400 de 3,00 GHz e 8 GB de RAM.

Para avaliar o potencial da metodologia BD-OTS foram utilizados onze sistemas teste, propostos por Coffrin, Gordon e Scott (2016). Segundo os autores, nos últimos anos os trabalhos relacionados com a otimização de sistemas de potência utilizaram sistemas teste desenvolvidos desde a década de 1960, com objetivo de validar e avaliar suas metodologias. Entretanto, não é claro se esses sistemas são adequados para os estudos de otimização de sistemas de potência. O trabalho de Coffrin, Gordon e Scott (2016) analisa todos os equipamentos utilizados nesses sistemas e descobre que muitos dos casos teste tradicionais estão sem as principais restrições de operação de rede, tais como limites térmicos de linhas, capacidades dos geradores, dentre outros. Além disso, o trabalho propõe e disponibiliza uma base de dados denominada *The NICTA Energy System Test Case Archive* (NESTA) com diversos sistemas teste estendidos a partir dos dados já existentes na literatura, incorporando restrições antes ausentes nos sistemas originais, e isso é feito com base em uma variedade de fontes de dados disponíveis publicamente.

Considerando relevantes os argumentos apresentados em Coffrin, Gordon e Scott (2016), e que diversos trabalhos atuais vem utilizando a base de dados NESTA para avaliar suas metodologias, optou-se também na tese em utilizar os sistemas teste disponíveis na base NESTA. Foram utilizados dois sistemas de 14 barras, três de 30 barras, dois de 57 barras, dois de 118 barras e dois de 162 barras. A Tabela 20 e a Tabela 21 mostram as características gerais dos sistemas utilizados, e todas as demais destes sistemas podem ser verificadas no Anexo A deste trabalho.

Tabela 20 – Características gerais dos sistemas teste utilizados pela BD-OTS – Parte 1

Sistema	Nº de Barras	Nº de Linhas	Barras de Geração	Barras de Carga	Nº de Transformadores	Nº de Shunts
nesta_case14_ieee	14	20	5	9	3	1
nesta_case14_ieee_api	14	20	5	9	3	1
nesta_case30_fsr_api	30	41	6	24	0	2
nesta_case30_ieee	30	41	6	24	4	2
nesta_case30_ieee_api	30	41	6	24	4	2
nesta_case57_ieee	57	80	7	50	17	3
nesta_case57_ieee_api	57	80	7	50	17	3
nesta_case118_ieee	118	186	54	64	9	14
nesta_case118_ieee_api	118	186	54	64	9	14
nesta_case162_ieee_dtc	162	284	12	150	46	34
nesta_case162_ieee_dtc_api	162	284	12	150	46	34

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 21 – Características Gerais dos Sistemas Teste utilizados pela BD-OTS – Parte 2

Sistema	Carga Ativa Total (MW)	Carga Reativa Total (MVar)	Capacidade de Geração Ativa (MW)	Capacidade de Geração Reativa (MVar)
nesta_case14_ieee	259,000	73,500	425,000	130,000
nesta_case14_ieee_api	462,970	73,500	732,000	524,400
nesta_case30_fsr_api	206,710	107,200	819,000	751,600
nesta_case30_ieee	283,400	126,200	884,000	188,000
nesta_case30_ieee_api	471,260	126,200	1637,000	1137,400
nesta_case57_ieee	1250,800	336,400	1377,000	611,000
nesta_case57_ieee_api	1442,420	336,400	1749,000	1219,800
nesta_case118_ieee	4242,000	1438,000	7134,000	8170,000
nesta_case118_ieee_api	6880,950	1438,000	11056,000	13098,000
nesta_case162_ieee_dtc	7239,060	1174,620	9685,000	4213,200
nesta_case162_ieee_dtc_api	7650,570	1174,620	10917,000	5681,600

Fonte: Elaboração do autor.

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pela metodologia BD-OTS, os onze sistemas teste também foram resolvidos pelo *solver* KNITRO utilizando a modelagem matemática apresentada em (81)–(102), escrita na linguagem AMPL. Duas situações foram consideradas, na primeira fixou-se as variáveis $sw_{kij} = 1$ como parâmetros do modelo para não considerar o desligamento de linhas de transmissão, e na segunda situação considerou-se as variáveis sw_{kij} como incógnitas do modelo para que o método resolva também a otimização do desligamento de linhas de transmissão.

A Tabela 22 mostra os valores das funções objetivo obtidos das soluções do problema utilizando os sistemas teste com a metodologia BD-OTS e com o modelo implementado em

AMPL e resolvido com o *solver* KNITRO. Além disso, são mostrados os resultados das soluções desses mesmos sistemas apresentados no trabalho de Coffrin, Gordon e Scott (2016), denominados NESTA para simplificação, os quais foram obtidos por uma heurística para resolver o problema de FPO AC completo e não convexo, considerando todas as linhas ligadas.

Tabela 22 – Comparação dos valores das funções objetivo da solução dos sistemas teste pelo AMPL+KNITRO e BD-OTS

Sistema	NESTA (US\$/h)	AMPL + KNITRO (US\$/h)	AMPL+KNITRO com Desligamento de Linhas		BD-OTS	
			FO (US\$/h)	Redução (%)	FO (US\$/h)	Redução (%)
nesta_case14_ieee	244,05	243,9903	244,0017	0,02%	243,9663696	0,03%
nesta_case14_ieee_api	325,56	321,4390	324,5028	0,32%	321,0067139	1,40%
nesta_case30_ieee	204,97	204,9550	195,3063	4,71%	194,2417450	5,23%
nesta_case30_ieee_api	415,53	Infactível	Infactível	–	413,4252014	0,51%
nesta_case30_fsr_api	372,14	Não convergiu	207,1336	44,34%	205,1702728	44,87%
nesta_case57_ieee	1143,27	1173,0094	1147,7605	–0,39%	1141,9589840	0,11%
nesta_case57_ieee_api	1430,65	1427,4381	1436,8770	–0,44%	1427,3769530	0,23%
nesta_case118_ieee	3718,64	Infactível	3708,1298	0,28%	3708,1979980	0,28%
nesta_case118_ieee_api	10325,27	9980,2529	Não convergiu	–	9246,1884770	10,45%
nesta_case162_ieee_dtc	4230,23	4144,8901	Não convergiu	–	4145,3481450	2,01%
nesta_case162_ieee_dtc_api	6111,68	6017,2258	Não convergiu	–	6016,8076170	1,55%

Fonte: Elaboração do autor.

Como pode ser observado na Tabela 22 a metodologia BD-OTS conseguiu soluções factíveis para todos os sistemas testes utilizados, e apresentou melhores resultados em nove sistemas, sendo que, nos sistemas nesta_case118_ieee e nesta_case162_ieee_dtc os valores das funções objetivo são bastante próximos se comparados com as outras abordagens. Os resultados obtidos pela metodologia apresentada no trabalho de Coffrin, Gordon e Scott (2016), mostrados na coluna denominada NESTA, são de pior qualidade em relação aos resultados das outras três abordagens, com exceção de três casos para os dois sistemas de 57 barras utilizando AMPL+KNITRO.

Os modelos implementados em AMPL+KNITRO não conseguiram resolver todos os sistemas. O modelo implementado em AMPL+KNITRO considerando todas as linhas de transmissão ligadas não conseguiu soluções factíveis em dois sistemas, denominados

nesta_case30_ieee_api e nesta_case118_ieee, que apresentaram problemas nos balanços de potência ativa e reativa. Já para o sistema denominado nesta_case30_fsr_api, o *solver* não apresentou convergência.

Já o modelo que considerou o desligamento de linhas de transmissão implementado em AMPL+KNITRO não conseguiu convergência na solução dos sistemas nesta_case118_ieee_api, nesta_case162_ieee_dtc e nesta_case162_ieee_dtc_api. A solução do sistema nesta_case30_ieee_api é infactível, também devido a problemas nos balanços de potência ativa e reativa.

A Tabela 23, a Tabela 24 e a Tabela 25 mostram os resultados das variáveis discretas gerenciadas pela meta-heurística e utilizadas como parâmetros para o modelo matemático do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão apresentado nas expressões (81)–(102).

Tabela 23 – Variáveis binárias *shunts* gerenciadas pela meta-heurística

Sistema	Barras com Shunt Ligado	Barras com Shunt Desligado
nesta_case14_ieee, nesta_case14_ieee_api	9	–
nesta_case30_fsr_api	5, 24	–
nesta_case30_ieee, nesta_case30_ieee_api	10, 24	–
nesta_case57_ieee, nesta_case57_ieee_api	18, 25, 53	–
nesta_case118_ieee	5, 34, 37, 44, 45, 46, 48, 74, 79, 82, 83, 105, 107, 110	–
nesta_case118_ieee_api	5, 34, 46, 48, 79, 82, 105, 107, 110	37, 44, 45, 74, 83
nesta_case162_ieee_dtc	5, 25, 26, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 45, 46, 56, 66, 67, 68, 71, 77, 80, 81, 82, 84, 85, 86, 90, 100, 104, 105, 154, 158, 160	1, 75, 112
nesta_case162_ieee_dtc_api	25, 26, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 45, 46, 56, 66, 67, 68, 71, 77, 81, 82, 84, 85, 86, 90, 100, 104, 105, 154, 158	1, 5, 75, 80, 112, 160

Fonte: Elaboração do autor.

Na Tabela 23 são apresentados os valores binários correspondentes aos estados dos *shunts*. Como pode ser observado, apenas o sistema nesta_case118_ieee_api e os dois sistemas de 162 barras apresentaram *shunts* desligados.

A Tabela 24 apresenta quais linhas foram desligadas dos respectivos sistemas, em que a variável que gerencia a operação das linhas é binária. Note que houve quatro sistemas em que a solução do problema não forneceu linhas desligadas: o sistema nesta_case14_ieee, os dois de 57 barras e o sistema nesta_case162_ieee_dtc. Por fim, a Tabela 25 apresenta os resultados das variáveis inteiras que representam as posições dos *taps* dos transformadores.

Tabela 24 – Linhas desligadas fornecidas pela meta-heurística na variável binária sw_{kij}

Sistema	Linhas desligadas (k)
nesta_case14_ieee	–
nesta_case14_ieee_api	9
nesta_case30_fsr_api	9, 26, 35, 41
nesta_case30_ieee	3, 20, 23, 32
nesta_case30_ieee_api	26
nesta_case57_ieee, nesta_case57_ieee_api	–
nesta_case118_ieee	11, 81, 115, 146, 162, 169
nesta_case118_ieee_api	43, 58, 78, 79, 92, 99, 102, 105, 145, 146, 149, 158, 186
nesta_case162_ieee_dtc	–
nesta_case162_ieee_dtc_api	24, 32, 41, 243, 273

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 25 – Posições dos *taps* fornecidas pela meta-heurística na variável inteira t_{kij}

Sistema	Barra de origem (i) – destino (j) (posição do <i>tap</i>)
nesta_case14_ieee	4-7(-1), 4-9(16), 5-6(5)
nesta_case14_ieee_api	4-7(-5), 5-6(2)
nesta_case30_fsr_api	–
nesta_case30_ieee	6-9(-5), 6-10(5), 4-12(3), 28-27(7)
nesta_case30_ieee_api	6-9(0), 6-10(-3), 4-12(2), 28-27(1)
nesta_case57_ieee	4-18(0), 4-18(-2), 21-20(-1), 24-25(8), 24-25(9), 24-26(-4), 7-29(-2), 34-32(4), 11-41(4), 15-45(6), 14-46(3), 10-51(1), 13-49(7), 11-43(6), 40-56(3), 39-57(2), 9-55(-6)
nesta_case57_ieee_api	4-18(0), 4-18(6), 21-20(-4), 24-25(11), 24-25(11), 24-26(0), 7-29(10), 34-32(13), 11-41(16), 15-45(8), 14-46(11), 10-51(9), 13-49(16), 11-43(13), 40-56(-1), 39-57(4), 9-55(10)
nesta_case118_ieee	8-5(5), 26-25(-9), 30-17(2), 38-37(5), 63-59(7), 64-61(-4), 65-66(3), 68-69(14), 81-80(4)
nesta_case118_ieee_api	8-5(16), 26-25(-16), 30-17(-3), 38-37(16), 63-59(16), 64-61(-16), 68-69(16), 81-80(-16)
nesta_case162_ieee_dtc	1-6(1), 4-115(7), 5-131(-11), 7-8(-1), 12-2(1), 18-37(-3), 20-53(-1), 22-39(-2), 24-25(-2), 26-76(0), 52-118(-6), 53-11(-2), 60-61(-2), 60-61(2), 66-11(10), 70-73(-8), 75-130(1), 79-74(-5), 89-86(2), 93-42(-11), 93-108(-3), 94-109(-16), 95-91(-2), 95-99(0), 96-101(-2), 97-44(-8), 98-93(-2), 104-34(-10), 105-38(-10), 110-112(-5), 110-114(-3), 112-121(0), 116-119(-8), 120-14(2), 128-72(2), 129-132(1), 133-134(0), 138-110(-1), 142-51(6), 144-141(-3), 148-116(0), 149-26(2), 149-26(4), 153-70(1), 153-70(-2), 157-55(-1)
nesta_case162_ieee_dtc_api	1-6(2), 4-115(2), 5-131(1), 7-8(1), 12-2(0), 18-37(-2), 20-53(-5), 22-39(-8), 24-25(-4), 26-76(0), 52-118(-4), 53-11(0), 60-61(0), 60-61(-2), 66-11(8), 70-73(-9), 75-130(0), 79-74(-1), 89-86(-6), 93-42(-11), 93-108(0), 94-109(-10), 95-91(-3), 95-99(1), 96-101(7), 97-44(-4), 98-93(-4), 104-34(-10), 105-38(-6), 110-112(-5), 110-114(-1), 112-121(3), 116-119(-7), 120-14(2), 128-72(3), 129-132(1), 133-134(-1), 138-110(0), 142-51(-1), 144-141(-2), 148-116(3), 149-26(2), 149-26(5), 153-70(-2), 157-55(-3)

Fonte: Elaboração do autor.

No Apêndice C deste trabalho são mostradas as informações completas referentes às soluções obtidas pela metodologia BD-OTS.

Um fator muito importante a ser observado é a conexidade da topologia dos sistemas de energia. Um otimizador de desligamento de linhas de transmissão não pode gerar uma solução em que haja barras ou conjunto de barras desconectados do sistema. A Tabela 26 mostra o número de linhas de transmissão desligadas e o número de barras desconectadas nas soluções obtidas por AMPL+KNITRO e BD-OTS.

Como pode ser visto na Tabela 26, seis soluções obtidas pelo modelo AMPL+KNITRO apresentaram barras desconectadas da topologia dos sistemas, enquanto que as onze soluções obtidas pela metodologia BD-OTS não apresentaram topologias com barras desconectadas. Isso se deve ao fato de que na metodologia BD-OTS é utilizada uma estratégia onde, sempre que uma solução é obtida pela meta-heurística, é verificada a conexidade da topologia do sistema, e se houver barras desconectadas, linhas são religadas para que a topologia do sistema fique totalmente conectada, como foi mostrado no Capítulo 5. Vale ressaltar que, na modelagem matemática escrita na linguagem AMPL, utilizando o *solver* KNITRO, não foi considerada nenhuma restrição que impedisse que barras ficassem desconectadas do sistema nas soluções obtidas.

Tabela 26 – Desligamento de linhas pelas abordagens AMPL+KNITRO e BD-OTS

Sistema	Nº de Linhas	AMPL+KNITRO		BD-OTS	
		Linhas Desligadas	Barras Desconectadas	Linhas Desligadas	Barras Desconectadas
nesta_case14_ieee	20	1	1	0	0
nesta_case14_ieee_api	20	0	0	1	0
nesta_case30_ieee	41	9	2	4	0
nesta_case30_ieee_api	41	–	–	1	0
nesta_case30_fsr_api	41	7	1	4	0
nesta_case57_ieee	80	14	1	0	0
nesta_case57_ieee_api	80	11	1	0	0
nesta_case118_ieee	186	22	2	6	0
nesta_case118_ieee_api	186	–	–	13	0
nesta_case162_ieee_dtc	284	–	–	0	0
nesta_case162_ieee_dtc_api	284	–	–	5	0

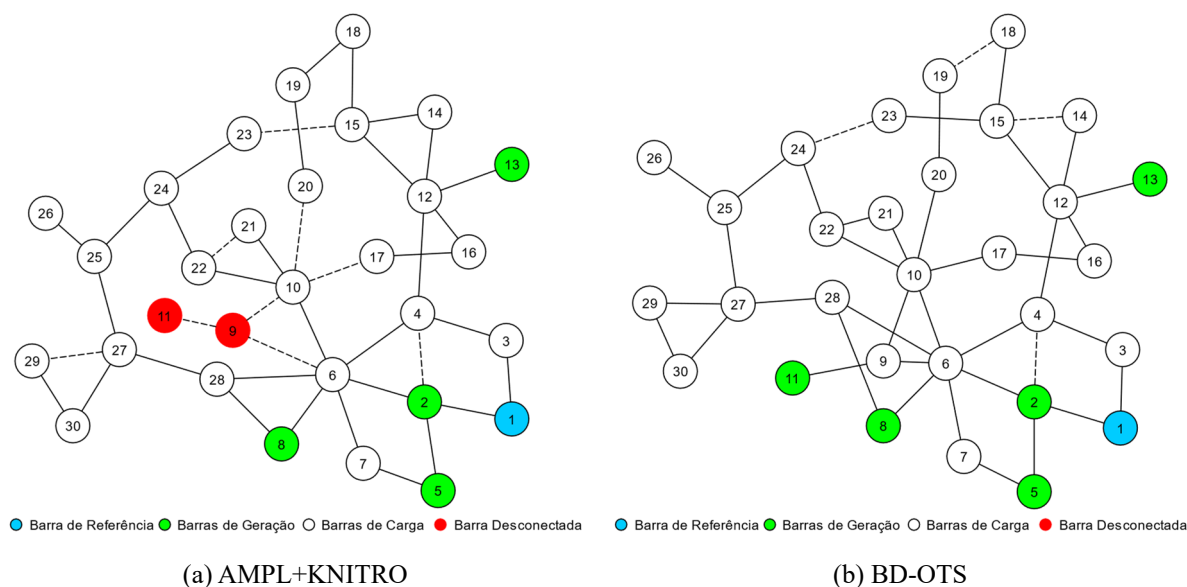
Fonte: Elaboração do autor.

A fim de mostrar graficamente o problema da conexidade, a Figura 17 ilustra as topologias fornecidas pelas metodologias AMPL+KNITRO, em que a solução apresenta barras desconectadas, e pela metodologia BD-OTS, em que não há barras desconectadas. As barras de geração são representadas pelos círculos verdes, as barras de carga por círculos na cor branca,

a barra de referência é representada pelo círculo azul e as barras desconectadas por círculos vermelhos. As linhas contínuas indicam que a linha de transmissão entre uma barra e a outra está ligada e as linhas tracejadas indicam que a linha está desligada.

É evidente que o desligamento de linhas de transmissão contribui para a redução dos custos de geração de energia. Como pode ser constatado na Tabela 22 e na Tabela 26, as soluções utilizando o desligamento de linhas de transmissão conseguiram um percentual de redução de custo considerável em relação aos valores obtidos pela metodologia utilizada em Coffrin, Gordon e Scott (2016), a qual não considerou o desligamento de linhas. O caso mais expressivo foi o do sistema *neta_case30_fsr_api*, no qual a redução do custo de geração de energia foi de 44,34% desligando-se 7 linhas de transmissão pela solução do *solver*, e, redução de 44,87% desligando 4 linhas de transmissão pela solução da BD-OTS. Entretanto, nesse exemplo, a solução do sistema pelo *solver* deixou uma barra desconectada do sistema, enquanto a solução do sistema pela BD-OTS não deixou nenhuma barra desconectada.

Figura 17 – Topologias do sistema *neta_case30_ieee* fornecidas pelas metodologias AMPL+KNITRO e BD-OTS



Fonte: Elaboração do autor.

Ainda observando a Tabela 26 verifica-se que em quatro casos a metodologia BD-OTS não desligou linhas, e em apenas um caso a metodologia utilizando o AMPL+KNITRO também não desligou. Entretanto, como é mostrado na Tabela 22, todos esses casos ainda obtiveram melhores resultados que a metodologia apresentada por Coffrin, Gordon e Scott (2016). O fato da metodologia BD-OTS não ter desligado linhas, e ainda assim ter obtido soluções melhores é justificado pelo melhor gerenciamento das variáveis discretas de *taps* e *shunts* realizada pela

meta-heurística. No caso do modelo utilizando o *solver*, justifica-se pela melhor eficiência do método de pontos interiores e do algoritmo do solver KNITRO para tratar variáveis discretas.

Outra característica bastante relevante a ser considerada é o tempo computacional gasto na obtenção das soluções. A Tabela 27 mostra os tempos computacionais em segundos gastos nas soluções do problema pelas abordagens AMP+KNITRO e BD-OTS.

Nota-se que o tempo computacional gasto pela meta-heurística BD-OTS é bastante superior aos tempos gastos pelo solver KNITRO para resolver os modelos implementados em AMPL. Isso se deve ao fato de que a meta-heurística trabalha com população de soluções e que o método de combinação das soluções possui um alto custo computacional. Além disso, a avaliação de uma proposta de solução usa o *solver* KNITRO como foi apresentado no Capítulo 5, o que onera ainda mais o tempo computacional. Entretanto, vale ressaltar que, embora as soluções obtidas pela BD-OTS consumiram tempo computacional considerável, isso é irrelevante considerando que a metodologia BD-OTS apresentou melhores resultados que as outras abordagens na maioria dos casos, e que deve ser utilizada na etapa pré-operação, e não em tempo real.

Tabela 27 – Tempo computacional gasto pelas abordagens AMPL+KNITRO e BD-OTS

Sistema	AMPL+KNITRO sem Desligamento de Linhas (s)	AMPL+KNITRO com Desligamento de Linhas (s)	BD-OTS (s)
nesta_case14_ieee	0,16	0,33	297,487
nesta_case14_ieee_api	0,19	0,17	324,904
nesta_case30_ieee	0,58	94	513,944
nesta_case30_ieee_api	–	–	86,080
nesta_case30_fsr_api	–	1,86	358,972
nesta_case57_ieee	0,45	156,39	185,185
nesta_case57_ieee_api	0,25	91,53	839,343
nesta_case118_ieee	–	1,3	814,135
nesta_case118_ieee_api	0,58	–	1073,882
nesta_case162_ieee_dtc	0,89	–	2073,405
nesta_case162_ieee_dtc_api	0,33	–	7356,454

Fonte: Elaboração do autor.

Conclui-se que a metodologia BD-OTS é uma boa e promissora ferramenta para a solução do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão, pois os resultados dos testes mostraram que a metodologia produz soluções factíveis, e com melhores resultados se comparado às outras metodologias testadas. Além disso, mesmo com o desligamento de linhas, a metodologia não produz soluções com barras desconectadas do sistema, o que implica na

maior segurança da operação. Há também o que melhorar, pois o tempo computacional exigido nas soluções é bastante alto, o que inviabilizaria a utilização dessa ferramenta em operações de tempo real.

6.4 AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES DE OTS DC NO MODELO AC

O objetivo desta seção é a de apresentar os resultados obtidos para o problema de OTS usando o modelo DC de acordo com a modelagem matemática apresentada no Capítulo 5, expressões (50)–(56), a fim de avaliar as soluções do OTS DC no modelo AC.

A modelagem matemática OTS DC foi escrita na linguagem AMPL e foi resolvida utilizando o *solver* CPLEX, sendo que os testes foram realizados com os onze sistemas teste descritos na seção anterior, em um microcomputador com processador Intel® Core™ i5-7400 de 3,00 GHz e 8 GB de RAM.

A Tabela 28 mostra um resumo dos resultados obtidos para o problema de FPO puro, sem desligamento de linhas, e do problema de FPO com desligamento de linhas, aplicados aos onze sistemas teste, utilizando o modelo DC. Nota-se que o modelo DC sem desligamento de linhas conseguiu convergência em todas as soluções. Já o modelo DC com desligamento de linhas não conseguiu convergência com 0% de *gap* nas soluções dos dois sistemas de 118 barras, e o tempo computacional da solução destes sistemas também foi consideravelmente maior que as outras soluções.

Observa-se também na Tabela 28 que, com o desligamento de linhas, apenas o sistema nesta_case30_ieee teve redução significativa no custo de operação (19,33%), sendo que 11 de 30 linhas foram desligadas. É importante verificar que apenas um dos sistemas que teve linhas desligadas não apresentou barras desconectadas da topologia do sistema, nos demais, todos apresentaram o problema de barras desconectadas, problema que não existe na metodologia BD-OTS.

A Tabela 29 mostra um resumo de todas as soluções dos sistemas obtidas por todas as metodologias, ou seja, utilizando o *solver* com os modelos AC e DC, e a metodologia BD-OTS, comparados com os resultados obtidos da literatura.

Observando a Tabela 29, percebe-se que o modelo DC apresentou melhores resultados que os modelos AC e a metodologia BD-OTS, em relação aos dados obtidos da literatura. Entretanto, deve ser considerado que o modelo DC não representa a realidade, pois trata-se de um modelo simplificado em relação ao modelo AC, e uma avaliação das linhas desligadas no modelo

DC no modelo AC faz-se necessária para comprovar a factibilidade das soluções, como será mostrado a seguir.

Tabela 28 – Comparação das funções objetivo entre os modelos DC sem e com desligamento de linhas de transmissão

SISTEMA	MODELO DC sem Desligamento de Linhas		MODELO DC com Desligamento de Linhas					
	Custo de Operação (US\$/h)	Tempo Comp. (s)	Custo de Operação (US\$/h)	Gap (%)	Tempo Comp. (s)	Redução do Custo de Operação (%)	Nº de Linhas Desligadas	Barras Desconectadas
nesta_case14_ieee	231,4132	0,05	231,4132	0	0,22	0,00	1	1
nesta_case14_ieee_api	296,4988	0,08	296,4988	0	0,05	0,00	1	1
nesta_case30_ieee	189,3159	0,03	152,7233	0	0,5	19,33	11	3
nesta_case30_ieee_api	380,4429	0,03	380,327	0	0,41	0,03	6	2
nesta_case30_fsr_api	191,7824	0,05	190,3807	0	0,12	0,73	11	1
nesta_case57_ieee	1125,1389	0,09	1125,1389	0	0,09	0,00	0	0
nesta_case57_ieee_api	1380,3799	0,06	1380,3799	0	0,06	0,00	0	0
nesta_case118_ieee	3544,9450	0,05	3467,2232	0,06	6436,16	2,19	40	0
nesta_case118_ieee_api	8648,3729	0,06	5567,9749	0,44	2544,28	35,62	36	0
nesta_case162_ieee_dtc	4000,3430	0,00	3904,8063	0	4390,75	2,39	80	1
nesta_case162_ieee_dtc_api	5784,5437	0,00	5773,8241	0	15,62	0,19	37	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 29 – Comparação das funções objetivo entre os resultados da literatura, os modelos AC, DC e BD-OTS

Sistema	NESTA (US\$/h)	Modelo AC		BD-OTS (US\$/h)	Modelo DC			
		Sem desligamento de linhas (US\$/h)	Com desligamento de linhas (US\$/h)		Sem desligamento de linhas (US\$/h)	Redução (%)	Com desligamento de linhas (US\$/h)	Redução (%)
nesta_case14_ieee	244,05	243,9903	244,0017	243,9663696	231,4132	5,18%	231,4132	5,18%
nesta_case14_ieee_api	325,56	321,439	324,5028	321,0067139	296,4988	8,93%	296,4988	8,93%
nesta_case30_ieee	204,97	204,955	195,3063	194,241745	189,3159	7,64%	152,7233	25,49%
nesta_case30_ieee_api	415,53	Infactível	Infactível	413,4252014	380,4429	8,44%	380,327	8,47%
nesta_case30_fsr_api	372,14	Não Convergiu	207,1336	205,1702728	191,7824	48,46%	190,3807	48,84%
nesta_case57_ieee	1143,27	1173,0094	1147,7605	1141,958984	1125,1389	1,59%	1125,1389	1,59%
nesta_case57_ieee_api	1430,65	1427,4381	1436,8770	1427,376953	1380,3799	3,51%	1380,3799	3,51%
nesta_case118_ieee	3718,64	Infactível	3708,1298	3708,197998	3544,945	4,67%	3467,2232	6,76%
nesta_case118_ieee_api	10325,27	9980,2529	Não Convergiu	9246,188477	8648,3729	16,24%	5567,9749	46,07%
nesta_case162_ieee_dtc	4230,23	4144,8901	Não Convergiu	4145,348145	4000,343	5,43%	3904,8063	7,69%
nesta_case162_ieee_dtc_api	6111,68	6017,2258	Não Convergiu	6016,807617	5784,5437	5,35%	5773,8241	5,53%

Fonte: Elaboração do autor.

Como os dois sistemas de 57 barras não apresentaram linhas desligadas no modelo DC, não é necessário avaliar as soluções no modelo AC. Sendo assim, a avaliação das linhas desligadas no modelo DC no modelo AC, foi realizada para os demais sistemas. Para realizar essa avaliação, o modelo AC foi escrito na linguagem AMPL e resolvido utilizando o *solver* KNITRO, utilizando-se o modelo (81)–(102).

A Tabela 30 mostra o resumo das soluções considerando o modelo AC com as linhas desligadas nas soluções obtidas pelo modelo DC fixadas.

Como pode ser observado na Tabela 30, apenas dois sistemas apresentaram soluções factíveis no modelo AC, o sistema `case_nesta14_ieee` e o sistema `nesta_case30_fsr_api`. A solução referente ao sistema `nesta_case162_ieee_dtc_api` não convergiu. Já as soluções para os demais sistemas foram infactíveis, e o problema da infactibilidade se deu pelo balanço de potência ativa e reativa, como é detalhado na Tabela 31.

Tabela 30 – Resultados do modelo AC utilizando as linhas desligadas pelo modelo DC

Sistema	Custo de Operação (US\$/h)	Corte de Carga Total no Modelo AC (MW)	Linhas Desligadas	Tempo (s)	Factibilidade
<code>nesta_case14_ieee</code>	244,0265	0	1	0,17	Factível
<code>nesta_case14_ieee_api</code>	327,2931	0,795	1	0,09	Infactível
<code>nesta_case30_ieee</code>	202,6808	72,1934	11	0,09	Infactível
<code>nesta_case30_ieee_api</code>	409,4015	6,9199	6	0,3	Infactível
<code>nesta_case30_fsr_api</code>	214,1579	0	11	0,11	Factível
<code>nesta_case118_ieee</code>	4243,3733	54,6731	40	2,67	Infactível
<code>nesta_case118_ieee_api</code>	6504,3411	43,522	36	32,14	Infactível
<code>nesta_case162_ieee_dtc</code>	4337,4069	364,8604	80	2922,50	Infactível
<code>nesta_case162_ieee_dtc_api</code>	–	–	37	–	Não convergiu

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 31 – Infactibilidades das soluções do modelo AC utilizando as linhas desligadas pelo modelo DC

Sistema	Factibilidade
<code>nesta_case14_ieee_api</code>	Problema no balanço de potência ativa em 1 barra
<code>nesta_case30_ieee</code>	Problema no balanço de potência ativa em 3 barras, e reativa em 9 barras
<code>nesta_case30_ieee_api</code>	Problema no balanço de potência ativa em 4 barras
<code>nesta_case118_ieee</code>	Problema no balanço de potência ativa em 3 barras, e reativa em 4 barras
<code>nesta_case118_ieee_api</code>	Problema no balanço de potência ativa em 5 barras, e reativa em 1 barra
<code>nesta_case162_ieee_dtc</code>	Problema no balanço de potência ativa em 12 barras, e reativa em 19 barras

Fonte: Elaboração do autor.

Realizando uma comparação entre os custos de operação das soluções dos modelos AC e DC mostrados na Tabela 32, utilizando as mesmas linhas desligadas, nota-se que os custos de operação do modelo DC são menores que do modelo AC. Entretanto, o modelo DC não reflete a operação da rede de forma exata, pois é um modelo relaxados. Além disso, como já discutido anteriormente, apenas dois sistemas conseguiram soluções factíveis no modelo AC.

Tabela 32 – Custos de operação dos modelos AC e DC utilizando as linhas desligadas no modelo de OTS DC

Sistema	Modelo AC Custo de Operação (US\$/h)	Modelo DC Custo de Operação (US\$/h)
nesta_case14_ieee	244,0265	231,4132
nesta_case14_ieee_api	327,2931	296,4988
nesta_case30_ieee	202,6808	152,7233
nesta_case30_ieee_api	409,4015	380,327
nesta_case30_fsr_api	214,1579	190,3807
nesta_case118_ieee	4243,3733	3467,2232
nesta_case118_ieee_api	6504,3411	5567,9749
nesta_case162_ieee_dtc	4337,4069	3904,8063

Fonte: Elaboração do autor.

Por fim, de acordo com os resultados apresentados, nota-se a necessidade de se ter cautela na utilização de soluções do problema de FPO, com e sem desligamento de linhas, utilizando modelos matemáticos DC.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia utilizando a meta-heurística de busca dispersa (BD) para resolver o problema de fluxo de potência ótimo (FPO) com desligamento de linhas (BD-OTS) objetivando a redução dos custos de operação em sistemas de transmissão de energia elétrica. Primeiramente a meta-heurística de BD foi avaliada por meio de sua aplicação em onze problemas de funções multimodais restritas conhecidas na literatura, e sua eficiência para resolver estes tipos de problemas foi comprovada através da comparação dos resultados com os resultados de outras metodologias de outros autores que resolveram os mesmos problemas. Em seguida, a meta-heurística de BD foi implementada para resolver o problema de FPO utilizando modelo AC, em que o objetivo era o de avaliar a meta-heurística de BD no gerenciamento de variáveis contínuas e discretas. Essa última abordagem foi testada com três sistemas teste e os resultados comparados com a solução destes mesmos sistemas utilizando o *solver* KNITRO que resolve o modelo exato do problema. Nesse caso, entretanto, os resultados não foram muito satisfatórios para os sistemas maiores, sendo que a proposta foi um estímulo para atingir o objetivo principal deste trabalho, que foi o de resolver o problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão por uma abordagem mais eficiente.

Uma revisão da literatura a respeito de trabalhos publicados em revistas importantes da área, congressos e teses que trataram o problema de FPO e OTS foi realizada. Foram selecionados alguns trabalhos que resolveram esses problemas utilizando métodos clássicos e outros trabalhos utilizando meta-heurísticas. Embora o assunto de FPO venha sendo estudado desde

1962, quando Carpentier introduziu a questão da solução do FPO, e OTS, em que Glavitsch em 1985 publicou o primeiro trabalho considerando a estratégia do desligamento de linhas de transmissão, nota-se que ainda há muito o que se pesquisar. Soluções robustas para problemas de grande porte e que produzam resultados factíveis em tempos aceitáveis são ainda uma necessidade. Notou-se também que muitas meta-heurísticas foram utilizadas para a solução do problema, porém, verificou-se que a meta-heurística de BD não tinha sido utilizada para resolver esse tipo de problema, e sendo uma meta-heurística bastante eficiente e estudada, de fácil implementação e que trata qualquer tipo de problema, enxergou-se na BD uma opção de ferramenta promissora para a solução do FPO e OTS.

Na metodologia BD-OTS o algoritmo de BD foi escrito na linguagem C/C++ integrando o *solver* KNITRO, sendo que o modelo matemático foi escrito na linguagem AMPL. Nessa abordagem o modelo matemático AC foi utilizado, as variáveis discretas do modelo (status das linhas de transmissão, status dos compensadores *shunt* e posição dos *taps* dos transformadores) foram gerenciadas pela meta-heurística e passadas ao modelo matemático de PNL, o qual era resolvido pelo *solver* KNITRO na etapa de avaliação da proposta de solução. O resultado do PNL com todas as variáveis contínuas do modelo era retornado à meta-heurística. A solução do problema de OTS pela metodologia BD-OTS foi obtida utilizando onze sistemas teste conhecidos da literatura: dois sistemas de 14 barras, três de 30 barras, dois de 57 barras, dois de 118 barras e dois de 162 barras.

A fim de comparação dos resultados e comprovar a eficiência da metodologia BD-OTS, os resultados das soluções dos onze sistemas teste obtidos pela BD-OTS foram comparados com os resultados do problema de FPO utilizando outras três abordagens. Duas abordagens utilizaram o *solver* KNITRO para resolver o modelo matemático do problema com e sem desligamento de linhas de transmissão, e a outra abordagem foi obtida da literatura.

Analisando os resultados, todas as soluções obtidas pela metodologia BD-OTS foram factíveis. Já para os modelos resolvidos pelo *solver*, três soluções foram infactíveis e quatro não convergiram. Além disso, nove soluções de onze sistemas resolvidos pela BD-OTS apresentaram melhores resultados que as outras abordagens, e outras duas soluções praticamente empataram, comparadas às soluções obtidas pelo *solver*.

Constatou-se também que, dos sete sistemas resolvidos pelo *solver* considerando o desligamento de linhas, seis deles apresentaram barras desconectadas, enquanto a metodologia BD-OTS não apresentou soluções com barras desconectadas, pois essa possuía uma estratégia para evitar esse problema.

Em alguns casos observou-se que não ocorria o desligamento de linhas no sistema, tanto utilizando o *solver* quanto utilizando a BD-OTS. Entretanto, mesmo sem desligar linhas a BD-OTS apresentou melhores resultados que os apresentados na literatura. Isso se deve ao fato de que a meta-heurística propiciou um melhor gerenciamento das variáveis discretas do problema. Nas soluções em que linhas de transmissão foram desligadas, o *solver* e a BD-OTS conseguiram soluções com redução de custos de operação consideráveis em relação às soluções do problema de FPO sem o desligamento de linhas apresentados na literatura. Os casos mais significativos foram para o sistema de 30 barras em que o *solver* conseguiu uma redução de 44,34% com 7 linhas desligadas e a BD-OTS conseguiu uma redução de 44,87% com 4 linhas desligadas, e o caso do sistema de 118 barras em que a BD-OTS conseguiu uma redução de 10,45% com 13 linhas desligadas. Com estas observações, conclui-se que o desligamento de linhas pode contribuir para a redução dos custos de operação em sistemas de energia elétrica.

Também foi realizada uma avaliação do problema de OTS utilizando o modelo DC resolvido pelo *solver*, onde se provou que o modelo DC pode gerar soluções infactíveis no problema de OTS quando a operação AC do sistema é considerada. Isso foi feito considerando-se as linhas desligadas na solução do modelo DC fixas no modelo AC. Conclui-se, portanto que, deve-se ter bastante cautela na utilização dos resultados obtidos por modelos relaxados do problema de FPO/OTS.

Com a execução deste trabalho, conclui-se que a metodologia BD-OTS é uma boa e promissora ferramenta para a solução do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão. A proposta foi capaz de resolver todos os onze sistemas teste a que foi submetida com soluções factíveis, e apresentou melhor solução em nove sistemas, sendo que as outras duas soluções praticamente empataram com as soluções obtidas pelo *solver*.

Considerando que o *solver*, também utilizado pela BD-OTS, pode apresentar problemas em sistemas de grande porte, e que, o valor comercial pago no *solver* pode ser relativamente alto, faz-se necessário em trabalhos futuros, um estudo para o desenvolvimento de uma meta-heurística especializada para a solução do problema de OTS que trabalhe independente de qualquer *solver*. Para tanto, fica como proposta para trabalhos futuros, a melhoria da metodologia BD-FPO, a qual foi apresentada e utilizada neste trabalho como um protótipo de uma ferramenta independente para resolver o problema de FPO, incorporando o desligamento de linhas de transmissão.

REFERÊNCIAS

AMORIM, E. de A. **Fluxo de potência ótimo em sistemas multimercados através de um algoritmo evolutivo multiobjetivo**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, 2006. 172 p.

ARAÚJO, E. X. S. **Fluxo de potência ótimo em sistemas elétricos de potência através de um algoritmo genético multiobjetivo**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, 2018. 164 p.

ARAÚJO, L. R. **Uma contribuição ao fluxo de potência ótimo aplicado a sistemas de potência trifásicos usando o método dos pontos interiores**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005. 295 p.

ATTIA, A.-F.; EL SEHIEMY, R. A.; HASANIEN, H. M. Optimal power flow solution in power systems using a novel Sine-Cosine algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 99, p. 331–343, jul. 2018.

BAI, Y.; ZHONG, H.; XIA, Q.; KANG, C. A two-level approach to AC optimal transmission switching with an accelerating technique. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 32, n. 2, p. 1616–1625, mar. 2017.

BAI, Y.; ZHONG, H.; XIA, Q.; WANG, Y. A conic programming approach to optimal transmission switching considering reactive power and voltage security. In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 5., 2015, Denver. **Anais...** Denver: IEEE, jul. 2015. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7285833/>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BAKIRTZIS, A. G.; BISKAS, P. N.; ZOUMAS, C. E.; PETRIDIS, V. Optimal power flow by enhanced genetic algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 17, n. 2, p. 229–236, maio 2002.

