

Juan Camilo López Amézquita

**ALOCÇÃO ÓTIMA DE CHAVES DE INTERCONEXÃO
NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Ilha Solteira-SP
2014



Juan Camilo López Amézquita

**ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CHAVES DE INTERCONEXÃO
NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Especialidade: Automação.

Marcos Julio Rider Flores
Orientador

Ilha Solteira–SP
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- L864a López Amézquita, Juan Camilo.
Alocação ótima de chaves de interconexão nas redes de distribuição de energia elétrica / Juan Camilo López Amézquita. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
160 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistema Elétricos De Potência, 2014
- Orientador: Marcos Julio Rider
Inclui bibliografia
1. Sistemas de distribuição de energia elétrica. 2. Otimização matemática. 3. Chaves de Interconexão.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Alocação Ótima de Chaves de Interconexão nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica.

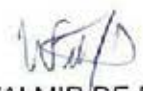
AUTOR: JUAN CAMILO LOPEZ AMEZQUITA

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES

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


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


Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. WALMIR DE FREITAS FILHO
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data de realização: 20 de fevereiro de 2015.

*Este trabalho é dedicado aos meus pais e minha irmã,
pela alegria insondável que eles me dão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Maria del Socorro Amézquita e Mario Hernán López pelo apoio, amor incondicional e educação de qualidade que ainda hoje me oferecem, e a minha irmã Manuela López Amézquita pelos belos momentos que tivemos e vamos ter: Levo vocês em cada pulsação.

Ao professor Dr. Marcos Julio Rider pela excelente orientação ao longo do mestrado, sem o qual não teria alcançado oportunamente os objetivos da pesquisa. Agradeço também as sugestões e conselhos dos professores Dra. Marina Lavorato e Dr. John Fredy Franco, essências para o desenvolvimento deste trabalho e os artigos derivados dele.

Aos professores da "Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales". A minha família e amigos em Colômbia, especialmente a Miguel Leandro Ocampo, Leonardo Grand, Sergio Torres, Andrés Díaz e tantos outros. Agradecimento especial ao Eng. Fernando Yepes, profissional exemplar, que me fez amar a engenharia elétrica como ninguém.

Aos colegas do LAPSEE, e os novos amigos brasileiros, colombianos e estrangeiros, que fizeram minha vida mais fácil neste lugar do mundo.

Agradeço a UNESP, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da FEIS, pela infraestrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho. A CAPES pelo apoio financeiro durante o mestrado.

Sinceramente,
Juan Camilo López,
2014

“Reality leaves a lot to the imagination”.
John Lennon

RESUMO

O problema da alocação ótima das chaves de interconexões nos sistemas de distribuição de média tensão é um problema do planejamento da operação dos sistemas de energia elétrica, de natureza combinatória e sujeito a restrições técnicas e operacionais que derivam em modelos complexos, não-lineares, não determinísticos e, em muitos casos, não analíticos e difíceis de representar matematicamente. Portanto, a melhor opção para obter soluções de boa qualidade em tempo razoável são as técnicas heurísticas modernas. Este trabalho apresenta uma metodologia baseada na formulação de modelos matemáticos convexos e resolvida utilizando o algoritmo de busca inteligente GRASP, para gerar soluções de boa qualidade ao problema da alocação ótima das chaves de interconexões. As chaves alocadas pela metodologia fornecem um esquema de restauração eficiente que, em caso de uma falta permanente, possa isolar a zona afetada pela falta e restaurar o serviço elétrico da maior quantidade possível de usuários. Por outro lado, as chaves instaladas pela metodologia proposta, também são aproveitadas para otimizar o ponto de operação em estado estacionário do sistema e os índices de confiabilidade experimentados pelos usuários, ou seja, reduzir as perdas de potência ativa e melhorar probabilisticamente os índices de continuidade da duração e da frequência das interrupções (SAIDI e SAIFI) quando o sistema opera em condições normais. Para demonstrar a eficácia e flexibilidade do algoritmo proposto dois sistemas testes, de 43 e 136 nós, serão utilizados para resolver diferentes instâncias do problema da alocação.

Palavras-chaves: Chaves de interconexão. Confiabilidade. GRASP. Programação matemática. Sistemas de distribuição de energia elétrica.

ABSTRACT

The optimal switch allocation problem in electrical distribution systems is a combinatorial optimization problem, subject to a set of technical and operational constraints that produces complex, nonlinear, nondeterministic and, in many cases, non-analytical and difficult to represent optimization models. Therefore, the best approach to provide high quality solutions, in reasonable time, is the use of modern heuristics algorithms. This work presents an optimization methodology based on the formulation of convex mathematical models and solved by using a simplified GRASP algorithm, in order to provide high quality solutions to the switch allocation problem. The allocated switches establish an efficient restoration scheme that, in case of a permanent fault, isolates the faulty zone and restores the electrical service of as many users as possible. On the other hand, the switches allocated by the proposed methodology, are also used to optimize the steady-state operating point of the system and the reliability indices experienced by the users, i.e., the active power losses are reduced and the reliability indices, SAIDI and SAIFI, are improved when the system is operating flawlessly. In order to show the efficiency and flexibility of the proposed switch allocation methodology, two test systems have been proposed and different allocation instances have been solved.

Key-words: Electrical distribution systems. GRASP. Interconnection switches. Mathematical optimization. Reliability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Análise dos SDMT radiais.	44
Figura 2 – Sistema teste radial de 43 nós.	47
Figura 3 – Sistema que exemplifica a operação das chaves de interconexão nos SDMT.	54
Figura 4 – Sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga.	60
Figura 5 – Configuração inicial com mínimas perdas do sistema didático de 43 nós.	61
Figura 6 – Resultado da restauração da rede de 43 nós após a falta na zona 6.	63
Figura 7 – Resultado da restauração da rede de 43 nós após a falta na zona 8, sem corte de carga.	64
Figura 8 – Resultado da restauração da rede de 43 nós após a falta na zona 8, com corte de carga.	66
Figura 9 – Configuração inicial do sistema real de distribuição. Zonas de carga e chaves de interconexão.	68
Figura 10 – Resultado da restauração do sistema real da Fig. 9 após a falta na zona 1, sem corte de carga.	69
Figura 11 – Resultado da restauração do sistema real da Fig. 9 após a falta na zona 9 com corte de carga.	71
Figura 12 – Porcentagens de corte de carga ajustadas para a reconfiguração do sistema real da Fig. 9 após a falta na zona 9.	73
Figura 13 – Sistema radial de distribuição: Avaliação da confiabilidade.	79
Figura 14 – Sistema radial de distribuição com equipamentos de proteção alocados ao longo do alimentador: Avaliação da Confiabilidade.	80
Figura 15 – Processo de setorização dos SDMT.	83
Figura 16 – Sistema didático de 16 nós e dois fusíveis alocados.	84
Figura 17 – Hipóteses 3. Influência da topologia do sistema na avaliação da confiabilidade. (a) O caminho mínimo do nó 10 está formado pelas zonas 1 e 4. (b) O caminho mínimo do nó 10 está formado pelas zonas 4, 3 e 1.	86
Figura 18 – Sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga: Construção da PSS.	91
Figura 19 – SSP do sistema de 43 nós da Fig. 18.	92
Figura 20 – Sistema teste de 136 nós e 16 zonas de carga: Construção da PSS.	93
Figura 21 – SSP do sistema de 136 nós da Fig. 20.	94
Figura 22 – Sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga: Modelo Robusto da RSDC.	104
Figura 23 – Configuração do sistema didático de 43 nós obtida pelo modelo de reconfiguração com critérios de confiabilidade das equações não robustas (66)-(84).	105
Figura 24 – Curva de soluções robustas do sistema didático de 43 nós da Fig. 22.	107
Figura 25 – Curva de soluções robustas do sistema didático de 43 acrescentando os valores das taxas de falta por ano em +10%.	109
Figura 26 – Curva de soluções robustas do sistema 136 nós da Fig. 20.	111

Figura 27 – Configuração robusta proposta para o SDMT de 136 nós.	111
Figura 28 – Fluxograma da metodologia para o problema da AOCS D.	115
Figura 29 – Sistema teste de 136: Aplicação do algoritmo de geração de zonas de carga.	123
Figura 30 – Resultado da aplicação do algoritmo de geração de zonas de carga do sistema da Fig. 29.	124
Figura 31 – Sistema teste de 43 nós e 6 caminhos possíveis de interconexão.	125
Figura 32 – Sistema teste de 136 nós e 15 caminhos possíveis de interconexão.	126
Figura 33 – Alocação das 5 chaves de interconexão para o sistema de 43 nós da Fig. 31 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS D.	127
Figura 34 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 33.	127
Figura 35 – Alocação das 10 chaves de interconexão para o sistema de 43 nós da Fig. 31 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS D.	129
Figura 36 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 35.	129
Figura 37 – Alocação das 5 chaves de interconexão para o sistema de 136 nós da Fig. 32 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS D.	131
Figura 38 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 37.	131
Figura 39 – Alocação das 10 chaves de interconexão para o sistema de 136 nós da Fig. 32 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS D.	133
Figura 40 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 39.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Magnitudes e ângulos das tensões do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com <i>KNITRO</i> .	48
Tabela 2 –	Magnitudes das correntes do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com <i>KNITRO</i> .	48
Tabela 3 –	Fluxos de potência ativa e reativa nas fontes do sistema da Fig. 2 obtidas com <i>KNITRO</i> .	49
Tabela 4 –	Magnitudes das tensões nos nós do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com <i>CPLEX</i> e os erros relativos.	51
Tabela 5 –	Magnitudes das correntes do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com <i>CPLEX</i> e os erros relativos.	52
Tabela 6 –	Fluxos de potência ativa e reativa nas fontes do sistema da Fig. 2 obtidas com <i>CPLEX</i> .	52
Tabela 7 –	Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós da Fig. 5.	61
Tabela 8 –	Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração da rede de 43 nós da Fig. 6.	62
Tabela 9 –	Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós após a restauração da Fig. 6.	63
Tabela 10 –	Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração da rede de 43 nós da Fig. 7.	64
Tabela 11 –	Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós após a restauração da Fig. 7.	65
Tabela 12 –	Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração da rede de 43 nós da Fig. 8.	65
Tabela 13 –	Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós após a restauração da Fig. 8.	67
Tabela 14 –	Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores da configuração inicial do sistema real da Fig. 9.	67
Tabela 15 –	Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração do sistema real da Fig. 10.	67
Tabela 16 –	Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores do sistema real após a restauração da Fig. 10.	70
Tabela 17 –	Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração do sistema real da Fig. 11.	70
Tabela 18 –	Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores do sistema real após a restauração da Fig. 11.	72
Tabela 19 –	Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores do sistema real após o ajuste do ponto de operação da restauração da Fig. 12.	74