BARROWS, C.; BLUMSACK, S.; HINES, P. Correcting optimal transmission switching for AC power flows. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 47., 2014, Hilton Waikoloa. **Anais...** Hilton Waikoloa: IEEE, jan. 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6758897/>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BLUMSACK, S. A. **Network topologies and transmission investment under electric-industry restructuring**. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2006. 263 p.

BURCHETT, R.; HAPP, H.; VIERATH, D. Quadratically convergent optimal power flow. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-103, n. 11, p. 3267–3275, nov. 1984.

CAPITANESCU, F.; WEHENKEL, L. An AC OPF-based heuristic algorithm for optimal transmission switching. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 18., 2014, Wrocław. **Anais...** Wrocław: IEEE, ago. 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7038445/>. Acesso em: 10 jan. 2019.

CARPENTIER, J. Contribution a l'étude du dispatching économique. **Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens**, London, v. 3, n. 1, p. 431–447, ago. 1962.

COFFRIN, C.; GORDON, D.; SCOTT, P. NESTA, The NICTA Energy system test case archive. **arXiv preprint**, Ithaca, p. 1–26, nov. 2014.

COFFRIN, C.; HIJAZI, H. L.; LEHMANN, K.; VAN HENTENRYCK, P. Primal and dual bounds for optimal transmission switching. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 18., 2014, Wrocław. **Anais...** Wrocław: IEEE, ago. 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7038446/>. Acesso em: 18 nov. 2018.

DENG, Z.; ROTARU, M. D.; SYKULSKI, J. K. Kriging assisted surrogate evolutionary computation to solve optimal power flow problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. PP, n. c, p. 1–1, ago. 2019.

DOMMEL, H.; TINNEY, W. Optimal power flow solutions. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-87, n. 10, p. 1866–1876, out. 1968.

ESMIN, A. A.; LAMBERT-TORRES, G.; ZAMBRONI DE SOUZA, A. C. A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 859–866, maio 2005.

FARIVAR, M.; LOW, S. H. Branch flow model: relaxations and convexification—part I. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, n. 3, p. 2554–2564, ago. 2013.

FARMANI, R.; WRIGHT, J. A. Self-adaptive fitness formulation for constrained optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 7, n. 5, p. 445–455, out. 2003.

FISHER, E. B.; O'NEILL, R. P.; FERRIS, M. C. Optimal transmission switching. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 23, n. 3, p. 1346–1355, ago. 2008.

FRANK, S.; STEPONAVICE, I.; REBENNACK, S. Optimal power flow: a bibliographic survey II. **Energy Systems**, Heidelberg, v. 3, n. 3, p. 259–289, set. 2012. a.

FRANK, S.; STEPONAVICE, I.; REBENNACK, S. Optimal power flow: a bibliographic survey I. **Energy Systems**, Heidelberg, v. 3, n. 3, p. 221–258, set. 2012. b.

FULLER, J. D.; RAMASRA, R.; CHA, A. Fast heuristics for transmission-line switching. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 27, n. 3, p. 1377–1386, ago. 2012.

GARCIA, A. M.; MACEDO, L. H.; ROMERO, R. Algoritmo de busca dispersa para otimização de funções contínuas multimodais com restrições. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL - L SBPO, 50., 2018, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SOBRAPO, ago. 2018. p. 1–11.

GLAVITSCH, H. Switching as means of control in the power system. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 7, n. 2, p. 92–100, abr. 1985.

GLOVER, F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. **Decision Sciences**, Hoboken, v. 8, n. 1, p. 156–166, jan. 1977.

GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. v. 1. 570p.

GLOVER, F.; KUO, C.-C.; DHIR, K. S. Heuristic algorithms for the maximum diversity problem. **Journal of Information and Optimization Sciences**, Abingdon, v. 19, n. 1, p. 109–132, jan. 1998.

GRANVILLE, S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 136–146, fev. 1994.

HENNEAUX, P.; KIRSCHEN, D. S. Probabilistic security analysis of optimal transmission switching. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 31, n. 1, p. 508–517, jan. 2016.

HUA WEI; SASAKI, H.; KUBOKAWA, J.; YOKOYAMA, R. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 13, n. 3, p. 870–877, ago. 1998.

IBA, K. Reactive power optimization by genetic algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 685–692, maio 1994.

JIANG, J.; HAN, X.; WANG, J.; ZHU, X.; SUN, D.; MA, Y. Optimal power flow with transmission switching for power system with wind/photovoltaic generation. In: CHINESE AUTOMATION CONGRESS - CAC, 4., 2017, Jinan. **Anais...** Jinan: IEEE, out. 2017. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8243820/>. Acesso em: 25 mar. 2019.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS- ICNN, 4., 1995, Perth. **Anais...** Perth: IEEE, nov. 1995. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/488968/>. Acesso em: 23 abr. 2018.

KHANABADI, M.; GHASEMI, H.; DOOSTIZADEH, M. Optimal transmission switching considering voltage security and N-1 contingency analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, n. 1, p. 542–550, fev. 2013.

KIRCHMAYER, L. K. Economic operation of power systems. New York: Wiley, 1958.

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, Washington, v. 220, n. 4598, p. 671–680, maio 1983.

KOCUK, B.; DEY, S. S.; SUN, X. A. New formulation and strong MISOCP relaxations for AC optimal transmission switching problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 32, n. 6, p. 4161–4170, nov. 2017.

KOZIEL, S.; MICHALEWICZ, Z. Evolutionary algorithms, homomorphous mappings, and constrained parameter optimization. **Evolutionary Computation**, Cambridge, v. 7, n. 1, p. 19–44, mar. 1999.

LAGARIAS, J. C.; REEDS, J. A.; WRIGHT, M. H.; WRIGHT, P. E. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions. **SIAM Journal on Optimization**, Philadelphia, v. 9, n. 1, p. 112–147, jan. 1998.

LAGUNA, M.; MARTÍ, R. **Scatter search: methodology and implementations in C**. New York: Springer Science, 2003. 300 p.

LAVAEI, J.; LOW, S. H. Zero duality gap in optimal power flow problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 27, n. 1, p. 92–107, fev. 2012.

LEE, K. Y.; VLACHOGIANNIS, J. G. Optimization of power systems based on ant colony system algorithms: An overview. In: PROCEEDINGS INTERNATIONAL CONFERENCE ON, INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 13., 2005, Arlington. **Anais...** Arlington: IEEE, nov. 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1599237/>. Acesso em: 13 jun. 2018.

LOW, S. H. Convex relaxation of optimal power flow—part II: exactness. **IEEE Transactions on Control of Network Systems**, Piscataway, v. 1, n. 2, p. 177–189, jun. 2014.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structure = evolution programs**. [S.l.] : Springer-Verlag, 1994. 387 p.

MLADENOVIC, N. H. P. Variable neighborhood search. **Computers & Operations Research**, Kidlington, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, nov. 1997.

MOHAMED, A.-A. A.; MOHAMED, Y. S.; EL-GAAFARY, A. A. M.; HEMEIDA, A. M. Optimal power flow using moth swarm algorithm. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 142, p. 190–206, jan. 2017.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. 164 p.

OPEN MULTI-PROCESSING – OPENMP. The OpenMP API specification for parallel programming. [S. l.: s.n.] 2019. Disponível em: <https://www.openmp.org/>. Acesso em: 22 ago. 2019.

ORIONDO, M. A. M. **Resolução do problema de fluxo de potência ótimo pela meta-heurística algoritmo dos fogos de artifício de busca dinâmica com mutação de covariância**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” -

UNESP, 2016. 186 p.

POTLURI, T.; HEDMAN, K. W. Impacts of topology control on the ACOPF. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2., 2012, San Diego. **Anais...** San Diego: IEEE, jul. 2012. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6345676/>. Acesso em: 18 out. 2018.

RUNARSSON, T. P.; YAO, X. Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 4, n. 3, p. 284–294, 2000.

SALKUTI, S. R. Congestion management using optimal transmission switching. **IEEE Systems Journal**, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 3555–3564, dez. 2018.

SERAPIÃO, A. B. D. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, Heidelberg, v. 20, n. 3, p. 271–304, set. 2009.

SOLER, E. M.; ASADA, E. N.; DA COSTA, G. R. M. Penalty-based nonlinear solver for optimal reactive power dispatch with discrete controls. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 28, n. 3, p. 2174–2182, ago. 2013.

SOROUSH, M.; FULLER, J. D. Accuracies of optimal transmission switching heuristics based on DCOPF and ACOPF. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 29, n. 2, p. 924–932, mar. 2014.

SOUSA, T.; SOARES, J.; VALE, Z. A.; MORAIS, H.; FARIA, P. Simulated annealing metaheuristic to solve the optimal power flow. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 1., 2011, Detroit. **Anais...** Detroit: IEEE, jul. 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039543/>. Acesso em: 14 set. 2018.

STAHL, E. C. M. Load division in interconnections. **Electrical World**, New York, v. 20, n. 20, p. 434–438, 1930.

SUN, D.; ASHLEY, B.; BREWER, B.; HUGHES, A.; TINNEY, W. Optimal power flow by newton approach. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-103, n. 10, p. 2864–2880, out. 1984.

SURENDER REDDY, S.; BIJWE, P. R. Efficiency improvements in meta-heuristic algorithms to solve the optimal power flow problem. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 82, p. 288–302, nov. 2016.

TARAFDAR HAGH, M.; ZAMANI GARGARI, M.; VAHID PAKDEL, M. J. Sequential analysis of optimal transmission switching with contingency assessment. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 12, n. 6, p. 1390–1396, mar. 2018.

TINOCO, M. A. F. **Uma contribuição ao problema de desligamento ótimo de linhas de transmissão para otimização da operação de um sistema de energia elétrica**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, 2018. 105 p.

TORRES, G.; QUINTANA, V. An interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v.

13, n. 4, p. 1211–1218, nov. 1998.

VENKATA RAO, R. Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, Toronto, v. 7, n. 1, p. 19–34, 2016.

VENKATRAMAN, S.; YEN, G. G. A generic framework for constrained optimization using genetic algorithms. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 424–435, 2005.

WANG, G.-G.; DEB, S.; CUI, Z. Monarch butterfly optimization. **Neural Computing and Applications**, London, v. 310, n. 7, p. 1995–2014, jul. 2015.

WARID, W.; HIZAM, H.; MARIUN, N.; ABDUL WAHAB, N. I. A novel quasi-oppositional modified Jaya algorithm for multi-objective optimal power flow solution. **Applied Soft Computing**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 360–373, abr. 2018.

YADAV, V.; GHOSHAL, S. P. Optimal power flow for IEEE 30 and 118-bus systems using monarch butterfly optimization. In: TECHNOLOGIES FOR SMART-CITY ENERGY SECURITY AND POWER - ICSESP, 2018, Bhubaneswar. **Anais...** Bhubaneswar: IEEE, mar. 2018.

YURYEVICH, J.; KIT PO WONG. Evolutionary programming based optimal power flow algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 14, n. 4, p. 1245–1250, nov. 1999.

ZINI, É. D. O. C. **Algoritmo genético especializado na resolução de problemas com variáveis contínuas e altamente restritos**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, 2009. Disponível em: http://www.dee.feis.unesp.br/pos/teses/arquivos/234-dissertacao_erico.pdf. Acesso em: 19 out. 2016. 151 p.

APÊNDICE A – PROBLEMAS TESTES COM FUNÇÕES MULTIMODAIS CONTÍNUAS E SUAS SOLUÇÕES

Neste apêndice serão apresentados os problemas testes utilizados para avaliação da meta-heurística de busca dispersa implementada neste trabalho, bem como suas respectivas soluções encontradas.

Problema G1: Minimização

$$\min G_1(x) = 5x_1 + 5x_2 + 5x_3 + 5x_4 - 5 \sum_{i=1}^4 x_i^2 - \sum_{i=5}^{13} x_i$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} 2x_1 + 2x_2 + x_{10} + x_{11} &\leq 10 \\ -8x_1 + x_{10} &\leq 0 \\ -2x_4 - x_5 + x_{10} &\leq 0 \\ 2x_1 + 2x_3 + x_{10} + x_{12} &\leq 10 \\ -8x_2 + x_{11} &\leq 0 \\ 2x_2 + 2x_3 + x_{11} + x_{12} &\leq 10 \\ -8x_3 + x_{12} &\leq 0 \\ -2x_8 - x_9 + x_{12} &\leq 0 \\ 0 \leq x_1 &\leq 1, i = 1, \dots, 9 \\ 0 \leq x_1 &\leq 100, i = 10, 11, 12 \\ 0 \leq x_{13} &\leq 1 \end{aligned} \tag{109}$$

Solução obtida:

$$\mathbf{x}^* = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 1)$$

$$G_1(\mathbf{x}^*) = -15$$

Problema G2: Maximização

$$\max G_2(x) = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \cos^4 x_i - 2 \prod_{i=1}^n \cos^2 x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n i x_i^2}} \right| \tag{110}$$

sujeito a:

$$\prod_{i=1}^n x_i \geq 0,75$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq 7,5$$

$$0 \leq x_i \leq 10, \text{ para } 1 \leq i \leq n; n = 20$$

Solução obtida:

$$\mathbf{x}^* = (3.15448942380855210000, 3.10840992362602360000, 3.08918452798613650000, \\ 3.02695592843126970000, 3.00698261041075910000, 2.96361827879534670000, \\ 2.97803592354222380000, 2.89771423317796420000, 0.49329841133548347000, \\ 0.46218256678621294000, 0.47114476056933419000, 0.48782624432017119000, \\ 0.47055183811094026000, 0.48490030976899967000, 0.44059613283145049000, \\ 0.44415326402251720000, 0.48700803159221762000, 0.43487359961109184000, \\ 0.45739821463960328000, 0.46936082964765591000)$$

$$G_2(\mathbf{x}^*) = 0.80276$$

Problema G3: Maximização

$$\max G_3(x) = (\sqrt{n})^2 \prod_{i=1}^n x_i$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 1$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \text{ para } 1 \leq i \leq n$$

(111)

Solução obtida:

Para $n = 20$, a solução obtida é $\mathbf{x}^* = 1/\sqrt{n} = 0,223606, i = 1, \dots, 20$, com $G_3(\mathbf{x}^*) = 1$.

Problema G4: Minimização

$$\min G_4(x) = 5.3578547x_3^2 + 0.8356891x_1x_5 + 37.293239x_1 - 40792.141$$

sujeito a:

$$0 \leq 85.334407 + 0.0056858x_2x_5 + 0.0006262x_1x_4 - 0.0022053x_3x_5 \leq 92$$

$$90 \leq 80.51249 + 0.0071317x_2x_5 + 0.0029955x_1x_2 + 0.0021813x_3^2 \leq 110$$

$$20 \leq 9.300961 + 0.0047026x_3x_5 + 0.0012547x_1x_3 + 0.0019085x_3x_4 \leq 25$$

$$78 \leq x_1 \leq 102$$

$$33 \leq x_2 \leq 45$$

$$27 \leq x_i \leq 45 \text{ para } i = 3, 4, 5$$

(112)

Solução obtida:

$$\mathbf{x}^* = (78, 33, 29.995256055500793, 45, 36.775812850796257)$$

$$G_4(\mathbf{x}^*) = -30665.53867$$

Problema G5: Minimização

$$\min G_5(x) = 3x_1 + 0.000001x_1^3 + 2x_2 + \frac{0.00002}{3}x_2^3$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} 1000 \sin(-x_3 - 0.25) + 1000 \sin(-x_4 - 0.25) + 894.8 - x_1 &= 0 \\ 1000 \sin(x_3 - 0.25) + 1000 \sin(x_3 - x_4 - 0.25) + 894.8 - x_2 &= 0 \\ 1000 \sin(x_4 - 0.25) + 1000 \sin(x_4 - x_3 - 0.25) + 1294.8 &= 0 \\ 0 \leq x_i \leq 1200 \text{ para } i = 1, 2 \\ -0.55 \leq x_i \leq 0.55 \text{ para } i = 3, 4 \end{aligned} \quad (113)$$

Solução obtida:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &= (679.95315239779848, 1026.0587626481524, 0.11887077874753292, \\ &-0.39623620448114444) \\ G_5(\mathbf{x}^*) &= 5126.4981096162 \end{aligned}$$

Problema G6: Minimização

$$\min G_6(x) = (x_1 - 10)^3 + (x_2 - 20)^3$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} -(x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 + 100 &\leq 0 \\ (x_1 - 6)^2 + (x_2 - 5)^2 - 82.81 &\leq 0 \\ 13 \leq x_1 \leq 100 \\ 0 \leq x_2 \leq 100 \end{aligned} \quad (114)$$

Solução obtida:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &= (14.094942045723407, 0.84284058214040081) \\ G_6(\mathbf{x}^*) &= -6961.88176 \end{aligned}$$

Problema G7: Minimização

$$\begin{aligned} \max G_7(x) &= x_1^2 + x_2^2 + x_1x_2 - 14x_1 - 16x_2 + (x_3 - 10)^2 + \\ &4(x_4 - 5)^2 + (x_5 - 3)^2 + 2(x_6 - 1)^2 + 5x_7^2 + 7(x_8 - 11)^2 \\ &+ 2(x_9 - 10)^2 + (x_{10} - 7)^2 + 45 \end{aligned}$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} 105 - 4x_1 - 5x_2 + 3x_7 - 9x_8 &\geq 0 \\ -10x_1 + 8x_2 + 17x_7 - 2x_8 &\geq 0 \\ 8x_1 - 2x_2 - 5x_9 + 2x_{10} + 12 &\geq 0 \\ 3x_1 - 6x_2 - 12(x_9 - 8)^2 + 7x_{10} &\geq 0 \\ -3(x_1 - 2)^2 - 4(x_2 - 3)^2 - 2x_3^2 + 7x_4 + 120 &\geq 0 \\ -x_1^2 - 2(x_2 - 2)^2 + 2x_1x_2 - 14x_5 + 6x_6 &\geq 0 \\ -5x_1^2 - 8x_2 - (x_3 - 6)^2 + 2x_4 + 40 &\geq 0 \end{aligned} \quad (115)$$

$$\begin{aligned} -0.5(x_1 - 8)^2 - 2(x_2 - 4)^2 - 3x_5^2 + x_6 + 30 &\geq 0 \\ -10 \leq x_i &\leq 10 \text{ para } i = 1 \dots 10 \end{aligned}$$

Solução obtida:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &= (2.17230616601325630000, 2.36310222643093180000, 8.77417946145225440000, \\ &5.0977329509349412, 0.9904776972039584, 1.4304215174580341, 1.322141017602142, \\ &9.82907637571472040000, 8.2804780802833786, 8.3750729290372057) \\ G_7(\mathbf{x}^*) &= 24.30623 \end{aligned}$$

Problema G8: Maximização

$$\max G_8(x) = \frac{\text{sen}(2\pi x_1)\text{sen}(2\pi x_2)}{x_1^3(x_1 + x_2)}$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} x_1^2 - x_2 + 1 &\leq 0 \\ 1 - x_1 + (x_2 - 4)^2 &\leq 0 \\ 0 &\leq x_1 \leq 10 \\ 0 &\leq x_2 \leq 10 \end{aligned}$$

(116)

Solução obtida:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &= (1.2279661965175832, 4.2453742217070642) \\ G_8(\mathbf{x}^*) &= 0.0958250413 \end{aligned}$$

Problema G9: Minimização

$$\begin{aligned} \min G_9(x) &= (x_1 - 10)^2 + 5(x_2 - 12)^2 + x_3^4 + 3(x_4 - 11)^2 \\ &+ 10x_5^6 + 7x_6^2 + x_7^4 - 4x_6x_7 - 10x_6 - 8x_7 \end{aligned}$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} 127 - 2x_1^2 - 3x_2^4 - x_3 - 4x_4^2 - 5x_5 &\geq 0 \\ 196 - 23x_1 - x_2^2 - 6x_6^2 + 8x_7 &\geq 0 \\ 282 - 7x_1 - 3x_2 - 10x_3^2 - x_4 + x_5 &\geq 0 \\ -4x_1^2 - x_2^2 + 3x_1x_2 - 2x_3^2 - 5x_6 + 11x_7 &\geq 0 \\ -10 \leq x_i &\leq 10 \text{ para } i = 1 \dots 7 \end{aligned}$$

(117)

Solução obtida:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^* &= (2.3308456380329989, 1.9513645488368834, -0.47737601902680094, 4.3656592977936608, \\ &-0.62455868428873096, 1.0377843988723441, 1.5944453665982898) \\ G_9(\mathbf{x}^*) &= 680.6300608794 \end{aligned}$$

Problema G10: Minimização

$$\min G_{10}(x) = x_1 + x_2 + x_3$$

sujeito a:

$$\begin{aligned}
 -1 + 0.0025(x_4 + x_6) &\leq 0 \\
 -1 + 0.0025(x_5 + x_7 - x_4) &\leq 0 \\
 -1 + 0.01(x_8 - x_5) &\leq 0 \\
 -x_1x_6 + 833.33252x_4 + 100x_1 - 83333.333 &\leq 0 \\
 -x_2x_7 + 1250x_5 + x_2x_4 - 1250x_4 &\leq 0 \\
 -x_3x_8 + 1250000 + x_3x_5 - 2500x_5 &\leq 0 \\
 100 \leq x_1 &\leq 10000 \\
 1000 \leq x_i &\leq 10000 \text{ para } i = 2,3 \\
 10 \leq x_i &\leq 1000 \text{ para } i = 4 \dots 8
 \end{aligned} \tag{118}$$

Solução obtida:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}^* &= (579.2411438120979, 1360.2152383062796, 5106.9393537885007, 182.02829247996777, \\
 &295.67027223182384, 218.01088961632709, 286.46211345869767, 395.69580299155268) \\
 G_{10}(\mathbf{x}^*) &= 7047.8207201713
 \end{aligned}$$

Problema G11: Minimização

$$\min G_{11}(x) = x_1^2 + (x_2 - 1)^2$$

sujeito a:

$$\begin{aligned}
 x_2 - x_1^2 &= 0 \\
 -1 \leq x_i &\leq 1 \text{ para } i = 1,2
 \end{aligned} \tag{119}$$

Solução obtida:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}^* &= (-0.70710674316191002, 0.49999999622889352) \\
 G_{11}(\mathbf{x}^*) &= 0.749999975
 \end{aligned}$$

APÊNDICE B – SOLUÇÕES DO PROBLEMA DE FPO PELO MÉTODO BD-FPO

Neste apêndice serão detalhadas todas as soluções do problema de FPO dos sistemas de 6, 14 e 57 barras obtidas pela metodologia BD-FPO apresentada no Capítulo 5.

Para cada sistema, primeiramente serão apresentados os valores das soluções por barras e em seguida os valores por linhas de transmissão.

Tabela 33 – Resultado por barras do sistema de 6 barras (BD-FPO)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>
1	1,049987	0	70,3113327	47,4075089	-	4	0,9760422	-0,0460116	-	-	-
2	1,0343602	-0,0209768	79,5101318	51,3978004	-	5	0,9701676	-0,0609613	-	-	-
3	1,049407	-0,0285234	67,0199966	79,9011078	-	6	0,9852643	-0,0619054	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 34 – Resultado por linhas do sistema de 6 barras (BD-FPO)

Barra de Origem	Barra de Destino	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição <i>Taps</i>
1	2	12,44155	-12,2972	-0,1023	-3,9536	0
1	4	31,44419	-30,5457	29,29688	-29,8132	-
1	5	26,42559	-25,5828	18,21293	-21,1836	-
2	3	1,95575	-1,93358	-9,81404	3,411402	-
2	4	44,4728	-42,8594	37,33175	-36,1275	-
2	5	18,75418	-18,1817	14,00893	-16,3137	-
2	6	26,62456	-25,9827	13,82477	-17,0924	-
3	5	22,7168	-21,6412	18,95058	-21,7263	-
3	6	46,23677	-45,224	57,53912	-54,5475	-
4	5	3,415094	-3,39048	-4,05829	-3,46802	-
5	6	-1,19384	1,21671	-7,3077	1,640398	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 35 – Resultado por barras do sistema de 14 barras (BD-FPO)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>
1	1,0205922	0	173,4809265	0,5492322	-	8	1,0215273	-0,1849764	0	24,00	-
2	0,9993991	-0,0656812	61,1863251	-9,5669775	-	9	0,9880754	-0,2047352	-	-	0
3	0,9867989	-0,2080177	0,0000000	40,0000000	-	10	0,9965422	-0,2008899	-	-	-
4	0,9901493	-0,1542459	-	-	-	11	1,0254273	-0,197993	-	-	-
5	0,9910172	-0,1297496	-	-	-	12	1,0391130	-0,2133741	-	-	-
6	1,0451202	-0,202962	0,0000000	24,0000000	-	13	1,0232608	-0,215568	-	-	-
7	0,9787095	-0,1867319	-	-	-	14	0,9855469	-0,2272504	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 36 – Resultado por linhas do sistema de 14 barras (BD-FPO)

Barra de Origem	Barra de Destino	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	114,0914688	-111,6680298	0,1535526	1,8590583	-
1	5	59,3894615	-57,5553360	0,3956796	2,1973119	-
2	3	69,4593430	-67,1773529	-7,2755666	12,5697155	-
2	4	46,9889297	-45,6666718	-9,7416630	10,3889904	-
2	5	34,7060814	-34,0027885	-7,1088061	5,8291340	-
3	4	-26,9944763	27,5576267	8,8459444	-8,6592999	-
4	5	-52,2498894	52,6531410	15,2228432	-13,9509621	-
4	7	13,8285418	-13,8285418	-29,7955608	32,5221558	-13
4	9	9,6542788	-9,6542788	17,4187336	-15,5162554	14
5	6	31,9402428	-31,9402428	4,4434552	-2,0796781	10
6	11	1,8460953	-1,7651126	9,4727440	-9,3031292	-
6	12	4,5581741	-4,5346971	0,2871991	-0,2383390	-
6	13	15,3331060	-15,1323318	9,8164387	-9,4210682	-
7	8	-0,9964012	0,9964012	-23,7892170	24,8317337	-
7	9	15,8248920	-15,8248920	-8,1899729	8,5547409	-
9	10	-7,1862402	7,2198830	-7,1865430	7,2758002	-
9	14	7,0315785	-6,9603853	-2,2903655	2,4418302	-
10	11	-6,7167549	6,8753200	-12,1152630	12,4864550	-
12	13	4,6259632	-4,5621395	3,1294544	-3,0717037	-
13	14	7,1228848	-6,9455175	7,6101341	-7,2490034	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 37 – Resultado por barras do sistema de 57 barras (BD-FPO)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt
1	1,012508	0	45,175903	92,347176	-	30	1,0042875	0,0255474	-	-	-
2	0,9957809	0,0061473	0	19,367348	-	31	0,9631594	-0,0264682	-	-	-
3	0,9958369	0,0130222	61	-8,9930792	-	32	0,9521481	-0,0755292	-	-	-
4	0,9973869	0,0098293	-	-	-	33	0,95	-0,0767127	-	-	-
5	0,9987413	0,0116266	-	-	-	34	0,9958333	-0,0634422	-	-	-
6	1,0017172	0,0216054	0	0,1833957	-	35	0,9977701	-0,0630764	-	-	-
7	1,0069197	0,0656519	-	-	-	36	0,9923893	-0,0518899	-	-	-
8	1,022052	0,115177	423,24344	44,243897	-	37	0,9890783	-0,0436429	-	-	-
9	1,0027379	0,0457409	0	8,9995975	-	38	0,9852268	-0,0231144	-	-	-
10	0,9964375	0,0634886	-	-	-	39	0,9866078	-0,0436407	-	-	-
11	1,0010588	0,0309839	-	-	-	40	0,9920521	-0,0525587	-	-	-
12	1,0068837	0,0594739	524	9,4444199	-	41	0,9541666	-0,0221608	-	-	-
13	0,9992236	0,0259643	-	-	-	42	0,9520836	-0,0457106	-	-	-
14	0,9965599	0,014017	-	-	-	43	0,9645816	0,0162378	-	-	-
15	1,0014985	0,0073868	-	-	-	44	0,9729278	-0,0202018	-	-	-
16	1,0027449	0,0176722	-	-	-	45	0,9562495	0,0001833	-	-	-
17	1,0005113	-0,0050889	-	-	-	46	0,9988578	0,0062808	-	-	-
18	1,0430539	-0,0272127	-	-	1	47	0,9902791	-0,0041806	-	-	-
19	1,0396464	-0,0299998	-	-	-	48	0,9881493	-0,009197	-	-	-
20	1,038195	-0,0299157	-	-	-	49	0,9822415	-0,0066125	-	-	-
21	0,9978895	-0,0280311	-	-	-	50	0,9709197	0,0034149	-	-	-
22	0,9937216	-0,0278881	-	-	-	51	1,023008	0,0414582	-	-	-
23	0,9935087	-0,027727	-	-	-	52	1,015664	0,0085875	-	-	-
24	0,9529936	0,0111977	-	-	-	53	1,0090222	0,0103384	-	-	1
25	1,0027932	0,0094325	-	-	1	54	1,0055553	0,0307681	-	-	-
26	1,0229424	0,012829	-	-	-	55	0,9973098	0,0381798	-	-	-
27	0,9881939	0,0465815	-	-	-	56	0,9506941	-0,0694108	-	-	-
28	0,9780891	0,0535444	-	-	-	57	0,95	-0,0845222	-	-	-
29	0,9942147	0,0464094	-	-	-						

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 38 – Resultado por linhas do sistema de 57 barras (BD-FPO)

Barra de Origem	Barra de Destino	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	-3,8470287	4,1564059	55,083038	-67,047287	-
2	3	-7,1544147	7,1716161	-1,585366	-6,4772577	-
3	4	6,7468085	-6,7372413	-8,1522179	4,409338	-
4	5	-1,5033383	1,504813	-1,5935674	-0,9732725	-
4	6	-8,100028	8,1284933	-2,2489715	-1,1298952	-

continua

Resultado por linhas do sistema de 57 barras (BD-FPO) (continuação)

6	7	-42,71381	43,080994	2,8402963	-3,7515891	-
6	8	-54,983212	56,005394	-0,7694976	1,1730238	-
8	9	143,89259	-141,90669	12,908822	-8,3959112	-
9	10	-9,2659616	9,3102083	3,6807973	-7,8758583	-
9	11	16,576433	-16,503681	-4,0247951	2,0756853	-
9	12	-4,7721939	4,7869434	-4,2098393	-3,5175159	-
9	13	12,132807	-12,061533	-3,38042	-0,4534133	-
13	14	26,843666	-26,747927	-2,417151	1,636187	-
13	15	18,83877	-18,724812	-9,3968353	7,4631386	-
1	15	-5,6143179	5,6508784	8,3140707	-18,146328	-
1	16	-7,2812572	7,3233409	3,6815827	-9,0343971	-
1	17	6,9185076	-6,8854361	8,2684803	-11,015843	-
3	15	6,7328825	-6,6993027	-15,363604	10,047653	-
4	18	7,245513	-7,245513	-0,246791	0,5159695	7
4	18	9,3517666	-9,3517666	-0,3185348	0,6659583	7
5	6	-14,503039	14,568265	1,6553406	-2,757508	-
7	8	-72,618424	73,345459	-6,4346371	8,1620493	-
10	12	1,3191972	-1,2983946	-10,159426	6,9632173	-
11	13	6,9812255	-6,9703898	-0,5419456	-1,3031002	-
12	13	57,11726	-56,542568	-6,318912	2,1143243	-
12	16	50,783211	-50,320839	-6,1278949	6,0350804	-
12	17	35,613472	-35,112957	-5,5544744	3,015882	-
14	15	8,469305	-8,433774	-12,339792	10,976131	-
18	19	0,5442874	-0,5429403	0,1531757	-0,1511544	-
19	20	0,1443983	-0,1441878	0,2535021	-0,2531766	-
21	20	0,2607994	-0,2607994	-0,3842846	0,3858187	6
21	22	1,5153331	-1,5086172	2,6015422	-2,5908649	-
22	23	-0,0983559	0,0983012	1,455869	-1,4556745	-
23	24	-2,826654	3,375123	17,421986	-17,372129	-
24	25	0,1569921	-0,1569921	4,0354133	-3,8600121	16
24	25	0,1388649	-0,1388649	-2,9720328	3,0889857	2
24	26	-3,6353831	3,6353831	16,302288	-16,177502	13
26	27	-2,9480591	3,3723402	16,13616	-15,483003	-
27	28	-0,1816881	0,2529118	10,60933	-10,49928	-
28	29	-4,8329444	5,0820894	-23,385544	23,735445	-
7	29	29,540115	-29,540115	10,185247	-9,5532598	-1
25	30	-5,8662701	5,9265847	3,2434452	-3,153177	-
30	31	11,007134	-10,609605	1,3540101	-0,7479513	-
31	32	4,8232818	-4,6805573	-1,6880651	1,9006001	-
32	33	4,191885	-4,1837649	1,118847	-1,1112062	-
34	32	1,1724941	-1,1724941	1,9213855	-1,8701665	-4
34	35	-1,4637851	1,4661306	-1,6555681	1,341006	-
35	36	-7,6336832	7,7725964	16,146174	-16,131168	-
36	37	-9,172308	9,2758017	16,336762	-16,206102	-
37	38	-12,185054	12,377141	11,742874	-11,640011	-
37	39	2,9047122	-2,8975065	4,615438	-4,6039162	-
36	40	1,3259107	-1,3254937	-0,1349611	0,1358317	-
22	38	1,9709244	-1,8245296	27,370293	-27,145472	-
11	41	6,1814485	-6,1814485	-4,7994609	5,3491893	-14
41	42	4,7935843	-4,7305226	-2,1827829	2,2900345	-
41	43	-8,5757847	8,5757847	-2,247391	2,603045	-
38	44	4,3918805	-4,2837577	18,453396	-18,426251	-
15	45	6,2068272	-6,2068272	-15,606356	15,93965	-10
14	46	10,542551	-10,542551	5,4034829	-5,3009534	1
46	47	17,503885	-17,422733	6,6008611	-6,6775241	-
47	48	17,501167	-17,440758	-4,5657945	4,6433825	-
48	49	0,6930904	-0,6784855	3,8454909	-4,2888045	-
49	50	-1,4449149	1,5235945	9,6296368	-9,5038223	-
50	51	-22,512899	23,363751	-8,4781818	9,8287373	-
10	51	32,720898	-32,720898	16,03606	-15,151197	6
13	49	16,737057	-16,737057	9,156951	-8,4606562	0
29	52	7,4768014	-6,9843316	-16,783213	17,421835	-
52	53	2,1794815	-2,1563003	5,1692491	-5,139266	-
53	54	-4,6153545	4,7071867	5,3351903	-5,2217665	-
54	55	-0,2985464	0,3247652	3,9010332	-3,8667731	-
11	43	9,0153332	-9,0153332	3,3586812	-3,2081716	-5
44	45	-6,8881078	7,102838	16,492012	-16,436819	-
40	56	1,2967163	-1,2967163	1,3510467	-1,3062645	-4
56	41	-4,0822663	4,2677708	3,6950958	-3,5109289	-
56	42	-4,5872507	4,6508713	2,4522741	-2,3462923	-
39	57	2,897732	-2,897732	4,6322112	-4,2366562	4
57	56	-3,7242401	3,7609956	2,2784224	-2,2235157	-
38	49	-5,5507145	5,6210141	5,1968918	-5,3790307	-
38	48	-22,445248	22,631798	8,7507162	-8,4624557	-

continua

Resultado por linhas do sistema de 57 barras (BD-FPO) (continuação)

9	55	6,2356744	-6,2356744	-0,6702334	0,7180664	-1
---	----	-----------	------------	------------	-----------	----

Fonte: Elaboração do autor.

APÊNDICE C – SOLUÇÕES DO PROBLEMA DE FPO COM DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PELO MÉTODO BD-OTS

Os resultados completos das soluções do problema de FPO com desligamento de linhas de transmissão utilizando a metodologia BD-OTS apresentada no Capítulo 5 serão apresentadas neste apêndice.

Serão apresentados os resultados de onze sistemas teste, dentre eles, dois sistemas de 14 barras, três sistemas de 30 barras, dois sistemas de 57 barras, dois sistemas de 118 barras, e por fim, dois sistemas de 162 barras. Para cada sistema, primeiramente serão apresentados os valores das soluções por barras e em seguida os valores por linhas de transmissão.

Tabela 39 – Resultado por barras do sistema nesta_case14_ieee (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>
1	1,0599997	0	208,23352	0,0011301	-	8	1,0599935	-0,2260651	0	11,516611	-
2	1,0385764	-0,0736234	62,999989	16,045973	-	9	1,0478259	-0,2540984	-	-	1
3	1,0077927	-0,2123776	0	28,513939	-	10	1,0419953	-0,2572044	-	-	-
4	1,0135497	-0,1706062	-	-	-	11	1,0459938	-0,2523385	-	-	-
5	1,0194011	-0,1451968	-	-	-	12	1,0424484	-0,2578221	-	-	-
6	1,0570964	-0,2426987	0	23,99725	-	13	1,037985	-0,2592387	-	-	-
7	1,0408552	-0,2260651	-	-	-	14	1,0253795	-0,2741464	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

As tabelas que mostram os resultados por linhas de transmissão, apresentam cada linha com suas respectivas barras de origem e destino, como pode ser observado na Tabela 40. Em alguns sistemas há linhas paralelas, entretanto, a meta-heurística e o modelo matemático do problema tratam cada linha paralela de maneira independente.