Tabela 20 – Parâmetros de confiabilidade do sistema da Fig. 13.	79
Tabela 21 – Número de usuários e carga média dos nós da Fig. 13.	80
Tabela 22 – Parâmetros de confiabilidade do sistema da Fig. 16.	84
Tabela 23 – Taxas médias de faltas (λ_z) e os tempos de restauração (r_z) de cada zona do sistema da Fig. 16.	85
Tabela 24 – Parâmetro λ_{fused_k} de cada nó do sistema da Fig. 16.	85
Tabela 25 – λ_z e r_z calculados para cada zona do sistema da Fig. 18.	92
Tabela 26 – Topologias da SSP da Fig. 19.	92
Tabela 27 – λ_z e r_z calculados para cada zona do sistema da Fig. 20.	93
Tabela 28 – Topologias da SSP da Fig. 21.	94
Tabela 29 – Parâmetros das taxas de falta por ano (λ_z) e reparação (r_z) das zonas do sistema da Fig. 22.	106
Tabela 30 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 24.	108
Tabela 31 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 25.	108
Tabela 32 – Parâmetros das taxas de falta por ano (λ_z) e reparação (r_z) das zonas do sistema da Fig. 20.	110
Tabela 33 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 26.	110
Tabela 34 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 34.	128
Tabela 35 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 36.	130
Tabela 36 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 38.	132
Tabela 37 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 40.	134
Tabela 38 – Parâmetros elétricos da rede do sistema da Fig. 2 na página 47.	146
Tabela 39 – Dados das barras do sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga na página 60.	147
Tabela 40 – Dados dos ramos do sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga na página 60.	148
Tabela 41 – Dados elétricos e de confiabilidade do sistema teste de 43 nós da Fig. 18 na página 91 e da Fig. 22 na página 104.	149
Tabela 42 – Dados elétricos e de confiabilidade do sistema teste de 136 nós da Fig. 20 na página 93.	150
Tabela 43 – Dados das barras do sistema teste de 43 nós da Fig. 31 na página 125.	153
Tabela 44 – Dados dos caminhos de interconexão do sistema teste de 43 nós da Fig. 31 na página 125.	154
Tabela 45 – Dados das barras do sistema teste de 136 nós da Fig. 32 na página 126.	155

Tabela 46 – Dados dos caminhos de interconexão do sistema teste de 136 nós da Fig. 32
na página 126.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Automação da Distribuição
AHC	Algoritmo Heurístico Construtivo
AOCSD	Alocação Ótima de Chaves de Interconexão nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
ED	Empresas de Distribuição de Energia Elétrica
ENS	Energia Não Suprida
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
PCSO	Programação Cônica de Segunda Ordem
PCSOIM	Programação Cônica de Segunda Ordem Inteira-Mista
PLIM	Programação Linear Inteira-Mista
PNL	Programação Não Linear
PNLIM	Programação Não Linear Inteira-Mista
ReSD	Restauração Ótima dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
RSD	Reconfiguração Ótima dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
RSDC	Reconfiguração Ótima dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica considerando a Confiabilidade
SAIDI	Índice Médio da Duração das Interrupções no Sistema
SAIFI	Índice Médio da Frequência das Interrupções no Sistema
SDEE	Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica
SDH	Busca Através da Vizinhança
SDMT	Sistemas de Distribuição de Média Tensão
SSP	Superfície de Soluções de Pareto

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω_b	Conjunto de nós.
Ω_l	Conjunto de ramos.
Ω_{ch}	Conjunto de chaves.
Ω_z	Conjunto de zonas.
Ω_z^s	Conjunto de zonas-fonte.
Ω_b^s	Conjunto de nós-fonte.
Ω_{ij}^*	Conjunto de caminhos candidatos para alocação das chaves.
c^{lss}	Custo das perdas de potência ativa. [\$/kW].
c_i^{ls}	Custo do corte de carga no nó $i \in \Omega_b$. [\$/kW].
c^{ch}	Custo da mudança de estado das chaves. [\$].
f_{perdas}	Factor de perdas do sistema.
$SAIDI_{\text{máximo}}$	Valor máximo permitido pelas agências reguladores do índice SAIDI nas redes de distribuição. [horas/usuário/ano].
$SAIFI_{\text{máximo}}$	Valor máximo permitido pelas agências reguladores do índice SAIFI nas redes de distribuição. [faltas/usuário/ano].
$\bar{V}$	Magnitude de tensão máxima. [kV].
$\underline{V}$	Magnitude de tensão mínima. [kV].
r_{sw}	Tempo médio de restauração automática em caso de falta. [horas].
P_i^D	Demanda de potência ativa no nó $i \in \Omega_b$. [kW].
Q_i^D	Demanda de potência reativa no nó $i \in \Omega_b$. [kVAr].
N_i	Número de usuários conectados ao nó $i \in \Omega_b$. [usuários].
$\bar{S}_i$	Limite de geração de potência aparente no nó $i \in \Omega_b$. [kVA].
$\bar{r}_i$	Limite de corte de carga permitido no nó $i \in \Omega_b$. [p.u.].
$\hat{z}_i$	Zona do nó $i \in \Omega_b$.
R_{ij}	Resistência do ramo $ij \in \Omega_l$. [mΩ].

X_{ij}	Reatância do ramo $ij \in \Omega_l$. [m Ω].
Z_{ij}	Impedância do ramo $ij \in \Omega_l$, onde $Z_{ij} = \sqrt{R_{ij}^2 + X_{ij}^2}$. [m Ω].
$\bar{I}_{ij}$	Limite de corrente através do ramo $ij \in \Omega_l$. [A].
λ_{ij}	Taxa média de faltas ao longo do ano no ramo $ij \in \Omega_l$. [faltas/ano].
r_{ij}	Tempo nominal de restauração do ramo $ij \in \Omega_l$. [horas].
$l_{\text{fused}_{ij}}$	Parâmetro binário que indica se o ramo $ij \in \Omega_l$ está protegido por um fusível na lateral ($l_{\text{fused}_{ij}} = 1$), ou não ($l_{\text{fused}_{ij}} = 0$).
s_{ij}^{ini}	Estado inicial de operação da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$.
$\hat{z}_{ij}$	Zona do ramo $ij \in \Omega_l$.
$\bar{I}_{ij}^{\text{ch}}$	Limite de corrente através da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$. [A].
f_z^S	Fluxo artificial unitário gerado na zona $z \in \Omega_z$.
$f_{z,k}^D$	Fluxo artificial unitário demandado na zona $z \in \Omega_z$, para cada nó $k \in \Omega_b$.
λ_z	Taxa média de faltas ao longo do ano na zona $z \in \Omega_z$. [faltas/ano].
r_z	Tempo médio de restauração nominal da zona $z \in \Omega_z$. [horas].
λ_{fused_k}	Taxa média de faltas no ano no nó $k \in \Omega_b$ caso esteja protegido por um fusível nas laterais. [faltas/ano].
P_i^S	Potência ativa gerada no nó $i \in \Omega_b$. [kW].
Q_i^S	Potência reativa gerada no nó $i \in \Omega_b$. [kVAr].
V_i	Magnitude de tensão no nó $i \in \Omega_b$. [kV].
V_i^{sqr}	Quadrado de V_i . [kV ²].
I_{ij}	Magnitude de corrente através do ramo $ij \in \Omega_l$. [A].
I_{ij}^{sqr}	Quadrado de I_{ij} . [A ²].
P_{ij}	Fluxo de potência ativa através do ramo $ij \in \Omega_l$. [kW].
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa através do ramo $ij \in \Omega_l$. [kVAr].
I_{ij}^{ch}	Magnitude da corrente através da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$. [A].
$I_{ij}^{\text{ch,sqr}}$	Quadrado de I_{ij}^{ch} . [A ²].
P_{ij}^{ch}	Fluxo de potência ativa através da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$. [kW].

Q_{ij}^{ch}	Fluxo de potência reativa através da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$. [kVAR].
r_i	Corte de carga no nó $i \in \Omega_b$. [p.u.].
$SAIDI_{\text{médio}}$	Índice médio da duração das interrupções ao longo do ano no sistema. [horas/usuário/ano].
$SAIFI_{\text{médio}}$	Índice médio da frequência das interrupções ao longo do ano no sistema. [faltas/usuário/ano].
ENS	Energia não Suprida no sistema. [kW·h].
$f_{ij,k}$	Fluxo artificial através da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$, calculado para cada nó $k \in \Omega_b$.
y_{ij}	Estado de operação da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$, onde $y_{ij} = 1$ se a chave ij está fechada, caso contrário, $y_{ij} = 0$.
x_z	Estado de energização da zona $z \in \Omega_z$, onde $x_z = 1$ se a zona z fica energizada após a restauração da rede, caso contrário, $x_z = 0$.
$z_{\text{act}z,k}$	Variável binária que identifica se a zona $z \in \Omega_z$ faz parte do caminho mínimo através das zonas entre o nó $k \in \Omega_b$ e sua fonte, onde $z_{\text{act}z,k} = 1$ se a zona z faz parte do caminho mínimo de k , caso contrário, $z_{\text{act}z,k} = 0$.
$\omega_{z,k}$	Variável binária que identifica se a zona $z \in \Omega_z$ se encontra no mesmo alimentador do nó $k \in \Omega_b$, onde $\omega_{z,k} = 1$ se a zona z pertence ao mesmo alimentador de k , caso contrário, $\omega_{z,k} = 0$.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	MOTIVAÇÕES DO TRABALHO	32
1.1.1	MINIMIZAR OS CUSTOS DE OPERAÇÃO E INVESTIMENTO NÃO PLANEJADO NOS SDMT	32
1.1.2	ATENDER ÀS EXIGÊNCIAS DE CONFIABILIDADE E QUALIDADE DA POTÊNCIA NOS SDMT	34
1.1.3	APRIMORAR OS INCENTIVOS E REDUZIR AS PENALIDADES IMPOSTAS PELAS AGÊNCIAS REGULADORAS	35
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
1.2.1	RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT CONSIDERANDO OS INDICES DE CONFIABILIDADE	36
1.2.2	RESTAURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT	38
1.2.3	ALOCÇÃO ÓTIMA DE CHAVES DE INTERCONEXÃO NOS SDMT	39
1.3	OBJETIVO GERAL	41
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO	42
2	MODELAGEM MATEMÁTICA DOS SDMT: O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO ÓTIMA	43
2.1	EQUAÇÕES DO PONTO DE OPERAÇÃO DOS SDEE RADIAIS	44
2.2	MODELO NÃO-LINEAR DO PONTO DE OPERAÇÃO DOS SDMT	45
2.2.1	APLICAÇÃO DO MODELO DO PONTO DE OPERAÇÃO UTILIZANDO O SOLVER DE PNL <i>KNITRO</i> : SISTEMA TESTE DE 43 NÓS.	47
2.3	MODELO DE PROGRAMAÇÃO CÔNICA DE SEGUNDA ORDEM DO PONTO DE OPERAÇÃO DOS SDMT EM ESTADO ESTACIONÁRIO	49
2.3.1	APLICAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO DO PONTO DE OPERAÇÃO UTILIZANDO O SOLVER DE PCSO <i>CPLEX</i> : SISTEMA TESTE DE 43 NÓS	51
2.4	MODELO DE PCSO APLICADO AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT	52
2.5	MODELO DE PCSOIM DO PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT	56
2.6	EXEMPLO DIDÁTICO DA UTILIZAÇÃO DO MODELO DE PCSOIM PARA A ReSD	59
2.6.1	CONFIGURAÇÃO INICIAL DA REDE	60
2.6.2	RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DIDÁTICO DE 43 NÓS DA FIG. 5. CASO 1: FALTA NA ZONA 6	62
2.6.3	RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DIDÁTICO DE 43 NÓS DA FIG. 5. CASO 2: FALTA NA ZONA 8 SEM CORTE DE CARGA	63

2.6.4	RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DIDÁTICO DE 43 NÓS DA FIG. 5. CASO 3: FALTA NA ZONA 8 COM CORTE DE CARGA CONTROLADO NOS NÓS.	65
2.7	MODELO DE PCSOIM DA ReSD APLICADO A UM SISTEMA REAL DE DISTRIBUIÇÃO	66
2.7.1	RESTAURAÇÃO DO SISTEMA REAL DA FIG. 9. CASO 1: DEFEITO NA ZONA 1 SEM CORTE DE CARGA	67
2.7.2	RESTAURAÇÃO DO SISTEMA REAL DA FIG. 9. CASO 2: DEFEITO NA ZONA 9 COM CORTE DE CARGA	70
3	O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT CONSIDERANDO OS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE	75
3.1	MODELO DE PCSOIM APLICADO AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT: MODELO MONO-OBJETIVO	76
3.2	AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE	77
3.2.1	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE EM SDEE RADIAIS	78
3.3	MODELO DE PCSOIM DO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT CONSIDERANDO OS INDICES DE CONFIABILIDADE	82
3.3.1	PRE-PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE	82
3.3.2	RESTRIÇÕES DE CONFIABILIDADE	85
3.4	METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DO PROBLEMA DA RSDC	89
3.4.1	TESTES E RESULTADOS	90
3.4.2	A METODOLOGIA ε-CONSTRAINT PARA RESOLVER O PROBLEMA DA RSDC	95
3.5	PROGRAMAÇÃO ROBUSTA	95
3.5.1	FORMULAÇÃO GERAL DA PROGRAMAÇÃO ROBUSTA	96
3.5.2	FORMULAÇÃO ROBUSTA DE Bertsimas e Sim (2004)	97
3.5.3	RESTRIÇÕES DE CONFIABILIDADE ROBUSTAS: MOTIVAÇÃO	98
3.5.4	RESTRIÇÕES DE CONFIABILIDADE ROBUSTAS: FORMULAÇÃO	99
3.6	MODELO DE PROGRAMAÇÃO ROBUSTA DO PROBLEMA DA RSDC	102
3.6.1	EXEMPLO DIDÁTICO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO ROBUSTO DA RSDC	103
3.6.2	ESCOLHA DO PARÂMETRO DE AJUSTE ROBUSTO Γ PARA O PROBLEMA DA RSDC ROBUSTO	106
3.6.3	MODELO ROBUSTO DA RSDC: TESTES E RESULTADOS	109
4	METODOLOGIA DA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CHAVES DE INTERCONEXÃO NOS SDMT	113
4.1	FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA A AOCSD	114

4.2	ALGORITMO DE BUSCA INTELIGENTE: GRASP	118
4.2.1	FASE CONSTRUTIVA: AHC	119
4.2.2	FASE MELHORIA LOCAL: SDH	120
4.3	ALGORITMO DE GERAÇÃO DE ZONAS DE CARGA	121
5	TESTES E RESULTADOS	125
5.1	CASO 1: SISTEMA TESTE DE 43 E 5 CHAVES DE INTERCONEXÃO	126
5.2	CASO 2: SISTEMA TESTE DE 43 E 10 CHAVES DE INTERCONEXÃO	128
5.3	CASO 3: SISTEMA TESTE DE 136 NÓS E 5 CHAVES DE INTERCONEXÃO	130
5.4	CASO 4: SISTEMA TESTE DE 136 NÓS E 10 CHAVES DE INTERCONEXÃO	132
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	135
6.1	CONCLUSÕES	135
6.2	TRABALHOS FUTUROS	136
 Referências		 137
 Anexos		 143
ANEXO A	DADOS DOS SISTEMAS TESTES	145

1 INTRODUÇÃO

Na complexa infraestrutura que compõe as redes de energia elétrica são as chamadas Empresas Distribuidoras (ED) aquelas que administram e controlam os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). Os SDEE são o conjunto de instalações e equipamentos que fornecem o serviço de energia elétrica, normalmente em forma de onda alternada senoidal polifásica, aos pontos de demanda que estão sendo atendidos pelas ED encarregadas da rede. Tipicamente, os SDEE compreendem apenas as instalações de propriedade das ED, ou seja, dispositivos tais como: aparelhos elétricos, subestações, fontes de geração, ou esquemas de proteção que pertencem aos usuários ou às demais instalações de transmissão/geração não fazem parte dos SDEE (ANEEL, 2012a).

No Brasil os SDEE podem ser classificados em função dos níveis de tensão padronizados pela agência reguladora ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) segundo ANEEL (2012a), nos seguintes tipos:

- Sistema de distribuição de alta tensão (SDAT): Compreende a faixa de nível de tensão nominal das instalações elétricas entre 69 kV e 230 kV.
- Sistema de distribuição de média tensão (SDMT): Compreende a faixa de nível de tensão nominal das instalações elétricas entre 1 kV e 69 kV.
- Sistema de distribuição de baixa tensão (SDBT): Compreende a faixa de nível de tensões nominais das instalações elétricas inferiores ou iguais a 1 kV.

Assim, o foco de análise deste trabalho são os circuitos associados aos SDMT, pois as instalações que pertencem a este nível de tensões são as mais comuns no atendimento das unidades consumidoras residenciais, comerciais e industriais pequenas, sejam rurais ou urbanas; tanto se as cargas estão agrupadas nas subestações de distribuição ou diretamente conectadas ao nível de tensão contratada. Aliás, a maioria da geração distribuída e os equipamentos de transformação, proteção, operação e medida, ligados aos SDEE, encontram-se nos SDMT (ANEEL, 2012a).

Os propósitos universais dos SDMT (e em geral de todos os tipos de SDEE) podem-se resumir nos seguintes objetivos: 1. Abranger o território de influência da ED responsável pelo atendimento dos usuários que se desejam conectar ao SDMT e contratem o serviço elétrico; 2. Ter capacidade suficiente de potência para atender os picos de demanda do conjunto de usuários conectados; 3. Prover um serviço satisfatoriamente contínuo aos usuários conectados; 4. Garantir níveis de tensão adequados às condições da demanda de cada um dos usuários. (WILLIS, 2004).