Tabela 40 – Resultado por linhas do sistema nesta_case14_ieee (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição <i>Taps</i>
1	2	1	136,4408	-133,22958	-4,2359109	8,2262878	-
1	5	1	71,792725	-69,29068	4,237041	0,7711514	-
2	3	1	73,994858	-71,60376	1,3052559	4,1820025	-
2	4	1	57,361561	-55,587948	-3,1914868	4,9929948	-
2	5	1	43,173161	-42,188377	-2,9940844	2,3370006	-
3	4	1	-22,596241	22,956726	5,3319349	-5,7193422	-
4	5	1	-60,473995	60,953747	5,8801131	-4,3668337	-
4	7	1	27,788506	-27,788506	-15,431866	17,51453	-1
4	9	1	17,516714	-17,516714	14,178101	-11,905734	16
5	6	1	42,925308	-42,925308	-0,3413185	4,5434594	5
6	11	1	6,6683249	-6,6241384	2,7421846	-2,6496525	-
6	12	1	7,6747785	-7,6035776	2,4147434	-2,2665548	-
6	13	1	17,382206	-17,175999	6,7968607	-6,3907757	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case14_ieee (BD-OTS) (continuação)

7	8	1	0	0	-11,308682	11,516611	-
7	9	1	27,788506	-27,788506	-6,2058473	7,0290728	-
9	10	1	5,9010978	-5,8837223	5,014905	-4,968749	-
9	14	1	9,9041204	-9,7708817	4,122601	-3,8391855	-
10	11	1	-3,1162777	3,1241386	-0,831251	0,8496524	-
12	13	1	1,5035775	-1,4980782	0,6665547	-0,6615792	-
13	14	1	5,174078	-5,129118	1,2523552	-1,1608146	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 41 – Resultado por barras do sistema nesta_case14_ieee_api (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>
1	1,0599999	0	309,86517	-46,640472	-	8	1,0599995	-0,4411568	0	29,846355	-
2	1,0589281	-0,1098524	189,99994	94,999107	-	9	1,0067641	-0,5239992	-	-	1
3	1,0106577	-0,3761817	0	65,638153	-	10	1,0049102	-0,5271639	-	-	-
4	1,0094488	-0,2785018	-	-	-	11	1,0260788	-0,5058199	-	-	-
5	1,0117174	-0,2437028	-	-	-	12	1,0336834	-0,5089309	-	-	-
6	1,0599679	-0,4743602	0	56,400002	-	13	1,0229563	-0,5144727	-	-	-
7	1,010401	-0,4411568	-	-	-	14	0,9834476	-0,5608105	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 42 – Resultado por linhas do sistema nesta_case14_ieee_api (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	191,77402	-185,00873	-52,423531	67,152329	-
1	5	1	118,09116	-111,35012	5,7830601	16,762444	-
2	3	1	144,77585	-135,94608	8,0594215	24,447985	-
2	4	1	103,18017	-97,653435	2,4056077	10,725306	-
2	5	1	84,392662	-80,753212	4,6817541	2,7195477	-
3	4	1	-49,223934	51,155872	22,19017	-18,565144	-
4	5	1	-77,817146	78,666634	20,700047	-18,020512	-
4	7	1	76,514717	-76,514717	-8,9602079	21,938234	-5
4	9	0	-	-	-	-	-
5	6	1	98,496697	-98,496697	-3,0614815	26,384735	2
6	11	1	21,133863	-20,69891	8,2385807	-7,3277311	-
6	12	1	16,378883	-16,07366	3,2774527	-2,6421931	-
6	13	1	38,963951	-37,998859	10,999232	-9,0986633	-
7	8	1	0	0	-28,449812	29,846355	-
7	9	1	76,514717	-76,514717	6,5115795	-0,1572673	-
9	10	1	4,0490193	-4,0437245	0,6904517	-0,6763864	-
9	14	1	14,475695	-14,207247	2,124717	-1,5536922	-
10	11	1	-13,646275	13,81891	-5,1236138	5,5277305	-
12	13	1	4,0836582	-4,0469332	1,0421931	-1,0089656	-
13	14	1	15,505791	-15,082752	4,3076286	-3,4463077	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 43 – Resultado por barras do sistema nesta_case30_ieee (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω <i>shunt</i>
1	1,0599999	0	240,8699	7,5597005	-	16	1,0128872	-0,2995938	-	-	-
2	1,0358728	-0,0717484	60,482323	17,630976	-	17	1,0062321	-0,3062205	-	-	-
3	1,0134383	-0,154814	-	-	-	18	1,0067313	-0,3097993	-	-	-
4	1,0033959	-0,1912988	-	-	-	19	0,9849585	-0,3293289	-	-	-
5	0,9965447	-0,2457435	0	31,805018	-	20	0,9905998	-0,3238928	-	-	-
6	1,0014986	-0,2118477	-	-	-	21	0,998438	-0,311716	-	-	-
7	0,9914916	-0,2352362	-	-	-	22	0,9991661	-0,3115053	-	-	-
8	1,0019289	-0,2255315	0	39,999889	-	23	1,0057058	-0,3086634	-	-	-
9	1,012066	-0,272511	-	-	-	24	0,9893928	-0,3193417	-	-	1
10	1,0107039	-0,3032929	-	-	1	25	0,9976631	-0,3099458	-	-	-
11	1,0591959	-0,272511	0	23,999899	-	26	0,9796231	-0,3175674	-	-	-
12	1,0283014	-0,2887727	-	-	-	27	1,0115054	-0,2992822	-	-	-
13	1,0599995	-0,2887727	0	23,999899	-	28	0,9963916	-0,2235291	-	-	-
14	1,0166763	-0,3020652	-	-	-	29	0,9914105	-0,3212606	-	-	-
15	1,012113	-0,3038849	-	-	-	30	0,979789	-0,3370483	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 44 – Resultado por linhas do sistema nesta_case30_ieee (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	137,99957	-134,74348	0,344828	3,6073413	-
1	3	1	102,87033	-98,576942	7,2148724	4,0895681	-
2	4	0	-	-	-	-	-
3	4	1	96,176949	-94,985077	-5,2895684	7,857451	-
2	5	1	91,686897	-87,970047	4,3379283	6,9593511	-
2	6	1	81,838913	-78,211899	-3,0142937	10,138	-
4	6	1	47,425484	-47,151058	-8,9740534	9,0243645	-
5	7	1	-6,2299528	6,2697196	5,8456669	-7,761065	-
6	7	1	29,300678	-29,069719	2,1600974	-3,1389349	-
6	8	1	30,011982	-29,8937	-9,828475	9,3393784	-
6	9	1	28,619846	-28,619846	-18,658928	21,238237	-5
6	10	1	17,144276	-17,144276	4,8880386	-3,2314062	5
9	11	1	0	0	-22,932001	23,999899	-
9	10	1	28,619846	-28,619846	1,6937647	-0,8110343	-
4	12	1	39,959595	-39,959595	-0,4833978	4,3959999	3
12	13	1	0	0	-23,282211	23,999899	-
12	14	1	6,2488289	-6,1999998	1,7015053	-1,6	-
12	15	1	14,779045	-14,624354	5,3540955	-5,049386	-
12	16	1	7,73172	-7,6615343	4,3306103	-4,1830359	-
14	15	0	-	-	-	-	-
16	17	1	4,1615343	-4,1497889	2,3830357	-2,3399301	-
15	18	1	3,2116988	-3,2	0,9238225	-0,9	-
18	19	0	-	-	-	-	-
19	20	1	-9,5	9,5356808	-3,4000001	3,4713614	-
10	20	1	11,883648	-11,735681	4,5017581	-4,1713614	-
10	17	1	4,8615704	-4,8502111	3,4896944	-3,4600701	-
10	21	1	15,67653	-15,563245	9,3157749	-9,0719519	-
10	22	1	7,5423756	-7,4896669	4,1441374	-4,0354586	-
21	22	1	-1,9367553	1,9377189	-2,1280477	2,130008	-
15	23	1	3,2126553	-3,2	1,6255634	-1,6	-
22	24	1	5,5519485	-5,512259	1,9054506	-1,8436733	-
23	24	0	-	-	-	-	-
24	25	1	-3,187741	3,2081149	-0,647065	0,6826466	-
25	26	1	3,5464973	-3,5	2,3694537	-2,3	-
25	27	1	-6,754612	6,8149433	-3,0521002	3,1672981	-
28	27	1	20,104082	-20,104082	8,2408953	-6,5124183	7
27	29	1	6,1931043	-6,1046815	1,6748885	-1,5078185	-
27	30	1	7,096034	-6,9297185	1,6702322	-1,357182	-
29	30	1	3,7046816	-3,6702816	0,6078185	-0,542818	-
8	28	1	-0,1063003	0,1113057	0,6605117	-4,9176192	-
6	28	1	20,286175	-20,215387	2,2769015	-3,323277	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 45 – Resultado por barras do sistema nesta_case30_ieee_api (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω_{shunt}	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω_{shunt}
1	1,0599806	0	257,82184	-11,87442	-	16	0,9704286	-0,4479648	-	-	-
2	1,043002	-0,0731783	253,00322	16,723848	-	17	0,9500536	-0,475896	-	-	-
3	1,021395	-0,1835631	-	-	-	18	0,9797129	-0,4547962	-	-	-
4	1,0143844	-0,2262068	-	-	-	19	0,9802726	-0,456277	-	-	-
5	0,9859585	-0,3462161	0	37,189465	-	20	0,9884448	-0,4471571	-	-	-
6	1,0250148	-0,2753227	-	-	-	21	1,0001733	-0,4296131	-	-	-
7	0,9985691	-0,3207754	-	-	-	22	1,0005816	-0,4293967	-	-	-
8	1,059956	-0,3060363	0	149,07115	-	23	0,9789361	-0,4493002	-	-	-
9	1,0272346	-0,3649967	-	-	-	24	0,9802851	-0,4473378	-	-	1
10	1,0175637	-0,4127218	-	-	1	25	0,9844455	-0,4349768	-	-	-
11	1,0540501	-0,3649967	0	13,588914	-	26	0,9597664	-0,4521921	-	-	-
12	1,0081109	-0,4132996	-	-	-	27	0,9987439	-0,4175008	-	-	-
13	1,0403824	-0,4132996	0	23,981941	-	28	1,0254421	-0,2951879	-	-	-
14	0,9891289	-0,4398778	-	-	-	29	0,9676444	-0,4575889	-	-	-
15	0,9866863	-0,441288	-	-	-	30	0,9490753	-0,4862835	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 46 – Resultado por linhas do sistema nesta_case30_ieee_api (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	137,42268	-134,18027	-12,408505	16,280697	-
1	3	1	120,39916	-114,56432	0,5340852	16,371182	-
2	4	1	91,019478	-86,662415	-7,5681672	16,9508	-
3	4	1	110,57433	-108,99017	-17,571182	21,249302	-
2	5	1	143,42894	-134,40462	12,800723	20,807638	-
2	6	1	116,65508	-109,25954	-17,489403	35,931587	-
4	6	1	107,78338	-106,10263	-54,462139	59,373604	-
5	7	1	-22,235394	22,470587	-2,618171	1,2026256	-
6	7	1	61,39072	-60,380585	13,464287	-12,102626	-
6	8	1	51,240013	-49,827637	-99,167099	103,13204	-
6	9	1	45,333653	-45,333653	0,9401454	3,1301928	0
6	10	1	25,212347	-25,212347	-0,3939931	3,8885128	-3
9	11	1	0	0	-13,243218	13,588914	-
9	10	1	45,333653	-45,333653	10,113025	-7,8640385	-
4	12	1	75,229202	-75,229202	14,662041	-0,4056748	2
12	13	1	0	0	-23,238049	23,981941	-
12	14	1	11,384376	-11,221848	2,1390872	-1,8012245	-
12	15	1	23,77857	-23,395313	4,7902575	-4,0353231	-
12	16	1	21,446259	-20,939631	9,2143793	-8,1491184	-
14	15	1	0,9118474	-0,9098778	0,2012244	-0,1994446	-
16	17	1	15,11963	-14,97	6,3491187	-5,7999997	-
15	18	1	6,0768085	-6,0360622	0,2052187	-0,1222454	-
18	19	1	0,7160622	-0,7153182	-0,7777546	0,779259	-
19	20	1	-15,084683	15,171373	-4,1792588	4,3526416	-
10	20	1	19,195561	-18,831373	5,8658395	-5,0526419	-
10	17	0	-	-	-	-	-
10	21	1	27,978268	-27,675831	10,820575	-10,16964	-
10	22	1	13,732171	-13,58248	4,9623933	-4,6537471	-
21	22	1	-1,4241688	1,424527	-1,0303605	1,0310894	-
15	23	1	4,5883822	-4,5643544	1,5295491	-1,4810119	-
22	24	1	12,157953	-11,973088	3,6226575	-3,3349109	-
23	24	1	-0,7556459	0,7564519	-0,1189881	0,1206367	-
24	25	1	-3,2533638	3,2749455	0,6463968	-0,6087063	-
25	26	1	5,9281573	-5,8200002	2,4615555	-2,3	-
25	27	1	-9,2031021	9,3024969	-1,8528491	2,0426347	-
28	27	1	31,751553	-31,751553	10,570927	-6,4056644	1
27	29	1	10,454973	-10,204092	2,1326382	-1,6586099	-
27	30	1	11,994081	-11,516319	2,230391	-1,3311193	-
29	30	1	6,2140918	-6,1136813	0,7586099	-0,5688807	-
8	28	1	-0,0623646	0,2528422	15,939111	-19,994705	-
6	28	1	32,185432	-32,004391	-10,148532	9,4237804	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 47 – Resultado por barras do sistema nesta_case30_fsr_api (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω_{shunt}	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω_{shunt}
1	1,044589	0	178,12076	12,73734	-	16	0,9841651	-0,2317006	-	-	-
2	1,0214343	-0,0645722	0,0000195	32,086895	-	17	0,9640288	-0,246681	-	-	-
3	1,007071	-0,0955112	-	-	-	18	0,9868452	-0,2468669	-	-	-
4	0,9987118	-0,1147612	-	-	-	19	0,9833506	-0,2489335	-	-	-
5	0,9890295	-0,1096934	-	-	1	20	0,9874562	-0,2439361	-	-	-
6	0,9906349	-0,1286604	-	-	-	21	1,001527	-0,2415095	-	-	-
7	0,9642889	-0,1349655	-	-	-	22	1,0057874	-0,2437844	0,000033	30,049902	-
8	0,9799289	-0,1380717	-	-	-	23	1,0014832	-0,254738	0,0000011	10,937811	-
9	0,9978049	-0,1914755	-	-	-	24	0,9851416	-0,2571244	-	-	1
10	1,0031692	-0,2242642	-	-	-	25	0,9694741	-0,2657801	-	-	-
11	0,9978049	-0,1914755	-	-	-	26	0,9500017	-0,2751882	-	-	-
12	1,0134758	-0,2117337	-	-	-	27	1,0499997	-0,1098742	20,728531	14,773065	-
13	1,0499971	-0,1899308	16,571226	27,571562	-	28	1,007377	-0,1331276	-	-	-
14	1,0006975	-0,2318164	-	-	-	29	1,0293771	-0,1324154	-	-	-
15	0,9985738	-0,2366253	-	-	-	30	1,0173607	-0,1485282	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 48 – Resultado por linhas do sistema nesta_case30_fsr_api (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	121,52543	-118,92175	3,9126713	1,0672534	-
1	3	1	56,595333	-55,227615	8,8246679	-5,3681192	-
2	4	1	30,776304	-30,250082	3,042227	-3,3161263	-
3	4	1	52,607613	-52,244907	4,1681194	-3,5491581	-
2	5	1	25,623623	-25,270739	10,02082	-10,650739	-
2	6	1	38,811848	-37,95137	5,2565928	-4,5386205	-
4	6	1	35,914158	-35,749752	9,1674681	-9,0407152	-
5	7	1	25,270739	-24,91	10,836593	-10,9	-
6	7	0	-	-	-	-	-
6	8	1	26,807827	-26,681662	17,473949	-17,46924	-
6	9	1	29,831432	-29,831432	-2,4775801	4,3767753	-
6	10	1	17,061863	-17,061863	-1,4170333	3,0777125	-
9	11	1	0	0	0	0	-
9	10	1	29,831432	-29,831432	-4,3767753	5,3811574	-
4	12	1	38,28083	-38,28083	-3,9021835	7,7024298	-
12	13	1	-16,571226	16,571226	-26,257526	27,571562	-
12	14	1	8,4712353	-8,3838682	1,065583	-0,8839667	-
12	15	1	20,130001	-19,867178	1,6028877	-1,0851815	-
12	16	1	14,010819	-13,765502	8,3866272	-7,8708119	-
14	15	1	1,613869	-1,6069893	-0,7160333	0,7222499	-
16	17	1	9,9455013	-9,8299999	6,0708122	-5,7999997	-
15	18	1	5,8520069	-5,8084545	2,5180521	-2,429117	-
18	19	1	2,308455	-2,3034241	1,5291169	-1,5189451	-
19	20	1	-8,0765762	8,1007566	-1,881055	1,929415	-
10	20	1	10,61324	-10,500756	2,8805823	-2,629415	-
10	17	0	-	-	-	-	-
10	21	1	19,941313	-19,787499	-6,8662062	7,1972599	-
10	22	1	9,9987431	-9,8962488	-6,4732461	6,6845798	-
21	22	1	0,6674972	-0,6283041	-18,397259	18,476997	-
15	23	1	6,6621609	-6,5959177	-4,6551204	4,7889318	-
22	24	1	10,524586	-10,371501	4,8883257	-4,6500459	-
23	24	1	3,0959189	-3,0560715	4,5488787	-4,4673724	-
24	25	1	3,9175723	-3,876045	2,4562387	-2,3837152	-
25	26	1	3,876045	-3,8199999	2,3837152	-2,3	-
25	27	0	-	-	-	-	-
28	27	1	-6,2106109	6,2106109	-10,770496	11,373682	-
27	29	1	6,7654467	-6,6684365	1,6994632	-1,5161682	-
27	30	1	7,7524743	-7,56953	1,6999196	-1,3555709	-
29	30	1	4,0484366	-4,0104704	0,6161683	-0,544429	-
8	28	1	-6,0983377	6,2106109	-12,530759	10,770496	-
6	28	0	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 49 – Resultado por barras do sistema nesta_case57_ieee (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω $shunt$	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω $shunt$
1	1,0599909	0	281,99976	27,238876	-	30	1,0011622	-0,2579477	-	-	-
2	1,0510123	-0,0146366	0	49,974693	-	31	0,9680925	-0,2665426	-	-	-
3	1,0448161	-0,063953	60,99971	30,857197	-	32	0,9705592	-0,2485854	-	-	-
4	1,0415603	-0,0841618	-	-	-	33	0,9683143	-0,2492486	-	-	-
5	1,0378431	-0,1020527	-	-	-	34	0,967533	-0,1781931	-	-	-
6	1,0411217	-0,1035702	0	7,8271799	-	35	0,9732175	-0,1735802	-	-	-
7	1,0401034	-0,0850342	-	-	-	36	0,9818596	-0,1685036	-	-	-
8	1,0599678	-0,0364274	398,15167	63,26561	-	37	0,988869	-0,1646081	-	-	-
9	1,0366619	-0,0919314	0	8,984271	-	38	1,0096982	-0,1513381	-	-	-
10	1,0381635	-0,0912113	-	-	-	39	0,9874453	-0,1653017	-	-	-
11	1,0264771	-0,0956411	-	-	-	40	0,9805256	-0,1691795	-	-	-
12	1,0591332	-0,0473757	523,99976	63,253941	-	41	1,026703	-0,1654682	-	-	-
13	1,0305001	-0,0837007	-	-	-	42	0,9895924	-0,1887367	-	-	-
14	1,0246801	-0,0894323	-	-	-	43	1,0530468	-0,1160547	-	-	-
15	1,0352089	-0,0723003	-	-	-	44	1,0225624	-0,140635	-	-	-
16	1,0543	-0,0565533	-	-	-	45	1,0599999	-0,1061913	-	-	-
17	1,0506961	-0,0427261	-	-	-	46	1,0351875	-0,11792	-	-	-
18	1,0297623	-0,1546899	-	-	1	47	1,018412	-0,1423521	-	-	-
19	1,002322	-0,1725713	-	-	-	48	1,0164953	-0,1451422	-	-	-
20	0,9972918	-0,1717759	-	-	-	49	1,0258256	-0,1438158	-	-	-
21	1,0044988	-0,1569538	-	-	-	50	1,0114458	-0,1438354	-	-	-

continua

Resultado por barras do sistema nesta case57_ieee (BD-OTS) (continuação)

22	1,0060484	-0,1548516	-	-	-	51	1,038771	-0,113671	-	-	-
23	1,0043794	-0,1563986	-	-	-	52	0,974246	-0,1456975	-	-	-
24	0,9911477	-0,1694625	-	-	-	53	0,9586236	-0,155759	-	-	1
25	1,0232415	-0,2500112	-	-	1	54	0,9703042	-0,1377677	-	-	-
26	0,9675763	-0,1652351	-	-	-	55	0,9920238	-0,113721	-	-	-
27	0,9885154	-0,1473324	-	-	-	56	0,9831522	-0,196737	-	-	-
28	1,0028348	-0,1322017	-	-	-	57	0,9755763	-0,2063217	-	-	-
29	1,0157137	-0,1215642	-	-	-						

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 50 – Resultado por linhas do sistema nesta_case57_ieee (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	62,908207	-62,597508	8,5215788	-21,845371	-
2	3	1	59,597511	-58,602619	-16,179932	10,034973	-
3	4	1	57,709087	-57,36124	-9,8323498	6,8337464	-
4	5	1	13,152668	-13,04725	-4,5629082	1,9966155	-
4	6	1	13,232319	-13,158358	-5,285574	1,7664644	-
6	7	1	-18,71817	18,787222	3,3961675	-6,0327411	-
6	8	1	-43,084179	43,665367	-4,0091033	1,7875086	-
8	9	1	126,10902	-124,64082	24,467852	-23,001637	-
9	10	1	-0,6346653	0,6350161	-3,1518373	-1,5819595	-
9	11	1	7,7302947	-7,6914234	8,9359474	-11,128056	-
9	12	1	-17,392008	17,582682	-7,8551517	0,244969	-
9	13	1	-3,9601629	3,9796178	3,0897298	-7,3631177	-
13	14	1	16,622597	-16,578617	8,2192659	-9,2362127	-
13	15	1	-14,325878	14,378156	-2,2908485	0,0061023	-
1	15	1	89,928391	-88,614243	8,8760099	-13,002098	-
1	16	1	30,041132	-29,673248	-5,8924513	1,4597887	-
1	17	1	44,122017	-43,709625	-1,2662619	-0,0477717	-
3	15	1	20,893236	-20,804808	9,6545715	-15,249438	-
4	18	1	13,618544	-13,618544	2,6945572	-1,7085887	0
4	18	1	17,357706	-17,357706	0,3201785	0,9048827	-2
5	6	1	0,04725	-0,039293	-5,9966154	4,6736517	-
7	8	1	-77,585243	78,377304	-13,092284	15,01025	-
10	12	1	-39,862911	40,286404	-9,4312305	7,753397	-
11	13	1	-17,332855	17,396454	-1,2484511	-0,5314403	-
12	13	1	77,471802	-76,378975	26,364378	-29,39822	-
12	16	1	13,357231	-13,326751	2,185482	-4,4597888	-
12	17	1	-1,698379	1,7096258	2,7057121	-7,9522281	-
14	15	1	-35,799465	36,019264	-9,0243692	8,1574726	-
18	19	1	3,7762501	-3,703018	1,6078094	-1,498994	-
19	20	1	0,4030181	-0,400284	0,898994	-0,8948011	-
21	20	1	1,899716	-1,899716	0,1334682	-0,1051989	-1
21	22	1	-1,899716	1,9023614	-0,1334682	0,1376735	-
22	23	1	12,276815	-12,261156	3,0593584	-3,0353179	-
23	24	1	5,9611564	-5,8996415	0,9353179	-1,676736	-
24	25	1	7,2489834	-7,2489834	1,8297065	-1,2196928	8
24	25	1	7,0075607	-7,0075607	2,2960215	-1,6857613	9
24	26	1	-8,3569031	8,3569031	-2,448992	2,487402	-4
26	27	1	-8,3569031	8,4908915	-2,487402	2,6936638	-
27	28	1	-17,790892	17,99752	-3,1936638	3,5126343	-
28	29	1	-22,597521	22,823809	-5,812634	6,1304131	-
7	29	1	58,798019	-58,798019	19,125025	-16,776751	-2
25	30	1	7,9565444	-7,8302956	5,8828902	-5,693985	-
30	31	1	4,2302957	-4,1227756	3,8939848	-3,7300651	-
31	32	1	-1,6772246	1,69617	0,8300652	-0,8018527	-
32	33	1	3,8075461	-3,8	1,9069303	-1,9	-
34	32	1	7,1037164	-7,1037164	2,4523237	-1,9050775	4
34	35	1	-7,1037164	7,1346922	-2,4523237	2,1974645	-
35	36	1	-13,134692	13,224924	-5,1974645	5,1572533	-
36	37	1	-15,491554	15,57649	-6,5090775	6,6162734	-
37	38	1	-18,531374	18,806639	-8,4680271	8,694931	-
37	39	1	2,9548838	-2,9519119	1,8517537	-1,8470407	-
36	40	1	2,2666297	-2,2644622	1,3518243	-1,3484576	-
22	38	1	-14,179176	14,219253	-3,1970317	3,2586093	-
11	41	1	10,062522	-10,062522	3,9245296	-3,135227	4
41	42	1	9,7538996	-9,514657	5,1664896	-4,7596612	-
41	43	1	-12,961758	12,961758	-6,2445655	7,053627	-
38	44	1	-23,96101	24,153633	-10,367056	10,550453	-
15	45	1	37,021629	-37,021629	15,087959	-13,644251	6

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case57_ieee (BD-OTS) (continuação)

14	46	1	41,878082	-41,878082	12,960582	-11,66438	3
46	47	1	41,878082	-41,471603	11,66438	-10,800021	-
47	48	1	11,771606	-11,747176	-0,7999789	0,8312527	-
48	49	1	-4,1079326	4,1393495	-4,9435658	4,491621	-
49	50	1	5,1937823	-5,1211367	8,2742739	-8,158185	-
50	51	1	-15,878863	16,227892	-2,341815	2,8958294	-
10	51	1	34,227894	-34,227894	9,0131903	-8,1958294	1
13	49	1	34,706177	-34,706177	29,064364	-25,681063	7
29	52	1	18,974213	-18,380508	8,0463371	-7,2764158	-
52	53	1	13,48051	-13,31393	5,076416	-4,8613048	-
53	54	1	-6,6860704	6,7782922	0,6507479	-0,5368208	-
54	55	1	-10,878292	11,097361	-0,8631792	1,1496624	-
11	43	1	14,961757	-14,961757	8,4519777	-8,053627	6
44	45	1	-36,153633	37,021629	-12,350452	13,644251	-
40	56	1	2,2644622	-2,2644622	1,3484576	-1,2652702	3
56	41	1	-6,707768	6,9703779	-0,952592	1,2133026	-
56	42	1	-2,4017246	2,4146574	-0,338117	0,3596612	-
39	57	1	2,9519119	-2,9519119	1,8470407	-1,6826726	2
57	56	1	-3,7480884	3,7739553	-0,3173273	0,3559793	-
38	49	1	-7,2907858	7,3730478	-4,5993276	4,4151673	-
38	48	1	-15,774096	15,855108	-3,9871578	4,1123128	-
9	55	1	17,89736	-17,89736	4,9672198	-4,5496626	-6

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 51 – Resultado por barras do sistema nesta_case57_ieee_api (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt
1	1,0317433	0	1,9999692	83,092339	-	30	1,0388213	-0,2291121	-	-	-
2	1,0292248	0,0392191	0	49,998425	-	31	1,0098904	-0,2396978	-	-	-
3	1,0599998	0,1526378	662,99988	32,122845	-	32	1,0209796	-0,2209797	-	-	-
4	1,042241	0,0897333	-	-	-	33	1,0186222	-0,2217797	-	-	-
5	1,0202808	0,0067187	-	-	-	34	0,9694045	-0,1433783	-	-	-
6	1,0176885	-0,0258352	0	26,533287	-	35	0,9766456	-0,1379517	-	-	-
7	1,0070664	-0,0572094	-	-	-	36	0,9868744	-0,1319054	-	-	-
8	1,0203981	-0,0348511	322,43011	49,545197	-	37	0,994551	-0,126229	-	-	-
9	1,0012408	-0,0922051	0	38,397331	-	38	1,0183874	-0,1073997	-	-	-
10	0,9966784	-0,0959582	-	-	-	39	0,9925237	-0,1273238	-	-	-
11	0,9894011	-0,0799509	-	-	-	40	0,9861681	-0,133885	-	-	-
12	1,0172609	-0,0565945	497,99991	63,483055	-	41	1,0395176	-0,1522091	-	-	-
13	0,9949337	-0,0522059	-	-	-	42	0,9989836	-0,1746376	-	-	-
14	0,992678	-0,0355114	-	-	-	43	1,0599971	-0,101397	-	-	-
15	1,0135275	0,0168089	-	-	-	44	1,0276442	-0,0870269	-	-	-
16	1,0148691	-0,0684355	-	-	-	45	1,0599992	-0,0305036	-	-	-
17	1,0156497	-0,0518395	-	-	-	46	1,0506263	-0,0699061	-	-	-
18	1,0591953	0,0003772	-	-	1	47	1,0306053	-0,0996873	-	-	-
19	1,0051926	-0,057251	-	-	-	48	1,0273834	-0,1033595	-	-	-
20	0,9865779	-0,081573	-	-	-	49	1,0363109	-0,1128606	-	-	-
21	1,017207	-0,1066141	-	-	-	50	1,0188856	-0,1273461	-	-	-
22	1,0157422	-0,110687	-	-	-	51	1,0446784	-0,1156156	-	-	-
23	1,0141841	-0,1129209	-	-	-	52	1,0215807	-0,1284749	-	-	-
24	1,0044601	-0,1354189	-	-	-	53	1,0080411	-0,1430004	-	-	1
25	1,0596478	-0,2196767	-	-	1	54	1,0263742	-0,1318111	-	-	-
26	1,0064387	-0,1317297	-	-	-	55	1,0548911	-0,1134838	-	-	-
27	1,0301088	-0,1191353	-	-	-	56	0,991073	-0,1782098	-	-	-
28	1,0460092	-0,1053721	-	-	-	57	0,9856657	-0,1872849	-	-	-
29	1,0599982	-0,0953827	-	-	-						

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 52 – Resultado por linhas do sistema nesta_case57_ieee_api (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	-133,36554	134,96101	44,863976	-53,180141	-
2	3	1	-138,42101	143,91824	15,178564	-8,4266195	-
3	4	1	189,56717	-185,98509	-2,7416043	10,248633	-
4	5	1	62,345249	-60,057938	-10,807379	12,894037	-
4	6	1	82,120941	-79,450111	-3,6785986	9,1790104	-
6	7	1	32,446705	-32,239079	3,3011668	-5,0711131	-
6	8	1	4,9155016	-4,9054928	-4,9666719	0,1370277	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case57 ieee api (BD-OTS) (continuação)

8	9	1	119,61288	-118,21969	15,733716	-14,226711	-
9	10	1	2,699136	-2,6947818	-0,0737158	-4,2973442	-
9	11	1	-9,1849241	9,2798061	15,768792	-17,616657	-
9	12	1	-12,820092	12,930061	-6,2718878	-1,0914745	-
9	13	1	-21,819729	22,10775	9,108674	-12,207101	-
13	14	1	-33,24514	33,424969	15,055241	-15,550393	-
13	15	1	-78,257507	79,930573	4,560463	-1,475354	-
1	15	1	-14,681273	14,811132	18,428221	-28,097487	-
1	16	1	35,174496	-34,645294	-1,0169508	-2,2996967	-
1	17	1	51,452278	-50,854015	3,8170929	-4,099606	-
3	15	1	282,23447	-270,65704	22,291069	9,7354422	-
4	18	1	17,749952	-17,749952	-2,3903036	4,0292182	0
4	18	1	23,76894	-23,76894	6,6276469	-4,3884439	6
5	6	1	45,06794	-44,402088	-16,894037	17,019783	-
7	8	1	-34,560108	34,742729	-12,732753	11,674451	-
10	12	1	-33,436783	33,767719	-9,922945	8,1044655	-
11	13	1	-36,078545	36,378773	3,1104231	-3,9756153	-
12	13	1	3,9893162	-3,7388201	34,827023	-40,125431	-
12	16	1	14,983766	-14,944704	-1,3532279	-0,7003034	-
12	17	1	-2,4209485	2,4240134	-1,0037335	-3,900394	-
14	15	1	-97,684692	99,344551	-5,5115509	9,3318081	-
18	19	1	10,148891	-9,7126598	1,7781729	-1,1299757	-
19	20	1	5,9026604	-5,8042884	0,5299757	-0,3791158	-
21	20	1	-3,1542883	3,1542883	0,7033554	-0,6208842	-4
21	22	1	3,1542883	-3,1468592	-0,7033554	0,7151653	-
22	23	1	15,399387	-15,376617	0,3993327	-0,3643724	-
23	24	1	8,106617	-7,9978137	-1,7356277	1,0476665	-
24	25	1	8,099328	-8,099328	1,6010211	-0,9019125	11
24	25	1	7,7832565	-7,7832565	1,5385422	-0,866716	11
24	26	1	-7,8847704	7,8847704	-4,1872296	4,2245951	0
26	27	1	-7,8847704	8,0151138	-4,2245951	4,4252453	-
27	28	1	-18,735113	18,953667	-4,9252453	5,2626243	-
28	29	1	-24,253668	24,500248	-7,562624	7,9088969	-
7	29	1	66,799187	-66,799187	17,803867	-15,098988	10
25	30	1	8,6125841	-8,4909735	5,1934643	-5,0114989	-
30	31	1	4,3409734	-4,2528911	3,211499	-3,0772133	-
31	32	1	-2,4371092	2,4667914	0,1772133	-0,1330117	-
32	33	1	4,3886118	-4,3800001	1,9079087	-1,9	-
34	32	1	8,7054033	-8,7054033	3,3283577	-2,5748971	13
34	35	1	-8,7054033	8,7529268	-3,3283577	3,096669	-
35	36	1	-15,672927	15,800004	-6,0966687	6,1011472	-
36	37	1	-19,405607	19,526039	-5,2798076	5,4318018	-
37	38	1	-23,967045	24,385696	-7,9526653	8,3989191	-
37	39	1	4,4410057	-4,4347048	2,5208635	-2,5108716	-
36	40	1	3,6056037	-3,6013916	-0,8213391	0,8278822	-
22	38	1	-12,252527	12,280696	-1,114498	1,1577778	-
11	41	1	10,904975	-10,904975	7,4885206	-6,3819451	16
41	42	1	10,179095	-9,9102964	6,0585833	-5,6014948	-
41	43	1	-13,583764	13,583764	-4,8219929	5,6141601	-
38	44	1	-35,545872	35,898876	1,7133167	-1,2080687	-
15	45	1	51,200771	-51,200771	5,50559	-3,0657361	8
14	46	1	52,149719	-52,149719	15,761945	-13,823797	11
46	47	1	52,149719	-51,542198	13,823797	-12,374208	-
47	48	1	17,292202	-17,240862	0,7742071	-0,7084804	-
48	49	1	2,305325	-2,2431867	-8,8165188	8,4015627	-
49	50	1	14,969351	-14,784842	4,8268533	-4,5320082	-
50	51	1	-9,4351587	9,6015644	-5,9679918	6,2321272	-
10	51	1	30,361563	-30,361563	12,220289	-11,532127	9
13	49	1	35,994949	-35,994949	34,392445	-30,440193	16
29	52	1	22,698942	-22,010651	4,5900903	-3,6975086	-
52	53	1	16,360651	-16,163574	1,4975086	-1,2430167	-
53	54	1	-6,8964252	6,9945769	-2,3552577	2,4765105	-
54	55	1	-11,724577	11,975296	-3,8765101	4,2043843	-
11	43	1	15,893765	-15,893765	7,0177121	-6,6141596	13
44	45	1	-49,738876	51,200771	-0,5919313	3,0657361	-
40	56	1	3,6013916	-3,6013916	-0,8278822	0,9977913	-1
56	41	1	-6,7624831	7,0396447	-1,8701981	2,145355	-
56	42	1	-1,7109215	1,720297	-1,1858764	1,2014949	-
39	57	1	4,4347048	-4,4347048	2,5108716	-2,1708553	4
57	56	1	-3,2952952	3,3147957	0,1708553	-0,1417167	-
38	49	1	-2,417742	2,5087852	-8,8883076	8,7117777	-
38	48	1	-14,842781	14,935536	-9,3817043	9,5249987	-
9	55	1	19,815296	-19,815296	8,0921822	-7,6043844	10

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 53 – Resultado por barras do sistema nesta_case118_ieee (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt
1	1,0346774	-0,5398057	0	14,999207	-	60	1,0571411	-0,2479757	-	-	-
2	1,0452328	-0,5166976	-	-	-	61	1,0599999	-0,2369798	0,0000272	124,54737	-
3	1,0408301	-0,5307786	-	-	-	62	1,0539622	-0,2203475	0	19,988016	-
4	1,0588577	-0,5002697	0	16,140204	-	63	1,0405384	-0,2518824	-	-	-
5	1,0599942	-0,4966922	-	-	1	64	1,059586	-0,2075836	-	-	-
6	1,056089	-0,5103068	0	22,286472	-	65	1,0599998	-0,1063034	342,64151	16,386444	-
7	1,0566181	-0,5058177	-	-	-	66	1,0599999	-0,0265828	864,99988	-66,999123	-
8	1,0426697	-0,469273	0	-86,950668	-	67	1,0469662	-0,1296934	-	-	-
9	1,0599978	-0,4706376	-	-	-	68	1,0544308	-0,094053	-	-	-
10	1,0374724	-0,4689351	0,0000244	-138,76651	-	69	1,0599999	0	880,99994	-291,46304	-
11	1,0506644	-0,5060934	-	-	-	70	1,0393161	-0,1792677	0	31,998173	-
12	1,0597769	-0,492804	287	59,219116	-	71	1,0437062	-0,1937385	-	-	-
13	1,0376364	-0,5203055	-	-	-	72	1,0507168	-0,2517002	0	-1,6152809	-
14	1,0554743	-0,5014691	-	-	-	73	1,046762	-0,1968819	0	7,5566611	-
15	1,0463969	-0,4994395	0	29,987791	-	74	1,0083876	-0,1873101	0	8,9994316	1
16	1,0518377	-0,4955333	-	-	-	75	1,0089297	-0,1631457	-	-	-
17	1,0567369	-0,4635083	-	-	-	76	0,9961952	-0,1981122	0	22,999655	-
18	1,0488175	-0,4951558	0	40,943089	-	77	1,0429931	-0,1350581	0	69,998337	-
19	1,0446545	-0,4985486	0	23,993639	-	78	1,0386571	-0,142003	-	-	-
20	1,0333743	-0,4755893	-	-	-	79	1,0409969	-0,141224	-	-	1
21	1,0292908	-0,4443514	-	-	-	80	1,0599997	-0,1153919	354,26447	33,662338	-
22	1,0344325	-0,3970226	-	-	-	81	1,0519888	-0,1016456	-	-	-
23	1,0546262	-0,3071183	-	-	-	82	1,032855	-0,1461098	-	-	1
24	1,0599988	-0,291182	0	8,0899067	-	83	1,0347893	-0,1259045	-	-	1
25	1,0599997	-0,2025948	266,99997	132,71767	-	84	1,0390334	-0,0843963	-	-	-
26	1,0599997	-0,19563	286,55341	-193,05133	-	85	1,0480577	-0,0594069	0	22,999701	-
27	1,0482072	-0,4155359	0	40,484726	-	86	1,0410511	-0,0831909	-	-	-
28	1,0385339	-0,4407807	-	-	-	87	1,0537844	-0,0848589	0,0000129	3,9996538	-
29	1,0355229	-0,4549632	-	-	-	88	1,0462927	-0,0044934	-	-	-
30	1,050853	-0,402403	-	-	-	89	1,0599999	0,0633169	596,21252	-30,09911	-
31	1,0373541	-0,4527997	22,999985	11,99875	-	90	1,0504487	-0,0369163	0	73,608093	-
32	1,0471153	-0,4244578	0	38,193329	-	91	1,0445828	-0,0347326	0	-7,3996677	-
33	1,0426359	-0,4876265	-	-	-	92	1,0448787	-0,0213119	0	-2,9961612	-
34	1,0528368	-0,4545135	0	12,774841	1	93	1,0370948	-0,0293151	-	-	-
35	1,0503654	-0,461679	-	-	-	94	1,0317832	-0,1576693	-	-	-
36	1,0508355	-0,4618915	0	23,598002	-	95	1,0213647	-0,1640841	-	-	-
37	1,0554954	-0,4466563	-	-	1	96	1,0311185	-0,1550948	-	-	-
38	1,0405215	-0,3712015	-	-	-	97	1,0408995	-0,1412516	-	-	-
39	1,0362698	-0,48819247	-	-	-	98	1,0502086	-0,1619848	-	-	-
40	1,0355493	-0,4887056	0	33,16053	-	99	1,0532596	-0,1884731	0	0,2629987	-
41	1,0304419	-0,4874196	-	-	-	100	1,0554018	-0,1859755	172,63789	79,279366	-
42	1,0420285	-0,4401332	0	57,825615	-	101	1,033059	-0,2080758	-	-	-
43	1,0324717	-0,4266239	-	-	-	102	1,0431054	-0,0236276	-	-	-
44	1,0211354	-0,3434544	-	-	1	103	1,0529269	-0,2341235	97,999985	28,066618	-
45	1,0169461	-0,2971226	-	-	1	104	1,0408912	-0,2902411	0	22,993206	-
46	1,0345303	-0,245333	0,0000157	7,1663485	1	105	1,038885	-0,3098437	0	13,316367	1
47	1,0414333	-0,1880461	-	-	-	106	1,0109875	-0,3217777	-	-	-
48	1,0452012	-0,2037798	-	-	1	107	1,022632	-0,3627318	0	13,980377	1
49	1,0481933	-0,1821729	229,7654	67,088722	-	108	1,0318547	-0,3368124	-	-	-
50	1,0416186	-0,1931524	-	-	-	109	1,0293559	-0,3473727	-	-	-
51	1,012345	-0,319286	-	-	-	110	1,0264457	-0,370095	0	22,996803	1
52	1,0061741	-0,3433208	-	-	-	111	1,0293834	-0,3709289	0,0002621	2,9459801	-
53	1,0078419	-0,3817202	-	-	-	112	1,0129117	-0,4134759	0	16,171476	-
54	1,0254195	-0,3842871	0,0000331	52,55772	-	113	1,0555369	-0,4600854	0	-0,9619141	-
55	1,0254689	-0,3917325	0	22,776928	-	114	1,0430803	-0,4290706	-	-	-
56	1,024865	-0,3879741	0	14,96861	-	115	1,0427682	-0,429134	-	-	-
57	1,019117	-0,3985004	-	-	-	116	1,0599976	-0,1012127	0	152,63554	-
58	1,0150268	-0,3534705	-	-	-	117	1,0450907	-0,5162913	-	-	-
59	1,0599993	-0,3359163	0,0000171	109,54477	-	118	0,9967092	-0,186815	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 54 – Resultado por linhas do sistema nesta_case118_ieee (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	-25,862577	26,054106	-4,1587701	2,043148	-
1	3	1	-25,137421	25,219921	-7,8420243	6,947927	-
4	5	1	-51,135983	51,177246	-3,8304768	3,7818718	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case118 ieee (BD-OTS) (continuação)