No Brasil existem atualmente 63 ED chamadas concessionárias do serviço público de distribuição, além das permissionárias (cooperativas de eletrificação rural), responsáveis pelo atendimento de mais de 64 milhões de unidades consumidoras, também pela conexão de pequenos e médios geradores e, a redução das tensões nas subestações de transferência ao sistema

de transmissão. Sendo um dos maiores sistemas de eletrificação do mundo, é um desafio para as ED brasileiras garantir uma operação econômica dos seus SDMT que também satisfaçam as exigências técnicas dos usuários e os índices de qualidade estabelecidos pela ANEEL (ANEEL, 2013; ANEEL, 2012b). Para isso, as ED precisam investir constantemente nas redes para manter bons níveis de tensão de atendimento nos alimentadores, continuidade do serviço e qualidade da energia nos pontos de conexão, com o objetivo de reduzir os custos de operação devido às perdas elétricas no sistema, compensações devido à violação dos índices de continuidade e custos associados à manutenção, modificação e reparação dos SDMT, em resposta a eventos inesperados, como flutuações de carga ou faltas na rede.

O maior investimento das ED para controlar e monitorar suas redes começou a partir da década de 80, junto com os avanços das tecnologias em telecomunicações, a capacidade de aquisição, armazenamento e processamento de dados e, o desenvolvimento de equipamentos especializados para melhorar as condições técnicas e operativas dos SDEE (SHORT, 2003). A integração das tecnologias para o monitoramento, coordenação e ajuste das ações de proteção e operação dos equipamentos instalados nas redes e, o armazenamento e análise dos estados das variáveis elétricas do sistema para o diagnóstico e o planejamento dos SDEE, formam um conjunto de tecnologias chamado Automação da Distribuição (AD). Finalmente, a AD junto aos esquemas de supervisão e controle em tempo real, os serviços de atendimento aos usuários e os sistemas de informação geográfica, formam a infraestrutura das novas redes de distribuição inteligentes ou Smart Grids.

1.1 MOTIVAÇÕES DO TRABALHO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia de otimização da alocação de chaves de interconexão nos SDMT no contexto da AD. A alocação ótima das chaves de interconexão é um problema relacionado com o investimento nos sistemas de distribuição e, em geral, as principais razões das ED para justificar o investimento nos esquemas de AD, podem-se resumir como segue: a) Minimizar os custos de operação e investimento não planejado nos SDMT, b) Atender às exigências de confiabilidade e qualidade da potência nos SDMT, e c) aprimorar os incentivos e reduzir as penalidades impostas pelas agências reguladoras (PABLA, 2004). Em seguida, cada uma destas razões será analisada em detalhe.

1.1.1 MINIMIZAR OS CUSTOS DE OPERAÇÃO E INVESTIMENTO NÃO PLANEJADO NOS SDMT

Os custos de operação e investimento não planejado são os custos que as ED assumem devido a um estado de operação eletricamente “indesejável” da rede. Um SDMT que opera indesejavelmente apresenta graves perdas técnicas nos circuitos devido à potência ativa que é consumida no processo de condução e transformação dos SDEE, e que não está sendo utilizada

diretamente pelos usuários. As chamadas perdas por *Efeito Joule* são inerentes a todos os processos de transporte de energia elétrica alternada e são proporcionais ao quadrado da magnitude da corrente que flui pelos cabos e transformadores, portanto, são críticas nos intervalos de tempo de maior consumo (SHORT, 2003). Adicionalmente, um SDMT operando de forma indesejável, apresenta níveis de tensão nos pontos de conexão abaixo do nível aceitável de atendimento, carregamento inadequado dos transformadores de distribuição e/ou fluxos de corrente maiores que as características nominais dos componentes da rede, o que pode derivar em custos não programados de reparação dos SDMT devido à desconexão não programada de carga, danos nos equipamentos e materiais da rede ou custos de repotenciação.

Infelizmente, as características “indesejáveis” dos SDMT são mais comuns e prolongadas em comparação com as mesmas características nos sistemas de transmissão (embora seus impactos sejam mais restritos), principalmente devido à necessidade das ED de atender a totalidade da demanda, mesmo que as cargas estejam muito afastadas das subestações de distribuição, ou porque o comportamento da demanda seja desconhecido. Este último caso acontece devido a natureza estocástica das cargas nos SDEE, e devido a seleção inadequada na fase de planejamento e construção dos cabos, transformadores ou até a topologia da rede. Se os custos de operação dos SDMT são desconsiderados, mesmo só analisando as perdas por Efeito Joule, podem-se tornar economicamente inviáveis para as ED. Só no Brasil, segundo Mendonça (2010, p. 12), do total das perdas técnicas do sistema elétrico nacional, a distribuição representa 60% comparado com a transmissão que representa os 40% restantes.¹

Para minimizar os custos de operação e investimento não planejado e levar os SDMT para estados de operação economicamente “desejáveis”, as ED devem otimizar o desempenho elétrico de suas redes. A otimização do ponto de operação dos SDMT consiste em procurar as melhores ações de controle, alocação e/ou seleção dos equipamentos que minimizam os custos elétricos, sem violar as restrições ou limites operacionais da rede. Algumas estratégias interessantes para melhorar o ponto de operação ótimo dos SDMT no contexto da AD são: seleção, alocação e operação ótima de bancos de capacitores, reguladores de tensão, comutadores sob carga (OLTC, pelas iniciais em inglês), chaves de interconexão, geração distribuída e bancos de baterias.

Existem muitas metodologias de otimização dos SDMT, e neste trabalho será apresentada uma metodologia baseada no modelamento matemático dos SDEE, não obstante, para todas elas, a qualidade das ações levadas na prática dependem da veracidade na informação da rede, a capacidade econômica e logística das ED para tomar as decisões geradas pelos métodos de otimização, e o grau de desenvolvimento dos sistemas de supervisão e controle instalados nos SDMT.

¹ As perdas não técnicas, associadas à fraude e ao furto de energia, são desconsideradas nesta análise. Não obstante elas representam 7,04% das perdas totais do Sistema Elétrico Brasileiro do ano 2009 (MENDONÇA, 2010).

1.1.2 ATENDER ÀS EXIGÊNCIAS DE CONFIABILIDADE E QUALIDADE DA POTÊNCIA NOS SDMT

A segunda das motivações dos esquemas de AD consiste em atender as exigências de confiabilidade e qualidade da potência nos SDMT. Isto significa que as ED devem manter o serviço elétrico em estado estacionário contínuo o maior tempo possível, a forma de onda das variáveis elétricas deve estar o mais perto possível dos seus valores nominais de magnitude e frequência e, o fator de potência dos alimentadores deve ser controlado nos pontos da rede onde o consumo ou geração de reativos seja elevado. Na prática, a capacidade das redes (ou algum dos seus componentes) para manter a continuidade do serviço elétrico é quantificada pelos índices de confiabilidade.

Os índices de avaliação da confiabilidade mais usados pelas ED no mundo são o índice médio da duração das interrupções do sistema (SAIDI pelas siglas em inglês), e o índice médio da frequência das interrupções do sistema (SAIFI pelas siglas em inglês)². Os índices de confiabilidade caracterizam a duração e a frequência das interrupções de longa duração (maior ou igual a 5 minutos) durante períodos de apuração usualmente de um ano. Existem muitos outros indicadores e estratégias de análise da confiabilidade (BILLINTON; ALLAN, 1996, p. 220), no entanto, o SAIDI e o SAIFI são os mais adequados para visualizar o impacto das interrupções em termos do número de usuários afetados pelas faltas de longa duração. Eles permitem fazer análise do comportamento global da continuidade nas redes e são os padrões de referência que as agências reguladoras utilizam para calcular as penalidades e incentivos em função da qualidade do serviço elétrico que as ED estão fornecendo.

É conhecido que nos SDEE incide o maior número de faltas de longa duração dos sistemas elétricos, principalmente pela proximidade com os centros de carga e a exposição da infraestrutura dos SDEE aos fatores externos que causam interrupções nos sistemas elétricos, como: árvores, animais, poluição, tempestades, descarga elétricas atmosféricas, furto, acidentes, entre outros; além das interrupções programadas e as interrupções devidas a erros na operação do sistema.

A otimização da confiabilidade nos SDMT não é uma tarefa simples, demanda para as ED a aquisição e valoração das informações estatísticas das redes para conhecer o número, a duração e os tempos de reparação das faltas em todos os componentes dos circuitos, e depois, fazer uma análise que garanta sustentabilidade entre os níveis desejáveis de confiabilidade e os custos de investimento para alcançá-los (PABLA, 2004). Quanto maior o investimento das ED nos esquemas de proteção e automação nos SDMT, melhores serão os indicadores globais de confiabilidade, pois o tempo de reação e restabelecimento das faltas nos componentes do sistema tenderão a diminuir. Por exemplo, os SDMT que têm chaves de interconexão controladas desde um centro de operações, estrategicamente alocadas ao longo dos alimentadores, poderão atender

² No Brasil, SAIFI e SAIDI correspondem à FEC (Frequência Equivalente das Interrupções por Unidade Consumidora) e DEC (Duração Equivalente de Interrupções por Unidade Consumidora), respectivamente.

rapidamente parte da demanda que foi desenergizada por uma falta na rede, devido às ações dos esquemas de restauração, fazendo transferência de carga entre os alimentadores que não estão afetados pela falta.

A topologia da rede também afeta a duração e o número das interrupções que os usuários dos SDMT experimentam ao longo do tempo. Configurações malhadas apresentam os melhores índices de confiabilidade, pois fornecem caminhos em paralelo aos pontos de consumo, o que gera redundância no atendimento das cargas e diminui consideravelmente a probabilidade de desenergização dos nós devido a faltas simples. Contudo, os esquemas de distribuição malhados são incomuns na prática e estão limitados a áreas metropolitanas muito povoadas, porque eles encarecem os esquemas de coordenação de proteções e isolamento dos sistemas, e tendem a aumentar as correntes de falta nos alimentadores, o que compromete a segurança da rede.