3	5	1	-36,962547	37,287102	-11,16592	9,4865322	-
5	6	1	28,567341	-28,480652	0,7614726	-1,9644393	-
6	7	1	-23,519348	23,542381	2,2509103	-2,7602692	-
8	9	1	0,2050059	-0,1262139	-122,41451	-5,0454845	-
8	5	1	117,03169	-117,03169	63,054539	-58,973389	5
9	10	1	0,1262139	0,0000244	5,0454845	-138,76651	-
4	11	1	12,135983	-12,0936	7,9706798	-9,7758799	-
5	11	0	-	-	-	-	-
11	12	1	-82,562546	82,959168	-23,559588	24,307152	-
2	12	1	-46,054108	46,434898	-11,043148	10,556028	-
3	12	1	-27,25737	27,595039	-5,7820072	2,4191687	-
7	12	1	-42,542381	42,682236	0,7602692	-1,1873211	-
11	13	1	24,656141	-24,507547	10,335469	-11,892668	-
12	14	1	14,360563	-14,320209	1,121969	-3,0205986	-
13	15	1	-9,4924526	9,555088	-4,1073313	-2,4928205	-
14	15	1	0,3202078	-0,3077612	2,0205986	-7,5243278	-
12	16	1	5,8365731	-5,8161507	7,40802	-9,713232	-
15	17	1	-89,700516	90,672417	1,537986	-3,2302611	-
16	17	1	-19,183849	19,337023	-0,2867672	-4,2853236	-
17	18	1	69,619179	-69,085259	-0,0106711	0,7641286	-
18	19	1	9,0852594	-9,0721493	6,1789603	-7,3724456	-
19	20	1	-18,11965	18,242142	12,591584	-15,240026	-
15	19	1	-0,9719413	0,9747025	4,3715663	-5,4665561	-
20	21	1	-36,242142	36,497978	12,240025	-13,350608	-
21	22	1	-50,497978	51,009769	5,3506079	-5,5945807	-
22	23	1	-61,009769	62,201851	0,5945805	0,5393311	-
23	24	1	-36,53817	36,700386	-3,9714768	-1,0045558	-
23	25	1	-140,35049	143,2226	23,106136	-18,036221	-
26	25	1	19,33354	-19,33354	-156,07759	165,51891	-9
25	27	1	143,1109	-137,3078	-14,765014	24,909483	-
27	28	1	33,219891	-33,023689	3,6455135	-5,1200652	-
28	29	1	16,023687	-15,967189	-1,879935	-0,4547889	-
30	17	1	176,96223	-176,96223	25,294298	-14,342086	2
8	30	1	-145,23669	146,07295	-27,590708	-18,950682	-
26	30	1	267,21988	-262,12808	-36,973747	-9,3673725	-
17	31	1	-3,2271585	3,3162496	11,895749	-15,976602	-
29	31	1	-8,0328112	8,0402775	-3,5452108	2,6765051	-
23	32	1	107,68681	-104,30735	-22,67399	22,0119	-
31	32	1	-31,356543	31,628859	-1,7011527	-0,1252981	-
27	32	1	12,314647	-12,282066	-3,2195628	1,2130122	-
15	33	1	-8,5748692	8,6122398	4,095387	-7,4577599	-
19	34	1	-18,782904	19,030994	-0,7589437	-5,377449	-
35	36	1	1,1793149	-1,1787592	-5,2477832	4,9545059	-
35	37	1	-34,179314	34,2967	-3,7522168	2,8213623	-
33	37	1	-31,612238	31,993815	-1,5422404	-1,1802528	-
34	36	1	29,891676	-29,821241	-2,0551863	1,6434962	-
34	37	1	-93,930199	94,1343	-4,3760848	4,0320387	-
38	37	1	227,67473	-227,67473	58,790421	-40,782478	5
37	39	1	38,816685	-38,363964	6,5267124	-7,9854431	-
37	40	1	28,433222	-27,997881	0,7308576	-4,0890231	-
30	38	1	-60,907085	61,092072	3,0237544	-47,016075	-
39	40	1	11,363962	-11,341019	-3,0145574	1,4245291	-
40	41	1	0,3823723	-0,3667321	10,092954	-11,344403	-
40	42	1	-27,04347	27,43614	2,732069	-6,4658947	-
41	42	1	-36,633266	37,155338	1,344403	-3,3193197	-
43	44	1	-32,166176	32,8717	10,989714	-14,539936	-
34	43	1	-13,992474	14,166175	14,102075	-17,989714	-
44	45	1	-48,8717	49,455441	16,967112	-16,945232	-
45	46	1	-40,244621	40,871094	-1,9924326	0,6228081	-
46	47	1	-45,743137	46,517815	7,7644639	-8,5800562	-
46	48	1	-23,127941	23,430576	-0,5183929	-3,6338563	-
47	49	1	-12,521784	12,559059	-8,2771749	6,6481471	-
42	49	1	-80,295738	85,020401	22,305414	-10,355349	-
42	49	1	-80,295738	85,020401	22,305414	-10,355349	-
45	49	1	-62,210823	64,831177	7,2794585	-4,8889327	-
48	49	1	-43,430576	43,755077	9,0205383	-9,4832783	-
49	50	1	17,073311	-17	2,1603701	-4	-
49	51	1	104,96757	-100,09097	-4,418385	14,533931	-
51	52	1	40,629623	-40,300976	-3,617502	3,1474705	-
52	53	1	22,300974	-22,087164	-8,1474705	4,895546	-
53	54	1	-0,9128352	0,9661549	-15,895546	12,938677	-
49	54	1	73,939858	-70,302048	-6,9004774	13,368013	-
49	54	1	72,385483	-68,213814	-9,9046278	16,026001	-
54	55	1	10,468116	-10,449477	-3,594872	1,5487435	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case118 ieee (BD-OTS) (continuação)

54	56	1	39,06992	-39,029293	-5,6081123	4,9799204	-
55	56	1	-22,46973	22,499197	11,215266	-11,517152	-
56	57	1	12,048559	-12	0,6091338	-3	-
50	57	0	-	-	-	-	-
56	58	1	-29,496309	29,932108	20,281168	-21,571373	-
51	58	1	42,461338	-41,93211	-18,916428	18,571373	-
54	59	1	-24,988298	25,329521	-12,571986	7,6240039	-
56	59	1	-24,406838	24,90058	-8,7255344	4,0428329	-
56	59	1	-25,615322	26,143059	-8,658926	4,4034729	-
55	59	1	-30,080792	30,525217	-11,987081	7,8703156	-
59	60	1	-63,718296	64,96566	16,893656	-15,401403	-
59	61	1	-69,848198	71,377091	16,757095	-14,12478	-
60	61	1	-92,029129	92,229561	-4,6943078	4,0876746	-
60	62	1	-50,936527	51,257412	17,095711	-17,26778	-
61	62	1	-43,507511	43,699646	26,413456	-26,631588	-
63	59	1	250,33188	-250,33188	83,85511	-61,046612	7
63	64	1	-250,33188	251,4101	-83,85511	72,573891	-
64	61	1	120,09911	-120,09911	-101,93976	108,17104	-4
38	65	1	-288,76678	295,87354	-11,774344	-25,84269	-
64	65	1	-371,50922	374,87766	29,365873	-34,229012	-
49	66	1	-180,21614	185,75444	35,073864	-9,5534258	-
49	66	1	-180,21614	185,75444	35,073864	-9,5534258	-
62	66	1	-92,674316	96,721054	23,95137	-12,106192	-
62	67	1	-79,282745	80,920326	25,936016	-21,930594	-
65	66	1	-246,37029	246,37029	67,832169	-47,113354	3
66	67	1	111,39967	-108,92033	-6,6727257	14,930594	-
65	68	1	-81,73938	81,845726	8,6259756	-78,703003	-
47	69	1	-67,996025	71,927452	16,857233	-11,747291	-
49	69	1	-56,35466	59,525044	14,438872	-13,210766	-
68	69	1	-308,52011	308,52011	283,19781	-233,84624	14
69	70	1	153,47403	-147,17815	-11,942545	25,152069	-
24	70	1	-29,860882	29,879431	1,4337168	-9,2172508	-
70	71	1	38,712101	-38,549667	-22,624931	22,326298	-
24	72	1	-19,839504	20,057451	7,6607456	-12,220736	-
71	72	1	32,541508	-32,057453	-13,525443	10,605454	-
71	73	1	6,0081625	-6	-8,8008556	7,5566611	-
70	74	1	12,586623	-12,371688	18,688288	-21,51055	-
70	75	0	-	-	-	-	-
69	75	1	144,9971	-137,39659	0,9121308	8,7056656	-
74	75	1	-55,628311	56,034523	15,712127	-15,423279	-
76	77	1	-48,870483	50,045723	-17,269671	17,359491	-
69	77	1	142,55627	-136,89883	-21,628326	28,642929	-
75	77	1	-18,241413	18,515959	-14,034102	9,7060022	-
77	78	1	65,74968	-65,590569	16,05755	-16,902136	-
78	79	1	-5,4094338	5,4147882	-9,0978642	8,4211483	-
77	80	1	-51,20113	51,662487	-20,752461	16,849711	-
77	80	1	-23,533796	23,711048	-11,340193	9,452198	-
79	80	1	-44,414787	44,744038	-18,747658	18,169704	-
68	81	1	42,492657	-42,462894	-35,693367	-53,590721	-
81	80	1	42,462894	-42,462894	53,590721	-52,103008	4
77	82	1	16,322397	-16,236855	2,3250165	-10,886108	-
82	83	1	-55,243588	55,579178	10,001458	-12,960416	-
83	84	1	-28,625551	29,173542	9,5469847	-11,16362	-
83	85	1	-46,953629	47,853336	4,1213212	-4,7990856	-
84	85	1	-40,173542	40,631535	4,1636205	-4,5353546	-
85	86	1	21,15324	-21,010649	-1,3140131	-1,1963357	-
86	87	1	0,0106492	0,0000129	-8,8036642	3,9996538	-
85	88	1	-56,173355	56,785904	12,932648	-12,835191	-
85	89	1	-77,46476	78,785416	5,7155061	-1,3777093	-
88	89	1	-104,7859	106,18199	2,8351915	2,1708801	-
89	90	1	57,224709	-55,689716	-10,375549	10,067163	-
89	90	1	109,29	-106,73737	-16,284071	15,173915	-
90	91	1	-0,5729096	0,5860986	6,3670168	-8,6718245	-
89	92	1	185,99998	-182,95088	0,0468211	9,4365616	-
89	92	1	58,730419	-57,522636	-4,27948	4,5524349	-
91	92	1	-10,586099	10,629155	1,2721567	-4,697536	-
92	93	1	12,042688	-12	4,7779107	-7	-
92	94	1	89,063683	-85,504227	-14,336118	21,650906	-
93	94	0	-	-	-	-	-
94	95	1	21,166658	-21,069214	17,790203	-18,639624	-
80	96	1	26,216702	-25,952036	9,3907881	-13,439136	-
82	96	1	17,480446	-17,433508	-4,7795587	-0,8604653	-
94	96	1	-2,6522644	2,6547003	0,3899605	-2,8290408	-
80	97	1	33,580647	-33,357895	14,065359	-15,731452	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case118_ieee (BD-OTS) (continuação)

80	98	1	48,03997	-47,551121	-1,4648566	0,4992136	-
80	99	1	38,772446	-38,159699	-6,697557	3,3818927	-
92	100	1	58,734615	-56,607594	-14,14911	18,626997	-
94	100	1	36,98983	-36,298164	-55,83107	51,505894	-
95	96	1	-20,930786	21,024626	-12,360376	11,108139	-
96	97	1	-18,293781	18,357893	-8,979497	6,7314529	-
98	100	1	13,551122	-13,472603	-8,4992132	3,577229	-
99	100	1	-3,8403008	3,8432922	-3,1188941	0,7313188	-
100	101	1	22,171192	-22	12,202962	-15,000001	-
92	102	1	5,0033751	-5	1,4196953	-3	-
101	102	0	-	-	-	-	-
100	103	1	95,288429	-93,917069	-24,597014	23,140389	-
100	104	1	55,633408	-54,378819	-4,8807354	4,6118217	-
103	104	1	38,177727	-37,563152	-4,3980846	2,0261674	-
103	105	1	49,218117	-48,036205	-7,4384222	6,5649533	-
100	106	1	65,079926	-62,748379	4,112709	-1,9090248	-
104	105	1	53,941979	-53,668995	-8,6447821	8,6166639	-
105	106	0	-	-	-	-	-
105	107	1	30,996952	-30,524576	-1,4858655	-1,8982387	-
105	108	1	39,708244	-39,323456	-4,7937436	3,8533952	-
106	107	1	19,748381	-19,475424	-14,090975	10,153274	-
108	109	1	37,323456	-37,184124	-4,8533955	4,4283228	-
103	110	1	81,52121	-79,175926	0,7627363	5,1391168	-
109	110	1	29,184128	-28,950056	-7,4283228	5,9356151	-
110	111	1	0,0030691	0,0002621	-5,0477691	2,9459801	-
110	112	1	69,12291	-68	-6,7086143	3,1714764	-
17	113	1	-10,439224	10,452613	6,9725933	-7,7851005	-
32	113	1	16,65406	-16,452612	-11,883722	6,8231864	-
32	114	1	9,3064966	-9,2929115	3,977438	-5,6940136	-
27	115	1	20,773264	-20,707295	2,1492927	-4,0067167	-
114	115	1	1,2929121	-1,2927058	2,6940136	-2,9932835	-
68	116	1	184,18172	-184	-168,80144	152,63554	-
12	117	1	20,131496	-20	4,5940971	-8	-
75	118	1	52,603485	-52,194031	9,7517138	-9,5982618	-
76	118	1	-19,129517	19,194027	4,2693253	-5,4017382	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 55 – Resultado por barras do sistema nesta_case118_ieee_api (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt
1	0,9953323	0,3278342	0	-18,629459	-	60	0,9655978	0,1017068	-	-	-
2	1,0230421	0,3632826	-	-	-	61	0,9677553	0,128956	0,0000109	164,59471	-
3	1,0136923	0,3429644	-	-	-	62	0,9400001	0,0259934	0	-19,99995	-
4	1,0599999	0,3978197	0	50,401527	-	63	0,9906364	0,1787481	-	-	-
5	1,0599999	0,4057307	-	-	1	64	1,004814	0,1692331	-	-	-
6	1,0354825	0,3802241	0	-29,88514	-	65	0,9577277	0,2023198	852,51294	-239,17661	-
7	1,0402504	0,384873	-	-	-	66	0,9711446	0,0513557	4,6312099	14,736873	-
8	0,9884784	0,4726163	0	98,361801	-	67	0,9477772	0,0122386	-	-	-
9	0,9957166	0,689192	-	-	-	68	0,9492871	0,0817971	-	-	-
10	1,0151969	0,9150245	709,69281	20,882528	-	69	1,0050232	0	123,99999	-207,57307	-
11	1,0420599	0,3753754	-	-	-	70	1,0599999	-0,1598321	0	294,00098	-
12	1,0515562	0,4019723	684,21893	77,68943	-	71	1,0538585	-0,1466033	-	-	-
13	1,0127935	0,2904031	-	-	-	72	1,0174464	-0,0637228	0	24,739967	-
14	1,0310231	0,3187739	-	-	-	73	1,054774	-0,1493094	0	2,6252222	-
15	1,0117416	0,1246626	0	26,789961	-	74	0,9400001	-0,2056567	0	-74,689415	0
16	1,0295874	0,3139227	-	-	-	75	0,9617435	-0,1835585	-	-	-
17	1,0291613	0,188046	-	-	-	76	0,9568645	-0,3246602	0	40,799912	-
18	1,0327418	0,1085754	0	111,59965	-	77	1,0156388	-0,1472644	0	158,84975	-
19	1,0141159	0,0860781	0	24,597324	-	78	1,0091578	-0,1564197	-	-	-
20	0,9805793	0,0527817	-	-	-	79	1,0106232	-0,1479159	-	-	1
21	0,9627346	0,0543599	-	-	-	80	1,034438	-0,0814686	378,15256	510,99912	-
22	0,9536498	0,0796671	-	-	-	81	1,0101694	0,020911	-	-	-
23	0,9510373	0,1502997	-	-	-	82	1,0074431	-0,1462012	-	-	1
24	0,94	0,0775595	0	-57,73843	-	83	1,0147797	-0,1135155	-	-	0
25	0,9574139	0,3160144	0,0000162	-67,416122	-	84	1,0384091	-0,0503924	-	-	-
26	1,0599999	0,4398418	493,90405	11,465555	-	85	1,0599999	-0,0116847	0	204,41432	-
27	1,0599999	0,1161494	0	197,25232	-	86	1,0512666	-0,0078932	-	-	-
28	1,0461049	0,1467571	-	-	-	87	1,0599979	0,0603505	36,734264	-1,7957922	-
29	1,0444878	0,2052173	-	-	-	88	0,9920151	0,0751421	-	-	-
30	1,0145227	0,2843209	-	-	-	89	0,9716222	0,1997509	778,78973	-103,29643	-
31	1,0514925	0,2378812	326,02899	75,73848	-	90	0,9443789	0,0155786	0	93,743065	-

continua

Resultado por barras do sistema nesta case118_ieee_api (BD-OTS) (continuação)

32	0,9692075	0,1455369	0	-103,07736	-	91	0,9400004	0,0447606	0	-10,966826	-
33	1,020533	0,0402967	-	-	-	92	0,9511086	0,0993909	0	-0,3174736	-
34	1,0584655	-0,012788	0	67,027626	1	93	0,9400001	0,0820578	-	-	-
35	1,0563205	-0,0267019	-	-	-	94	0,9485549	-0,0824742	-	-	-
36	1,0575939	-0,0267899	0	43,781498	-	95	0,94	-0,1144206	-	-	-
37	1,0599999	-0,0025179	-	-	0	96	0,9596879	-0,1172132	-	-	-
38	0,9758838	0,1210706	-	-	-	97	0,9905585	-0,1101281	-	-	-
39	1,02361	-0,1193241	-	-	-	98	1,0123794	-0,1387565	-	-	-
40	1,0211972	-0,1637482	0	96,783279	-	99	0,9762639	-0,0397974	0	-17,848787	-
41	1,0073383	-0,1917768	-	-	-	100	0,9745069	0,010904	564,14935	17,760983	-
42	0,9699377	-0,1365433	0	16,295954	-	101	0,9470626	0,0191754	-	-	-
43	1,0108447	0,0007611	-	-	-	102	0,9479455	0,0693854	-	-	-
44	0,9683423	0,0972118	-	-	0	103	0,9564419	-0,0751282	59,555244	-29,341152	-
45	0,9663587	0,1590867	-	-	0	104	0,9647536	-0,1717337	0	60,400177	-
46	1,0152305	0,3689475	416,0087	-40,534523	1	105	0,9594331	-0,1986059	0	46,537804	1
47	1,0097409	0,2088143	-	-	-	106	0,9428933	-0,2115988	-	-	-
48	1,0141252	0,1836083	-	-	1	107	0,9401072	-0,2959163	0	19,47971	1
49	1,0195684	0,1515809	381	150,71365	-	108	0,964439	-0,1996433	-	-	-
50	1,005091	0,1074757	-	-	-	109	0,9667899	-0,1989932	-	-	-
51	0,9968196	0,0898238	-	-	-	110	0,9782752	-0,1870023	0	62,29438	1
52	0,9987767	0,0981419	-	-	-	111	1,0103474	-0,0707317	153,88687	5,8962269	-
53	1,0205936	0,1680525	-	-	-	112	0,9517222	-0,267856	0	19,428339	-
54	1,0599997	0,2591342	494	44,249706	-	113	1,0488482	0,1730473	0	108,89774	-
55	1,0442666	0,1920416	0	15,686521	-	114	1,0009784	0,1171052	-	-	-
56	0,9995191	0,0529081	0	23,999418	-	115	1,006968	0,1137879	-	-	-
57	0,9973484	0,064571	-	-	-	116	0,9400001	0,0742058	0	-206,71329	-
58	0,9944357	0,0658303	-	-	-	117	1,0316983	0,3605656	-	-	-
59	1,0599998	0,1924605	733,99994	158,34369	-	118	0,9455578	-0,2105	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 56 – Resultado por linhas do sistema nesta case118_ieee_api (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	-40,571545	41,140736	-15,92039	15,209664	-
1	3	1	-44,878456	45,251537	-29,709068	29,843432	-
4	5	1	-106,12679	106,31212	23,729033	-23,124691	-
3	5	1	-68,268868	69,523811	-27,730566	30,299736	-
5	6	1	59,691917	-59,180069	34,832634	-34,075577	-
6	7	1	-27,939934	27,986485	-17,809563	17,428062	-
8	9	1	-684,90784	696,90668	49,95179	-14,338934	-
8	5	1	288,51181	-288,51181	120,93523	-98,834015	16
9	10	1	-696,90668	709,69281	14,338934	20,882528	-
4	11	1	40,786789	-40,431767	14,672491	-15,4349	-
5	11	1	52,983944	-52,446884	11,882339	-11,998055	-
11	12	1	-149,61714	150,84424	-3,3645861	6,8566895	-
2	12	1	-74,650734	75,744148	-24,209665	26,119715	-
3	12	1	-42,32267	43,213707	-12,112865	10,72776	-
7	12	1	-59,816486	60,130127	-19,428062	19,709047	-
11	13	1	125,21579	-121,98721	7,7975402	0,8288699	-
12	14	1	126,62703	-123,508	-3,6672487	11,954499	-
13	15	1	65,027222	-61,825729	-16,828869	20,922859	-
14	15	1	100,048	-94,386086	-12,954499	26,272932	-
12	16	1	115,04114	-112,50148	2,3022428	5,3712583	-
15	17	1	-148,14369	150,98471	6,9301052	-2,148423	-
16	17	1	70,611481	-68,404793	-15,371259	19,187317	-
17	18	1	157,57607	-154,51564	-39,721321	50,906902	-
18	19	1	53,98563	-53,601654	26,692745	-26,197275	-
19	20	1	33,120354	-32,72855	20,873541	-22,019499	-
15	19	1	90,76722	-89,682816	-32,320446	34,84462	-
20	21	1	2,5685511	-2,4907253	19,019501	-20,697905	-
21	22	1	-20,969275	21,111607	12,697906	-14,295981	-
22	23	1	-37,861607	38,447289	9,2959824	-10,237196	-
23	24	1	129,47826	-126,96284	-11,63976	16,354742	-
23	25	1	-179,36682	185,23454	39,080769	-16,857107	-
26	25	1	295,31882	-295,31882	9,7816696	26,864201	-16
25	27	1	110,0843	-104,21221	-77,423218	89,527283	-
27	28	1	-33,997498	34,304478	24,227139	-25,250479	-
28	29	1	-62,784481	63,72097	18,250481	-17,124769	-
30	17	1	253,82533	-253,82533	-74,137024	101,51318	-3
8	30	1	368,39606	-362,31042	-72,525215	92,126267	-
26	30	1	198,58524	-195,58345	1,6838862	-67,11393	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case118 ieec api (BD-OTS) (continuação)

17	31	1	-35,429615	35,995667	-5,2128978	2,7606399	-
29	31	1	-103,93098	105,01853	13,124768	-10,703159	-
23	32	1	-0,2887106	0,3665371	-20,203814	9,6727934	-
31	32	1	112,9748	-108,6259	56,680996	-44,872768	-
27	32	0	-	-	-	-	-
15	33	1	62,798286	-61,131352	-25,015488	27,174526	-
19	34	1	34,77412	-33,369659	-29,923557	27,746454	-
35	36	1	-1,843774	1,8471227	-12,932366	12,648216	-
35	37	1	-53,446228	53,729977	3,9323661	-4,1261067	-
33	37	1	22,591351	-21,920048	-36,174522	34,509399	-
34	36	1	54,028671	-53,787125	-14,025889	14,133284	-
34	37	1	-118,33742	118,66296	15,027867	-14,93658	-
38	37	1	374,0567	-374,0567	61,709553	-14,937494	16
37	39	1	121,30055	-117,08441	5,1146326	5,876461	-
37	40	1	102,28327	-96,756218	-5,6238527	16,732779	-
30	38	1	304,06851	-299,67416	49,12468	-39,795567	-
39	40	1	71,844414	-70,89267	-16,876461	18,383514	-
40	41	1	62,551682	-61,989998	10,629306	-10	-
40	42	1	-5,4827995	5,9928212	28,037682	-30,977827	-
41	42	0	-	-	-	-	-
43	44	1	-31,671242	32,708576	24,108019	-25,86624	-
34	43	1	-1,1715925	1,51124	27,964083	-31,108019	-
44	45	1	-59,518578	60,450302	17,86624	-16,214666	-
45	46	1	-143,8022	152,8956	21,914404	5,6510825	-
46	47	1	122,17015	-116,49149	-23,467928	39,207169	-
46	48	1	94,032982	-88,644333	-22,410746	34,497162	-
47	49	1	82,491493	-80,940643	-39,207169	42,630547	-
42	49	1	-83,416405	88,903793	12,136891	4,136982	-
42	49	1	-83,416405	88,903793	12,136891	4,136982	-
45	49	1	-5,448103	5,950861	-27,69974	24,68601	-
48	49	1	55,134331	-54,454578	-30,070412	30,687397	-
49	50	1	59,963768	-59,040199	-1,3105001	1,9911224	-
49	51	1	46,44743	-45,43718	0,0896091	-0,7185091	-
51	52	1	-13,589583	13,62773	0,7387335	-2,0180962	-
52	53	1	-43,787731	44,56654	-2,9819038	1,988515	-
53	54	1	-83,106545	84,883102	-12,988515	17,873516	-
49	54	1	-40,609142	41,769608	-5,6811185	2,2933939	-
49	54	1	-39,89851	41,229282	-3,8993185	0,4602557	-
54	55	1	105,42223	-103,75005	0,7761488	3,9830577	-
54	56	0	-	-	-	-	-
55	56	0	-	-	-	-	-
56	57	1	-9,9574614	10,00326	4,6430278	-6,9264717	-
50	57	1	30,560202	-30,113258	-5,9911227	3,9264719	-
56	58	1	-10,121636	10,184247	7,7307425	-9,9598188	-
51	58	1	30,546764	-30,294245	-8,0202246	6,9598184	-
54	59	1	31,375773	-30,92004	-9,1536112	4,5120039	-
56	59	1	-58,917397	61,784256	-3,4577396	6,1410336	-
56	59	1	-61,743504	64,807739	-2,9166129	6,3481503	-
55	59	1	-1,7999523	1,8240018	-10,296536	4,1556673	-
59	60	1	76,060768	-73,566193	53,175266	-45,629997	-
59	61	1	55,311066	-53,551876	52,290241	-48,241856	-
60	61	1	-184,06964	185,04413	22,455334	-18,832674	-
60	62	1	126,95582	-124,77216	20,174664	-11,547947	-
61	62	0	-	-	-	-	-
63	59	1	-41,032188	41,032188	84,126572	-81,278679	16
63	64	1	41,032188	-40,907921	-84,126572	64,068573	-
64	61	1	131,49225	-131,49225	-211,36334	231,66924	-16
38	65	1	-74,382523	74,979576	-21,913986	-69,331841	-
64	65	1	-90,584312	91,541344	147,29475	-173,16145	-
49	66	1	114,97462	-112,45354	35,321304	-24,908299	-
49	66	0	-	-	-	-	-
62	66	1	-12,926843	13,077413	-12,990112	8,3918858	-
62	67	1	8,6889963	-8,647831	-9,4618912	6,8866558	-
65	66	0	-	-	-	-	-
66	67	1	38,667343	-38,262169	13,253284	-13,886656	-
65	68	1	685,99194	-678,896	3,316689	20,948755	-
47	69	0	-	-	-	-	-
49	69	1	45,998589	-43,962025	-10,084246	8,2978811	-
68	69	1	231,74901	-231,74901	120,09283	-96,974365	16
69	70	1	119,10566	-113,7889	-67,111031	76,603233	-
24	70	1	56,830895	-56,739162	-25,43174	32,277626	-
70	71	1	-34,850781	35,004505	26,778666	-27,140751	-
24	72	1	57,131939	-54,134785	-48,66143	56,017323	-
71	72	1	-41,008144	42,134789	31,056339	-31,277353	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case118 ieece api (BD-OTS) (continuação)

71	73	1	6,0036397	-6	-3,9155848	2,6252222	-
70	74	1	58,50629	-55,045898	77,31031	-69,27372	-
70	75	1	36,292561	-34,27639	61,031158	-58,0765	-
69	75	1	144,89938	-136,48056	-5,4009571	18,764214	-
74	75	1	-58,884102	59,508949	-32,415699	33,543171	-
76	77	1	-113,93	120,24485	4,7999091	12,666899	-
69	77	1	135,70598	-129,55432	-46,384602	55,896103	-
75	77	1	-23,321707	23,899817	-20,898449	17,951654	-
77	78	1	84,138336	-83,851875	27,265415	-27,616274	-
78	79	1	-35,108124	35,174408	1,6162742	-1,9809326	-
77	80	1	-137,66722	140,82101	11,139988	-7,1021342	-
77	80	1	-65,163384	66,375053	1,050905	0,8806677	-
79	80	1	-100,51441	102,06894	-9,5918798	14,651691	-
68	81	1	262,86362	-259,77298	-336,49542	294,53833	-
81	80	1	259,77298	-259,77298	-294,53833	363,57996	-16
77	82	1	1,9019365	-1,8769966	4,8787742	-13,171284	-
82	83	1	-88,593002	89,466896	6,4701157	-7,4913263	-
83	84	1	-47,546734	48,940201	4,6084447	-4,3848543	-
83	85	1	-75,430168	77,817841	-7,1171179	11,588268	-
84	85	1	-67,370201	68,642441	-2,6151457	3,9569287	-
85	86	1	-1,1947552	1,2145067	6,3222594	-9,328537	-
86	87	1	-36,394508	36,734264	-0,6714625	-1,7957922	-
85	88	1	-72,015419	74,337593	87,104652	-78,170189	-
85	89	1	-113,4601	117,66661	80,4422	-54,852314	-
88	89	1	-154,7576	158,81529	68,170189	-49,24995	-
89	90	1	88,795067	-84,466316	-4,6240187	15,487769	-
89	90	1	168,96922	-161,77068	-3,2246087	23,64963	-
90	91	1	-26,863014	27,120899	12,60566	-13,656606	-
89	92	1	185,74815	-182,11423	9,6756916	3,7957609	-
89	92	1	58,79538	-57,355942	-1,0212356	2,9852366	-
91	92	1	-37,120899	37,731903	2,6897805	-3,603452	-
92	93	1	20,238724	-20,110001	5,4739475	-7	-
92	94	0	-	-	-	-	-
93	94	0	-	-	-	-	-
94	95	1	65,562759	-64,932137	-0,6941967	1,7778337	-
80	96	1	26,84457	-26,134893	34,940315	-36,230118	-
82	96	0	-	-	-	-	-
94	96	1	29,947594	-29,55023	-21,825264	21,015066	-
80	97	1	39,530094	-38,971104	39,944393	-39,696522	-
80	98	1	57,723324	-56,959999	8,4680071	-8	-
80	99	1	-13,247475	13,771661	29,636255	-32,780998	-
92	100	1	25,16419	-24,610127	-13,977083	12,123368	-
94	100	1	-145,77034	149,99095	6,5194616	1,6477916	-
95	96	1	-5,4378605	5,6433258	-32,777832	32,105091	-
96	97	1	-13,628202	13,841105	-31,890041	30,69652	-
98	100	0	-	-	-	-	-
99	100	1	-55,77166	56,407211	14,932212	-14,116595	-
100	101	1	-1,3279072	1,4633615	19,951313	-22,362598	-
92	102	1	47,435345	-47,126846	-4,9918828	5,0739698	-
101	102	1	-38,32336	38,746845	7,3625989	-8,0739698	-
100	103	1	150,7664	-146,93098	-8,3944206	15,98266	-
100	104	1	82,400894	-79,159859	-8,4616785	18,035297	-
103	104	1	51,089203	-49,60656	-19,194149	20,478201	-
103	105	1	63,503658	-60,947876	-20,234575	24,253473	-
100	106	1	88,531952	-83,538696	-2,9887936	16,188866	-
104	105	1	65,096413	-64,64312	-3,1133215	3,9244401	-
105	106	1	27,168556	-26,981363	21,536627	-22,102684	-
105	107	1	47,511303	-46,210671	-3,4684381	3,7011199	-
105	108	1	-1,0288632	1,0409548	-7,2980628	5,6243281	-
106	107	1	38,480061	-37,559326	-10,086182	9,0813942	-
108	109	1	-4,390955	4,3975697	-6,6243281	5,9338384	-
103	110	1	53,353371	-51,970749	-21,895088	23,998097	-
109	110	1	-17,797569	17,910765	-8,9338388	7,3334866	-
110	111	1	-148,77286	153,88687	9,6762695	5,8962269	-
110	112	1	117,49285	-113,93	-2,9713345	6,4283395	-
17	113	1	30,668968	-30,087233	-76,617859	77,706589	-
32	113	1	-23,115086	24,087233	-33,264427	31,191143	-
32	114	1	32,524448	-31,907978	-57,612961	58,827393	-
27	115	1	19,249716	-18,447241	70,497902	-68,979752	-
114	115	1	18,507978	-18,412758	-61,827393	61,979748	-
68	116	1	184,28337	-184	195,45383	-206,71329	-
12	117	1	33,868568	-33,509998	5,6412182	-8	-
75	118	1	55,81971	-55,290001	15,667565	-15,000001	-
76	118	0	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 57 – Resultado por barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt
1	1,0515087	0,0464533	-	-	0	82	0,9964661	-0,2522919	-	-	1
2	1,0560218	-0,0429121	-	-	-	83	1,0019133	-0,2353173	-	-	-
3	1,0011085	-0,075173	-	-	-	84	1,0222393	-0,1720473	-	-	1
4	1,0225174	-0,1188935	-	-	-	85	1,0136796	-0,2773744	-	-	1
5	1,0599999	0,0567507	-	-	1	86	1,0084958	-0,3284293	-	-	1
6	1,0580806	0,1534237	898,71301	48,1138	-	87	1,0110415	-0,3006383	-	-	-
7	1,0534165	-0,0497183	-	-	-	88	1,0145942	-0,3169253	-	-	-
8	1,0440634	-0,108465	-	-	-	89	0,9955716	-0,3439374	-	-	-
9	1,0549459	-0,0071036	-	-	-	90	0,9752924	-0,3811713	-	-	1
10	1,0351878	-0,1802315	-	-	-	91	1,0375224	-0,1503363	-	-	-
11	1,0470685	-0,1229018	-	-	-	92	1,0100553	-0,1677311	-	-	-
12	1,0453104	-0,1033871	-	-	-	93	1,0599999	-0,0820725	-	-	-
13	1,0570379	-0,066199	-	-	-	94	1,0599999	-0,1659949	-	-	-
14	1,0538397	-0,0563506	-	-	-	95	1,0509654	-0,1470041	-	-	-
15	1,0597733	0,0089626	-	-	-	96	1,0382751	-0,3074777	-	-	-
16	1,0586582	-0,0568843	-	-	-	97	1,0389369	-0,160869	-	-	-
17	1,0587275	-0,0431338	-	-	-	98	1,0599656	-0,1257463	-	-	-
18	1,0471524	-0,1178808	-	-	-	99	1,0574126	-0,0549981	149,05464	16,814119	-
19	1,0034683	-0,1828673	-	-	-	100	1,041021	-0,3234642	-	-	1
20	1,0359721	-0,151115	-	-	-	101	1,0592756	-0,2239335	87,904404	38,585003	-
21	1,046676	-0,0626635	-	-	-	102	0,997596	-0,159225	-	-	-
22	1,0188181	-0,1717229	-	-	-	103	0,9909241	-0,1177784	-	-	-
23	1,0334299	-0,1560781	-	-	-	104	1,0599999	-0,3080388	-	-	1
24	1,0440377	-0,1276788	-	-	-	105	1,0593055	-0,1884311	-	-	1
25	1,0396764	-0,0619635	-	-	1	106	1,0154274	-0,2890479	-	-	-
26	1,0598456	0,0653042	-	-	1	107	0,9944134	-0,2941867	-	-	-
27	1,0365615	-0,0741425	-	-	-	108	1,0561846	0	584,80975	134,1548	-
28	1,0214814	-0,1710425	-	-	-	109	0,9932257	-0,0923991	-	-	-
29	1,0173575	-0,1974683	-	-	-	110	1,0599999	-0,0304212	-	-	-
30	1,0154028	-0,2238573	-	-	1	111	1,0416507	-0,1103828	-	-	-
31	1,0221044	-0,1832639	-	-	-	112	1,0420017	0,0148117	-	-	0
32	1,0179862	-0,2454109	-	-	1	113	1,0539559	-0,055174	-	-	-
33	1,0096952	-0,2793304	-	-	1	114	1,0279242	0,0760906	147,99998	-8,4406967	-
34	1,004935	-0,2792573	-	-	1	115	1,0599999	-0,1620771	-	-	-
35	0,9943092	-0,3000692	-	-	1	116	1,0576748	-0,1879496	-	-	-
36	1,0107112	-0,2847382	-	-	1	117	1,0521964	-0,1987837	-	-	-
37	1,0468589	-0,0700422	-	-	-	118	1,0539495	-0,2100767	61,608875	94,999954	-
38	1,0079252	-0,1815387	-	-	1	119	1,0134264	-0,1491922	-	-	-
39	1,0183797	-0,1030074	-	-	-	120	1,0456465	0,0060649	-	-	-
40	0,9966204	-0,2537525	-	-	-	121	1,0420015	0,140889	718,56982	45,356594	-
41	1,007314	-0,2179688	-	-	-	122	0,965017	-0,3251977	-	-	-
42	1,0036055	-0,0934449	-	-	-	123	0,94	-0,3269557	-	-	-
43	0,9877713	-0,1340143	-	-	-	124	0,9857606	-0,0523771	-	-	-
44	0,9904755	-0,143776	-	-	-	125	0,9716818	-0,0099046	2421,0864	-157,40683	-
45	1,0273118	-0,1796675	-	-	1	126	1,0484935	-0,0097918	-	-	-
46	1,0383635	-0,2313551	-	-	1	127	1,0581205	-0,0559485	-	-	-
47	1,0161184	-0,2670904	-	-	-	128	1,046575	0,0046069	-	-	-
48	1,0053526	-0,2372548	-	-	-	129	1,0474139	0,0039107	-	-	-
49	1,0149151	-0,272782	-	-	-	130	1,0577354	0,1394397	501,06192	10,935827	-
50	0,9884442	-0,2043336	-	-	-	131	1,009294	0,1307518	579,99994	197,65192	-
51	1,0033643	-0,1857789	-	-	-	132	1,0540541	-0,0457884	-	-	-
52	1,0467916	-0,2402507	-	-	-	133	1,0504805	-0,0739444	-	-	-
53	1,0460799	-0,1153591	-	-	-	134	1,0540633	-0,0533346	-	-	-
54	1,0179402	-0,2106793	-	-	-	135	1,0497174	-0,0752475	-	-	-
55	1,0453702	-0,1121256	-	-	-	136	1,0464772	-0,0803353	-	-	-
56	1,0166488	-0,249506	-	-	1	137	1,0485516	-0,0793967	-	-	-
57	1,0215355	-0,2074493	-	-	-	138	1,059786	-0,0614706	-	-	-
58	1,057049	-0,0637371	-	-	-	139	1,0512445	-0,0735853	-	-	-
59	1,0368345	-0,137511	-	-	-	140	1,0493349	-0,0783889	-	-	-
60	1,0315447	-0,1450934	-	-	-	141	1,0216069	-0,1059526	-	-	-
61	1,0417005	-0,1059012	-	-	-	142	0,9676089	-0,2183182	-	-	-
62	1,0599135	0,1115754	-	-	-	143	0,984529	-0,2008296	-	-	-
63	1,0414172	-0,0774457	-	-	-	144	1,0244303	-0,1457778	-	-	-
64	1,0340197	-0,0671285	-	-	-	145	1,0340376	-0,1147557	-	-	-
65	1,0540357	-0,0032227	-	-	-	146	0,985615	-0,2115274	-	-	-
66	0,9931757	-0,1097674	-	-	1	147	1,0469577	-0,2154408	-	-	-
67	1,0201303	-0,2656766	-	-	1	148	1,0472347	-0,2323832	-	-	-
68	1,0331669	-0,2404616	-	-	1	149	1,0588859	-0,0255228	-	-	-
69	1,0395281	-0,2183309	-	-	-	150	1,057103	-0,0352994	-	-	-
70	1,0599999	-0,0262832	-	-	-	151	1,0496981	-0,0656134	-	-	-

continua

Resultado por barras do sistema nesta case162_ieee_dtc (BD-OTS) (continuação)

71	1,0333936	-0,1449064	-	-	1	152	1,0580996	-0,0411893	-	-	-
72	1,0542541	-0,0546946	-	-	-	153	1,0576973	-0,058771	-	-	-
73	1,0371689	-0,0262832	0,0000116	158,83366	-	154	1,0259877	-0,1497903	-	-	1
74	1,024853	-0,1274734	-	-	-	155	1,0334904	-0,1234628	-	-	-
75	1,0529729	0,0310719	-	-	0	156	1,0295188	-0,1442684	-	-	-
76	1,0598456	0,1565872	1248,6982	57,032055	-	157	1,0359136	-0,1498422	-	-	-
77	1,0269532	-0,2423892	-	-	1	158	1,0227586	-0,1676928	-	-	1
78	1,0437335	-0,2083189	-	-	-	159	1,021807	-0,1663772	-	-	-
79	1,0529191	-0,1732882	-	-	-	160	1,0232865	-0,1593054	-	-	1
80	1,0324321	-0,215457	-	-	1	161	1,0467891	-0,0840823	-	-	-
81	0,9990502	-0,3285283	-	-	1	162	1,0455548	-0,0951139	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 58 – Resultado por linhas do sistema nesta _case162_ieee_dtc (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	304,99222	-302,01056	-64,29773	31,258797	-
1	3	1	406,78882	-401,06271	104,05653	-125,29026	-
1	4	1	289,39413	-284,44003	-11,686513	-46,405571	-
1	5	1	-102,46218	102,60875	-76,185982	55,345051	-
1	6	1	-898,71301	898,71301	48,113693	48,1138	1
2	7	1	62,277405	-62,2258	3,4092295	-26,554308	-
2	13	1	61,379719	-61,221249	-47,973122	-29,375652	-
3	14	1	-3,0101411	3,0790796	-4,4947405	4,7902913	-
3	50	1	73,959572	-71,828163	-4,6200228	13,929197	-
3	103	1	2,3726416	-2,3663678	0,4742689	-0,3689893	-
3	123	1	14,527543	-13,895762	2,9286783	0,7351328	-
3	124	1	-3,4160984	3,4185901	2,4833515	-2,3679719	-
3	125	1	-53,370792	53,693317	31,618723	-27,245342	-
4	112	1	-249,27492	252,78459	-40,797054	-23,987946	-
4	115	1	263,98868	-263,98868	47,540264	-35,854183	7
4	119	1	269,72629	-268,71811	39,662361	-52,336968	-
5	120	1	255,5238	-254,19803	27,877613	-56,412636	-
5	129	1	221,86734	-220,87622	11,439199	-50,574131	-
5	131	1	-579,99994	579,99994	-150,84186	197,65192	-11
7	8	1	339,9118	-339,48889	18,12005	1,8634824	-1
7	9	1	-277,68604	278,8764	8,4342585	-28,516892	-
8	10	1	6,5234513	-6,3324413	-1,67247	2,1177711	-
8	12	1	-9,7370329	9,7462711	-0,4454716	0,4955004	-
8	13	1	-9,7547722	9,865984	-0,0277999	0,445414	-
8	14	1	-14,543347	14,635219	-0,4636576	1,2320313	-
8	15	1	-6,9977617	7,234581	1,5173259	-0,6973715	-
8	132	1	-24,001654	24,134966	-0,7714091	2,2950037	-
9	75	1	-278,8764	279,80688	28,516892	-47,572792	-
10	11	1	-168,57057	169,92422	-9,0276155	11,086908	-
10	13	1	-19,679829	20,15247	1,616061	0,6470891	-
10	15	1	-28,549421	29,541599	4,3403769	1,1325607	-
10	60	1	-2,8677433	2,8892627	0,9534063	-0,8490728	-
11	15	1	-79,684181	81,364082	-8,4790306	-19,615505	-
11	46	1	96,241936	-95,041954	-8,784873	-1,2605193	-
11	58	1	-60,891007	61,466385	-9,6516695	-9,6829777	-
11	59	1	36,314011	-36,208729	12,852402	-21,404038	-
12	2	1	-178,12398	178,35344	-2,4915328	13,305095	1
12	13	1	-12,896091	13,054423	0,6028626	-0,1243557	-
12	14	1	-7,8838491	7,9756021	0,7639914	-0,3956571	-
12	132	1	-3,8423524	3,9045904	0,6291785	-0,410347	-
13	15	1	-25,58001	25,842711	3,5718951	-1,6452322	-
13	62	1	-160,27162	162,5787	24,835609	3,9087758	-
14	72	1	-2,2523901	2,2528841	-0,2344771	0,2383005	-
14	113	1	-3,3817842	3,3824363	0,2390639	-0,2351105	-
14	132	1	-30,723133	30,772505	4,2437358	-3,9197977	-
15	58	1	109,70664	-108,46552	-17,222904	9,2155437	-
15	60	1	10,06248	-9,7100925	0,2118306	1,2991856	-
15	62	1	-190,39459	193,20818	36,994846	-17,29987	-
15	63	1	6,6425028	-6,5744839	0,8417782	-0,260788	-
16	17	1	-0,9115533	0,9168055	0,3838793	-0,3713333	-
16	18	1	62,068951	-61,043961	-6,9775038	4,6170483	-
16	27	1	2,5263927	-2,5105872	2,2071657	-2,1180863	-
16	126	1	-9,3104382	9,4088278	4,2469783	-3,7674558	-
16	127	1	-0,173354	0,1733964	0,13948	-0,139247	-
17	18	1	81,319611	-80,062279	-5,5434079	4,4051619	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162 ieee dtc (BD-OTS) (continuação)

17	19	1	20,145096	-19,289982	2,8970764	-0,0597539	-
17	21	1	8,7083702	-8,6718512	3,3278909	-3,1212571	-
17	127	1	5,4101176	-5,4025984	-0,3102261	0,3793107	-
18	30	1	106,38114	-104,19763	12,949574	-7,0046105	-
18	32	1	113,12955	-110,37517	7,2402558	0,9137034	-
18	37	1	-112,80446	112,80446	-40,882038	47,099789	-3
19	21	1	-6,7314172	6,9064403	-0,5129434	1,373121	-
19	38	1	-1,6969051	1,7000997	-6,2534013	0,2419826	-
19	43	1	-16,37579	16,601437	10,423224	-9,4607563	-
19	127	1	-20,305908	20,759495	-3,5971255	6,4728012	-
20	53	1	-33,770695	33,770695	-14,371315	15,820154	-1
20	157	1	-4,1293035	4,1314759	1,871315	-1,9088782	-
21	22	1	72,755066	-71,230003	3,592335	-3,929136	-
21	127	1	-1,1896518	1,1901134	-1,8441989	1,8723972	-
22	38	1	22,50535	-22,407459	13,511221	-15,701018	-
22	39	1	-142,69522	142,69522	-20,189915	30,305866	-2
22	40	1	117,47771	-114,9726	3,7982047	2,4246154	-
22	41	1	56,552158	-56,02002	1,5396265	-3,0562639	-
23	24	1	-60,011776	60,598541	-1,3950108	0,6365179	-
23	60	1	-3,4882267	3,4969487	1,3950108	-1,3541355	-
24	25	1	-207,02676	207,02676	-19,543829	33,375626	-2
24	28	1	67,442963	-66,377747	9,600914	-8,6541367	-
24	45	1	78,985252	-78,185486	9,3063984	-8,7212019	-
25	26	1	-239,53278	242,66522	-46,71497	-24,849701	-
25	27	1	32,506031	-32,462154	-40,707012	-49,237968	-
26	74	1	348,85373	-341,8392	5,8066001	-39,294216	-
26	75	1	119,87551	-119,48687	-14,81245	-37,240757	-
26	76	1	-1248,6982	1248,6982	57,031982	57,032055	0
27	31	1	91,389374	-90,595841	9,4712543	0,5303414	-
27	62	1	-34,913822	35,110096	0,125119	6,4664135	-
27	65	1	-28,180674	28,260248	-4,4890022	6,5837569	-
27	125	1	-3,7511773	3,7614901	4,193655	-3,697331	-
27	126	1	-312,0358	314,03369	-14,461917	34,894962	-
27	127	1	-1,535145	1,5411294	-1,3830527	1,440094	-
28	29	1	27,907744	-27,727488	-4,5158634	0,6265035	-
29	30	1	17,448328	-17,333561	-6,4566336	-0,2802239	-
29	31	1	-18,03084	18,095841	-3,1998699	-0,5303414	-
30	32	1	20,331192	-20,218109	-9,7695217	5,4917316	-
32	33	1	77,893272	-77,225807	-0,7395197	1,2245331	-
33	34	1	0,9152207	-0,9106156	1,3405377	-6,5981731	-
33	35	1	21,550686	-21,429501	7,7704487	-12,29088	-
33	36	1	9,5898991	-9,57932	-5,0058346	2,4693298	-
34	40	1	-14,355832	14,472177	5,9955668	-12,461858	-
34	77	1	-45,590824	46,10775	-14,015142	11,774419	-
35	40	1	-33,050503	33,359009	2,6041341	-7,3997974	-
36	67	1	-22,38068	22,472849	-8,0847187	4,0317626	-
37	39	1	99,906128	-99,376991	33,198738	-99,512482	-
37	126	1	-171,50302	172,58942	-17,971417	-45,221729	-
37	127	1	-41,207565	41,292156	-62,32711	-12,503221	-
39	42	1	-43,318234	43,496384	69,206612	-100,25893	-
40	81	1	21,407499	-21,268148	-1,9456826	3,1698585	-
40	82	1	-7,1460814	7,1483536	1,7827226	-2,8444717	-
41	81	1	29,939005	-29,611853	0,6173142	2,0881796	-
41	83	1	69,941544	-69,687859	7,007616	-7,0101933	-
41	84	1	-83,060524	83,462265	-17,368666	18,449398	-
42	109	1	-0,164764	0,2180885	36,397392	-69,042763	-
43	44	1	11,143628	-11,112091	-7,9820194	4,7032833	-
43	103	1	-9,3323984	9,3613195	0,0226078	0,1293195	-
43	124	1	-43,279099	43,872471	10,141429	-6,5650029	-
43	125	1	-16,633568	17,123138	7,278739	-5,0795531	-
44	102	1	25,218153	-25,078592	-21,583969	19,788778	-
44	103	1	-47,156937	47,462002	10,32526	-11,495029	-
45	54	1	58,165485	-57,814606	5,3164039	-6,3090577	-
46	47	1	29,731957	-29,445717	7,2093272	-12,501211	-
47	48	1	-23,840855	24,038189	13,008086	-17,260782	-
47	49	1	48,466576	-48,398228	-2,066874	1,7833663	-
48	50	1	-16,874495	17,034126	10,038399	-17,001988	-
48	51	1	-35,401089	36,003338	11,122193	-15,007894	-
48	52	1	-5,5226068	5,8220224	-26,75981	19,897249	-
49	87	1	41,578228	-41,342609	-3,5633664	1,9782912	-
50	51	1	-23,259903	23,447916	-10,446206	6,9435368	-
50	123	1	6,4667106	-6,2825971	1,5388569	-0,7002382	-
50	125	1	-28,112776	29,390699	11,980139	-6,215621	-
51	141	1	-78,415443	80,422226	8,0634937	-6,3819656	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162 ieee dtc (BD-OTS) (continuação)

52	79	1	-32,446926	33,078796	2,5028591	-10,707328	-
52	106	1	79,392723	-77,962128	20,256395	-19,155151	-
52	116	1	-119,53385	120,31791	-6,9601254	10,489602	-
52	117	1	-89,825089	90,70137	10,501889	-9,3428421	-
52	118	1	-61,608875	61,608875	-88,998268	94,999954	-6
53	11	1	38,95451	-38,922112	-73,464081	74,760017	-2
53	54	1	53,088345	-52,354782	4,8003731	-9,7531357	-
53	55	1	-125,81355	125,8987	52,843552	-52,641384	-
54	56	1	43,011681	-42,695133	-8,1503277	5,3557978	-
54	57	1	-3,1822906	3,1860225	-5,3574791	-0,7384825	-
55	57	1	58,087177	-56,659542	-2,7213614	-0,3974577	-
55	149	1	-138,85941	141,59848	15,083683	-6,525032	-
55	162	1	-94,194023	94,533066	19,215948	-18,685104	-
56	67	1	17,405134	-17,346977	-9,3083582	5,2168121	-
57	80	1	4,9935193	-4,9494152	-14,47406	9,6639032	-
58	61	1	46,999142	-46,722431	0,4674333	-18,634434	-
59	61	1	-48,221272	48,450626	-5,6459641	-5,8954692	-
60	61	1	-64,995186	65,13179	-31,907726	35,444954	-2
60	61	1	-107,71538	107,93217	14,885485	-10,625604	2
60	62	1	-24,914295	27,414953	10,175139	-3,613796	-
60	65	1	-35,596554	36,871159	5,9795609	-0,9056282	-
60	126	1	-7,4547029	7,7508278	1,7715635	-0,7621339	-
61	62	1	-102,57782	105,52174	-5,2424932	-16,258083	-
61	63	1	-72,214333	72,424255	4,9530468	-11,181045	-
62	63	1	122,9409	-120,79605	11,657029	11,447572	-
62	65	1	173,41725	-172,3436	8,982192	10,88054	-
62	126	1	45,408192	-45,325954	6,1573386	-0,6078789	-
63	65	1	-4,153718	4,1920414	-0,0057395	0,3175433	-
64	65	1	-123,78053	124,51865	-70,149193	-20,597986	-
64	66	1	123,78053	-122,98287	70,149193	-123,28613	-
65	126	1	4,8014836	-4,8004537	3,7217741	-3,6707499	-
66	11	1	122,98287	-122,98287	73,966232	-71,783752	10
67	68	1	-27,665875	27,818329	-10,03458	5,7542558	-
68	69	1	-68,238327	68,536392	-5,6250515	5,3679743	-
69	77	1	73,026505	-72,517746	15,724238	-15,597645	-
69	78	1	-25,858181	25,92977	-4,2140918	2,3600335	-
69	79	1	-115,7047	116,36077	-16,87812	19,932928	-
70	73	1	-0,0000116	0,0000116	-154,21356	158,83366	-8
70	149	1	-39,632996	39,64452	69,973358	-69,98188	-
70	149	1	-39,632996	39,64452	69,973358	-69,98188	-
71	85	1	92,080421	-89,666458	-2,7889752	7,2459364	-
71	150	1	-121,95042	124,6869	3,6738038	4,8207331	-
72	113	1	4,3813524	-4,3809166	1,677222	-1,6746476	-
72	132	1	-57,071312	57,156426	11,028603	-10,51789	-
72	152	1	-8,45228	8,4770784	-0,387992	0,5039348	-
74	119	1	75,858368	-75,660202	5,6570277	-53,760399	-
75	128	1	339,84381	-338,992	41,417988	-50,448303	-
75	130	1	-500,16385	501,06192	43,395565	10,935827	1
78	79	1	-115,90856	116,54125	-9,9254236	12,093572	-
78	80	1	10,858789	-10,810585	7,5653896	-11,929339	-
79	74	1	-265,9808	265,9808	-21,31917	33,637192	-5
82	83	1	-69,428352	69,687859	-7,0889034	7,0101933	-
84	93	1	-121,36226	123,18773	-25,222469	32,796223	-
85	86	1	49,146454	-48,647789	-6,1753798	3,5563681	-
86	87	1	-24,265818	24,432612	1,3898273	-6,2082911	-
86	88	1	-5,4736042	5,487689	-7,1544333	-3,9258175	-
88	96	1	-6,2706723	6,3419566	-8,4665508	7,2111092	-
88	106	1	-59,817017	60,098034	7,9523683	-8,6777954	-
89	86	1	-27,657211	27,657211	-0,6336811	1,0630044	2
89	90	1	27,657211	-27,123482	0,6336811	-0,9568161	-
90	96	1	-23,086517	24,15551	-6,2912302	4,6262922	-
91	92	1	27,908611	-27,668131	27,649752	-30,328953	-
91	93	1	-85,344521	86,324257	-11,980907	13,162668	-
91	94	1	14,001644	-13,881715	-28,932879	24,444288	-
92	102	1	-8,45187	8,5385923	21,278952	-23,868778	-
93	42	1	43,331623	-43,331623	-62,324097	63,86153	-11
93	108	1	-584,80975	584,80975	-84,456268	134,1548	-3
94	103	1	-27,666706	28,562201	56,848412	-58,538086	-
94	107	1	76,610848	-73,260185	11,807011	-10,300889	-
94	109	1	-199,06242	199,06242	-99,589714	118,64265	-16
95	91	1	7,8087897	-7,8057303	-0,0204464	0,434032	-2
95	96	1	74,921837	-70,249703	-22,591412	24,59145	-
95	97	1	6,1719122	-6,124063	-0,1389568	-3,4039125	-
95	98	1	-57,047905	57,26635	-13,229343	12,056893	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162 ieee dtc (BD-OTS) (continuação)

95	99	1	-149,05464	149,05464	-3,0298412	16,814119	0
96	100	1	8,4566412	-8,3928251	-6,3118773	4,4503646	-
96	101	1	-87,904404	87,904404	-30,116972	38,585003	-2
97	44	1	-16,715937	16,730875	-2,3060873	2,8454249	-8
98	93	1	-227,86606	228,16617	-51,773876	66,261475	-2
98	105	1	19,499708	-18,892641	-10,633019	8,3500376	-
100	104	1	-14,817175	14,972435	-8,0991898	6,6302171	-
103	123	1	26,483748	-25,166994	3,0047348	2,4286776	-
103	124	1	-381,7002	382,00159	47,714565	-22,54855	-
103	125	1	-49,802689	50,616062	19,553486	-13,804465	-
104	34	1	-46,492432	46,677273	-10,798058	12,59941	-10
105	38	1	-5,9473591	5,9473591	-12,67242	12,902906	-10
106	107	1	17,864094	-17,641193	27,832949	-29,844818	-
107	122	1	55,491383	-54,914291	34,735706	-34,82077	-
109	119	1	94,673721	-94,022278	-87,627655	0,3638687	-
109	124	1	-171,74016	172,3938	33,747776	-63,522339	-
109	125	1	-122,21408	123,47783	4,2799935	-89,619949	-
110	111	1	89,640404	-87,9944	-0,19943	2,2045429	-
110	112	1	-261,52979	261,52979	-78,047768	91,116402	-5
110	114	1	-147,99998	147,99998	24,413187	-8,4406967	-3
110	134	1	101,62445	-101,3255	12,27154	-11,377091	-
110	141	1	133,73705	-130,28487	22,572153	-15,024185	-
111	115	1	22,5844	-22,25028	-18,924543	8,9543924	-
112	120	1	204,25543	-204,009	-112,48741	106,81093	-
112	121	1	-718,56982	718,56982	45,358944	45,356594	0
113	132	1	-3,4977663	3,502939	0,532762	-0,4999571	-
113	134	1	-28,203753	28,209499	1,3769962	-1,74743	-
115	117	1	268,91895	-267,68515	23,559794	-17,240171	-
116	117	1	32,190476	-32,140789	9,8377705	-11,814627	-
116	119	1	-438,4006	438,4006	-87,911568	105,73351	-8
116	147	1	109,8122	-109,41099	26,785433	-25,234478	-
117	147	1	107,22456	-106,98901	18,337641	-17,565521	-
120	14	1	370,70331	-370,33261	33,107777	-9,8749876	2
120	128	1	29,611755	-29,606882	-26,802822	15,921476	-
120	129	1	57,89196	-57,875015	-56,703247	49,776985	-
122	123	1	7,6342926	-7,4831433	25,460772	-28,351143	-
123	125	1	-112,17151	118,51584	25,887569	10,723598	-
124	125	1	-24,8697	24,955885	11,074096	-9,8652105	-
124	126	1	-5,8167634	5,8657026	-6,970233	7,6704836	-
125	126	1	-0,447709	0,4815654	-12,602961	13,599282	-
126	127	1	6,9963746	-6,9536896	-2,1347785	2,4778643	-
128	72	1	368,59888	-368,11066	34,526825	-12,556134	2
129	132	1	278,75122	-278,47144	0,7971401	13,052988	1
133	134	1	-55,655998	55,655998	-8,6061172	9,7845201	0
133	135	1	5,8209476	-5,8175588	0,6264356	-0,6624926	-
133	136	1	7,5994411	-7,578454	1,1885375	-1,3111538	-
133	137	1	12,13561	-12,117643	0,7711444	-0,8137178	-
135	138	1	-14,24244	14,332658	-3,3475075	3,3538353	-
136	139	1	-12,481545	12,520192	-2,6988461	2,6854522	-
137	140	1	-7,9423561	7,9450846	-3,1962824	3,1626511	-
138	110	1	-84,527847	84,527847	-16,251541	18,990318	-1
138	139	1	22,74564	-22,620192	4,8976564	-4,6954522	-
138	140	1	21,638222	-21,525085	6,0666199	-5,8426509	-
138	145	1	25,811333	-25,260044	1,9334284	-0,9535381	-
142	51	1	-18,964191	18,964191	0,6164348	0,0008636	6
142	143	1	-5,092494	5,1436567	-2,4030485	1,8818998	-
142	146	1	-3,0333157	3,0673094	-3,5633862	2,9768083	-
143	144	1	-26,213657	26,902945	-5,8918996	7,4165874	-
144	141	1	-49,86264	49,86264	-19,092709	21,406151	-3
144	145	1	-14,25574	14,430041	1,350289	-1,2564619	-
144	146	1	24,845436	-24,397308	8,3158331	-6,9868078	-
148	116	1	-120,00001	120,00001	-24	29,598757	0
149	26	1	-267,00372	267,00372	46,231983	-21,573696	2
149	26	1	-270,30005	270,30005	84,02005	-57,766365	4
149	150	1	129,63728	-129,48689	7,4752593	-6,420733	-
149	151	1	172,25307	-171,2133	14,127183	-8,675992	-
149	152	1	14,525899	-14,477078	-5,3656912	-0,5039348	-
151	161	1	147,2133	-146,80025	0,6759917	1,2252464	-
153	70	1	-40,005722	40,005722	5,6553488	-4,3352747	1
153	70	1	-39,260273	39,260273	-17,063423	18,602106	-2
153	154	1	35,826782	-34,999699	4,1309328	-1,4077014	-
153	155	1	39,439217	-38,828022	5,6771407	-3,4545417	-
154	156	1	-16,518789	16,560093	-2,8030026	2,8194897	-
154	160	1	23,518488	-23,464798	0,926609	-0,805787	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162_ieee_dtc (BD-OTS) (continuação)

155	156	1	26,82802	-26,709387	-0,5454583	0,9505742	-
156	157	1	2,1492934	-2,1286595	-6,170064	5,9849906	-
157	55	1	-49,067562	49,067562	-18,905348	21,063118	-1
157	158	1	15,064748	-14,951776	4,429234	-4,4015551	-
158	159	1	-1,0482243	1,0498798	1,9396605	-2,0618253	-
159	160	1	-9,04988	9,0647984	-0,3381747	-0,8528672	-
161	162	1	114,80025	-114,53307	-11,625247	12,285104	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 59 – Resultado por barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api (BD-OTS)

Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt	Barra	V (p.u.)	Ângulo (Rad)	P_g (MW)	Q_g (MVar)	ω shunt
1	1,046312	0,1095653	-	-	0	82	1,0012982	-0,255065	-	-	1
2	1,0512033	0,0220316	-	-	-	83	1,0071607	-0,2386607	-	-	-
3	1,012427	-0,0440916	-	-	-	84	1,0209264	-0,17673	-	-	1
4	1,0277773	-0,0668564	-	-	-	85	0,9906948	-0,2257415	-	-	1
5	1,0487148	0,1324377	-	-	0	86	0,9843317	-0,2915103	-	-	1
6	1,059391	0,216271	898,7193	47,995316	-	87	0,9944548	-0,260315	-	-	-
7	1,0478017	0,0177585	-	-	-	88	1,0028727	-0,2838367	-	-	-
8	1,0494704	-0,0420906	-	-	-	89	1,0174036	-0,3129571	-	-	-
9	1,0506551	0,0657665	-	-	-	90	0,9817526	-0,3553601	-	-	1
10	1,0340327	-0,1164706	-	-	-	91	1,0328999	-0,153563	-	-	-
11	1,045624	-0,0579543	-	-	-	92	1,018261	-0,1730931	-	-	-
12	1,0478455	-0,0383255	-	-	-	93	1,0494167	-0,0831064	-	-	-
13	1,0544381	-0,0072243	-	-	-	94	1,0592769	-0,164674	-	-	-
14	1,0508561	0,0143545	-	-	-	95	1,0473319	-0,1501253	-	-	-
15	1,0599998	0,0757902	-	-	-	96	1,0123112	-0,2789141	-	-	-
16	1,0561967	-0,0400411	-	-	-	97	1,0381373	-0,1672384	-	-	-
17	1,0599349	-0,0322537	-	-	-	98	1,0599864	-0,130291	-	-	-
18	1,0423371	-0,1045088	-	-	-	99	1,0543994	-0,0576496	149,80042	7,7342792	-
19	1,0223423	-0,1815806	-	-	-	100	1,0186837	-0,3047487	-	-	1
20	1,0411305	-0,0854557	-	-	-	101	1,0573161	-0,1903217	95,870522	4,9839139	-
21	1,057555	-0,0594677	-	-	-	102	1,0158161	-0,1648826	-	-	-
22	1,0376266	-0,1734431	-	-	-	103	1,0235411	-0,1231683	-	-	-
23	1,0368831	-0,1101359	-	-	-	104	1,043113	-0,293674	-	-	1
24	1,0463709	-0,0838774	-	-	-	105	1,054136	-0,1923066	-	-	1
25	1,0333806	-0,0132088	-	-	1	106	1,0094178	-0,2523119	-	-	-
26	1,0599995	0,1450619	-	-	1	107	0,9992723	-0,2730381	-	-	-
27	1,0357137	-0,0430717	-	-	-	108	1,0549202	0	596,7345	62,510498	-
28	1,0198208	-0,1364544	-	-	-	109	1,022316	-0,0923311	-	-	-
29	1,0134557	-0,1722056	-	-	-	110	1,0599995	0,0357544	-	-	-
30	1,0078609	-0,2130267	-	-	1	111	1,0340039	-0,053084	-	-	-
31	1,0194509	-0,1558469	-	-	-	112	1,0384498	0,084532	-	-	0
32	1,0090592	-0,2357743	-	-	1	113	1,0520343	0,0145193	-	-	-
33	0,9995078	-0,2691619	-	-	1	114	1,0580163	0,1388452	149,33586	14,09915	-
34	0,992434	-0,2635474	-	-	1	115	1,0411725	-0,1116893	-	-	-
35	0,9899281	-0,2983627	-	-	1	116	1,0518705	-0,1406952	-	-	-
36	0,9980397	-0,2695369	-	-	1	117	1,0392975	-0,1503165	-	-	-
37	1,0478343	-0,0544579	-	-	-	118	1,0574982	-0,0967522	174,99965	96,823158	-
38	1,0272883	-0,1834893	-	-	1	119	1,0182332	-0,1024356	-	-	-
39	1,0182999	-0,0970688	-	-	-	120	1,0408505	0,077962	-	-	-
40	1,0013303	-0,2550412	-	-	-	121	1,0579211	0,2068388	718,65399	44,004669	-
41	1,012972	-0,2219002	-	-	-	122	0,9832114	-0,3090599	-	-	-
42	1,0112259	-0,091041	-	-	-	123	0,9768332	-0,314541	-	-	-
43	1,0192142	-0,1397166	-	-	-	124	1,0195318	-0,059855	-	-	-
44	1,0170385	-0,1494732	-	-	-	125	1,057128	-0,050966	2276	117,14975	-
45	1,0214571	-0,1361183	-	-	1	126	1,05049	0,0178862	-	-	-
46	1,031186	-0,180127	-	-	1	127	1,0599999	-0,0412781	-	-	-
47	1,0054929	-0,2227159	-	-	-	128	1,0418737	0,0782075	-	-	-
48	1,0011605	-0,1922643	-	-	-	129	1,0421855	0,0760788	-	-	-
49	1,00333	-0,2290378	-	-	-	130	1,0557085	0,2344478	575,77948	50,615173	-
50	0,9964138	-0,1676279	-	-	-	131	1,0560366	0,2133403	709,13269	35,081947	-
51	1,0017599	-0,1399747	-	-	-	132	1,0512334	0,0256756	-	-	-
52	1,0395358	-0,1817563	-	-	-	133	1,0518748	-0,0094846	-	-	-
53	1,0330446	-0,0433995	-	-	-	134	1,0520624	0,0150325	-	-	-
54	1,0058942	-0,166649	-	-	-	135	1,0501171	-0,0110759	-	-	-
55	1,0329394	-0,0387848	-	-	-	136	1,0453435	-0,0169827	-	-	-
56	1,002055	-0,2151887	-	-	1	137	1,0482181	-0,0157897	-	-	-
57	1,0042698	-0,1575293	-	-	-	138	1,0566031	0,0034319	-	-	-
58	1,0558374	0,0003748	-	-	-	139	1,0489506	-0,0097662	-	-	-
59	1,0346224	-0,077093	-	-	-	140	1,048547	-0,014769	-	-	-

continua

Resultado por barras do sistema nesta case162_ieee_dtc_api (BD-OTS) (continuação)

60	1,0397341	-0,0869801	-	-	-	141	1,022166	-0,0496399	-	-	-
61	1,0393471	-0,0466515	-	-	-	142	0,9936322	-0,17831	-	-	-
62	1,0597123	0,1682628	-	-	-	143	0,9924945	-0,1551311	-	-	-
63	1,0396992	-0,0186397	-	-	-	144	1,0239362	-0,0921768	-	-	-
64	1,0417904	-0,0090092	-	-	-	145	1,0314945	-0,0567861	-	-	-
65	1,0572238	0,0475791	-	-	-	146	0,9954621	-0,1656483	-	-	-
66	1,0032589	-0,0461932	-	-	1	147	1,0363452	-0,1699788	-	-	-
67	1,0042607	-0,2382093	-	-	1	148	1,0219759	-0,1900586	-	-	-
68	1,0138875	-0,2044465	-	-	1	149	1,0582018	0,0734768	-	-	-
69	1,0197709	-0,1775092	-	-	-	150	1,0553195	0,0621976	-	-	-
70	1,0599042	0,0745272	-	-	-	151	1,0440032	0,0231032	-	-	-
71	1,0198187	-0,0654438	-	-	1	152	1,0568845	0,047085	-	-	-
72	1,053023	0,0169875	-	-	-	153	1,0595642	0,0064371	-	-	-
73	1,0411155	0,1187479	233,69012	220,95277	-	154	1,0252594	-0,0873746	-	-	1
74	1,0279806	-0,0736858	-	-	-	155	1,034022	-0,0603152	-	-	-
75	1,0502268	0,108625	-	-	0	156	1,0297431	-0,0812033	-	-	-
76	1,0599995	0,2363182	1248,6989	57,014336	-	157	1,0392436	-0,0837582	-	-	-
77	1,0086621	-0,2097895	-	-	1	158	1,0231656	-0,1048283	-	-	1
78	1,0231782	-0,162248	-	-	-	159	1,0210768	-0,1039818	-	-	-
79	1,0317817	-0,1227428	-	-	-	160	1,0215991	-0,0970871	-	-	0
80	1,0116737	-0,1682254	-	-	0	161	1,038866	-0,0006845	-	-	-
81	1,0029157	-0,3391885	-	-	1	162	1,0359254	-0,0153647	-	-	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 60 – Resultado por linhas do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api (BD-OTS)

Barra de Origem	Barra de Destino	Status da Linha sw_{ij}	P^{de} (MW)	P^{para} (MW)	Q^{de} (MVar)	Q^{para} (MVar)	Posição Taps
1	2	1	295,72226	-292,88709	-64,835068	31,025106	-
1	3	1	507,15427	-498,89102	54,604149	-51,940502	-
1	4	1	306,65576	-301,11728	-27,522745	-24,893061	-
1	5	1	-210,81297	211,25951	-10,240598	-7,0059242	-
1	6	1	-898,7193	898,7193	47,994267	47,995316	2
2	7	1	40,359329	-40,331295	12,440634	-35,563267	-
2	13	1	76,054535	-75,803871	-54,40361	-21,557287	-
3	14	1	-6,6335344	6,7452154	-2,1170113	2,5958078	-
3	50	1	72,580315	-70,578629	-2,5507357	11,293318	-
3	103	1	4,4994211	-4,4776769	-0,7127797	1,0776826	-
3	123	1	16,068125	-15,335314	1,5347705	2,7149222	-
3	124	1	2,4849982	-2,4839764	-1,1434298	1,1907561	-
3	125	1	3,5116806	-3,3797436	-39,970318	41,759319	-
4	112	1	-280,13071	284,56839	-17,577206	-38,430779	-
4	115	1	262,48056	-262,48056	2,80267	8,9687109	2
4	119	1	318,76743	-317,3869	39,667595	-49,387753	-
5	120	1	267,07907	-265,64584	-3,0359383	-23,76412	-
5	129	1	230,79411	-229,72519	-12,282873	-25,103682	-
5	131	1	-709,13269	709,13269	22,324736	35,081947	1
7	8	1	350,8212	-350,37506	30,281517	-9,2007151	1
7	9	1	-310,48993	311,98953	5,2817492	-21,991257	-
8	10	1	7,013598	-6,8024063	-1,2143847	1,7067366	-
8	12	1	-6,4424314	6,448103	4,174129	-4,1434178	-
8	13	0	-	-	-	-	-
8	14	1	-15,496586	15,601317	1,9292083	-1,0532827	-
8	15	1	-6,9779201	7,2157278	1,8243386	-1,0009619	-
8	132	1	-25,721613	25,874407	2,4874241	-0,7412354	-
9	75	1	-311,98953	313,15176	21,991257	-38,1745	-
10	11	1	-171,41693	172,81917	-7,5927711	10,023854	-
10	13	1	-18,783043	19,21468	1,575425	0,4913742	-
10	15	1	-28,997618	30,022467	4,3106093	1,3425248	-
10	60	0	-	-	-	-	-
11	15	1	-80,841858	82,571449	-9,0589218	-18,678721	-
11	46	1	108,00568	-106,48535	-3,890568	-3,2235689	-
11	58	1	-59,942795	60,501743	-10,040102	-9,3400097	-
11	59	1	46,641655	-46,479778	13,156	-21,299803	-
12	2	1	-176,24689	176,47321	-0,2721382	10,937873	0
12	13	1	-10,47757	10,5833	1,4351208	-1,1155894	-
12	14	1	-8,5697498	8,6817856	1,8811129	-1,4313585	-
12	132	1	-4,1539006	4,2293363	1,0993224	-0,8340871	-
13	15	0	-	-	-	-	-
13	62	1	-157,99411	160,2377	22,181501	5,7717381	-
14	72	1	-3,8099811	3,8118794	-2,2530143	2,2677042	-
14	113	1	-0,9845676	0,9851636	-3,0785966	3,0822103	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162 ieee dtc api (BD-OTS) (continuação)

14	132	1	-32,809403	32,865845	4,1295657	-3,7592194	-
15	58	1	114,01234	-112,67609	-15,515843	8,1287146	-
15	60	1	10,586865	-10,196783	-0,3171729	1,9898239	-
15	62	1	-171,66147	173,94688	33,203487	-17,205582	-
15	63	1	7,2526283	-7,1714392	0,966689	-0,2732005	-
16	17	1	-0,6131113	0,6151402	-0,0156746	0,020521	-
16	18	1	65,619309	-64,471397	-5,441287	3,5653551	-
16	27	1	0,7819104	-0,7735801	2,3005695	-2,2536199	-
16	126	1	-11,708412	11,852461	3,9394479	-3,237396	-
16	127	1	0,1203056	-0,1197666	-0,7830555	0,786024	-
17	18	1	79,68232	-78,474701	0,8980922	-2,2486739	-
17	19	1	21,116076	-20,197353	0,3962215	2,6521578	-
17	21	1	11,28749	-11,233742	-0,8925832	1,1967003	-
17	127	1	3,7989736	-3,7952411	-0,4222514	0,4565453	-
18	30	1	108,02938	-105,74307	15,330749	-8,7796898	-
18	32	1	115,46911	-112,55705	10,539554	-1,481501	-
18	37	1	-118,3324	118,3324	-38,856983	45,533562	-2
19	21	1	-6,9415092	7,1197963	-0,0581685	0,9343894	-
19	38	1	0,8012815	-0,7971071	-7,3115187	1,0738468	-
19	43	1	-15,71663	15,875242	5,2831111	-4,6065755	-
19	127	1	-22,345789	22,859219	-0,5655819	3,8206511	-
20	53	1	-38,426647	38,426647	-20,822926	22,963598	-5
20	157	1	-3,2033536	3,2116826	8,3229256	-8,3456411	-
21	22	1	77,098145	-75,438141	-1,808993	1,9372073	-
21	127	1	-3,1841986	3,1851602	-0,3220967	0,3808382	-
22	38	1	23,431816	-23,335335	12,544338	-14,837185	-
22	39	1	-155,35249	155,35249	-59,157063	73,177467	-8
22	40	1	124,58481	-121,7682	22,916634	-15,584685	-
22	41	1	63,674019	-62,970673	16,488882	-17,260679	-
23	24	1	-55,605091	56,105526	-0,822333	-0,2035363	-
23	60	1	-7,894907	7,9335852	0,822333	-0,6410736	-
24	25	1	-218,94598	218,94598	-31,77565	47,764778	-4
24	28	1	81,586594	-80,038223	11,226167	-8,8741198	-
24	45	1	81,253853	-80,363754	20,753019	-19,677692	-
25	26	1	-295,50241	300,32907	-43,461021	-10,7707	-
25	27	1	76,556442	-76,308067	-57,697529	-29,721073	-
26	74	1	395,5441	-386,58539	5,3923988	-20,462032	-
26	75	1	128,04378	-127,59245	-5,7670779	-45,47628	-
26	76	1	-1248,6989	1248,6989	57,016544	57,014336	0
27	31	1	94,215233	-93,368019	11,025158	-0,3469582	-
27	62	1	-39,593517	39,846535	1,1037116	7,3936133	-
27	65	1	-36,055248	36,185005	-5,0638685	8,4795628	-
27	125	1	0,4855786	-0,4849291	-1,3247195	1,3559797	-
27	126	1	-297,51291	299,34662	-29,946768	48,700718	-
27	127	1	-0,3174975	0,3217867	-1,7188218	1,759706	-
28	29	1	37,78822	-37,45779	-4,2958803	1,0354496	-
29	30	1	27,148407	-26,873354	-6,1044936	0,0810261	-
29	31	1	-20,780615	20,868019	-3,9609563	0,3469582	-
30	32	1	21,466429	-21,34387	-8,5845833	4,4214282	-
32	33	1	76,020905	-75,372543	2,36408	-1,9140376	-
33	34	1	-3,1675301	3,1840515	4,3963408	-9,4873228	-
33	35	1	27,753559	-27,583996	1,1927658	-5,3991752	-
33	36	1	1,1765158	-1,1757292	1,2452508	-3,7748933	-
34	40	1	-6,634614	6,6590004	-7,4579811	0,6939899	-
34	77	1	-60,181725	61,045963	-2,5856872	1,796085	-
35	40	1	-32,256008	32,544136	-4,3310366	-0,567755	-
36	67	1	-33,924271	34,127632	-1,9168569	-1,4256709	-
37	39	1	127,24535	-126,49057	34,334789	-98,518814	-
37	126	1	-206,52287	208,09427	-14,846327	-43,936005	-
37	127	1	-39,054878	39,138031	-65,022018	-10,028602	-
39	42	1	-28,861919	28,9119	25,341343	-57,828724	-
40	81	1	24,330837	-24,152998	-1,7364526	3,400002	-
40	82	1	0,154223	-0,1542213	-0,4050972	-0,6777353	-
41	81	1	32,099266	-31,727005	1,1244143	2,0290601	-
41	83	1	68,739929	-68,495812	8,955596	-9,0188818	-
41	84	1	-80,918518	81,283188	-5,6193309	6,3101473	-
42	109	1	1,2467778	-1,1856725	-74,35939	40,562408	-
43	44	1	13,383351	-13,350914	-2,1394351	-1,3383008	-
43	103	1	-10,248434	10,28129	-0,5562941	0,7288864	-
43	124	1	-45,410214	46,01585	9,2260952	-5,5757494	-
43	125	1	-15,099946	15,423153	-1,9237908	3,375658	-
44	102	1	30,487701	-30,367487	-6,4157906	4,4399714	-
44	103	1	-53,426159	53,776753	-0,2191765	-0,9129778	-
45	54	1	58,373756	-57,988731	16,250103	-17,01309	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162 ieee dtc api (BD-OTS) (continuação)