Uma estratégia favorável para melhorar a confiabilidade dos usuários dos SDMT, considerando radialidade na rede, é a utilização de esquemas de seletividade entre dispositivos de religamento e proteção, alocados ao longo dos alimentadores. A alocação e coordenação inteligente de equipamento de chaveamento e proteção melhoram os tempos de detecção e reparação de faltas através da setorização da rede em zonas de proteção. Assim, as faltas ficam isoladas e os demais usuários não são desenergizados durante o total do tempo de restauração das interrupções. Estas ações diminuem eficientemente os índices de duração das faltas, e a tendência, no contexto da AD, é minimizar a intervenção humana nas ações de controle até obter sistemas de “Self-Healing” capazes de localizar, isolar as faltas e restaurar o sistema automaticamente; adaptando-se às condições de carga e configuração da rede e levando o sistema até um ponto de operação eficiente (AGUERO, 2012).

1.1.3 APRIMORAR OS INCENTIVOS E REDUZIR AS PENALIDADES IMPOSTAS PELAS AGÊNCIAS REGULADORAS

Os SDMT cujos esquemas de AD otimizam o ponto de operação das redes em estado estacionário, e que ajudam a manter bons indicadores de confiabilidade globais, terão um efeito positivo no lucro das ED. Mínimas perdas elétricas nas linhas dos SDMT implicam maiores lucros para as ED, pois a maior parte da potência ativa que está sendo fornecida é consumida pelos usuários que contratam o serviço de energia. Além disso, um SDMT que opera em condições eletricamente favoráveis (ou seja, sem ultrapassar as restrições operativas das redes) reduz a deterioração do sistema, e o investimento em manutenção e reparação das redes. Finalmente, as ED que melhorem os indicadores de confiabilidade das redes, além de diminuir os custos de alocação e atendimento das faltas, não serão penalizadas pelas agências reguladoras que impõem limites ao número e duração das interrupções que os usuários experimentam no ano.

Justifica-se então a incorporação das tecnologias de AD nos SDMT como estratégia para garantir um serviço elétrico econômico para as ED e de qualidade para os usuários. No contexto das redes inteligentes, e visando satisfazer as razões da incorporação das tecnologias em AD

apresentadas anteriormente, este trabalho propõe uma metodologia baseada na formulação matemática do comportamento elétrico dos SDEE, para a alocação ótima de chaves de interconexão nos SDMT que melhora as condições elétricas do sistema e os níveis de confiabilidade globais na rede, em função da operação das chaves, tanto em condições de atendimento normal da demanda como em estados de contingência.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A metodologia de alocação ótima de chaves de interconexão nos SDMT proposta neste trabalho considera dois subproblemas relacionados com o estado de operação das chaves de interconexões instaladas:

1. O estado de operação das chaves para melhorar o ponto de operação dos SDMT em estado normal de atendimento da carga, considerando os índices de confiabilidade;
2. As ações de restauração, em caso de interrupção permanente, para isolar as faltas em zonas desenergizadas e atender a maior quantidade possível de demanda através da operação das chaves alocadas nos SDMT, considerando as restrições operativas da rede.

1.2.1 RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT CONSIDERANDO OS INDICES DE CONFIABILIDADE

O subproblema (1) é conhecido na literatura especializada como o problema da Reconfiguração ótima dos Sistemas de Distribuição para diminuir as perdas de potência ativa e melhorar a confiabilidade geral da rede (RSDC). Vários algoritmos e metodologias têm sido desenvolvidas até a data deste trabalho para encontrar soluções de boa qualidade ao problema da RSD com confiabilidade. A maioria das metodologias de otimização estão baseadas em meta-heurísticas e algoritmos de busca inteligente, devido a natureza combinatória do problema, cuja complexidade aumenta com o número de chaves alocadas, e a técnica utilizada para avaliar a confiabilidade dos SDMT.

O problema da reconfiguração para minimizar as perdas de potência ativa nas redes tem sido estudado desde os anos 70 com o trabalho pioneiro de Merlin e Back (1975), porém, a otimização conjunta das perdas elétricas e a confiabilidade, em função da topologia da rede, começou apenas na última década. Assim, Hsiao (2004) propôs um algoritmo multiobjetivo, baseado em técnicas evolutivas e lógica fuzzy para resolver o problema da reconfiguração que minimiza as perdas ativas e melhora a confiabilidade, aliás, considera a diminuição do número de chaveamentos necessários e o desvio máximo de tensão. A metodologia apresentada por Hsiao (2004) permite as ED orientar a solução gerada pelo algoritmo segundo suas prioridades na função objetivo. Contudo, a confiabilidade em Hsiao (2004) é avaliada pela capacidade de reserva das linhas e transformadores da rede e não pelos indicadores globais de confiabilidade.

No ano 2009, Mendoza et al. (2009) propuseram um algoritmo multiobjetivo baseado numa meta-heurística Micro-Genética (μ GA) que, empregando uma população reduzida, gera eficientemente a fronteira de soluções não-dominadas do problema. Os autores comparam as perdas elétricas com os indicadores gerais de confiabilidade SAIDI, SAIFI, a Energia Não Suprida (ENS) e o indicador da duração média das interrupções, $D = SAIDI/SAIFI$, calculados em cada sistema teste. Um ano depois, Bernardon et al. (2010) aplicaram mais uma metodologia multicritério baseada em lógica fuzzy, para indicar às ED como devem reconfigurar suas redes, visando minimizar as perdas e o número de usuários desenergizados ao longo de um ano. Uma contribuição interessante neste trabalho é a inclusão das perdas da subtransmissão no cálculo das perdas totais do sistema, devido as correntes primárias nas subestações de distribuição.

Amanulla, Chakrabarti e Singh (2012) apresentam uma metodologia meta-heurística chamada *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) para resolver o problema da RSDC cuja função objetivo, dependendo do interesse do usuário, diminui as perdas elétricas e melhora a confiabilidade. Para a avaliação da confiabilidade em cada ponto de carga são utilizados modelos probabilísticos das falta nos componentes da rede, alocados no caminho elétrico entre cada nó e a fonte, chamados *Cut Sets*. A avaliação da confiabilidade utilizando *Cut Sets* considera que, se algum desses componentes sofre uma falta, a disponibilidade do serviço elétrico será afetada segundo o número de nós desatendidos.

Até o ano 2013, novos algoritmos especializados têm sido utilizados para gerar a fronteira de soluções do problema da RSDC. Kumar e Thanushkodi (2013) apresentam uma combinação entre um *Opposition based Differential Evolution Algorithm* (ODE) e um *Plant Growth Simulation Algorithm* (PGSA) que também gera soluções de qualidade para o problema em condições de contingência. Paralelamente, Esmaeilian, Fadaeinedjad e Attari (2013) empregam um *Binary Gravitational Search Algorithm* (BGSA) para minimizar perdas e Energia não Suprida no sistema. Os valores esperados de confiabilidade dos componentes da rede utilizados por Esmaeilian, Fadaeinedjad e Attari (2013) estão baseados no modelo probabilístico Weibull-Markov que se ajusta adequadamente à estocasticidade das taxas de falta nos componentes da rede. Kavousi-Fard e Niknam (2013) consideram a incerteza dos parâmetros de confiabilidade aplicando um fluxo de carga probabilístico na avaliação da função objetivo da meta-heurística: *Clonal Selection Algorithm*. Finalmente, Narimani et al. (2014) apresenta uma nova meta-heurística baseada na lei da gravitação universal e interação de massas, chamada *Gravitational Search Algorithm* (GSA), para reconfigurar eficientemente os SDEE, considerando a confiabilidade, as perdas de potência ativa e os custos operacionais. Os autores fazem uma comparação exaustiva das vantagens do seu algoritmo em relação com propostas anteriores e apresentam os resultados em forma de superfícies de Pareto para cada caso teste.

A principal desvantagem de todas as metodologias anteriores, é que elas estão baseadas em técnicas heurísticas modernas, que não conseguem garantir a otimalidade da fronteira de soluções de Pareto ao problema da RSDC. Aliás, até a data deste trabalho, nenhuma das metodologias que consideram a incerteza na avaliação da confiabilidade, há utilizado a programação robusta

para gerar soluções factíveis, de boa qualidade, mesmo que os parâmetros de confiabilidade do modelo mudem aleatoriamente. A aplicação de modelos de programação robusta na solução do problema da RSDC será abordado no Capítulo 3 deste trabalho.

1.2.2 RESTAURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT

O subproblema (2) é normalmente conhecido na literatura especializada como o problema da Restauração dos Sistemas de Distribuição (ReSD). A ReSD é um problema de otimização clássico, complexo e de difícil solução devido à natureza combinatória do problema e a não linearidade nas restrições operativas dos SDEE. Os primeiros trabalhos que tentaram procurar soluções de qualidade ao problema da ReSD, remontam-se ao fim da década do 80 com a proposta de Civanlar et al. (1988), que propuseram uma metodologia heurística simples para operar as chaves energizadas e reduzir as perdas de potência ativa na rede, através do balanceamento das cargas entre os alimentadores. A estratégia garante a radialidade dos SDEE e tenta manter níveis adequados de tensão em todos os nós da rede. Paralelamente, Liu, Lee e Venkata (1988) apresentam um sistema especialista chamado *Restoration Planner* (RP) que, após a localização da falta e conhecidas todas as variáveis do sistema, emprega regras heurísticas baseadas no comportamento típico dos SDEE radiais para formular um conjunto de ações de controle dos equipamentos de chaveamento/proteção, que permitem atender a maior quantidade de demanda desenergizada após isolar falta.

Morelato e Monticelli (1989), resolveram o problema da ReSD fazendo uma busca heurística através do conjunto de soluções apresentadas em forma de árvore binário. O processo de busca é dirigida por regras práticas baseadas no conhecimento da rede elétrica por parte dos operadores, e assim evita a explosão combinatória das variáveis de decisão do problema. A metodologia utiliza uma estratégia de busca em grafos chamada *Depth-first Search* para gerar novas possíveis soluções em cada iteração. Do mesmo modo, Hsu et al. (1992) empregam regras empíricas, baseadas na experiência dos operadores da ED chinesa: Taiwan Power Company, para formular uma sequência heurística de passos que restauram o sistema após a localização e isolamento da falta.

Com o novo milênio, começa-se utilizar algoritmos meta-heurísticos para resolver eficientemente o problema da ReSD, com vantagens no tempo computacional e resultados de boa qualidade em sistemas de grande porte. Toune et al. (2002), fazem uma comparação exaustiva de quatro métodos alternativos para resolver o problema da ReSD: *Reactive Tabu Search*, *Tabu Search*, *Parallel Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos. Para todas elas, a função objetivo faz um balanceamento de carga de modo que a maioria da demanda esteja atendida após a falta, aprimorando as fontes mais próximas e maximizando a tensão mínima da rede. Técnicas similares têm sido utilizadas com sucesso, como o *Ant Colony Optimization Algorithm* (ACO) (LING et al., 2005), Algoritmos Evolutivos Estocásticos e *Particle Swarm Optimization* (PSO) (LING et al., 2005; LAMBERT-TORRES et al., 2009). Embora todos eles apresentem excelentes

resultados e agreguem novas características ao problema como: a minimização conjunta das perdas durante a restauração, estocasticidade e controle do número de chaveamentos; o ótimo global do problema não pode ser garantido por nenhum deles.

Outra desvantagem das técnicas heurísticas, meta-heurísticas e de busca exaustiva para resolver o problema da ReSD, é que todas elas requerem de uma longa etapa de desenvolvimento e teste dos algoritmos. Portanto, estas metodologias, além de não garantir o ótimo global do problema, tampouco são flexíveis nem fáceis de reproduzir. Finalmente, no capítulo 2 deste trabalho, será apresentado um modelo matemático convexo para resolver o problema da ReSD, utilizando solvers de otimização para encontrar o ótimo do problema, e expressões matemáticas simples de serem representadas utilizando linguagens de programação matemática.

1.2.3 ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CHAVES DE INTERCONEXÃO NOS SDMT

Também são encontradas na literatura diferentes propostas para resolver o problema geral da Alocação Ótima de Chaves de Interconexão nos Sistemas de Distribuição (AOCSD). Uma das metodologias precursoras para resolver o problema da AOCSD, foi desenvolvida por Billinton e Jonnavithula (1996). Os autores utilizam a meta-heurística *Simulated Annealing* para alocar as chaves nos alimentadores. A função objetivo considera: o custo da confiabilidade devido às compensações que as ED devem pagar pela duração das interrupções que os usuários experimentam ao longo de um ano, os custos de investimento e os custos de manutenção das chaves. A avaliação da confiabilidade em cada nó é feita utilizando técnicas de busca em Grafos Interconectados, onde é calculado o efeito de qualquer contingência $n - 1$ na energização de todos os nós da rede.

No ano 2005, Carvalho, Ferreira e Silva (2005) propuseram uma metodologia em duas fases para a alocação estratégica de chaves controladas remotamente. A função objetivo considera a relação custo/benefício entre a instalação e manutenção das chaves e uma função de lucro econômico devido à melhora na confiabilidade. Na primeira fase, o espaço de soluções é dividido em espaços independentes menores utilizando um *Space Partitioning Algorithm* (SPA) especializado e, cada um dos novos problemas é resolvido empregando uma busca exaustiva. Na segunda fase, todas as soluções dos subespaços são comparadas utilizando um algoritmo simples de busca local. Garante-se a otimalidade da solução final devido à convexidade entre os valores das funções objetivo das soluções dos subespaços gerados pelo SPA, como é demonstrado pelos autores em Carvalho, Ferreira e Silva (2005).

Uma metodologia precursora, baseada num modelo de Programação Linear Inteira-Mista (PLIM), foi proposta por Soudi e Tomsovic (1998). O modelo classifica os trechos dos SDMT em duas categorias: alimentador principal e derivações, e cada uma das derivações é dividida em outras três categorias dependendo do número de usuários ligados a elas e seu tamanho. A função objetivo soma as taxas de falta de cada trecho, as quais são função do tipo de dispositivo alocado em cada trecho. Finalmente as variáveis de decisão binárias do modelo de PLIM minimizam

os indicadores gerais de confiabilidade SAIDI e SAIFI, sujeito a restrições de coordenação, operação e custo dos dispositivos alocados. Vários outros trabalhos aproveitam a formulação de Soudi e Tomsovic (1998) e agregam melhoras consideráveis ao alcance do modelo, como: a coordenação dos dispositivos considerando a topologia completa da rede, a relação entre o custo de investimento e a melhora da confiabilidade, e técnicas que melhoram o custo computacional para obter soluções de qualidade ao problema da AOCS (SILVA; PEREIRA; MANTOVANI, 2004; SOHN; NAM; PARK, 2006; ZAMBON et al., 2009). Embora a grande vantagem dos modelos de PLM aplicados ao problema da AOCS para gerar soluções ótimas utilizando solvers comerciais de otimização ou heurísticas modernas, nenhum dos modelos anteriores consideram as variáveis elétricas da rede, nem as restrições operacionais, para definir esquemas de restauração que melhoram a confiabilidade nas redes de distribuição moderna. Tampouco a incerteza nos parâmetros de confiabilidade dos alimentadores foi considerada.

Até a realização deste trabalho, novas técnicas meta-heurísticas têm sido desenvolvidas com sucesso para encontrar soluções de qualidade ao problema da AOCS. Assim, Chen et al. (2006) propõem um Algoritmo Imune (AI), inspirado nos algoritmos evolutivos, para a alocação ótima de chaves seccionadoras automáticas e manuais nos SDEE, procurando minimizar o custo de interrupção aos usuários e o investimento na instalação das chaves. Esquemas de restauração não são considerados por Chen et al. (2006). Do outro lado, Moradi e Fotuhi-Firuzabad (2008) desenvolveram uma versão discreta multiestágio do PSO com o propósito de alocar equipamento de proteção nos SDMT, agregando a possibilidade de alocar novos disjuntores nos alimentadores onde já tem equipamentos instalados. A metodologia de Moradi e Fotuhi-Firuzabad (2008) considera o custo de instalação dos dispositivos de chaveamento e o custo da continuidade do serviço em caso de alguma contingência na rede, para isso, a função objetivo simula todas as faltas possíveis e calcula os custos devido à operação dos esquemas de restauração e a confiabilidade experimentada pelos usuários. Contudo, Moradi e Fotuhi-Firuzabad (2008) desconsideram as restrições operativas dos SDMT no momento de fazer a restauração.

O trabalho de Falaghi, Haghifam e Singh (2009), é muito interessante devido as múltiplas considerações feitas pelos autores. Aplica-se a meta-heurística ACOA para resolver o problema de realocação e alocação de novas chaves seccionadoras nos SDEE, em presença de Geração Distribuída nas redes. Uma estratégia multiobjetivo baseada em lógica fuzzy é utilizada para gerar soluções de boa qualidade considerando o conflito entre o custo de investimento, instalação e manutenção das chaves e a minimização da Energia não Suprida Esperada (EENS) ao longo do ano, calculada em função do esquema de seletividade entre as chaves alocadas. O algoritmo proposto também considera as restrições operacionais da rede durante a restauração em presença de GD. Assim, a capacidade máxima de geração de potência ativa e reativa, a queda de tensão nos alimentadores e os limites térmicos de corrente pelos cabos são respeitados; para alcançar isso o algoritmo pode desligar cargas para garantir a factibilidade das soluções geradas. Porém, o trabalho de Falaghi, Haghifam e Singh (2009) desconsidera outras aplicações das chaves, as quais podem ser aproveitadas para minimizar perdas e melhorar os índices de confiabilidade em

função da topologia da rede.

Finalmente, é importante agregar que já existe na literatura especializada uma proposta de solução ao problema da AOCSD utilizando a metaheurística GRASP feita por Benavides et al. (2013). A função objetivo calcula a EENS para cada proposta de alocação das chaves, em função de todos os cenários factíveis de contingência $n - 1$ na rede. Do mesmo modo que será discutido no Capítulo 2 deste trabalho, o SDMT é setorizado em zonas de carga, e uma metodologia de restauração por zonas é proposta pelos autores para calcular a Energia Não Suprida total do sistema. Benavides et al. (2013) também propõem um algoritmo heurístico construtivo especializado e uma técnica de busca pela vizinhança dirigida, chamada *path relinking*, para acelerar a meta-heurística GRASP. Vários sistemas testes são resolvidos e a meta-heurística GRASP é comparada com uma técnicas exatas como *Branch & Bound*, para demonstrar sua eficiência computacional e a qualidade das respostas.

No Capítulo 4 deste trabalho também é utilizada a meta-heurística GRASP para resolver o problema da AOCSD. A principal diferença respeito ao trabalho feito por Benavides et al. (2013) é que a função objetivo não só abrange a minimização da energia não fornecida devido à aplicação dos esquemas de restauração, mas também otimiza a operação das chaves para melhorar o ponto de operação do sistema durante o estado normal de atendimento da carga, e a melhora robusta dos indicadores gerais de confiabilidade, SAIDI e SAIFI, em função da topologia da rede.