46	47	1	34,75536	-34,360592	8,7831955	-13,479653	-
47	48	1	-25,255505	25,438782	7,4821496	-11,722195	-
47	49	1	54,326092	-54,237862	4,4375038	-4,6293454	-
48	50	1	-13,628903	13,702461	1,8947105	-9,3124352	-
48	51	1	-36,337547	36,954567	9,4760656	-13,282893	-
48	52	1	-12,552336	12,827637	-22,508581	15,658133	-
49	87	1	46,747864	-46,441502	2,8493457	-4,015461	-
50	51	1	-29,247458	29,511398	2,2190702	-5,519784	-
50	123	1	7,6692991	-7,4281058	-0,0661331	1,1647447	-
50	125	1	-21,245678	21,876535	-4,1338201	6,9795198	-
51	141	1	-88,404907	90,969025	10,070103	-6,6584954	-
52	79	1	-26,141968	26,62361	7,2513142	-15,690179	-
52	106	1	107,27819	-104,78334	11,048387	-6,6009669	-
52	116	1	-93,755821	94,253098	-14,269072	15,50584	-
52	117	1	-64,858398	65,345055	15,734962	-16,169239	-
52	118	1	-174,99965	174,99965	-78,223724	96,823158	-4
53	11	1	76,947609	-76,899262	-66,327736	68,261864	0
53	54	1	66,408119	-65,250794	3,9084587	-5,5932665	-
53	55	1	-181,78238	181,94453	39,455681	-38,847202	-
54	56	1	52,871716	-52,387417	-6,7366419	4,9351945	-
54	57	1	-6,8921952	6,905797	-0,2270012	-5,6456146	-
55	57	1	70,360985	-68,214615	-1,7759608	1,6437162	-
55	149	1	-179,67769	184,32896	10,670294	6,3170938	-
55	162	1	-129,89098	130,52956	12,200895	-10,232254	-
56	67	1	24,607416	-24,496948	-8,982029	5,2961411	-
57	80	1	8,0588188	-8,0183382	-11,608102	6,9668159	-
58	61	1	52,174355	-51,83387	1,2112957	-18,82144	-
59	61	1	-46,250225	46,462097	-5,7501969	-5,8502936	-
60	61	1	-66,526421	66,637512	4,8316064	-1,9070923	0
60	61	1	-110,7541	110,99877	-25,099066	29,906834	-2
60	62	1	-24,682409	27,160763	10,955175	-4,4523621	-
60	65	1	-33,943363	35,093975	6,5364199	-1,9560741	-
60	126	1	-5,8304996	6,0093822	1,4271154	-0,8173417	-
61	62	1	-101,29523	104,16857	-6,570045	-15,366672	-
61	63	1	-70,969292	71,171936	3,2420359	-9,5090933	-
62	63	1	121,44405	-119,34712	12,460669	10,127667	-
62	65	1	182,52541	-181,33794	4,7094646	17,258579	-
62	126	1	56,270104	-56,144291	6,6891313	1,800404	-
63	65	1	-3,7533731	3,7850342	-0,3453725	0,6029725	-
64	65	1	-110,44364	111,0165	-64,771118	-28,903454	-
64	66	1	110,44364	-109,78259	64,771118	-120,58502	-
65	126	1	21,557427	-21,54397	4,5184145	-3,8517251	-
66	11	1	109,78259	-109,78259	70,258598	-68,452118	8
67	68	1	-34,390682	34,618134	-4,8492332	1,1350759	-
68	69	1	-79,008133	79,421082	-1,4794623	1,8861318	-
69	77	1	90,8395	-90,055969	7,0358062	-5,7943087	-
69	78	1	-36,219521	36,363678	0,7683231	-2,2645974	-
69	79	1	-134,04108	134,94313	-9,6902609	14,886695	-
70	73	1	-233,69012	233,69012	-202,15442	220,95277	-9
70	149	1	75,658676	-75,633461	91,815163	-91,700371	-
70	149	1	75,658676	-75,633461	91,815163	-91,700371	-
71	85	1	108,37983	-104,93429	2,7217767	7,1102715	-
71	150	1	-141,18983	144,94664	-2,1714141	15,788629	-
72	113	1	21,769489	-21,75971	4,3501606	-4,2923818	-
72	132	1	-53,839939	53,923683	20,438713	-19,936241	-
72	152	1	-18,19701	18,31325	1,9131256	-1,3696618	-
74	119	1	99,438515	-99,131867	-1,7032706	-45,705544	-
75	128	1	389,02115	-387,88705	61,72509	-67,556061	-
75	130	1	-574,58044	575,77948	21,925692	50,615173	0
78	79	1	-124,82004	125,58015	-5,7540812	8,8404512	-
78	80	1	9,3363581	-9,2916622	8,0186787	-12,216816	-
79	74	1	-287,14688	287,14688	-8,0369673	22,165302	-1
82	83	1	-68,245781	68,495812	-9,1552448	9,0188818	-
84	93	1	-122,91319	124,73935	-13,090192	20,720324	-
85	86	1	60,434296	-59,645409	-6,5925589	5,6468554	-
86	87	1	-27,649864	27,871498	-4,1655326	-0,214539	-
86	88	1	-4,6899757	4,7227716	-12,367296	1,7753253	-
88	96	1	-2,8670566	2,8794327	-3,6467931	2,2469294	-
88	106	1	-68,41571	68,783531	-2,5685322	2,3988609	-
89	86	1	-36,265251	36,265251	-8,3397884	9,1628809	-6
89	90	1	36,265251	-35,333794	8,3397884	-7,9301395	-
90	96	1	-19,816204	20,577427	0,8085208	-2,9998174	-
91	92	1	27,639416	-27,501291	11,436774	-14,666642	-
91	93	1	-85,639336	86,623123	-4,7742238	6,0531182	-

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162 ieee dtc api (BD-OTS) (continuação)

91	94	1	8,2115459	-8,0829582	-32,203213	27,798409	-
92	102	1	-12,16871	12,197488	5,6166425	-8,5199718	-
93	42	1	30,158678	-30,158678	-127,51401	132,18811	-11
93	108	1	-596,7345	596,7345	-12,69282	62,510498	0
94	103	1	-27,982887	28,373293	30,160713	-35,028187	-
94	107	1	65,605576	-63,120754	10,938646	-12,137551	-
94	109	1	-209,65971	209,65971	-75,387772	93,005203	-10
95	91	1	6,5016918	-6,4916267	-12,243148	12,710662	-3
95	96	1	62,503696	-59,391083	-8,9239273	7,3854709	-
95	97	1	6,7924829	-6,7381053	-1,4639026	-2,0492363	-
95	98	1	-54,717445	54,940552	-22,507912	21,372171	-
95	99	1	-149,80042	149,80042	6,12889	7,7342792	1
96	100	1	12,604743	-12,440839	-10,148125	8,6124554	-
96	101	1	-95,870522	95,870522	3,515543	4,9839139	7
97	44	1	-18,351894	18,369373	-3,6607635	4,2632675	-4
98	93	1	-240,85405	241,20334	-62,717255	78,873383	-4
98	105	1	19,953501	-19,357557	-9,0049181	6,7168527	-
100	104	1	-13,049162	13,230435	-12,399305	11,05884	-
103	123	1	25,931553	-24,752388	2,5119615	2,353708	-
103	124	1	-394,86011	395,1611	41,821598	-16,689013	-
103	125	1	-41,025101	41,501026	-10,198966	13,562841	-
104	34	1	-47,850437	48,06229	-15,425565	17,432753	-10
105	38	1	-7,9224424	7,9224424	-11,057808	11,266319	-6
106	107	1	35,999817	-35,74456	4,202106	-6,109787	-
107	122	1	59,975308	-59,480331	12,837338	-13,38145	-
109	119	1	18,787609	-18,765688	-43,173973	-53,320808	-
109	124	1	-149,85316	150,29877	9,0334778	-43,506687	-
109	125	1	-77,408501	77,958855	-99,427116	-3,8307145	-
110	111	1	100,29254	-98,217339	6,3150158	-2,4259889	-
110	112	1	-281,04739	281,04739	-57,395268	71,831078	-5
110	114	1	-149,33586	149,33586	1,3376898	14,09915	-1
110	134	1	93,033409	-92,772903	21,417542	-20,827946	-
110	141	1	148,77719	-144,56744	18,117456	-8,2298527	-
111	115	1	26,377335	-25,996325	-14,29401	4,8064218	-
112	120	1	153,03818	-152,90453	-77,401581	70,795433	-
112	121	1	-718,65399	718,65399	44,001278	44,004669	3
113	132	1	-4,0873899	4,0946989	0,9575662	-0,9112131	-
113	134	1	-7,8380613	7,8385077	0,2526052	-0,669181	-
115	117	1	269,45688	-268,18018	-17,115133	23,892242	-
116	117	1	30,606875	-30,52668	29,012104	-30,698473	-
116	119	1	-435,28448	435,28448	-130,05476	148,41409	-7
116	147	1	117,03449	-116,53881	43,548454	-41,198826	-
117	147	1	121,44182	-121,14118	2,9154663	-1,6011742	-
120	14	1	374,80524	-374,42438	22,776417	1,0908787	2
120	128	1	-6,8155065	6,8172069	-25,765238	14,942561	-
120	129	1	50,560631	-50,549007	-44,042496	37,117088	-
122	123	1	7,5503349	-7,5336165	4,0214496	-7,7642851	-
123	125	1	-109,95058	115,31075	1,53091	29,400957	-
124	125	1	-7,7272496	7,7943168	-23,605463	24,546188	-
124	126	1	-10,264482	10,327055	-2,7138431	3,60918	-
125	126	0	-	-	-	-	-
126	127	1	9,0584879	-8,9891891	-2,2678354	2,8248372	-
128	72	1	381,06982	-380,54443	52,613495	-28,969702	3
129	132	1	280,2742	-279,98798	-12,013405	26,181995	1
133	134	1	-65,754402	65,754402	-16,433418	18,157127	-1
133	135	1	8,3194323	-8,311307	3,6199336	-3,6448102	-
133	136	1	9,5862331	-9,5502453	3,1056666	-3,1902473	-
133	137	1	14,788738	-14,760552	3,6878181	-3,6920719	-
135	138	1	-13,718693	13,798252	-0,3651896	0,3450722	-
136	139	1	-12,479755	12,516952	-0,8197526	0,8030908	-
137	140	1	-7,2694473	7,2714224	-0,3179283	0,2814793	-
138	110	1	-88,280121	88,280121	-7,3257489	10,207565	0
138	139	1	23,740437	-23,606951	3,0359666	-2,8130908	-
138	140	1	22,305719	-22,191422	3,1905518	-2,9614794	-
138	145	1	28,435713	-27,766434	0,7541584	0,5268815	-
142	51	1	-21,93894	21,93894	-7,7724681	8,7325754	-1
142	143	1	-4,8914161	4,938457	1,9949059	-2,5489733	-
142	146	1	-2,9196451	2,9345942	0,4275622	-1,0842766	-
143	144	1	-28,078457	28,822146	-1,4610267	3,1205106	-
144	141	1	-53,598423	53,598423	-12,459753	14,888348	-2
144	145	1	-15,660079	15,876433	2,9361341	-2,7368815	-
144	146	1	26,846352	-26,364595	4,3931084	-2,9257233	-
148	116	1	-131,8	131,8	-24	30,788363	3
149	26	1	-210,44243	210,44243	39,261547	-23,852131	2

continua

Resultado por linhas do sistema nesta case162 ieee dtc api (BD-OTS) (continuação)

149	26	1	-214,33952	214,33952	96,082428	-78,19899	5
149	150	1	150,42194	-150,21664	18,910275	-17,388628	-
149	151	1	216,84642	-215,17651	29,644701	-19,951014	-
149	152	1	24,451542	-24,31325	-6,8153086	1,3696618	-
151	161	1	188,81651	-188,12668	11,951014	-8,2203522	-
153	70	1	-82,372765	82,372765	-12,711705	18,524101	-2
153	70	0	-	-	-	-	-
153	154	1	37,118076	-36,229668	4,8961458	-1,9281907	-
153	155	1	40,864689	-40,209255	6,2155595	-3,8029864	-
154	156	1	-18,958721	19,014477	-4,3646421	4,4165134	-
154	160	1	24,438391	-24,379532	2,9997733	-2,8569674	-
155	156	1	27,029255	-26,908991	-0,1970136	0,6096239	-
156	157	1	-0,8954858	0,9225917	-7,4261374	7,2557983	-
157	55	1	-57,263138	57,263138	-14,966123	17,751974	-3
157	158	1	17,978859	-17,81724	5,6559649	-5,4896908	-
158	159	1	0,2472389	-0,244121	3,0302942	-3,1495552	-
159	160	1	-8,5458794	8,5595322	0,7495551	-1,9430326	-
161	162	1	152,97667	-152,49956	-2,1796474	3,8322542	-

Fonte: Elaboração do autor.

ANEXAO A – CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DOS SISTEMAS IEEE

Neste anexo são apresentadas todas as características específicas dos sistemas IEEE utilizados neste trabalho. Esses dados foram obtidos em Coffrin, Gordon e Scott (2016). Para cada sistema, primeiramente serão apresentadas as características referentes às barras e em seguida as características referentes aos ramos dos sistemas.

Tabela 61 – Relação de barras do sistema nesta_case6_ww

Barra	Tipo de Barra ²	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	0	0	0	0	1,05	1,05
2	2	0	0	0	0	1,05	1,05
3	2	0	0	0	0	1,07	1,07
4	1	70	70	0	0	0,95	1,05
5	1	70	70	0	0	0,95	1,05
6	1	70	70	0	0	0,95	1,05

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 62 – Barras de geração do sistema nesta_case6_ww

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	50	200	-100	100	0,00533	11,669	213,1
2	37,5	150	-100	100	0,00889	10,333	200
3	45	180	-100	100	0,00741	10,833	240

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

As colunas c^q , c^l e c^c da Tabela 62 representam o custo de geração quadrático, linear e constante, em US\$/ (hora * MW²), US\$/ (hora * MW) e US\$/ hora respectivamente.

Tabela 63 – Relação de ramos do sistema nesta_case6_ww

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,1	0,2	0,04	40
1	4	0,05	0,2	0,04	60
1	5	0,08	0,3	0,06	40
2	3	0,05	0,25	0,06	40
2	4	0,05	0,1	0,02	60
2	5	0,1	0,3	0,04	30
2	6	0,07	0,2	0,05	90
3	5	0,12	0,26	0,05	70
3	6	0,02	0,1	0,02	80
4	5	0,2	0,4	0,08	20
5	6	0,1	0,3	0,06	40

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

² Tipo de Barra igual a 1: Barra PQ (Barra de Carga); 2: PV (Barra de Geração); 3: Referência

Os valores da condutância (G_{ij}) e receptância (B_{ij}) de cada ramo não serão mostrados nas tabelas referentes às informações dos ramos, pois como pode ser visto na Tabela 63, os valores das informações já existentes (r e x) nesta tabela, podem ser utilizados para calcular os valores de G_{ij} e B_{ij} através das expressões (120) e (121).

$$G_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (120)$$

$$B_{ij} = \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (121)$$

Tabela 64 – Relação de barras do sistema nesta_case14_ieee

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	0	0	0	0	0,94	1,06
2	2	21,7	12,7	0	0	0,94	1,06
3	2	94,2	19	0	0	0,94	1,06
4	1	47,8	-3,9	0	0	0,94	1,06
5	1	7,6	1,6	0	0	0,94	1,06
6	2	11,2	7,5	0	0	0,94	1,06
7	1	0	0	0	0	0,94	1,06
8	2	0	0	0	0	0,94	1,06
9	1	29,5	16,6	0	19	0,94	1,06
10	1	9	5,8	0	0	0,94	1,06
11	1	3,5	1,8	0	0	0,94	1,06
12	1	6,1	1,6	0	0	0,94	1,06
13	1	13,5	5,8	0	0	0,94	1,06
14	1	14,9	5	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 65 – Barras de geração do sistema nesta_case14_ieee

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	0	362	0	10	0	1,0261	0
2	0	63	-32	32	0	0,48081	0
3	0	0	0	40	0	0	0
6	0	0	-6	24	0	0	0
8	0	0	-6	24	0	0	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 66 – Relação de ramos do sistema nesta_case14_ieee

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	472
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	128
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	145
2	4	0,05811	0,17632	0,034	158
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	161
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	160
4	5	0,01335	0,04211	0	664
4	7	0	0,20912	0	141
4	9	0	0,55618	0	53
5	6	0	0,25202	0	117
6	11	0,09498	0,1989	0	134

continua

Relação de ramos do sistema nesta_case14_ieee (continuação)					
6	12	0,12291	0,25581	0	104
6	13	0,06615	0,13027	0	201
7	8	0	0,17615	0	167
7	9	0	0,11001	0	267
9	10	0,03181	0,0845	0	325
9	14	0,12711	0,27038	0	99
10	11	0,08205	0,19207	0	141
12	13	0,22092	0,19988	0	99
13	14	0,17093	0,34802	0	76

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 67 – Relação de barras do sistema nesta_case14_ieee__api

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	0	0	0	0	0,94	1,06
2	2	42,66	12,7	0	0	0,94	1,06
3	2	185,17	19	0	0	0,94	1,06
4	1	47,8	-3,9	0	0	0,94	1,06
5	1	14,94	1,6	0	0	0,94	1,06
6	2	22,02	7,5	0	0	0,94	1,06
7	1	0	0	0	0	0,94	1,06
8	2	0	0	0	0	0,94	1,06
9	1	57,99	16,6	0	19	0,94	1,06
10	1	17,69	5,8	0	0	0,94	1,06
11	1	6,88	1,8	0	0	0,94	1,06
12	1	11,99	1,6	0	0	0,94	1,06
13	1	26,54	5,8	0	0	0,94	1,06
14	1	29,29	5	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 68 – Barras de geração do sistema nesta_case14_ieee__api

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	0	542	-271	271	0	0,66426	0
2	0	190	-95	95	0	0,60619	0
3	0	0	-72	72	0	0	0
6	0	0	-56,4	56,4	0	0	0
8	0	0	-30	30	0	0	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 69 – Relação de ramos do sistema nesta_case14_ieee__api

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,01938	0,05917	0,0528	472
1	5	0,05403	0,22304	0,0492	128
2	3	0,04699	0,19797	0,0438	145
2	4	0,05811	0,17632	0,034	158
2	5	0,05695	0,17388	0,0346	161
3	4	0,06701	0,17103	0,0128	160
4	5	0,01335	0,04211	0	664
4	7	0	0,20912	0	141
4	9	0	0,55618	0	53
5	6	0	0,25202	0	117
6	11	0,09498	0,1989	0	134
6	12	0,12291	0,25581	0	104
6	13	0,06615	0,13027	0	201
7	8	0	0,17615	0	167
7	9	0	0,11001	0	267

continua

Relação de ramos do sistema nesta_case14_ieee_api (continuação)

9	10	0,03181	0,0845	0	325
9	14	0,12711	0,27038	0	99
10	11	0,08205	0,19207	0	141
12	13	0,22092	0,19988	0	99
13	14	0,17093	0,34802	0	76

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 70 – Relação de barras do sistema nesta_case30_fsr_api

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	0	0	0	0	0,95	1,05
2	2	23,71	12,7	0	0	0,95	1,1
3	1	2,62	1,2	0	0	0,95	1,05
4	1	8,3	1,6	0	0	0,95	1,05
5	1	0	0	0	0,19	0,95	1,05
6	1	0	0	0	0	0,95	1,05
7	1	24,91	10,9	0	0	0,95	1,05
8	1	32,78	30	0	0	0,95	1,05
9	1	0	0	0	0	0,95	1,05
10	1	6,34	2	0	0	0,95	1,05
11	1	0	0	0	0	0,95	1,05
12	1	12,24	7,5	0	0	0,95	1,05
13	2	0	0	0	0	0,95	1,1
14	1	6,77	1,6	0	0	0,95	1,05
15	1	8,96	2,5	0	0	0,95	1,05
16	1	3,82	1,8	0	0	0,95	1,05
17	1	9,83	5,8	0	0	0,95	1,05
18	1	3,5	0,9	0	0	0,95	1,05
19	1	10,38	3,4	0	0	0,95	1,05
20	1	2,4	0,7	0	0	0,95	1,05
21	1	19,12	11,2	0	0	0,95	1,05
22	2	0	0	0	0	0,95	1,1
23	2	3,5	1,6	0	0	0,95	1,1
24	1	9,51	6,7	0	0,04	0,95	1,05
25	1	0	0	0	0	0,95	1,05
26	1	3,82	2,3	0	0	0,95	1,05
27	2	0	0	0	0	0,95	1,1
28	1	0	0	0	0	0,95	1,05
29	1	2,62	0,9	0	0	0,95	1,05
30	1	11,58	1,9	0	0	0,95	1,05

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 71 – Barras de geração do sistema nesta_case30_fsr_api

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	0	231	-170,4	250	0	0,921	0
2	0	81	-159,6	159,6	0	1,2798	0
22	0	34	-30	80	0	1,2021	0
27	0	256	-128	128	0	1,195	0
23	0	50	-25	50	0	6,8928	0
13	0	167	-84	84	0	0,98661	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 72 – Relação de ramos do sistema nesta_case30_fsr_api

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0192	0,0575	0,0264	130
1	3	0,0452	0,1852	0,0204	130

continua

Relação de ramos do sistema nesta case30 fsr api (continuação)					
2	4	0,057	0,1737	0,0184	65
3	4	0,0132	0,0379	0,0042	130
2	5	0,0472	0,1983	0,0209	130
2	6	0,0581	0,1763	0,0187	65
4	6	0,0119	0,0414	0,0045	90
5	7	0,046	0,116	0,0102	70
6	7	0,0267	0,082	0,0085	130
6	8	0,012	0,042	0,0045	32
6	9	0	0,208	0	65
6	10	0	0,556	0	32
9	11	0	0,208	0	65
9	10	0	0,11	0	65
4	12	0	0,256	0	65
12	13	0	0,14	0	65
12	14	0,1231	0,2559	0	32
12	15	0,0662	0,1304	0	32
12	16	0,0945	0,1987	0	32
14	15	0,221	0,1997	0	16
16	17	0,0824	0,1932	0	16
15	18	0,107	0,2185	0	16
18	19	0,0639	0,1292	0	16
19	20	0,034	0,068	0	32
10	20	0,0936	0,209	0	32
10	17	0,0324	0,0845	0	32
10	21	0,0348	0,0749	0	32
10	22	0,0727	0,1499	0	32
21	22	0,0116	0,0236	0	32
15	23	0,1	0,202	0	16
22	24	0,115	0,179	0	16
23	24	0,132	0,27	0	16
24	25	0,1885	0,3292	0	16
25	26	0,2544	0,38	0	16
25	27	0,1093	0,2087	0	16
28	27	0	0,396	0	65
27	29	0,2198	0,4153	0	16
27	30	0,3202	0,6027	0	16
29	30	0,2399	0,4533	0	16
8	28	0,0636	0,2	0,0214	32
6	28	0,0169	0,0599	0,0065	32

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 73 – Relação de barras do sistema nesta_case30_ieee

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	$\underline{V}$ (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	0	0	0	0	0,94	1,06
2	2	21,7	12,7	0	0	0,94	1,06
3	1	2,4	1,2	0	0	0,94	1,06
4	1	7,6	1,6	0	0	0,94	1,06
5	2	94,2	19	0	0	0,94	1,06
6	1	0	0	0	0	0,94	1,06
7	1	22,8	10,9	0	0	0,94	1,06
8	2	30	30	0	0	0,94	1,06
9	1	0	0	0	0	0,94	1,06
10	1	5,8	2	0	19	0,94	1,06
11	2	0	0	0	0	0,94	1,06
12	1	11,2	7,5	0	0	0,94	1,06
13	2	0	0	0	0	0,94	1,06
14	1	6,2	1,6	0	0	0,94	1,06
15	1	8,2	2,5	0	0	0,94	1,06
16	1	3,5	1,8	0	0	0,94	1,06
17	1	9	5,8	0	0	0,94	1,06
18	1	3,2	0,9	0	0	0,94	1,06
19	1	9,5	3,4	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta _case30_ ieee (continuação)							
20	1	2,2	0,7	0	0	0,94	1,06
21	1	17,5	11,2	0	0	0,94	1,06
22	1	0	0	0	0	0,94	1,06
23	1	3,2	1,6	0	0	0,94	1,06
24	1	8,7	6,7	0	4,3	0,94	1,06
25	1	0	0	0	0	0,94	1,06
26	1	3,5	2,3	0	0	0,94	1,06
27	1	0	0	0	0	0,94	1,06
28	1	0	0	0	0	0,94	1,06
29	1	2,4	0,9	0	0	0,94	1,06
30	1	10,6	1,9	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 74 – Barras de geração do sistema nesta _case30_ ieee

Barra	$\underline{P}^g$ (MW)	$\overline{P}^g$ (MW)	$\underline{Q}^g$ (MVar)	$\overline{Q}^g$ (MVar)	c^g	c^l	c^c
1	0	784	0	10	0	0,52138	0
2	0	100	-40	50	0	1,1352	0
5	0	0	-40	40	0	0	0
8	0	0	-10	40	0	0	0
11	0	0	-6	24	0	0	0
13	0	0	-6	24	0	0	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 75 – Relação de ramos do sistema nesta _case30_ ieee

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0192	0,0575	0,0528	138
1	3	0,0452	0,1652	0,0408	152
2	4	0,057	0,1737	0,0368	139
3	4	0,0132	0,0379	0,0084	135
2	5	0,0472	0,1983	0,0418	144
2	6	0,0581	0,1763	0,0374	139
4	6	0,0119	0,0414	0,009	148
5	7	0,046	0,116	0,0204	127
6	7	0,0267	0,082	0,017	140
6	8	0,012	0,042	0,009	148
6	9	0	0,208	0	142
6	10	0	0,556	0	53
9	11	0	0,208	0	142
9	10	0	0,11	0	267
4	12	0	0,256	0	115
12	13	0	0,14	0	210
12	14	0,1231	0,2559	0	29
12	15	0,0662	0,1304	0	29
12	16	0,0945	0,1987	0	30
14	15	0,221	0,1997	0	20
16	17	0,0524	0,1923	0	38
15	18	0,1073	0,2185	0	29
18	19	0,0639	0,1292	0	29
19	20	0,034	0,068	0	29
10	20	0,0936	0,209	0	30
10	17	0,0324	0,0845	0	33
10	21	0,0348	0,0749	0	30
10	22	0,0727	0,1499	0	29
21	22	0,0116	0,0236	0	29
15	23	0,1	0,202	0	29
22	24	0,115	0,179	0	26
23	24	0,132	0,27	0	29
24	25	0,1885	0,3292	0	27
25	26	0,2544	0,38	0	25

continua

Relação de ramos do sistema nesta_case30_ieee (continuação)					
25	27	0,1093	0,2087	0	28
28	27	0	0,396	0	75
27	29	0,2198	0,4153	0	28
27	30	0,3202	0,6027	0	28
29	30	0,2399	0,4533	0	28
8	28	0,0636	0,2	0,0428	140
6	28	0,0169	0,0599	0,013	149

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 76 – Relação de barras do sistema nesta_case30_ieee__api

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	0	0	0	0	0,94	1,06
2	2	36,08	12,7	0	0	0,94	1,06
3	1	3,99	1,2	0	0	0,94	1,06
4	1	12,64	1,6	0	0	0,94	1,06
5	2	156,64	19	0	0	0,94	1,06
6	1	0	0	0	0	0,94	1,06
7	1	37,91	10,9	0	0	0,94	1,06
8	2	49,89	30	0	0	0,94	1,06
9	1	0	0	0	0	0,94	1,06
10	1	9,64	2	0	19	0,94	1,06
11	2	0	0	0	0	0,94	1,06
12	1	18,62	7,5	0	0	0,94	1,06
13	2	0	0	0	0	0,94	1,06
14	1	10,31	1,6	0	0	0,94	1,06
15	1	13,64	2,5	0	0	0,94	1,06
16	1	5,82	1,8	0	0	0,94	1,06
17	1	14,97	5,8	0	0	0,94	1,06
18	1	5,32	0,9	0	0	0,94	1,06
19	1	15,8	3,4	0	0	0,94	1,06
20	1	3,66	0,7	0	0	0,94	1,06
21	1	29,1	11,2	0	0	0,94	1,06
22	1	0	0	0	0	0,94	1,06
23	1	5,32	1,6	0	0	0,94	1,06
24	1	14,47	6,7	0	4,3	0,94	1,06
25	1	0	0	0	0	0,94	1,06
26	1	5,82	2,3	0	0	0,94	1,06
27	1	0	0	0	0	0,94	1,06
28	1	0	0	0	0	0,94	1,06
29	1	3,99	0,9	0	0	0,94	1,06
30	1	17,63	1,9	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 77 – Barras de geração do sistema nesta_case30_ieee__api

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	0	517	-259	259	0	0,76906	0
2	0	1120	-560	560	0	0,85006	0
5	0	0	-40	40	0	0	0
8	0	0	-230,4	230,4	0	0	0
11	0	0	-18	24	0	0	0
13	0	0	-6	24	0	0	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 78 – Relação de ramos do sistema nesta_case30_ieee_api

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0192	0,0575	0,0528	138
1	3	0,0452	0,1652	0,0408	152
2	4	0,057	0,1737	0,0368	139
3	4	0,0132	0,0379	0,0084	135
2	5	0,0472	0,1983	0,0418	144
2	6	0,0581	0,1763	0,0374	139
4	6	0,0119	0,0414	0,009	148
5	7	0,046	0,116	0,0204	127
6	7	0,0267	0,082	0,017	140
6	8	0,012	0,042	0,009	148
6	9	0	0,208	0	142
6	10	0	0,556	0	53
9	11	0	0,208	0	142
9	10	0	0,11	0	267
4	12	0	0,256	0	115
12	13	0	0,14	0	210
12	14	0,1231	0,2559	0	29
12	15	0,0662	0,1304	0	29
12	16	0,0945	0,1987	0	30
14	15	0,221	0,1997	0	20
16	17	0,0524	0,1923	0	38
15	18	0,1073	0,2185	0	29
18	19	0,0639	0,1292	0	29
19	20	0,034	0,068	0	29
10	20	0,0936	0,209	0	30
10	17	0,0324	0,0845	0	33
10	21	0,0348	0,0749	0	30
10	22	0,0727	0,1499	0	29
21	22	0,0116	0,0236	0	29
15	23	0,1	0,202	0	29
22	24	0,115	0,179	0	26
23	24	0,132	0,27	0	29
24	25	0,1885	0,3292	0	27
25	26	0,2544	0,38	0	25
25	27	0,1093	0,2087	0	28
28	27	0	0,396	0	75
27	29	0,2198	0,4153	0	28
27	30	0,3202	0,6027	0	28
29	30	0,2399	0,4533	0	28
8	28	0,0636	0,2	0,0428	140
6	28	0,0169	0,0599	0,013	149

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 79 – Relação de barras do sistema nesta_case57_ieee

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	$\bar{V}$ (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	55	17	0	0	0,94	1,06
2	2	3	88	0	0	0,94	1,06
3	2	41	21	0	0	0,94	1,06
4	1	0	0	0	0	0,94	1,06
5	1	13	4	0	0	0,94	1,06
6	2	75	2	0	0	0,94	1,06
7	1	0	0	0	0	0,94	1,06
8	2	150	22	0	0	0,94	1,06
9	2	121	26	0	0	0,94	1,06
10	1	5	2	0	0	0,94	1,06
11	1	0	0	0	0	0,94	1,06
12	2	377	24	0	0	0,94	1,06
13	1	18	2,3	0	0	0,94	1,06
14	1	10,5	5,3	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta_case57_ieee (continuação)

15	1	22	5	0	0	0,94	1,06
16	1	43	3	0	0	0,94	1,06
17	1	42	8	0	0	0,94	1,06
18	1	27,2	9,8	0	10	0,94	1,06
19	1	3,3	0,6	0	0	0,94	1,06
20	1	2,3	1	0	0	0,94	1,06
21	1	0	0	0	0	0,94	1,06
22	1	0	0	0	0	0,94	1,06
23	1	6,3	2,1	0	0	0,94	1,06
24	1	0	0	0	0	0,94	1,06
25	1	6,3	3,2	0	5,9	0,94	1,06
26	1	0	0	0	0	0,94	1,06
27	1	9,3	0,5	0	0	0,94	1,06
28	1	4,6	2,3	0	0	0,94	1,06
29	1	17	2,6	0	0	0,94	1,06
30	1	3,6	1,8	0	0	0,94	1,06
31	1	5,8	2,9	0	0	0,94	1,06
32	1	1,6	0,8	0	0	0,94	1,06
33	1	3,8	1,9	0	0	0,94	1,06
34	1	0	0	0	0	0,94	1,06
35	1	6	3	0	0	0,94	1,06
36	1	0	0	0	0	0,94	1,06
37	1	0	0	0	0	0,94	1,06
38	1	14	7	0	0	0,94	1,06
39	1	0	0	0	0	0,94	1,06
40	1	0	0	0	0	0,94	1,06
41	1	6,3	3	0	0	0,94	1,06
42	1	7,1	4,4	0	0	0,94	1,06
43	1	2	1	0	0	0,94	1,06
44	1	12	1,8	0	0	0,94	1,06
45	1	0	0	0	0	0,94	1,06
46	1	0	0	0	0	0,94	1,06
47	1	29,7	11,6	0	0	0,94	1,06
48	1	0	0	0	0	0,94	1,06
49	1	18	8,5	0	0	0,94	1,06
50	1	21	10,5	0	0	0,94	1,06
51	1	18	5,3	0	0	0,94	1,06
52	1	4,9	2,2	0	0	0,94	1,06
53	1	20	10	0	6,3	0,94	1,06
54	1	4,1	1,4	0	0	0,94	1,06
55	1	6,8	3,4	0	0	0,94	1,06
56	1	7,6	2,2	0	0	0,94	1,06
57	1	6,7	2	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 80 – Barras de geração do sistema nesta_case57_ieee

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	0	282	-140	141	0	0,75069	0
2	0	0	-17	50	0	0	0
3	0	61	-10	31	0	0,83696	0
6	0	0	-8	25	0	0	0
8	0	510	-140	200	0	1,172	0
9	0	0	-3	9	0	0	0
12	0	524	-150	155	0	0,78733	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 81 – Relação de ramos do sistema nesta_case57_ieee

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0083	0,028	0,129	1005

continua

Relação de ramos do sistema nesta case57 ieee (continuação)

2	3	0,0298	0,085	0,0818	326
3	4	0,0112	0,0366	0,038	767
4	5	0,0625	0,132	0,0258	201
4	6	0,043	0,148	0,0348	191
6	7	0,02	0,102	0,0276	283
6	8	0,0339	0,173	0,047	167
8	9	0,0099	0,0505	0,0548	570
9	10	0,0369	0,1679	0,044	171
9	11	0,0258	0,0848	0,0218	331
9	12	0,0648	0,295	0,0772	98
9	13	0,0481	0,158	0,0406	178
13	14	0,0132	0,0434	0,011	647
13	15	0,0269	0,0869	0,023	323
1	15	0,0178	0,091	0,0988	317
1	16	0,0454	0,206	0,0546	140
1	17	0,0238	0,108	0,0286	266
3	15	0,0162	0,053	0,0544	530
4	18	0	0,555	0	53
4	18	0	0,43	0	69
5	6	0,0302	0,0641	0,0124	414
7	8	0,0139	0,0712	0,0194	405
10	12	0,0277	0,1262	0,0328	228
11	13	0,0223	0,0732	0,0188	384
12	13	0,0178	0,058	0,0604	484
12	16	0,018	0,0813	0,0216	353
12	17	0,0397	0,179	0,0476	160
14	15	0,0171	0,0547	0,0148	512
18	19	0,461	0,685	0	36
19	20	0,283	0,434	0	57
21	20	0	0,7767	0	38
21	22	0,0736	0,117	0	213
22	23	0,0099	0,0152	0	1617
23	24	0,166	0,256	0,0084	97
24	25	0	1,182	0	25
24	25	0	1,23	0	24
24	26	0	0,0473	0	621
26	27	0,165	0,254	0	97
27	28	0,0618	0,0954	0	259
28	29	0,0418	0,0587	0	408
7	29	0	0,0648	0	453
25	30	0,135	0,202	0	121
30	31	0,326	0,497	0	50
31	32	0,507	0,755	0	33
32	33	0,0392	0,036	0	552
34	32	0	0,953	0	31
34	35	0,052	0,078	0,0032	313
35	36	0,043	0,0537	0,0016	427
36	37	0,029	0,0366	0	629
37	38	0,0651	0,1009	0,002	245
37	39	0,0239	0,0379	0	655
36	40	0,03	0,0466	0	530
22	38	0,0192	0,0295	0	834
11	41	0	0,749	0	40
41	42	0,207	0,352	0	72
41	43	0	0,412	0	72
38	44	0,0289	0,0585	0,002	450
15	45	0	0,1042	0	282
14	46	0	0,0735	0	400
46	47	0,023	0,068	0,0032	409
47	48	0,0182	0,0233	0	993
48	49	0,0834	0,129	0,0048	191
49	50	0,0801	0,128	0	195
50	51	0,1386	0,22	0	113
10	51	0	0,0712	0	412
13	49	0	0,191	0	154

continua

Relação de ramos do sistema nesta case57_ieee (continuação)					
29	52	0,1442	0,187	0	125
52	53	0,0762	0,0984	0	236
53	54	0,1878	0,232	0	99
54	55	0,1732	0,2265	0	103
11	43	0	0,153	0	192
44	45	0,0624	0,1242	0,004	212
40	56	0	1,195	0	25
56	41	0,553	0,549	0	38
56	42	0,2125	0,354	0	72
39	57	0	1,355	0	22
57	56	0,174	0,26	0	94
38	49	0,115	0,177	0,003	139
38	48	0,0312	0,0482	0	511
9	55	0	0,1205	0	244

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 82 – Relação de barras do sistema nesta_case57_ieee__api

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	3	63,42	17	0	0	0,94	1,06
2	2	3,46	88	0	0	0,94	1,06
3	2	47,28	21	0	0	0,94	1,06
4	1	0	0	0	0	0,94	1,06
5	1	14,99	4	0	0	0,94	1,06
6	2	86,49	2	0	0	0,94	1,06
7	1	0	0	0	0	0,94	1,06
8	2	172,98	22	0	0	0,94	1,06
9	2	139,53	26	0	0	0,94	1,06
10	1	5,77	2	0	0	0,94	1,06
11	1	0	0	0	0	0,94	1,06
12	2	434,75	24	0	0	0,94	1,06
13	1	20,76	2,3	0	0	0,94	1,06
14	1	12,11	5,3	0	0	0,94	1,06
15	1	25,37	5	0	0	0,94	1,06
16	1	49,59	3	0	0	0,94	1,06
17	1	48,43	8	0	0	0,94	1,06
18	1	31,37	9,8	0	10	0,94	1,06
19	1	3,81	0,6	0	0	0,94	1,06
20	1	2,65	1	0	0	0,94	1,06
21	1	0	0	0	0	0,94	1,06
22	1	0	0	0	0	0,94	1,06
23	1	7,27	2,1	0	0	0,94	1,06
24	1	0	0	0	0	0,94	1,06
25	1	7,27	3,2	0	5,9	0,94	1,06
26	1	0	0	0	0	0,94	1,06
27	1	10,72	0,5	0	0	0,94	1,06
28	1	5,3	2,3	0	0	0,94	1,06
29	1	19,6	2,6	0	0	0,94	1,06
30	1	4,15	1,8	0	0	0,94	1,06
31	1	6,69	2,9	0	0	0,94	1,06
32	1	1,85	0,8	0	0	0,94	1,06
33	1	4,38	1,9	0	0	0,94	1,06
34	1	0	0	0	0	0,94	1,06
35	1	6,92	3	0	0	0,94	1,06
36	1	0	0	0	0	0,94	1,06
37	1	0	0	0	0	0,94	1,06
38	1	16,14	7	0	0	0,94	1,06
39	1	0	0	0	0	0,94	1,06
40	1	0	0	0	0	0,94	1,06
41	1	7,27	3	0	0	0,94	1,06
42	1	8,19	4,4	0	0	0,94	1,06
43	1	2,31	1	0	0	0,94	1,06
44	1	13,84	1,8	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta_case57_ieee_api (continuação)

45	1	0	0	0	0	0,94	1,06
46	1	0	0	0	0	0,94	1,06
47	1	34,25	11,6	0	0	0,94	1,06
48	1	0	0	0	0	0,94	1,06
49	1	20,76	8,5	0	0	0,94	1,06
50	1	24,22	10,5	0	0	0,94	1,06
51	1	20,76	5,3	0	0	0,94	1,06
52	1	5,65	2,2	0	0	0,94	1,06
53	1	23,06	10	0	6,3	0,94	1,06
54	1	4,73	1,4	0	0	0,94	1,06
55	1	7,84	3,4	0	0	0,94	1,06
56	1	8,76	2,2	0	0	0,94	1,06
57	1	7,73	2	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 83 – Barras de geração do sistema nesta_case57_ieee_api

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	0	2	-140	141	0	0,75951	0
2	0	0	-17	50	0	0	0
3	0	663	-332	332	0	0,87982	0
6	0	0	-116,4	116,4	0	0	0
8	0	586	-293	293	0	1,0927	0
9	0	0	-38,4	38,4	0	0	0
12	0	498	-249	249	0	0,98437	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 84 – Relação de ramos do sistema nesta_case57_ieee_api

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0083	0,028	0,129	1005
2	3	0,0298	0,085	0,0818	326
3	4	0,0112	0,0366	0,038	767
4	5	0,0625	0,132	0,0258	201
4	6	0,043	0,148	0,0348	191
6	7	0,02	0,102	0,0276	283
6	8	0,0339	0,173	0,047	167
8	9	0,0099	0,0505	0,0548	570
9	10	0,0369	0,1679	0,044	171
9	11	0,0258	0,0848	0,0218	331
9	12	0,0648	0,295	0,0772	98
9	13	0,0481	0,158	0,0406	178
13	14	0,0132	0,0434	0,011	647
13	15	0,0269	0,0869	0,023	323
1	15	0,0178	0,091	0,0988	317
1	16	0,0454	0,206	0,0546	140
1	17	0,0238	0,108	0,0286	266
3	15	0,0162	0,053	0,0544	530
4	18	0	0,555	0	53
4	18	0	0,43	0	69
5	6	0,0302	0,0641	0,0124	414
7	8	0,0139	0,0712	0,0194	405
10	12	0,0277	0,1262	0,0328	228
11	13	0,0223	0,0732	0,0188	384
12	13	0,0178	0,058	0,0604	484
12	16	0,018	0,0813	0,0216	353
12	17	0,0397	0,179	0,0476	160
14	15	0,0171	0,0547	0,0148	512
18	19	0,461	0,685	0	36
19	20	0,283	0,434	0	57
21	20	0	0,7767	0	38

continua

Relação de ramos do sistema nesta_case57_ieee_api (continuação)					
21	22	0,0736	0,117	0	213
22	23	0,0099	0,0152	0	1617
23	24	0,166	0,256	0,0084	97
24	25	0	1,182	0	25
24	25	0	1,23	0	24
24	26	0	0,0473	0	621
26	27	0,165	0,254	0	97
27	28	0,0618	0,0954	0	259
28	29	0,0418	0,0587	0	408
7	29	0	0,0648	0	453
25	30	0,135	0,202	0	121
30	31	0,326	0,497	0	50
31	32	0,507	0,755	0	33
32	33	0,0392	0,036	0	552
34	32	0	0,953	0	31
34	35	0,052	0,078	0,0032	313
35	36	0,043	0,0537	0,0016	427
36	37	0,029	0,0366	0	629
37	38	0,0651	0,1009	0,002	245
37	39	0,0239	0,0379	0	655
36	40	0,03	0,0466	0	530
22	38	0,0192	0,0295	0	834
11	41	0	0,749	0	40
41	42	0,207	0,352	0	72
41	43	0	0,412	0	72
38	44	0,0289	0,0585	0,002	450
15	45	0	0,1042	0	282
14	46	0	0,0735	0	400
46	47	0,023	0,068	0,0032	409
47	48	0,0182	0,0233	0	993
48	49	0,0834	0,129	0,0048	191
49	50	0,0801	0,128	0	195
50	51	0,1386	0,22	0	113
10	51	0	0,0712	0	412
13	49	0	0,191	0	154
29	52	0,1442	0,187	0	125
52	53	0,0762	0,0984	0	236
53	54	0,1878	0,232	0	99
54	55	0,1732	0,2265	0	103
11	43	0	0,153	0	192
44	45	0,0624	0,1242	0,004	212
40	56	0	1,195	0	25
56	41	0,553	0,549	0	38
56	42	0,2125	0,354	0	72
39	57	0	1,355	0	22
57	56	0,174	0,26	0	94
38	49	0,115	0,177	0,003	139
38	48	0,0312	0,0482	0	511
9	55	0	0,1205	0	244