1.3 OBJETIVO GERAL

Neste trabalho, um algoritmo de otimização baseado na meta-heurística GRASP será utilizado para resolver o problema da AOCSD. A solução gerada pela metodologia proposta determina a localização de um número determinado de chaves de interconexão com o objetivo de melhorar o esquema de restauração da rede, diminuir as perdas de potência ativas e, simultaneamente, melhorar os índices gerais de confiabilidade, SAIDI e SAIFI, dos SDMT. Após uma falta acontecer na rede, o esquema de restauração determina a topologia radial que isola a zona com falta, e indica ao operador quais são as ações ideais para atender a maior quantidade possível da demanda em estado de contingência. Por outro lado, as chaves também são aproveitadas quando o sistema está operando normalmente (ou seja, sem nenhuma contingência), para estabelecer a topologia que minimiza as perdas de potência ativa e melhora, probabilisticamente, os índices de confiabilidade, SAIDI e SAIFI, sujeitos à incerteza nas taxas de falta dos componentes da rede. Evidentemente, em cada instância do problema da AOCSD devem ser resolvidos dois subproblemas, a ReSD e a RSDC. Ambos subproblemas são combinatórias, e eles serão resolvidos utilizando modelos de programação matemática convexos. Finalmente, todos modelos de otimização serão representados utilizando a linguagem de programação matemática AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003) e sua solução será obtida utilizando o solver comercial CPLEX *Cplex*.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

A estrutura do documento tenta distinguir claramente as fases de solução proposta para resolver o problema da AOCSD. O algoritmo de busca inteligente tem como objetivo alocar as chaves no SDMT para otimizar o ponto de operação da rede em estado estacionário, visando manter bons níveis de confiabilidade em função da topologia e garantindo que o sistema possa reagir adequadamente ante qualquer contingência $n - 1$.

No Capítulo 2, além de se definir as expressões matemáticas que formulam a operação em regime permanente dos SDMT, essenciais para construir os modelos de otimização utilizados ao longo do documento, é formulado um modelo de Programação Cônica de Segunda Ordem Linear Inteira-Mista (PCSOLIM) para resolver o problema da Restauração Ótima dos SDMT (ReSD). O modelo de ReSD encontra o estado ótimo da operação das chaves alocadas ao longo dos alimentadores que satisfaz a máxima demanda atendida possível em estado de contingência $n - 1$ do sistema. O modelo ReSD é melhorado incluindo expressões que caracterizam a desconexão controlada de carga nos nós, ou *Load-Shedding*, em caso de ser necessário, para tentar diminuir o número total de usuários desatendidos após a restauração.

No Capítulo 3, são aproveitadas as expressões matemáticas do estado da operação dos SDMT do Capítulo 2 para construir um modelo de PCSOLIM do problema da Reconfiguração Ótima dos SDMT considerando os índices globais de Confiabilidade na rede, ou seja, o problema da RSDC. Devido à natureza conflitiva entre a minimização das perdas e a maximização da confiabilidade na função objetivo da RSDC, no Capítulo 3 é apresentada uma abordagem multiobjetivo que aproveita a convexidade do modelo da RSDC para construir a Superfície de Soluções de Pareto. A metodologia multiobjetivo utilizada é conhecida como ε -constraint, a qual modifica iterativamente o modelo de PCSOIM da RSDC para encontrar a configuração da rede que minimiza as perdas sem violar os limites de confiabilidade ($SAIDI_{\text{máximo}}$ e $SAIFI_{\text{máximo}}$) impostos pelas agências reguladoras. Finalmente, o modelo da RSDC é melhorado empregando uma técnica de Otimização Robusta, a qual considera a estocasticidade da taxa de faltas no ano para cada ramo da rede, na avaliação dos indicadores globais de confiabilidade.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta para resolver o problema da AOCSD. A estratégia de busca inteligente aplicada é um algoritmo GRASP. Alguns conceitos gerais da meta-heurística são apresentados inicialmente neste capítulo. A função objetivo do problema combina os resultados dos modelos de RSDC e ReSD apresentados no Capítulo 3 e 2 respectivamente. Portanto, a solução gerada pela metodologia considera a operação das chaves alocadas durante o estado normal de atendimento da rede e durante o estado de emergência $n - 1$. Adicionalmente, é descrito um algoritmo de geração de zonas de carga, usado na construção da estrutura de vizinhança da meta-heurística. Alguns exemplos simples são apresentados para sua compreensão. Finalmente, o fluxograma que sintetiza a metodologia é analisado passo a passo.

O Capítulo 5 contém a análise dos resultados da metodologia aplicada a dois sistemas testes e o Capítulo 6 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS SDMT: O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO ÓTIMA

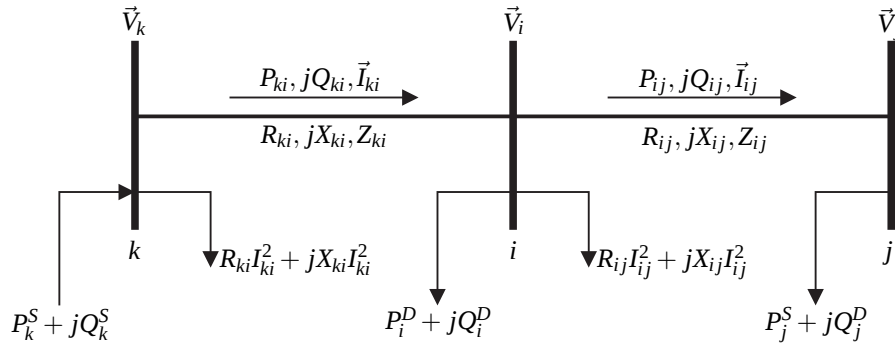
O ponto de operação em regime permanente dos sistemas elétricos alternados é calculado através das equações que formulam o fluxo de carga dos sistemas. A solução da formulação do fluxo de carga determina as grandezas das variáveis elétricas, sejam as magnitudes e os ângulos das tensões nas barras, os fluxos de potências ativas e reativas nas linhas, as perdas do sistema e a geração ou o consumo de potência reativa nas barras, em função das demandas dos nós e os parâmetros da rede (ARRILLAGA; ARNOLD, 1990; MONTICELLI, 1983). Embora os parâmetros elétricos das redes gerem relações lineares entre as tensões e as correntes, o cálculo dos fluxos das potências exige o produto entre as tensões nodais e as correntes nos ramos. Além disso, os SDEE são redes de corrente alternada, o que produz expressões complexas (com parte real e imaginária) que envolvem expressões de senos e cossenos e equações polinomiais de ordem superior. Portanto, análises elétricas que utilizem o cálculo do fluxo de carga produzem sistemas de equações não lineares e sua solução é obtida normalmente utilizando métodos iterativos.

Especificamente, os SDEE apresentam características particulares em relação às redes de alta tensão: a maioria das ED projetam os alimentadores para operar radialmente, o que significa que só existe um único caminho através da rede entre a fonte de fornecimento de fluxo de potência e os nós de consumo de cada alimentador, ou seja, não existem trajetórias fechadas ou *loops* no percurso do circuito. Esta característica de radialidade pode ser aproveitada na formulação do sistema de equações que caracterizam o fluxo de carga em estado estacionário dos SDEE, baseados nos modelos de ângulo relaxado (também chamados de injeção de potência) utilizados nos FC de varredura *backward/forward* propostos em Cespedes (1990), Shirmohammadi et al. (1988), e utilizados pela primeira vez na solução de problemas de planejamento dos SDEE por Baran e Wu (1989a), Baran e Wu (1989b).

O desenvolvimento do modelo analítico para o cálculo do ponto de operação em estado estacionário dos SDEE radiais utilizado neste trabalho está baseado nas seguintes hipóteses:

1. As demandas em cada nó da rede são representadas como potências ativas e reativas constantes.
2. Assume-se que o sistema é balanceado e é representado pelo seu equivalente monofásico.

Na Fig. 1 apresenta-se um segmento de rede com um nó de geração e dois nós de carga que exemplifica a formulação do fluxo de carga radial de acordo com as hipóteses anteriores. $\vec{V}_i$ e $\vec{I}_{ij}$ representam os fasores da tensão do nó i e do fluxo de corrente no circuito ij , respectivamente. P_i^D e Q_i^D representam a potência ativa e reativa demandada (se existirem) no nó i , respectivamente. P_i^S e Q_i^S representam a potência ativa e reativa gerada (se existirem) no nó i , respectivamente. P_{ij} e Q_{ij} representam o fluxo de potência ativa e reativa no circuito ij , respectivamente. R_{ij} , X_{ij} e Z_{ij} representam a resistência, reatância e impedância do circuito ij . $R_{ij}I_{ij}^2$ e $X_{ij}I_{ij}^2$ representam as perdas de potências ativa e reativa do circuito ij concentradas no nó i .

Figura 1 – Análise dos SDMT radiais.

Fonte: Elaboração do autor.