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 85 – Relação de barras do sistema nesta_case118_ieee

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	2	51	27	0	0	0,94	1,06
2	1	20	9	0	0	0,94	1,06
3	1	39	10	0	0	0,94	1,06
4	2	39	12	0	0	0,94	1,06
5	1	0	0	0	-40	0,94	1,06
6	2	52	22	0	0	0,94	1,06
7	1	19	2	0	0	0,94	1,06
8	2	28	0	0	0	0,94	1,06
9	1	0	0	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta case118 icee (continuação)

10	2	0	0	0	0	0,94	1,06
11	1	70	23	0	0	0,94	1,06
12	2	47	10	0	0	0,94	1,06
13	1	34	16	0	0	0,94	1,06
14	1	14	1	0	0	0,94	1,06
15	2	90	30	0	0	0,94	1,06
16	1	25	10	0	0	0,94	1,06
17	1	11	3	0	0	0,94	1,06
18	2	60	34	0	0	0,94	1,06
19	2	45	25	0	0	0,94	1,06
20	1	18	3	0	0	0,94	1,06
21	1	14	8	0	0	0,94	1,06
22	1	10	5	0	0	0,94	1,06
23	1	7	3	0	0	0,94	1,06
24	2	13	0	0	0	0,94	1,06
25	2	0	0	0	0	0,94	1,06
26	2	0	0	0	0	0,94	1,06
27	2	71	13	0	0	0,94	1,06
28	1	17	7	0	0	0,94	1,06
29	1	24	4	0	0	0,94	1,06
30	1	0	0	0	0	0,94	1,06
31	2	43	27	0	0	0,94	1,06
32	2	59	23	0	0	0,94	1,06
33	1	23	9	0	0	0,94	1,06
34	2	59	26	0	14	0,94	1,06
35	1	33	9	0	0	0,94	1,06
36	2	31	17	0	0	0,94	1,06
37	1	0	0	0	-25	0,94	1,06
38	1	0	0	0	0	0,94	1,06
39	1	27	11	0	0	0,94	1,06
40	2	66	23	0	0	0,94	1,06
41	1	37	10	0	0	0,94	1,06
42	2	96	23	0	0	0,94	1,06
43	1	18	7	0	0	0,94	1,06
44	1	16	8	0	10	0,94	1,06
45	1	53	22	0	10	0,94	1,06
46	2	28	10	0	10	0,94	1,06
47	1	34	0	0	0	0,94	1,06
48	1	20	11	0	15	0,94	1,06
49	2	87	30	0	0	0,94	1,06
50	1	17	4	0	0	0,94	1,06
51	1	17	8	0	0	0,94	1,06
52	1	18	5	0	0	0,94	1,06
53	1	23	11	0	0	0,94	1,06
54	2	113	32	0	0	0,94	1,06
55	2	63	22	0	0	0,94	1,06
56	2	84	18	0	0	0,94	1,06
57	1	12	3	0	0	0,94	1,06
58	1	12	3	0	0	0,94	1,06
59	2	277	113	0	0	0,94	1,06
60	1	78	3	0	0	0,94	1,06
61	2	0	0	0	0	0,94	1,06
62	2	77	14	0	0	0,94	1,06
63	1	0	0	0	0	0,94	1,06
64	1	0	0	0	0	0,94	1,06
65	2	0	0	0	0	0,94	1,06
66	2	39	18	0	0	0,94	1,06
67	1	28	7	0	0	0,94	1,06
68	1	0	0	0	0	0,94	1,06
69	3	0	0	0	0	0,94	1,06
70	2	66	20	0	0	0,94	1,06
71	1	0	0	0	0	0,94	1,06
72	2	12	0	0	0	0,94	1,06
73	2	6	0	0	0	0,94	1,06
74	2	68	27	0	12	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta_case118_ieee (continuação)							
75	1	47	11	0	0	0,94	1,06
76	2	68	36	0	0	0,94	1,06
77	2	61	28	0	0	0,94	1,06
78	1	71	26	0	0	0,94	1,06
79	1	39	32	0	20	0,94	1,06
80	2	130	26	0	0	0,94	1,06
81	1	0	0	0	0	0,94	1,06
82	1	54	27	0	20	0,94	1,06
83	1	20	10	0	10	0,94	1,06
84	1	11	7	0	0	0,94	1,06
85	2	24	15	0	0	0,94	1,06
86	1	21	10	0	0	0,94	1,06
87	2	0	0	0	0	0,94	1,06
88	1	48	10	0	0	0,94	1,06
89	2	0	0	0	0	0,94	1,06
90	2	163	42	0	0	0,94	1,06
91	2	10	0	0	0	0,94	1,06
92	2	65	10	0	0	0,94	1,06
93	1	12	7	0	0	0,94	1,06
94	1	30	16	0	0	0,94	1,06
95	1	42	31	0	0	0,94	1,06
96	1	38	15	0	0	0,94	1,06
97	1	15	9	0	0	0,94	1,06
98	1	34	8	0	0	0,94	1,06
99	2	42	0	0	0	0,94	1,06
100	2	37	18	0	0	0,94	1,06
101	1	22	15	0	0	0,94	1,06
102	1	5	3	0	0	0,94	1,06
103	2	23	16	0	0	0,94	1,06
104	2	38	25	0	0	0,94	1,06
105	2	31	26	0	20	0,94	1,06
106	1	43	16	0	0	0,94	1,06
107	2	50	12	0	6	0,94	1,06
108	1	2	1	0	0	0,94	1,06
109	1	8	3	0	0	0,94	1,06
110	2	39	30	0	6	0,94	1,06
111	2	0	0	0	0	0,94	1,06
112	2	68	13	0	0	0,94	1,06
113	2	6	0	0	0	0,94	1,06
114	1	8	3	0	0	0,94	1,06
115	1	22	7	0	0	0,94	1,06
116	2	184	0	0	0	0,94	1,06
117	1	20	8	0	0	0,94	1,06
118	1	33	15	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 86 – Barras de geração do sistema nesta_case118_ieee

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
1	0	0	-5	15	0	0	0
4	0	0	-300	300	0	0	0
6	0	0	-13	50	0	0	0
8	0	0	-300	300	0	0	0
10	0	663	-147	200	0	1,4634	0
12	0	287	-35	120	0	0,88905	0
15	0	0	-10	30	0	0	0
18	0	0	-16	50	0	0	0
19	0	0	-8	24	0	0	0
24	0	0	-300	300	0	0	0
25	0	267	-47	134	0	0,92969	0
26	0	451	-226	226	0	1,1181	0
27	0	0	-300	300	0	0	0
31	0	23	-12	12	0	0,81445	0

continua

Barras de geração do sistema nesta_case118_ieee (continuação)

32	0	0	-14	42	0	0	0
34	0	0	-8	24	0	0	0
36	0	0	-8	24	0	0	0
40	0	0	-300	300	0	0	0
42	0	0	-300	300	0	0	0
46	0	51	-26	26	0	1,5138	0
49	0	232	-85	116	0	1,0714	0
54	0	150	-75	75	0	1,3247	0
55	0	0	-8	23	0	0	0
56	0	0	-8	15	0	0	0
59	0	282	-60	141	0	1,4262	0
61	0	251	-100	126	0	1,2452	0
62	0	0	-20	20	0	0	0
65	0	608	-67	200	0	0,96976	0
66	0	865	-67	200	0	0,86571	0
69	0	881	-300	300	0	0,51851	0
70	0	0	-10	32	0	0	0
72	0	0	-100	100	0	0	0
73	0	0	-100	100	0	0	0
74	0	0	-6	9	0	0	0
76	0	0	-8	23	0	0	0
77	0	0	-20	70	0	0	0
80	0	739	-165	280	0	1,0066	0
85	0	0	-8	23	0	0	0
87	0	7	-4	4	0	1,3812	0
89	0	845	-210	300	0	0,7935	0
90	0	0	-300	300	0	0	0
91	0	0	-100	100	0	0	0
92	0	0	-3	9	0	0	0
99	0	0	-100	100	0	0	0
100	0	301	-50	151	0	1,0666	0
103	0	98	-15	40	0	0,69119	0
104	0	0	-8	23	0	0	0
105	0	0	-8	23	0	0	0
107	0	0	-200	200	0	0	0
110	0	0	-8	23	0	0	0
111	0	133	-67	67	0	1,2009	0
112	0	0	-100	1000	0	0	0
113	0	0	-100	200	0	0	0
116	0	0	-1000	1000	0	0	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 87 – Relação de ramos do sistema nesta_case118_ieee

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0303	0,0999	0,0254	151
1	3	0,0129	0,0424	0,01082	151
4	5	0,00176	0,00798	0,0021	176
3	5	0,0241	0,108	0,0284	175
5	6	0,0119	0,054	0,01426	176
6	7	0,00459	0,0208	0,0055	176
8	9	0,00244	0,0305	1,162	711
8	5	0	0,0267	0	1099
9	10	0,00258	0,0322	1,23	710
4	11	0,0209	0,0688	0,01748	151
5	11	0,0203	0,0682	0,01738	152
11	12	0,00595	0,0196	0,00502	151
2	12	0,0187	0,0616	0,01572	151
3	12	0,0484	0,16	0,0406	151
7	12	0,00862	0,034	0,00874	164
11	13	0,02225	0,0731	0,01876	151
12	14	0,0215	0,0707	0,01816	151
13	15	0,0744	0,2444	0,06268	115

continua

Relação de ramos do sistema nesta case118 ieee (continuação)

14	15	0,0595	0,195	0,0502	144
12	16	0,0212	0,0834	0,0214	164
15	17	0,0132	0,0437	0,0444	151
16	17	0,0454	0,1801	0,0466	158
17	18	0,0123	0,0505	0,01298	167
18	19	0,01119	0,0493	0,01142	173
19	20	0,0252	0,117	0,0298	178
15	19	0,012	0,0394	0,0101	151
20	21	0,0183	0,0849	0,0216	177
21	22	0,0209	0,097	0,0246	178
22	23	0,0342	0,159	0,0404	178
23	24	0,0135	0,0492	0,0498	158
23	25	0,0156	0,08	0,0864	186
26	25	0	0,0382	0	768
25	27	0,0318	0,163	0,1764	177
27	28	0,01913	0,0855	0,0216	174
28	29	0,0237	0,0943	0,0238	165
30	17	0	0,0388	0	756
8	30	0,00431	0,0504	0,514	580
26	30	0,00799	0,086	0,908	340
17	31	0,0474	0,1563	0,0399	151
29	31	0,0108	0,0331	0,0083	146
23	32	0,0317	0,1153	0,1173	158
31	32	0,0298	0,0985	0,0251	151
27	32	0,0229	0,0755	0,01926	151
15	33	0,038	0,1244	0,03194	150
19	34	0,0752	0,247	0,0632	114
35	36	0,00224	0,0102	0,00268	176
35	37	0,011	0,0497	0,01318	175
33	37	0,0415	0,142	0,0366	154
34	36	0,00871	0,0268	0,00568	146
34	37	0,00256	0,0094	0,00984	159
38	37	0	0,0375	0	783
37	39	0,0321	0,106	0,027	151
37	40	0,0593	0,168	0,042	140
30	38	0,00464	0,054	0,422	542
39	40	0,0184	0,0605	0,01552	151
40	41	0,0145	0,0487	0,01222	152
40	42	0,0555	0,183	0,0466	151
41	42	0,041	0,135	0,0344	151
43	44	0,0608	0,2454	0,06068	117
34	43	0,0413	0,1681	0,04226	167
44	45	0,0224	0,0901	0,0224	166
45	46	0,04	0,1356	0,0332	153
46	47	0,038	0,127	0,0316	152
46	48	0,0601	0,189	0,0472	148
47	49	0,0191	0,0625	0,01604	150
42	49	0,0715	0,323	0,086	89
42	49	0,0715	0,323	0,086	89
45	49	0,0684	0,186	0,0444	138
48	49	0,0179	0,0505	0,01258	140
49	50	0,0267	0,0752	0,01874	140
49	51	0,0486	0,137	0,0342	140
51	52	0,0203	0,0588	0,01396	142
52	53	0,0405	0,1635	0,04058	166
53	54	0,0263	0,122	0,031	177
49	54	0,073	0,289	0,0738	99
49	54	0,0869	0,291	0,073	97
54	55	0,0169	0,0707	0,0202	169
54	56	0,00275	0,00955	0,00732	155
55	56	0,00488	0,0151	0,00374	146
56	57	0,0343	0,0966	0,0242	140
50	57	0,0474	0,134	0,0332	140
56	58	0,0343	0,0966	0,0242	140
51	58	0,0255	0,0719	0,01788	140

continua

Relação de ramos do sistema nesta case118 ieee (continuação)

54	59	0,0503	0,2293	0,0598	125
56	59	0,0825	0,251	0,0569	112
56	59	0,0803	0,239	0,0536	117
55	59	0,04739	0,2158	0,05646	133
59	60	0,0317	0,145	0,0376	176
59	61	0,0328	0,15	0,0388	176
60	61	0,00264	0,0135	0,01456	186
60	62	0,0123	0,0561	0,01468	176
61	62	0,00824	0,0376	0,0098	176
63	59	0	0,0386	0	760
63	64	0,00172	0,02	0,216	687
64	61	0	0,0268	0	1095
38	65	0,00901	0,0986	1,046	297
64	65	0,00269	0,0302	0,38	675
49	66	0,018	0,0919	0,0248	186
49	66	0,018	0,0919	0,0248	186
62	66	0,0482	0,218	0,0578	132
62	67	0,0258	0,117	0,031	176
65	66	0	0,037	0	793
66	67	0,0224	0,1015	0,02682	176
65	68	0,00138	0,016	0,638	686
47	69	0,0844	0,2778	0,07092	102
49	69	0,0985	0,324	0,0828	87
68	69	0	0,037	0	793
69	70	0,03	0,127	0,122	170
24	70	0,00221	0,4115	0,10198	72
70	71	0,00882	0,0355	0,00878	166
24	72	0,0488	0,196	0,0488	146
71	72	0,0446	0,18	0,04444	159
71	73	0,00866	0,0454	0,01178	188
70	74	0,0401	0,1323	0,03368	151
70	75	0,0428	0,141	0,036	151
69	75	0,0405	0,122	0,124	145
74	75	0,0123	0,0406	0,01034	151
76	77	0,0444	0,148	0,0368	152
69	77	0,0309	0,101	0,1038	150
75	77	0,0601	0,1999	0,04978	141
77	78	0,00376	0,0124	0,01264	151
78	79	0,00546	0,0244	0,00648	174
77	80	0,017	0,0485	0,0472	141
77	80	0,0294	0,105	0,0228	157
79	80	0,0156	0,0704	0,0187	175
68	81	0,00175	0,0202	0,808	684
81	80	0	0,037	0	793
77	82	0,0298	0,0853	0,08174	141
82	83	0,0112	0,03665	0,03796	150
83	84	0,0625	0,132	0,0258	122
83	85	0,043	0,148	0,0348	154
84	85	0,0302	0,0641	0,01234	122
85	86	0,035	0,123	0,0276	156
86	87	0,02828	0,2074	0,0445	141
85	88	0,02	0,102	0,0276	186
85	89	0,0239	0,173	0,047	168
88	89	0,0139	0,0712	0,01934	186
89	90	0,0518	0,188	0,0528	151
89	90	0,0238	0,0997	0,106	169
90	91	0,0254	0,0836	0,0214	151
89	92	0,0099	0,0505	0,0548	186
89	92	0,0393	0,1581	0,0414	166
91	92	0,0387	0,1272	0,03268	151
92	93	0,0258	0,0848	0,0218	151
92	94	0,0481	0,158	0,0406	151
93	94	0,0223	0,0732	0,01876	151
94	95	0,0132	0,0434	0,0111	151
80	96	0,0356	0,182	0,0494	159

continua

Relação de ramos do sistema nesta_case118_ieee (continuação)

82	96	0,0162	0,053	0,0544	150
94	96	0,0269	0,0869	0,023	149
80	97	0,0183	0,0934	0,0254	186
80	98	0,0238	0,108	0,0286	176
80	99	0,0454	0,206	0,0546	140
92	100	0,0648	0,295	0,0472	98
94	100	0,0178	0,058	0,0604	150
95	96	0,0171	0,0547	0,01474	149
96	97	0,0173	0,0885	0,024	186
98	100	0,0397	0,179	0,0476	160
99	100	0,018	0,0813	0,0216	175
100	101	0,0277	0,1262	0,0328	176
92	102	0,0123	0,0559	0,01464	176
101	102	0,0246	0,112	0,0294	176
100	103	0,016	0,0525	0,0536	151
100	104	0,0451	0,204	0,0541	141
103	104	0,0466	0,1584	0,0407	153
103	105	0,0535	0,1625	0,0408	145
100	106	0,0605	0,229	0,062	124
104	105	0,00994	0,0378	0,00986	161
105	106	0,014	0,0547	0,01434	164
105	107	0,053	0,183	0,0472	154
105	108	0,0261	0,0703	0,01844	137
106	107	0,053	0,183	0,0472	154
108	109	0,0105	0,0288	0,0076	138
103	110	0,03906	0,1813	0,0461	159
109	110	0,0278	0,0762	0,0202	138
110	111	0,022	0,0755	0,02	154
110	112	0,0247	0,064	0,062	135
17	113	0,00913	0,0301	0,00768	151
32	113	0,0615	0,203	0,0518	139
32	114	0,0135	0,0612	0,01628	176
27	115	0,0164	0,0741	0,01972	175
114	115	0,0023	0,0104	0,00276	175
68	116	0,00034	0,00405	0,164	7218
12	117	0,0329	0,14	0,0358	170
75	118	0,0145	0,0481	0,01198	151
76	118	0,0164	0,0544	0,01356	151

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 88 – Relação de barras do sistema nesta_case118_ieee__api

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	2	85,45	27	0	0	0,94	1,06
2	1	33,51	9	0	0	0,94	1,06
3	1	65,34	10	0	0	0,94	1,06
4	2	65,34	12	0	0	0,94	1,06
5	1	0	0	0	-40	0,94	1,06
6	2	87,12	22	0	0	0,94	1,06
7	1	31,83	2	0	0	0,94	1,06
8	2	28	0	0	0	0,94	1,06
9	1	0	0	0	0	0,94	1,06
10	2	0	0	0	0	0,94	1,06
11	1	117,28	23	0	0	0,94	1,06
12	2	78,75	10	0	0	0,94	1,06
13	1	56,96	16	0	0	0,94	1,06
14	1	23,46	1	0	0	0,94	1,06
15	2	150,79	30	0	0	0,94	1,06
16	1	41,89	10	0	0	0,94	1,06
17	1	18,43	3	0	0	0,94	1,06
18	2	100,53	34	0	0	0,94	1,06
19	2	75,39	25	0	0	0,94	1,06
20	1	30,16	3	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta case118 iece api (continuação)

21	1	23,46	8	0	0	0,94	1,06
22	1	16,75	5	0	0	0,94	1,06
23	1	11,73	3	0	0	0,94	1,06
24	2	13	0	0	0	0,94	1,06
25	2	0	0	0	0	0,94	1,06
26	2	0	0	0	0	0,94	1,06
27	2	118,96	13	0	0	0,94	1,06
28	1	28,48	7	0	0	0,94	1,06
29	1	40,21	4	0	0	0,94	1,06
30	1	0	0	0	0	0,94	1,06
31	2	72,04	27	0	0	0,94	1,06
32	2	98,85	23	0	0	0,94	1,06
33	1	38,54	9	0	0	0,94	1,06
34	2	98,85	26	0	14	0,94	1,06
35	1	55,29	9	0	0	0,94	1,06
36	2	51,94	17	0	0	0,94	1,06
37	1	0	0	0	-25	0,94	1,06
38	1	0	0	0	0	0,94	1,06
39	1	45,24	11	0	0	0,94	1,06
40	2	110,58	23	0	0	0,94	1,06
41	1	61,99	10	0	0	0,94	1,06
42	2	160,84	23	0	0	0,94	1,06
43	1	30,16	7	0	0	0,94	1,06
44	1	26,81	8	0	10	0,94	1,06
45	1	88,8	22	0	10	0,94	1,06
46	2	46,91	10	0	10	0,94	1,06
47	1	34	0	0	0	0,94	1,06
48	1	33,51	11	0	15	0,94	1,06
49	2	145,76	30	0	0	0,94	1,06
50	1	28,48	4	0	0	0,94	1,06
51	1	28,48	8	0	0	0,94	1,06
52	1	30,16	5	0	0	0,94	1,06
53	1	38,54	11	0	0	0,94	1,06
54	2	189,32	32	0	0	0,94	1,06
55	2	105,55	22	0	0	0,94	1,06
56	2	140,74	18	0	0	0,94	1,06
57	1	20,11	3	0	0	0,94	1,06
58	1	20,11	3	0	0	0,94	1,06
59	2	464,1	113	0	0	0,94	1,06
60	1	130,68	3	0	0	0,94	1,06
61	2	0	0	0	0	0,94	1,06
62	2	129,01	14	0	0	0,94	1,06
63	1	0	0	0	0	0,94	1,06
64	1	0	0	0	0	0,94	1,06
65	2	0	0	0	0	0,94	1,06
66	2	65,34	18	0	0	0,94	1,06
67	1	46,91	7	0	0	0,94	1,06
68	1	0	0	0	0	0,94	1,06
69	3	0	0	0	0	0,94	1,06
70	2	110,58	20	0	0	0,94	1,06
71	1	0	0	0	0	0,94	1,06
72	2	12	0	0	0	0,94	1,06
73	2	6	0	0	0	0,94	1,06
74	2	113,93	27	0	12	0,94	1,06
75	1	78,75	11	0	0	0,94	1,06
76	2	113,93	36	0	0	0,94	1,06
77	2	102,2	28	0	0	0,94	1,06
78	1	118,96	26	0	0	0,94	1,06
79	1	65,34	32	0	20	0,94	1,06
80	2	217,81	26	0	0	0,94	1,06
81	1	0	0	0	0	0,94	1,06
82	1	90,47	27	0	20	0,94	1,06
83	1	33,51	10	0	10	0,94	1,06
84	1	18,43	7	0	0	0,94	1,06
85	2	40,21	15	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta_case118_ieee_api (continuação)

86	1	35,18	10	0	0	0,94	1,06
87	2	0	0	0	0	0,94	1,06
88	1	80,42	10	0	0	0,94	1,06
89	2	0	0	0	0	0,94	1,06
90	2	273,1	42	0	0	0,94	1,06
91	2	10	0	0	0	0,94	1,06
92	2	108,9	10	0	0	0,94	1,06
93	1	20,11	7	0	0	0,94	1,06
94	1	50,26	16	0	0	0,94	1,06
95	1	70,37	31	0	0	0,94	1,06
96	1	63,67	15	0	0	0,94	1,06
97	1	25,13	9	0	0	0,94	1,06
98	1	56,96	8	0	0	0,94	1,06
99	2	42	0	0	0	0,94	1,06
100	2	61,99	18	0	0	0,94	1,06
101	1	36,86	15	0	0	0,94	1,06
102	1	8,38	3	0	0	0,94	1,06
103	2	38,54	16	0	0	0,94	1,06
104	2	63,67	25	0	0	0,94	1,06
105	2	51,94	26	0	20	0,94	1,06
106	1	72,04	16	0	0	0,94	1,06
107	2	83,77	12	0	6	0,94	1,06
108	1	3,35	1	0	0	0,94	1,06
109	1	13,4	3	0	0	0,94	1,06
110	2	65,34	30	0	6	0,94	1,06
111	2	0	0	0	0	0,94	1,06
112	2	113,93	13	0	0	0,94	1,06
113	2	6	0	0	0	0,94	1,06
114	1	13,4	3	0	0	0,94	1,06
115	1	36,86	7	0	0	0,94	1,06
116	2	184	0	0	0	0,94	1,06
117	1	33,51	8	0	0	0,94	1,06
118	1	55,29	15	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 89 – Barras de geração do sistema nesta_case118_ieee_api

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^g	c^l	c^c
1	0	0	-117,6	117,6	0	0	0
4	0	0	-300	300	0	0	0
6	0	0	-115,2	115,2	0	0	0
8	0	0	-300	300	0	0	0
10	0	1027	-514	514	0	0,85121	0
12	0	759	-380	380	0	1,6366	0
15	0	0	-100,8	100,8	0	0	0
18	0	0	-111,6	111,6	0	0	0
19	0	0	-97,2	97,2	0	0	0
24	0	0	-300	300	0	0	0
25	0	87	-153,6	134	0	1,2504	0
26	0	1316	-658	658	0	1,1088	0
27	0	0	-300	300	0	0	0
31	0	495	-248	248	0	7,6254	0
32	0	0	-103,2	103,2	0	0	0
34	0	0	-175,2	175,2	0	0	0
36	0	0	-74,4	74,4	0	0	0
40	0	0	-300	300	0	0	0
42	0	0	-300	300	0	0	0
46	0	543	-272	272	0	1,2509	0
49	0	381	-289,2	289,2	0	1,0991	0
54	0	494	-247	247	0	0,96976	0
55	0	0	-32,4	32,4	0	0	0
56	0	0	-24	24	0	0	0
59	0	734	-367	367	0	1,0763	0

continua

Barras de geração do sistema nesta case118_ieee_api (continuação)							
61	0	379	-190	190	0	0,99897	0
62	0	0	-20	20	0	0	0
65	0	1210	-605	605	0	0,73518	0
66	0	200	-100	200	0	7,3246	0
69	0	124	-300	300	0	1,2467	0
70	0	0	-316,8	316,8	0	0	0
72	0	0	-100	100	0	0	0
73	0	0	-100	100	0	0	0
74	0	0	-86,4	86,4	0	0	0
76	0	0	-40,8	40,8	0	0	0
77	0	0	-207,6	207,6	0	0	0
80	0	1022	-511	511	0	0,19799	0
85	0	0	-277,2	277,2	0	0	0
87	0	157	-79	79	0	6,783	0
89	0	902	-451	451	0	0,53112	0
90	0	0	-300	300	0	0	0
91	0	0	-100	100	0	0	0
92	0	0	-7,2	9	0	0	0
99	0	0	-100	100	0	0	0
100	0	584	-292	292	0	0,90622	0
103	0	460	-230	230	0	1,1517	0
104	0	0	-84	84	0	0	0
105	0	0	-62,4	62,4	0	0	0
107	0	0	-200	200	0	0	0
110	0	0	-84	84	0	0	0
111	0	182	-91	91	0	0,9588	0
112	0	0	-100	1000	0	0	0
113	0	0	-151,2	200	0	0	0
116	0	0	-1000	1000	0	0	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 90 – Relação de ramos do sistema nesta_case118_ieee_api

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0303	0,0999	0,0254	151
1	3	0,0129	0,0424	0,01082	151
4	5	0,00176	0,00798	0,0021	176
3	5	0,0241	0,108	0,0284	175
5	6	0,0119	0,054	0,01426	176
6	7	0,00459	0,0208	0,0055	176
8	9	0,00244	0,0305	1,162	711
8	5	0	0,0267	0	1099
9	10	0,00258	0,0322	1,23	710
4	11	0,0209	0,0688	0,01748	151
5	11	0,0203	0,0682	0,01738	152
11	12	0,00595	0,0196	0,00502	151
2	12	0,0187	0,0616	0,01572	151
3	12	0,0484	0,16	0,0406	151
7	12	0,00862	0,034	0,00874	164
11	13	0,02225	0,0731	0,01876	151
12	14	0,0215	0,0707	0,01816	151
13	15	0,0744	0,2444	0,06268	115
14	15	0,0595	0,195	0,0502	144
12	16	0,0212	0,0834	0,0214	164
15	17	0,0132	0,0437	0,0444	151
16	17	0,0454	0,1801	0,0466	158
17	18	0,0123	0,0505	0,01298	167
18	19	0,01119	0,0493	0,01142	173
19	20	0,0252	0,117	0,0298	178
15	19	0,012	0,0394	0,0101	151
20	21	0,0183	0,0849	0,0216	177
21	22	0,0209	0,097	0,0246	178
22	23	0,0342	0,159	0,0404	178

continua

Relação de ramos do sistema nesta case118 ieee api (continuação)					
23	24	0,0135	0,0492	0,0498	158
23	25	0,0156	0,08	0,0864	186
26	25	0	0,0382	0	768
25	27	0,0318	0,163	0,1764	177
27	28	0,01913	0,0855	0,0216	174
28	29	0,0237	0,0943	0,0238	165
30	17	0	0,0388	0	756
8	30	0,00431	0,0504	0,514	580
26	30	0,00799	0,086	0,908	340
17	31	0,0474	0,1563	0,0399	151
29	31	0,0108	0,0331	0,0083	146
23	32	0,0317	0,1153	0,1173	158
31	32	0,0298	0,0985	0,0251	151
27	32	0,0229	0,0755	0,01926	151
15	33	0,038	0,1244	0,03194	150
19	34	0,0752	0,247	0,0632	114
35	36	0,00224	0,0102	0,00268	176
35	37	0,011	0,0497	0,01318	175
33	37	0,0415	0,142	0,0366	154
34	36	0,00871	0,0268	0,00568	146
34	37	0,00256	0,0094	0,00984	159
38	37	0	0,0375	0	783
37	39	0,0321	0,106	0,027	151
37	40	0,0593	0,168	0,042	140
30	38	0,00464	0,054	0,422	542
39	40	0,0184	0,0605	0,01552	151
40	41	0,0145	0,0487	0,01222	152
40	42	0,0555	0,183	0,0466	151
41	42	0,041	0,135	0,0344	151
43	44	0,0608	0,2454	0,06068	117
34	43	0,0413	0,1681	0,04226	167
44	45	0,0224	0,0901	0,0224	166
45	46	0,04	0,1356	0,0332	153
46	47	0,038	0,127	0,0316	152
46	48	0,0601	0,189	0,0472	148
47	49	0,0191	0,0625	0,01604	150
42	49	0,0715	0,323	0,086	89
42	49	0,0715	0,323	0,086	89
45	49	0,0684	0,186	0,0444	138
48	49	0,0179	0,0505	0,01258	140
49	50	0,0267	0,0752	0,01874	140
49	51	0,0486	0,137	0,0342	140
51	52	0,0203	0,0588	0,01396	142
52	53	0,0405	0,1635	0,04058	166
53	54	0,0263	0,122	0,031	177
49	54	0,073	0,289	0,0738	99
49	54	0,0869	0,291	0,073	97
54	55	0,0169	0,0707	0,0202	169
54	56	0,00275	0,00955	0,00732	155
55	56	0,00488	0,0151	0,00374	146
56	57	0,0343	0,0966	0,0242	140
50	57	0,0474	0,134	0,0332	140
56	58	0,0343	0,0966	0,0242	140
51	58	0,0255	0,0719	0,01788	140
54	59	0,0503	0,2293	0,0598	125
56	59	0,0825	0,251	0,0569	112
56	59	0,0803	0,239	0,0536	117
55	59	0,04739	0,2158	0,05646	133
59	60	0,0317	0,145	0,0376	176
59	61	0,0328	0,15	0,0388	176
60	61	0,00264	0,0135	0,01456	186
60	62	0,0123	0,0561	0,01468	176
61	62	0,00824	0,0376	0,0098	176
63	59	0	0,0386	0	760
63	64	0,00172	0,02	0,216	687

continua

Relação de ramos do sistema nesta case118 ieee api (continuação)					
64	61	0	0,0268	0	1095
38	65	0,00901	0,0986	1,046	297
64	65	0,00269	0,0302	0,38	675
49	66	0,018	0,0919	0,0248	186
49	66	0,018	0,0919	0,0248	186
62	66	0,0482	0,218	0,0578	132
62	67	0,0258	0,117	0,031	176
65	66	0	0,037	0	793
66	67	0,0224	0,1015	0,02682	176
65	68	0,00138	0,016	0,638	686
47	69	0,0844	0,2778	0,07092	102
49	69	0,0985	0,324	0,0828	87
68	69	0	0,037	0	793
69	70	0,03	0,127	0,122	170
24	70	0,00221	0,4115	0,10198	72
70	71	0,00882	0,0355	0,00878	166
24	72	0,0488	0,196	0,0488	146
71	72	0,0446	0,18	0,04444	159
71	73	0,00866	0,0454	0,01178	188
70	74	0,0401	0,1323	0,03368	151
70	75	0,0428	0,141	0,036	151
69	75	0,0405	0,122	0,124	145
74	75	0,0123	0,0406	0,01034	151
76	77	0,0444	0,148	0,0368	152
69	77	0,0309	0,101	0,1038	150
75	77	0,0601	0,1999	0,04978	141
77	78	0,00376	0,0124	0,01264	151
78	79	0,00546	0,0244	0,00648	174
77	80	0,017	0,0485	0,0472	141
77	80	0,0294	0,105	0,0228	157
79	80	0,0156	0,0704	0,0187	175
68	81	0,00175	0,0202	0,808	684
81	80	0	0,037	0	793
77	82	0,0298	0,0853	0,08174	141
82	83	0,0112	0,03665	0,03796	150
83	84	0,0625	0,132	0,0258	122
83	85	0,043	0,148	0,0348	154
84	85	0,0302	0,0641	0,01234	122
85	86	0,035	0,123	0,0276	156
86	87	0,02828	0,2074	0,0445	141
85	88	0,02	0,102	0,0276	186
85	89	0,0239	0,173	0,047	168
88	89	0,0139	0,0712	0,01934	186
89	90	0,0518	0,188	0,0528	151
89	90	0,0238	0,0997	0,106	169
90	91	0,0254	0,0836	0,0214	151
89	92	0,0099	0,0505	0,0548	186
89	92	0,0393	0,1581	0,0414	166
91	92	0,0387	0,1272	0,03268	151
92	93	0,0258	0,0848	0,0218	151
92	94	0,0481	0,158	0,0406	151
93	94	0,0223	0,0732	0,01876	151
94	95	0,0132	0,0434	0,0111	151
80	96	0,0356	0,182	0,0494	159
82	96	0,0162	0,053	0,0544	150
94	96	0,0269	0,0869	0,023	149
80	97	0,0183	0,0934	0,0254	186
80	98	0,0238	0,108	0,0286	176
80	99	0,0454	0,206	0,0546	140
92	100	0,0648	0,295	0,0472	98
94	100	0,0178	0,058	0,0604	150
95	96	0,0171	0,0547	0,01474	149
96	97	0,0173	0,0885	0,024	186
98	100	0,0397	0,179	0,0476	160
99	100	0,018	0,0813	0,0216	175

continua

Relação de ramos do sistema nesta_case118_ieee_api (continuação)					
100	101	0,0277	0,1262	0,0328	176
92	102	0,0123	0,0559	0,01464	176
101	102	0,0246	0,112	0,0294	176
100	103	0,016	0,0525	0,0536	151
100	104	0,0451	0,204	0,0541	141
103	104	0,0466	0,1584	0,0407	153
103	105	0,0535	0,1625	0,0408	145
100	106	0,0605	0,229	0,062	124
104	105	0,00994	0,0378	0,00986	161
105	106	0,014	0,0547	0,01434	164
105	107	0,053	0,183	0,0472	154
105	108	0,0261	0,0703	0,01844	137
106	107	0,053	0,183	0,0472	154
108	109	0,0105	0,0288	0,0076	138
103	110	0,03906	0,1813	0,0461	159
109	110	0,0278	0,0762	0,0202	138
110	111	0,022	0,0755	0,02	154
110	112	0,0247	0,064	0,062	135
17	113	0,00913	0,0301	0,00768	151
32	113	0,0615	0,203	0,0518	139
32	114	0,0135	0,0612	0,01628	176
27	115	0,0164	0,0741	0,01972	175
114	115	0,0023	0,0104	0,00276	175
68	116	0,00034	0,00405	0,164	7218
12	117	0,0329	0,14	0,0358	170
75	118	0,0145	0,0481	0,01198	151
76	118	0,0164	0,0544	0,01356	151

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 91 – Relação de barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	1	0	0	0	-100	0,94	1,06
2	1	0	0	0	0	0,94	1,06
3	1	370	96,9	0	0	0,94	1,06
4	1	0	0	0	0	0,94	1,06
5	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
6	2	0	0	0	0	0,94	1,06
7	1	0	0	0	0	0,94	1,06
8	1	398	0	0	0	0,94	1,06
9	1	0	0	0	0	0,94	1,06
10	1	226	0	0	0	0,94	1,06
11	1	0	0	0	0	0,94	1,06
12	1	193	0	0	0	0,94	1,06
13	1	204	0	0	0	0,94	1,06
14	1	381	0	0	0	0,94	1,06
15	1	-80	0	0	0	0,94	1,06
16	1	-54,2	0	0	0	0,94	1,06
17	1	-116,5	0	0	0	0,94	1,06
18	1	34,4	11,67	0	0	0,94	1,06
19	1	64,4	0	0	0	0,94	1,06
20	1	37,9	12,5	0	0	0,94	1,06
21	1	-69,8	0	0	0	0,94	1,06
22	1	17,39	5,27	0	0	0,94	1,06
23	1	63,5	0	0	0	0,94	1,06
24	1	0	0	0	0	0,94	1,06
25	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
26	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
27	1	324	57,9	0	0	0,94	1,06
28	1	38,47	13,17	0	0	0,94	1,06
29	1	28,31	9,03	0	0	0,94	1,06
30	1	101,2	32,52	0	15	0,94	1,06
31	1	72,5	0	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta case162 ieee dtc (continuação)

32	1	52,7	15,06	0	20	0,94	1,06
33	1	45,17	15,06	0	20	0,94	1,06
34	1	14,18	5,25	0	3,2	0,94	1,06
35	1	54,48	14,63	0	5	0,94	1,06
36	1	31,96	8,68	0	3	0,94	1,06
37	1	0	0	0	0	0,94	1,06
38	1	14,76	4,08	0	1,5	0,94	1,06
39	1	0	0	0	0	0,94	1,06
40	1	52,88	17,6	0	0	0,94	1,06
41	1	39,2	12,8	0	0	0,94	1,06
42	1	0	0	0	0	0,94	1,06
43	1	41,5	0	0	0	0,94	1,06
44	1	16,32	3,71	0	0	0,94	1,06
45	1	20,02	5,41	0	1,9	0,94	1,06
46	1	65,31	22,3	0	26,2	0,94	1,06
47	1	4,82	1,56	0	0	0,94	1,06
48	1	33,76	22,86	0	0	0,94	1,06
49	1	6,82	1,78	0	0	0,94	1,06
50	1	99,7	0	0	0	0,94	1,06
51	1	0	0	0	0	0,94	1,06
52	1	218,2	42,8	0	0	0,94	1,06
53	1	0	0	0	0	0,94	1,06
54	1	70,34	29,57	0	0	0,94	1,06
55	1	0	0	0	0	0,94	1,06
56	1	25,29	7,26	0	3,2	0,94	1,06
57	1	48,48	15,61	0	0	0,94	1,06
58	1	0	0	0	0	0,94	1,06
59	1	84,43	27,05	0	0	0,94	1,06
60	1	244	0	0	0	0,94	1,06
61	1	0	0	0	0	0,94	1,06
62	1	-865,6	0	0	0	0,94	1,06
63	1	59,1	0	0	0	0,94	1,06
64	1	0	0	0	0	0,94	1,06
65	1	-26,3	0	0	0	0,94	1,06
66	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
67	1	22,54	7,03	0	6	0,94	1,06
68	1	40,42	12,68	0	12	0,94	1,06
69	1	0	0	0	0	0,94	1,06
70	1	0	0	0	0	0,94	1,06
71	1	29,87	11,93	0	12	0,94	1,06
72	1	427	0	0	0	0,94	1,06
73	2	0	0	0	0	0,94	1,06
74	1	0	0	0	0	0,94	1,06
75	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
76	2	0	0	0	0	0,94	1,06
77	1	26,41	8,78	0	4,7	0,94	1,06
78	1	79,12	0	0	0	0,94	1,06
79	1	0	0	0	0	0,94	1,06
80	1	15,76	5,25	0	2,8	0,94	1,06
81	1	50,88	16,8	0	22,1	0,94	1,06
82	1	62,28	20,26	0	10,4	0,94	1,06
83	1	0	0	0	0	0,94	1,06
84	1	37,9	9,49	0	2,6	0,94	1,06
85	1	40,52	11,26	0	12	0,94	1,06
86	1	50,73	13,35	0	12	0,94	1,06
87	1	16,91	4,23	0	0	0,94	1,06
88	1	60,6	4,44	0	0	0,94	1,06
89	1	0	0	0	0	0,94	1,06
90	1	50,21	16,76	0	10	0,94	1,06
91	1	51,24	12,83	0	0	0,94	1,06
92	1	36,12	9,05	0	0	0,94	1,06
93	1	103,8	34,56	0	0	0,94	1,06
94	1	164	6,49	0	0	0,94	1,06
95	1	117,2	39,01	0	0	0,94	1,06
96	1	119,2	0	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta case162 ieee dtc (continuação)

97	1	22,84	5,71	0	0	0,94	1,06
98	1	151,1	50,35	0	0	0,94	1,06
99	2	0	0	0	0	0,94	1,06
100	1	23,21	6,9	0	3	0,94	1,06
101	2	0	0	0	0	0,94	1,06
102	1	16,54	4,08	0	0	0,94	1,06
103	1	322	0	0	0	0,94	1,06
104	1	31,52	10,46	0	5,6	0,94	1,06
105	1	24,84	6,23	0	1,7	0,94	1,06
106	1	0	0	0	0	0,94	1,06
107	1	35,41	5,41	0	0	0,94	1,06
108	3	0	0	0	0	0,94	1,06
109	1	0	0	0	0	0,94	1,06
110	1	0	0	0	0	0,94	1,06
111	1	65,41	16,72	0	0	0,94	1,06
112	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
113	1	32,7	0	0	0	0,94	1,06
114	2	0	0	0	0	0,94	1,06
115	1	17,32	3,34	0	0	0,94	1,06
116	1	56,08	11,2	0	0	0,94	1,06
117	1	101,9	20,06	0	0	0,94	1,06
118	2	0	0	0	0	0,94	1,06
119	1	0	0	0	0	0,94	1,06
120	1	0	0	0	0	0,94	1,06
121	2	0	0	0	0	0,94	1,06
122	1	47,28	9,36	0	0	0,94	1,06
123	1	165	0	0	0	0,94	1,06
124	1	-571	90,9	0	0	0,94	1,06
125	2	2000	0	0	0	0,94	1,06
126	1	-467	0	0	0	0,94	1,06
127	1	-52,6	0	0	0	0,94	1,06
128	1	0	0	0	0	0,94	1,06
129	1	0	0	0	0	0,94	1,06
130	2	0	0	0	0	0,94	1,06
131	2	0	0	0	0	0,94	1,06
132	1	159	0	0	0	0,94	1,06
133	1	30,1	6,02	0	0	0,94	1,06
134	1	17,46	3,34	0	0	0,94	1,06
135	1	20,06	4,01	0	0	0,94	1,06
136	1	20,06	4,01	0	0	0,94	1,06
137	1	20,06	4,01	0	0	0,94	1,06
138	1	0	0	0	0	0,94	1,06
139	1	10,1	2,01	0	0	0,94	1,06
140	1	13,58	2,68	0	0	0,94	1,06
141	1	0	0	0	0	0,94	1,06
142	1	27,09	5,35	0	0	0,94	1,06
143	1	21,07	4,01	0	0	0,94	1,06
144	1	12,37	2,01	0	0	0,94	1,06
145	1	10,83	2,21	0	0	0,94	1,06
146	1	21,33	4,01	0	0	0,94	1,06
147	1	216,4	42,8	0	0	0,94	1,06
148	1	120	24	0	0	0,94	1,06
149	1	0	0	0	0	0,94	1,06
150	1	4,8	1,6	0	0	0,94	1,06
151	1	24	8	0	0	0,94	1,06
152	1	6	0	0	0	0,94	1,06
153	1	4	1,6	0	0	0,94	1,06
154	1	28	9,6	0	6	0,94	1,06
155	1	12	4	0	0	0,94	1,06
156	1	8	2,4	0	0	0,94	1,06
157	1	32	10,4	0	0	0,94	1,06
158	1	16	5,6	0	3	0,94	1,06
159	1	8	2,4	0	0	0,94	1,06
160	1	14,4	4,8	0	3	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc (continuação)

161	1	32	10,4	0	0	0,94	1,06
162	1	20	6,4	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 92 – Barras de geração do sistema nesta_case162_ieee_dtc

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
6	0	1217	-200	400	0	0,20767	0
73	0	566	-72	267	0	1,1243	0
76	0	1282	-170	605	0	0,24517	0
99	0	186	-60,6	75,6	0	0,45608	0
101	0	180	-24,4	38,6	0	1,1278	0
108	0	1151	-576	576	0	0,74388	0
114	0	148	-25	33	0	0,65631	0
118	0	189	-44	95	0	1,1066	0
121	0	1005	-120	250	0	0,74641	0
125	0	2590	-1099	1295	0	0,56968	0
130	0	591	-144	288	0	0,91419	0
131	0	580	-265	290	0	0,88179	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 93 – Relação de ramos do sistema nesta_case162_ieee_dtc

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0035	0,0321	0,5438	613
1	3	0,0034	0,0326	0,7224	895
1	4	0,0064	0,0621	0,987	470
1	5	0,0011	0,0119	0,2012	663
1	6	0	0,0133	0	900
2	7	0,0014	0,0125	0,2122	605
2	13	0,0046	0,0417	0,7058	610
3	14	0,2361	1,0122	0	29
3	50	0,0389	0,1699	0	169
3	103	0,1074	1,8023	0	17
3	123	0,2883	1,6719	0	18
3	124	0,014	0,6483	0	46
3	125	0,0084	0,1139	0	257
4	112	0,0059	0,0568	0,925	514
4	115	0	0,0185	0	500
4	119	0,0014	0,0119	0,205	591
5	120	0,0022	0,0224	0,3792	644
5	129	0,0022	0,0268	0,4612	702
5	131	0	0,0127	0	710
7	8	0,0004	0,0189	0	672
7	9	0,0017	0,0169	0,2872	637
8	10	0,4591	1,0703	0	26
8	12	0,0106	0,0574	0	159
8	13	0,1274	0,4784	0	60
8	14	0,0473	0,3956	0	74
8	15	0,5035	1,7433	0	17
8	132	0,0252	0,288	0	102
9	75	0,0013	0,015	0,2682	684
10	11	0,0051	0,037	0,0716	366
10	13	0,1299	0,622	0	47
10	15	0,1275	0,7033	0	42
10	60	0,2525	1,2242	0	24
11	15	0,0285	0,1793	0,3484	162
11	46	0,0142	0,1225	0,1876	238
11	58	0,017	0,107	0,2074	271
11	59	0,0071	0,0471	0,0852	350
12	2	0,0008	0,0377	0	336

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieee dtc (continuação)

12	13	0,1038	0,3137	0	89
12	14	0,1598	0,6415	0	45
12	132	0,4486	1,5773	0	18
13	15	0,044	0,3227	0	91
13	62	0,0098	0,1221	0	240
14	72	0,0107	0,0828	0	264
14	113	0,0063	0,0382	0	235
14	132	0,0057	0,0374	0	244
15	58	0,0115	0,0732	0,142	344
15	60	0,3907	1,6753	0	18
15	62	0,0084	0,0588	0	359
15	63	0,1704	1,4555	0	21
16	17	0,6017	1,4373	0	19
16	18	0,0297	0,107	0,0546	184
16	27	0,1574	0,8871	0	33
16	126	0,1053	0,5132	0	56
16	127	0,0958	0,5276	0	55
17	18	0,0213	0,1013	0,0642	209
17	19	0,2314	0,7678	0	37
17	21	0,0471	0,2665	0	109
17	127	0,0287	0,2637	0	111
18	30	0,0207	0,1088	0,052	220
18	32	0,0234	0,122	0,0582	219
18	37	0	0,0456	0	225
19	21	0,3867	1,9005	0	16
19	38	0,0239	0,125	0,0596	219
19	43	0,0603	0,2572	0	112
19	127	0,1074	0,6809	0	43
20	53	0	0,114	0	75
20	157	0,0113	0,0279	0,0004	44
21	22	0,0312	0,1629	0,0778	177
21	127	0,0105	0,6414	0	46
22	38	0,014	0,054	0,025	190
22	39	0	0,0493	0	225
22	40	0,0188	0,0717	0,0328	189
22	41	0,0172	0,085	0,0404	213
23	24	0,0174	0,0511	0,023	167
23	60	0,066	0,3093	0	93
24	25	0	0,034	0	225
24	28	0,0249	0,0725	0,0202	166
24	45	0,0137	0,0725	0,034	220
25	26	0,0059	0,0583	0,9302	501
25	27	0,0044	0,041	0,8384	618
26	74	0,0063	0,0607	0,93	481
26	75	0,003	0,0322	0,5038	661
26	76	0	0,0082	0	1250
27	31	0,0101	0,1273	0	230
27	62	0,0173	0,581	0	51
27	65	0,0105	0,2764	0	107
27	125	0,035	1,6845	0	18
27	126	0,0022	0,0225	0	646
27	127	0,1506	1,4355	0	21
28	29	0,024	0,0965	0,0444	193
29	30	0,038	0,15	0,0696	177
29	31	0,0206	0,0833	0,0384	194
30	32	0,0249	0,1005	0,0458	194
32	33	0,0114	0,0448	0,0208	191
33	34	0,028	0,114	0,052	180
33	35	0,0216	0,107	0,051	214
33	36	0,0102	0,0536	0,0254	220
34	40	0,0397	0,1517	0,069	188
34	77	0,0235	0,0896	0,0408	189
35	40	0,0271	0,1341	0,0638	179
36	67	0,0176	0,0924	0,044	220
37	39	0,0039	0,0379	0,67	630

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieee dtc (continuação)

37	126	0,004	0,0381	0,67	624
37	127	0,004	0,0403	0,6832	641
39	42	0,002	0,0186	0,32	617
40	81	0,03	0,345	0,0038	81
40	82	0,004	0,019	0,0108	209
41	81	0,037	0,372	0,0058	79
41	83	0,0052	0,0256	0,0124	213
41	84	0,0057	0,058	0,0292	301
42	109	0,0019	0,0196	0,333	648
43	44	0,0188	0,0751	0,0348	193
43	103	0,0324	0,1702	0	170
43	124	0,0293	0,1766	0	164
43	125	0,1449	0,6509	0	44
44	102	0,013	0,05	0,0236	180
44	103	0,0127	0,051	0,0244	180
45	54	0,0108	0,057	0,0272	220
46	47	0,031	0,1378	0,0622	177
47	48	0,0251	0,1114	0,0502	177
47	49	0,003	0,012	0,0054	193
48	50	0,0336	0,166	0,078	174
48	51	0,042	0,13	0,057	171
48	52	0,054	0,168	0,074	167
49	87	0,014	0,068	0,0266	423
50	51	0,03	0,09	0,041	168
50	123	0,4071	1,8543	0	16
50	125	0,1337	0,6031	0	48
51	141	0,0323	0,1	0,0442	171
52	79	0,0623	0,2126	0,094	133
52	106	0,0231	0,0717	0,0314	171
52	116	0,006	0,0487	0,0256	270
52	117	0,0117	0,0493	0,023	198
52	118	0	0,052	0	200
53	11	0,0005	0,02	0	375
53	54	0,0275	0,1961	0,0956	149
53	55	0,0005	0,0026	0,0022	219
54	56	0,0174	0,091	0,043	219
54	57	0,025	0,1237	0,0588	213
55	57	0,0462	0,1763	0,0802	161
55	149	0,0153	0,0671	0,0312	202
55	162	0,004	0,0189	0,0098	209
56	67	0,017	0,0894	0,0424	220
57	80	0,0272	0,1037	0,0472	180
58	61	0,0133	0,1018	0,1842	276
59	61	0,0106	0,0706	0,121	351
60	61	0,0027	0,0653	-0,0022	100
60	61	0,002	0,0393	0	200
60	62	0,3674	0,964	0	29
60	65	0,1041	0,4144	0	69
60	126	0,5367	1,8295	0	16
61	62	0,0296	0,2275	0,3996	128
61	63	0,0043	0,0422	0,0764	345
62	63	0,0158	0,1702	0	172
62	65	0,004	0,074	0	396
62	126	0,0044	0,2969	0	99
63	65	0,2409	1,96	0	15
64	65	0,005	0,0571	0,9098	512
64	66	0,0033	0,0381	0,6066	684
65	126	0,0031	0,1536	0	191
66	11	0	0,0118	0	500
67	68	0,0193	0,1013	0,0482	220
68	69	0,0068	0,0353	0,0168	218
69	77	0,0098	0,0374	0,017	189
69	78	0,0114	0,0434	0,0196	180
69	79	0,0052	0,0433	0,022	273
70	73	0	0,0197	0	495

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieee dtc (continuação)

70	149	0,0002	0,0018	0,001	284
70	149	0,0002	0,0018	0,001	284
71	85	0,0304	0,1506	0,0716	191
71	150	0,0196	0,097	0,0462	213
72	113	0,0022	0,013	0	232
72	132	0,0028	0,0168	0	234
72	152	0,0385	0,18	0	160
74	119	0,0031	0,031	0,4822	639
75	128	0,0008	0,0087	0,166	665
75	130	0,0004	0,0242	0	578
78	79	0,0051	0,0336	0,0182	245
78	80	0,0244	0,093	0,0422	180
79	74	0	0,018	0	500
82	83	0,0053	0,0249	0,013	208
84	93	0,0125	0,0826	0,0414	245
85	86	0,0211	0,1046	0,0498	214
86	87	0,028	0,112	0,0538	255
86	88	0,044	0,228	0,109	127
88	96	0,074	0,25	0,0142	48
88	106	0,0079	0,0468	0,0232	173
89	86	0	0,057	0	90
89	90	0,069	0,134	0,014	69
90	96	0,1837	0,359	0,037	73
91	92	0,0156	0,0819	0,0376	220
91	93	0,0143	0,0895	0,045	239
91	94	0,0145	0,0957	0,048	245
92	102	0,015	0,061	0,0292	194
93	42	0	0,026	0	400
93	108	0	0,0154	0	600
94	103	0,0227	0,1333	0,066	217
94	107	0,0613	0,1891	0,0836	148
94	109	0	0,035	0	300
95	91	0,0054	0,0458	-0,0036	250
95	96	0,087	0,212	0,086	109
95	97	0,1289	0,2809	0,0334	58
95	98	0,0071	0,043	0,0224	168
95	99	0	0,0685	0	150
96	100	0,069	0,161	0,0186	69
96	101	0	0,1031	0	96
97	44	0,0051	0,1007	-0,0025	84
98	93	0,0006	0,0214	-0,0341	504
98	105	0,1485	0,293	0,031	69
100	104	0,062	0,145	0,0166	69
103	123	0,182	0,751	0	38
103	124	0,0002	0,0167	0	1757
103	125	0,0279	0,1972	0	148
104	34	0,008	0,0637	-0,0033	106
105	38	0	0,116	0	45
106	107	0,0196	0,0611	0,0268	171
107	122	0,013	0,0621	0,0296	210
109	119	0,006	0,0577	0,929	506
109	124	0,002	0,0222	0,3782	671
109	125	0,007	0,062	1	471
110	111	0,023	0,099	0,046	180
110	112	0	0,0185	0	500
110	114	0	0,0768	0	150
110	134	0,0032	0,0256	0,0134	268
110	141	0,021	0,0649	0,0288	171
111	115	0,0527	0,2215	0,103	129
112	120	0,0005	0,0044	0,072	601
112	121	0	0,019	0	720
113	132	0,0459	0,2911	0	100
113	134	0,0008	0,0072	0,0038	284
115	117	0,0019	0,0154	0,033	270
116	117	0,0048	0,0391	0,0214	271

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162_ieee_dtc (continuação)					
116	119	0	0,009	0	1000
116	147	0,0035	0,0286	0,0156	271
117	147	0,0022	0,0175	0,01	268
120	14	0,0003	0,0188	0	500
120	128	0,0004	0,0051	0,1	717
120	129	0,0003	0,0038	0,0652	715
122	123	0,0175	0,0835	0,0398	210
123	125	0,0423	0,2441	0	119
124	125	0,0113	0,1585	0	185
124	126	0,0577	0,8256	0	36
125	126	0,0201	0,5915	0	50
126	127	0,0877	0,7049	0	42
128	72	0,0004	0,018	0	500
129	132	0,0004	0,0198	0	500
133	134	0	0,041	0	160
133	135	0,0109	0,0259	0,0004	44
133	136	0,039	0,099	0,0016	39
133	137	0,0134	0,0504	0,001	60
135	138	0,0466	0,1182	0,002	39
136	139	0,026	0,065	0,001	39
137	140	0,0041	0,0156	0,0004	60
138	110	0	0,041	0	160
138	139	0,026	0,065	0,001	39
138	140	0,0251	0,0941	0,0018	60
138	145	0,0923	0,2338	0,0038	39
142	51	0	0,1728	0	83
142	143	0,1582	0,3919	0,0068	44
142	146	0,1618	0,3861	0,007	44
143	144	0,0927	0,2322	0,002	44
144	141	0	0,082	0	80
144	145	0,089	0,221	0,0032	39
144	146	0,068	0,2906	0,0058	60
148	116	0	0,041	0	160
149	26	0	0,0386	0	300
149	26	0	0,0386	0	300
149	150	0,001	0,0085	0,002	276
149	151	0,0039	0,0262	0,0138	247
149	152	0,0253	0,1168	0,0544	207
151	161	0,0021	0,0138	0,0074	244
153	70	0	0,0916	0	93
153	70	0	0,0916	0	93
153	154	0,071	0,2841	0,0054	50
153	155	0,043	0,1856	0,0038	66
154	156	0,0155	0,0379	0,0008	50
154	160	0,0102	0,0429	0,001	50
155	156	0,0176	0,0822	0,0014	66
156	157	0,053	0,1273	0,0022	33
157	55	0	0,0827	0	150
157	158	0,0489	0,1404	0,0028	50
158	159	0,0339	0,0664	0,0012	50
159	160	0,019	0,0811	0,012	50
161	162	0,0022	0,0103	0,0054	208

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 94 – Relação de barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api

Barra	Tipo de Barra	P^d (MW)	Q^d (MVar)	G^{sh} (MW)	B^{sh} (MVar)	V (p.u.)	$\bar{V}$ (p.u.)
1	1	0	0	0	-100	0,94	1,06
2	1	0	0	0	0	0,94	1,06
3	1	406,38	96,9	0	0	0,94	1,06
4	1	0	0	0	0	0,94	1,06
5	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
6	2	0	0	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta case162 ieee dtc api (continuação)							
7	1	0	0	0	0	0,94	1,06
8	1	398	0	0	0	0,94	1,06
9	1	0	0	0	0	0,94	1,06
10	1	226	0	0	0	0,94	1,06
11	1	0	0	0	0	0,94	1,06
12	1	193	0	0	0	0,94	1,06
13	1	204	0	0	0	0,94	1,06
14	1	381	0	0	0	0,94	1,06
15	1	-80	0	0	0	0,94	1,06
16	1	-54,2	0	0	0	0,94	1,06
17	1	-116,5	0	0	0	0,94	1,06
18	1	37,78	11,67	0	0	0,94	1,06
19	1	64,4	0	0	0	0,94	1,06
20	1	41,63	12,5	0	0	0,94	1,06
21	1	-69,8	0	0	0	0,94	1,06
22	1	19,1	5,27	0	0	0,94	1,06
23	1	63,5	0	0	0	0,94	1,06
24	1	0	0	0	0	0,94	1,06
25	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
26	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
27	1	355,86	57,9	0	0	0,94	1,06
28	1	42,25	13,17	0	0	0,94	1,06
29	1	31,09	9,03	0	0	0,94	1,06
30	1	111,15	32,52	0	15	0,94	1,06
31	1	72,5	0	0	0	0,94	1,06
32	1	57,88	15,06	0	20	0,94	1,06
33	1	49,61	15,06	0	20	0,94	1,06
34	1	15,57	5,25	0	3,2	0,94	1,06
35	1	59,84	14,63	0	5	0,94	1,06
36	1	35,1	8,68	0	3	0,94	1,06
37	1	0	0	0	0	0,94	1,06
38	1	16,21	4,08	0	1,5	0,94	1,06
39	1	0	0	0	0	0,94	1,06
40	1	58,08	17,6	0	0	0,94	1,06
41	1	43,05	12,8	0	0	0,94	1,06
42	1	0	0	0	0	0,94	1,06
43	1	41,5	0	0	0	0,94	1,06
44	1	17,92	3,71	0	0	0,94	1,06
45	1	21,99	5,41	0	1,9	0,94	1,06
46	1	71,73	22,3	0	26,2	0,94	1,06
47	1	5,29	1,56	0	0	0,94	1,06
48	1	37,08	22,86	0	0	0,94	1,06
49	1	7,49	1,78	0	0	0,94	1,06
50	1	99,7	0	0	0	0,94	1,06
51	1	0	0	0	0	0,94	1,06
52	1	239,65	42,8	0	0	0,94	1,06
53	1	0	0	0	0	0,94	1,06
54	1	77,26	29,57	0	0	0,94	1,06
55	1	0	0	0	0	0,94	1,06
56	1	27,78	7,26	0	3,2	0,94	1,06
57	1	53,25	15,61	0	0	0,94	1,06
58	1	0	0	0	0	0,94	1,06
59	1	92,73	27,05	0	0	0,94	1,06
60	1	244	0	0	0	0,94	1,06
61	1	0	0	0	0	0,94	1,06
62	1	-865,6	0	0	0	0,94	1,06
63	1	59,1	0	0	0	0,94	1,06
64	1	0	0	0	0	0,94	1,06
65	1	-26,3	0	0	0	0,94	1,06
66	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
67	1	24,76	7,03	0	6	0,94	1,06
68	1	44,39	12,68	0	12	0,94	1,06
69	1	0	0	0	0	0,94	1,06
70	1	0	0	0	0	0,94	1,06
71	1	32,81	11,93	0	12	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta case162 ieee dtc api (continuação)							
72	1	427	0	0	0	0,94	1,06
73	2	0	0	0	0	0,94	1,06
74	1	0	0	0	0	0,94	1,06
75	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
76	2	0	0	0	0	0,94	1,06
77	1	29,01	8,78	0	4,7	0,94	1,06
78	1	79,12	0	0	0	0,94	1,06
79	1	0	0	0	0	0,94	1,06
80	1	17,31	5,25	0	2,8	0,94	1,06
81	1	55,88	16,8	0	22,1	0,94	1,06
82	1	68,4	20,26	0	10,4	0,94	1,06
83	1	0	0	0	0	0,94	1,06
84	1	41,63	9,49	0	2,6	0,94	1,06
85	1	44,5	11,26	0	12	0,94	1,06
86	1	55,72	13,35	0	12	0,94	1,06
87	1	18,57	4,23	0	0	0,94	1,06
88	1	66,56	4,44	0	0	0,94	1,06
89	1	0	0	0	0	0,94	1,06
90	1	55,15	16,76	0	10	0,94	1,06
91	1	56,28	12,83	0	0	0,94	1,06
92	1	39,67	9,05	0	0	0,94	1,06
93	1	114,01	34,56	0	0	0,94	1,06
94	1	180,12	6,49	0	0	0,94	1,06
95	1	128,72	39,01	0	0	0,94	1,06
96	1	119,2	0	0	0	0,94	1,06
97	1	25,09	5,71	0	0	0,94	1,06
98	1	165,96	50,35	0	0	0,94	1,06
99	2	0	0	0	0	0,94	1,06
100	1	25,49	6,9	0	3	0,94	1,06
101	2	0	0	0	0	0,94	1,06
102	1	18,17	4,08	0	0	0,94	1,06
103	1	322	0	0	0	0,94	1,06
104	1	34,62	10,46	0	5,6	0,94	1,06
105	1	27,28	6,23	0	1,7	0,94	1,06
106	1	0	0	0	0	0,94	1,06
107	1	38,89	5,41	0	0	0,94	1,06
108	3	0	0	0	0	0,94	1,06
109	1	0	0	0	0	0,94	1,06
110	1	0	0	0	0	0,94	1,06
111	1	71,84	16,72	0	0	0,94	1,06
112	1	0	0	0	-50	0,94	1,06
113	1	32,7	0	0	0	0,94	1,06
114	2	0	0	0	0	0,94	1,06
115	1	19,02	3,34	0	0	0,94	1,06
116	1	61,59	11,2	0	0	0,94	1,06
117	1	111,92	20,06	0	0	0,94	1,06
118	2	0	0	0	0	0,94	1,06
119	1	0	0	0	0	0,94	1,06
120	1	0	0	0	0	0,94	1,06
121	2	0	0	0	0	0,94	1,06
122	1	51,93	9,36	0	0	0,94	1,06
123	1	165	0	0	0	0,94	1,06
124	1	-571	90,9	0	0	0,94	1,06
125	2	2000	0	0	0	0,94	1,06
126	1	-467	0	0	0	0,94	1,06
127	1	-52,6	0	0	0	0,94	1,06
128	1	0	0	0	0	0,94	1,06
129	1	0	0	0	0	0,94	1,06
130	2	0	0	0	0	0,94	1,06
131	2	0	0	0	0	0,94	1,06
132	1	159	0	0	0	0,94	1,06
133	1	33,06	6,02	0	0	0,94	1,06
134	1	19,18	3,34	0	0	0,94	1,06
135	1	22,03	4,01	0	0	0,94	1,06
136	1	22,03	4,01	0	0	0,94	1,06

continua

Relação de barras do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api (continuação)							
137	1	22,03	4,01	0	0	0,94	1,06
138	1	0	0	0	0	0,94	1,06
139	1	11,09	2,01	0	0	0,94	1,06
140	1	14,92	2,68	0	0	0,94	1,06
141	1	0	0	0	0	0,94	1,06
142	1	29,75	5,35	0	0	0,94	1,06
143	1	23,14	4,01	0	0	0,94	1,06
144	1	13,59	2,01	0	0	0,94	1,06
145	1	11,89	2,21	0	0	0,94	1,06
146	1	23,43	4,01	0	0	0,94	1,06
147	1	237,68	42,8	0	0	0,94	1,06
148	1	131,8	24	0	0	0,94	1,06
149	1	0	0	0	0	0,94	1,06
150	1	5,27	1,6	0	0	0,94	1,06
151	1	26,36	8	0	0	0,94	1,06
152	1	6	0	0	0	0,94	1,06
153	1	4,39	1,6	0	0	0,94	1,06
154	1	30,75	9,6	0	6	0,94	1,06
155	1	13,18	4	0	0	0,94	1,06
156	1	8,79	2,4	0	0	0,94	1,06
157	1	35,15	10,4	0	0	0,94	1,06
158	1	17,57	5,6	0	3	0,94	1,06
159	1	8,79	2,4	0	0	0,94	1,06
160	1	15,82	4,8	0	3	0,94	1,06
161	1	35,15	10,4	0	0	0,94	1,06
162	1	21,97	6,4	0	0	0,94	1,06

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 95 – Barras de geração do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api

Barra	P^g (MW)	$\bar{P}^g$ (MW)	Q^g (MVar)	$\bar{Q}^g$ (MVar)	c^q	c^l	c^c
6	0	1203	-602	602	0	0,20136	0
73	0	468	-234	267	0	1,2879	0
76	0	1274	-637	637	0	0,89038	0
99	0	229	-115	115	0	0,92889	0
101	0	167	-84	84	0	0,82349	0
108	0	1842	-921	921	0	1,2817	0
114	0	199	-100	100	0	1,0605	0
118	0	175	-117,6	117,6	0	1,353	0
121	0	1660	-830	830	0	0,71222	0
125	0	2276	-1138	1295	0	0,59028	0
130	0	645	-323	323	0	1,1099	0
131	0	779	-390	390	0	0,77644	0

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).

Tabela 96 – Relação de ramos do sistema nesta_case162_ieee_dtc_api

Barra de Origem	Barra de Destino	r (p.u.)	x (p.u.)	$2B^{sh}$ (p.u.)	$\bar{S}$ MVA
1	2	0,0035	0,0321	0,5438	613
1	3	0,0034	0,0326	0,7224	895
1	4	0,0064	0,0621	0,987	470
1	5	0,0011	0,0119	0,2012	663
1	6	0	0,0133	0	900
2	7	0,0014	0,0125	0,2122	605
2	13	0,0046	0,0417	0,7058	610
3	14	0,2361	1,0122	0	29
3	50	0,0389	0,1699	0	169
3	103	0,1074	1,8023	0	17
3	123	0,2883	1,6719	0	18
3	124	0,014	0,6483	0	46
3	125	0,0084	0,1139	0	257

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieec dtc api (continuação)					
4	112	0,0059	0,0568	0,925	514
4	115	0	0,0185	0	500
4	119	0,0014	0,0119	0,205	591
5	120	0,0022	0,0224	0,3792	644
5	129	0,0022	0,0268	0,4612	702
5	131	0	0,0127	0	710
7	8	0,0004	0,0189	0	672
7	9	0,0017	0,0169	0,2872	637
8	10	0,4591	1,0703	0	26
8	12	0,0106	0,0574	0	159
8	13	0,1274	0,4784	0	60
8	14	0,0473	0,3956	0	74
8	15	0,5035	1,7433	0	17
8	132	0,0252	0,288	0	102
9	75	0,0013	0,015	0,2682	684
10	11	0,0051	0,037	0,0716	366
10	13	0,1299	0,622	0	47
10	15	0,1275	0,7033	0	42
10	60	0,2525	1,2242	0	24
11	15	0,0285	0,1793	0,3484	162
11	46	0,0142	0,1225	0,1876	238
11	58	0,017	0,107	0,2074	271
11	59	0,0071	0,0471	0,0852	350
12	2	0,0008	0,0377	0	336
12	13	0,1038	0,3137	0	89
12	14	0,1598	0,6415	0	45
12	132	0,4486	1,5773	0	18
13	15	0,044	0,3227	0	91
13	62	0,0098	0,1221	0	240
14	72	0,0107	0,0828	0	264
14	113	0,0063	0,0382	0	235
14	132	0,0057	0,0374	0	244
15	58	0,0115	0,0732	0,142	344
15	60	0,3907	1,6753	0	18
15	62	0,0084	0,0588	0	359
15	63	0,1704	1,4555	0	21
16	17	0,6017	1,4373	0	19
16	18	0,0297	0,107	0,0546	184
16	27	0,1574	0,8871	0	33
16	126	0,1053	0,5132	0	56
16	127	0,0958	0,5276	0	55
17	18	0,0213	0,1013	0,0642	209
17	19	0,2314	0,7678	0	37
17	21	0,0471	0,2665	0	109
17	127	0,0287	0,2637	0	111
18	30	0,0207	0,1088	0,052	220
18	32	0,0234	0,122	0,0582	219
18	37	0	0,0456	0	225
19	21	0,3867	1,9005	0	16
19	38	0,0239	0,125	0,0596	219
19	43	0,0603	0,2572	0	112
19	127	0,1074	0,6809	0	43
20	53	0	0,114	0	75
20	157	0,0113	0,0279	0,0004	44
21	22	0,0312	0,1629	0,0778	177
21	127	0,0105	0,6414	0	46
22	38	0,014	0,054	0,025	190
22	39	0	0,0493	0	225
22	40	0,0188	0,0717	0,0328	189
22	41	0,0172	0,085	0,0404	213
23	24	0,0174	0,0511	0,023	167
23	60	0,066	0,3093	0	93
24	25	0	0,034	0	225
24	28	0,0249	0,0725	0,0202	166
24	45	0,0137	0,0725	0,034	220

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieee dtc api (continuação)					
25	26	0,0059	0,0583	0,9302	501
25	27	0,0044	0,041	0,8384	618
26	74	0,0063	0,0607	0,93	481
26	75	0,003	0,0322	0,5038	661
26	76	0	0,0082	0	1250
27	31	0,0101	0,1273	0	230
27	62	0,0173	0,581	0	51
27	65	0,0105	0,2764	0	107
27	125	0,035	1,6845	0	18
27	126	0,0022	0,0225	0	646
27	127	0,1506	1,4355	0	21
28	29	0,024	0,0965	0,0444	193
29	30	0,038	0,15	0,0696	177
29	31	0,0206	0,0833	0,0384	194
30	32	0,0249	0,1005	0,0458	194
32	33	0,0114	0,0448	0,0208	191
33	34	0,028	0,114	0,052	180
33	35	0,0216	0,107	0,051	214
33	36	0,0102	0,0536	0,0254	220
34	40	0,0397	0,1517	0,069	188
34	77	0,0235	0,0896	0,0408	189
35	40	0,0271	0,1341	0,0638	179
36	67	0,0176	0,0924	0,044	220
37	39	0,0039	0,0379	0,67	630
37	126	0,004	0,0381	0,67	624
37	127	0,004	0,0403	0,6832	641
39	42	0,002	0,0186	0,32	617
40	81	0,03	0,345	0,0038	81
40	82	0,004	0,019	0,0108	209
41	81	0,037	0,372	0,0058	79
41	83	0,0052	0,0256	0,0124	213
41	84	0,0057	0,058	0,0292	301
42	109	0,0019	0,0196	0,333	648
43	44	0,0188	0,0751	0,0348	193
43	103	0,0324	0,1702	0	170
43	124	0,0293	0,1766	0	164
43	125	0,1449	0,6509	0	44
44	102	0,013	0,05	0,0236	180
44	103	0,0127	0,051	0,0244	180
45	54	0,0108	0,057	0,0272	220
46	47	0,031	0,1378	0,0622	177
47	48	0,0251	0,1114	0,0502	177
47	49	0,003	0,012	0,0054	193
48	50	0,0336	0,166	0,078	174
48	51	0,042	0,13	0,057	171
48	52	0,054	0,168	0,074	167
49	87	0,014	0,068	0,0266	423
50	51	0,03	0,09	0,041	168
50	123	0,4071	1,8543	0	16
50	125	0,1337	0,6031	0	48
51	141	0,0323	0,1	0,0442	171
52	79	0,0623	0,2126	0,094	133
52	106	0,0231	0,0717	0,0314	171
52	116	0,006	0,0487	0,0256	270
52	117	0,0117	0,0493	0,023	198
52	118	0	0,052	0	200
53	11	0,0005	0,02	0	375
53	54	0,0275	0,1961	0,0956	149
53	55	0,0005	0,0026	0,0022	219
54	56	0,0174	0,091	0,043	219
54	57	0,025	0,1237	0,0588	213
55	57	0,0462	0,1763	0,0802	161
55	149	0,0153	0,0671	0,0312	202
55	162	0,004	0,0189	0,0098	209
56	67	0,017	0,0894	0,0424	220

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieee dtc api (continuação)					
57	80	0,0272	0,1037	0,0472	180
58	61	0,0133	0,1018	0,1842	276
59	61	0,0106	0,0706	0,121	351
60	61	0,0027	0,0653	-0,0022	100
60	61	0,002	0,0393	0	200
60	62	0,3674	0,964	0	29
60	65	0,1041	0,4144	0	69
60	126	0,5367	1,8295	0	16
61	62	0,0296	0,2275	0,3996	128
61	63	0,0043	0,0422	0,0764	345
62	63	0,0158	0,1702	0	172
62	65	0,004	0,074	0	396
62	126	0,0044	0,2969	0	99
63	65	0,2409	1,96	0	15
64	65	0,005	0,0571	0,9098	512
64	66	0,0033	0,0381	0,6066	684
65	126	0,0031	0,1536	0	191
66	11	0	0,0118	0	500
67	68	0,0193	0,1013	0,0482	220
68	69	0,0068	0,0353	0,0168	218
69	77	0,0098	0,0374	0,017	189
69	78	0,0114	0,0434	0,0196	180
69	79	0,0052	0,0433	0,022	273
70	73	0	0,0197	0	495
70	149	0,0002	0,0018	0,001	284
70	149	0,0002	0,0018	0,001	284
71	85	0,0304	0,1506	0,0716	191
71	150	0,0196	0,097	0,0462	213
72	113	0,0022	0,013	0	232
72	132	0,0028	0,0168	0	234
72	152	0,0385	0,18	0	160
74	119	0,0031	0,031	0,4822	639
75	128	0,0008	0,0087	0,166	665
75	130	0,0004	0,0242	0	578
78	79	0,0051	0,0336	0,0182	245
78	80	0,0244	0,093	0,0422	180
79	74	0	0,018	0	500
82	83	0,0053	0,0249	0,013	208
84	93	0,0125	0,0826	0,0414	245
85	86	0,0211	0,1046	0,0498	214
86	87	0,028	0,112	0,0538	255
86	88	0,044	0,228	0,109	127
88	96	0,074	0,25	0,0142	48
88	106	0,0079	0,0468	0,0232	173
89	86	0	0,057	0	90
89	90	0,069	0,134	0,014	69
90	96	0,1837	0,359	0,037	73
91	92	0,0156	0,0819	0,0376	220
91	93	0,0143	0,0895	0,045	239
91	94	0,0145	0,0957	0,048	245
92	102	0,015	0,061	0,0292	194
93	42	0	0,026	0	400
93	108	0	0,0154	0	600
94	103	0,0227	0,1333	0,066	217
94	107	0,0613	0,1891	0,0836	148
94	109	0	0,035	0	300
95	91	0,0054	0,0458	-0,0036	250
95	96	0,087	0,212	0,086	109
95	97	0,1289	0,2809	0,0334	58
95	98	0,0071	0,043	0,0224	168
95	99	0	0,0685	0	150
96	100	0,069	0,161	0,0186	69
96	101	0	0,1031	0	96
97	44	0,0051	0,1007	-0,0025	84
98	93	0,0006	0,0214	-0,0341	504

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieee dtc api (continuação)					
98	105	0,1485	0,293	0,031	69
100	104	0,062	0,145	0,0166	69
103	123	0,182	0,751	0	38
103	124	0,0002	0,0167	0	1757
103	125	0,0279	0,1972	0	148
104	34	0,008	0,0637	-0,0033	106
105	38	0	0,116	0	45
106	107	0,0196	0,0611	0,0268	171
107	122	0,013	0,0621	0,0296	210
109	119	0,006	0,0577	0,929	506
109	124	0,002	0,0222	0,3782	671
109	125	0,007	0,062	1	471
110	111	0,023	0,099	0,046	180
110	112	0	0,0185	0	500
110	114	0	0,0768	0	150
110	134	0,0032	0,0256	0,0134	268
110	141	0,021	0,0649	0,0288	171
111	115	0,0527	0,2215	0,103	129
112	120	0,0005	0,0044	0,072	601
112	121	0	0,019	0	720
113	132	0,0459	0,2911	0	100
113	134	0,0008	0,0072	0,0038	284
115	117	0,0019	0,0154	0,033	270
116	117	0,0048	0,0391	0,0214	271
116	119	0	0,009	0	1000
116	147	0,0035	0,0286	0,0156	271
117	147	0,0022	0,0175	0,01	268
120	14	0,0003	0,0188	0	500
120	128	0,0004	0,0051	0,1	717
120	129	0,0003	0,0038	0,0652	715
122	123	0,0175	0,0835	0,0398	210
123	125	0,0423	0,2441	0	119
124	125	0,0113	0,1585	0	185
124	126	0,0577	0,8256	0	36
125	126	0,0201	0,5915	0	50
126	127	0,0877	0,7049	0	42
128	72	0,0004	0,018	0	500
129	132	0,0004	0,0198	0	500
133	134	0	0,041	0	160
133	135	0,0109	0,0259	0,0004	44
133	136	0,039	0,099	0,0016	39
133	137	0,0134	0,0504	0,001	60
135	138	0,0466	0,1182	0,002	39
136	139	0,026	0,065	0,001	39
137	140	0,0041	0,0156	0,0004	60
138	110	0	0,041	0	160
138	139	0,026	0,065	0,001	39
138	140	0,0251	0,0941	0,0018	60
138	145	0,0923	0,2338	0,0038	39
142	51	0	0,1728	0	83
142	143	0,1582	0,3919	0,0068	44
142	146	0,1618	0,3861	0,007	44
143	144	0,0927	0,2322	0,002	44
144	141	0	0,082	0	80
144	145	0,089	0,221	0,0032	39
144	146	0,068	0,2906	0,0058	60
148	116	0	0,041	0	160
149	26	0	0,0386	0	300
149	26	0	0,0386	0	300
149	150	0,001	0,0085	0,002	276
149	151	0,0039	0,0262	0,0138	247
149	152	0,0253	0,1168	0,0544	207
151	161	0,0021	0,0138	0,0074	244
153	70	0	0,0916	0	93
153	70	0	0,0916	0	93

continua

Relação de ramos do sistema nesta case162 ieee dtc api (continuação)					
153	154	0,071	0,2841	0,0054	50
153	155	0,043	0,1856	0,0038	66
154	156	0,0155	0,0379	0,0008	50
154	160	0,0102	0,0429	0,001	50
155	156	0,0176	0,0822	0,0014	66
156	157	0,053	0,1273	0,0022	33
157	55	0	0,0827	0	150
157	158	0,0489	0,1404	0,0028	50
158	159	0,0339	0,0664	0,0012	50
159	160	0,019	0,0811	0,012	50
161	162	0,0022	0,0103	0,0054	208

Fonte: Coffrin, Gordon e Scott (2016).