2.1 EQUAÇÕES DO PONTO DE OPERAÇÃO DOS SDEE RADIAIS

Como indicado na Fig. 1, a queda de tensão fasorial para todos os ramos ij de uma rede radial é dada pela equação (1), onde Ω_l representa o conjunto de ramos da rede.

$$\vec{V}_i - \vec{V}_j = \vec{I}_{ij} (R_{ij} + jX_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1)$$

A corrente fasorial em todos os ramos ij , pela teoria de circuitos elétricos alternados, pode ser calculada utilizando a equação (2).

$$\vec{I}_{ij} = \left(\frac{\vec{S}_{ij}}{\vec{V}_j} \right)^* = \left(\frac{P_{ij} + jQ_{ij}}{\vec{V}_j} \right)^* \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2)$$

Substituindo a equação (2) em (1) obtêm-se a equação (3).

$$(\vec{V}_i - \vec{V}_j) \vec{V}_j^* = (P_{ij} - jQ_{ij}) (R_{ij} + jX_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (3)$$

Separando a magnitude e ângulo das tensões em (3) e operando, obteve-se a equação (4) a partir de (3). Considera-se que $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$.

$$V_i V_j (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) - V_j^2 = (P_{ij} - jQ_{ij}) (R_{ij} + jX_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (4)$$

Separando a parte real da parte imaginária em (4) obtêm-se as equações (5) e (6).

$$V_i V_j \cos \theta_{ij} = V_j^2 + (R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (5)$$

$$V_i V_j \sin \theta_{ij} = X_{ij} P_{ij} - R_{ij} Q_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6)$$

Somando os quadrados das igualdades (5) e (6), aplicando a identidade trigonométrica $\sin^2 \theta_{ij} + \cos^2 \theta_{ij} = 1$ e reduzindo os termos, obtêm-se a equação (7), onde $Z_{ij}^2 = R_{ij}^2 + X_{ij}^2$.

$$V_i^2 - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) - Z_{ij}^2 I_{ij}^2 - V_j^2 = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7)$$

O quadrado da magnitude da corrente (I_{ij}^2) é dado pela equação (8).

$$I_{ij}^2 = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_j^2} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (8)$$

Juntas, as equações (7) e (8) permitem calcular as magnitudes de tensão nos nós (V_i e V_j) e corrente pelos ramos (I_{ij}) nos SDEE, em função dos fluxos de potência ativa (P_{ij}) e reativa (Q_{ij}) dos ramos e das resistências (R_{ij}) e reatâncias (X_{ij}) dos circuitos.

Os fluxos de potência pelos ramos devem satisfazer a lei de balanço de energia pelos nós, conhecida como a primeira lei de Kirchhoff ou KCL. Portanto, as expressões (9) e (10) são utilizadas para representar os balanços dos fluxos de potência ativa e reativa em cada um os nós dos SDEE.

$$\sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij} + R_{ij} I_{ij}^2) + P_i^S = P_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (9)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij} + X_{ij} I_{ij}^2) + Q_i^S = Q_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (10)$$

Note que, o conjunto Ω_b em (9) e (10) representa o conjunto de nós do sistema, e as perdas ativas ($R_{ij} I_{ij}^2$) e reativas ($X_{ij} I_{ij}^2$) estão concentradas no nó i como indicado na Fig. 1.

Utilizando métodos iterativos de solução de sistemas não lineares como, por exemplo, o método de Newton-Raphson, é possível obter a solução do sistema de equações formado pelas expressões (7)-(10). A solução do sistema (7)-(10) determina o ponto de operação irrestrito dos SDEE radiais de ângulo relaxado, do mesmo modo que as formulações de fluxo de potência clássicas onde os ângulos das tensões estão explícitos. Contudo, a principal vantagem do uso da formulação do ponto de operação dos SDMT, dada pelas equações (7)-(10), é sua simplicidade durante a construção de modelos matemáticos para representar problemas de otimização combinatorial dos SDMT.

2.2 MODELO NÃO-LINEAR DO PONTO DE OPERAÇÃO DOS SDMT

Utilizando a formulação para o cálculo do fluxo de carga radial baseado nos métodos de ângulo relaxado dado pelas equações (7)-(10) é possível modelar matematicamente o problema do cálculo do ponto de operação em estado estacionário dos SDMT, considerando o critério de mínimas perdas, através das equações (11)-(17).

O modelo de minimização de perdas de potência ativa em SDMT dado pelas equações (11)-(17) é um modelo de programação não linear (PNL), não convexo, normalmente conhecido como o Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

Na formulação do fluxo de carga original as magnitudes de tensão nos nós e da corrente nos ramos aparecem como variáveis elevadas ao quadrado em todas as equações. Portanto, é conveniente fazer a seguinte troca de variáveis: $I_{ij}^{\text{sqr}} = I_{ij}^2$ e $V_i^2 = V_i^{\text{sqr}}$. Onde I_{ij}^{sqr} e V_i^{sqr} são variáveis não negativas para cada $ij \in \Omega_l$ e $i \in \Omega_b$, respectivamente.

$$\min c^{\text{loss}} \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}} \quad (11)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij} + R_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}}) + P_i^S = P_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (12)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij} + X_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}}) + Q_i^S = Q_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (13)$$

$$V_i^{\text{sqr}} - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) - Z_{ij}^2 I_{ij}^{\text{sqr}} - V_j^{\text{sqr}} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (14)$$

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{sqr}} = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (15)$$

$$0 \leq I_{ij}^{\text{sqr}} \leq \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (16)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{\text{sqr}} \leq \bar{V}^2 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (17)$$

A função objetivo (11) minimiza a soma total das perdas de potência ativa nos ramos, vezes um custo por perdas ativas c^{loss} . As restrições (12) e (13) representam o balanço de potência ativa e reativa para cada nó da rede, as quais satisfazem diretamente a primeira lei de Kirchhoff em todos os nós. A restrição (14) corresponde à equação (7), que satisfaz indiretamente a segunda lei de Kirchhoff em todos os ramos. A restrição (15) corresponde à equação (8) do cálculo da magnitude do fluxo de potência aparente em todos os ramos ij . Finalmente, as restrições (16) e (17) garantem os limites operativos da rede em função das magnitudes de tensão máximas e mínimas permitidas em cada nó e os limites de corrente em cada ramo. Note que as equações (11)-(14), (16) e (17) são expressões lineares, enquanto (15) é uma equação não linear devido ao produto entre as variáveis de contínuas I_{ij}^{sqr} e V_i^{sqr} e o quadrado dos fluxos de potência ativa e reativa, P_{ij} e Q_{ij} .

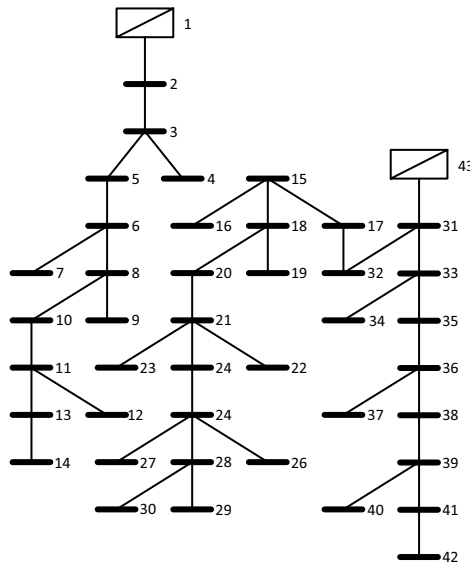
O modelo do ponto de operação dos SDMT mostrado em (11)-(17) fornece as equações fundamentais para a formulação de múltiplos problemas de otimização associadas à operação, expansão e investimento nos SDEE, para diferentes instâncias de demanda, restrições operativas, parâmetros e/ou configurações possíveis, considerando as hipóteses estabelecidas anteriormente. Contudo, o modelo (11)-(17) é em problema de PNL, não convexo e de difícil solução analítica, sendo proibitivo para sistemas ainda pequenos. Na prática, empregam-se solvers comerciais baseados em métodos iterativos para obter soluções para este tipo de problema.

Atualmente, existem vários solvers comerciais de PNL que encontram soluções de boa qualidade para modelos matemáticos não lineares, inclusive não-convexos. Porém, dependendo do tamanho do problema, o número, e o tipo de variáveis e restrições, em muitos casos não é possível garantir a convergência dos solvers ao ótimo global do problema. Em seguida, apresenta-se uma aplicação do modelo (11)-(17) para encontrar o ponto de operação do sistema teste de 43 nós da Fig. 2, utilizando o solver comercial *KNITRO* (KNITRO, 2012) para resolver problemas de PNL e a linguagem de programação matemática *AMPL* (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003) para descrever o modelo.

2.2.1 APLICAÇÃO DO MODELO DO PONTO DE OPERAÇÃO UTILIZANDO O SOLVER DE PNL *KNITRO*: SISTEMA TESTE DE 43 NÓS.

A Fig. 2 apresenta um sistema teste de distribuição radial de 43 nós, formado por dois alimentadores com fontes no nó 1 e 43. Os valores constantes do sistema são: $V^{\text{nom}} = 7,967 \text{ kV}$, $\underline{V} = 0,93V^{\text{nom}}$, $\bar{V} = V^{\text{nom}}$ e $c^{\text{lss}} = \$1/\text{kW}$. Os dados dos parâmetros elétricos dos circuitos, as demandas dos nós e os limites de corrente se encontram na Tabela 38 no Anexo A.

Figura 2 – Sistema teste radial de 43 nós.



Fonte: Elaboração do autor.

A Tabela 1 apresenta os resultados das magnitudes e os ângulos das tensões dos nós, e a Tabela 2 apresenta as magnitudes de corrente pelos circuitos após a convergência do solver *KNITRO*, utilizando o modelo (11)-(17) para o cálculo do ponto de operação dos SDMT. A solução ótima local foi encontrada pelo solver com um erro de factibilidade de $5,80 \times 10^{-8}$ em $0,16 \text{ s}$ ¹.

Para calcular os ângulos das tensões nos nós utiliza-se a equação (18), gerada a partir das equações (5)-(6).

$$\theta_{ij} = \frac{180^\circ}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{X_{ij}P_{ij} - R_{ij}Q_{ij}}{V_j^2 + R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}} \right) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (18)$$

Considerando os ângulos dos nós fonte iguais a zero ($\theta_1 = \theta_{43} = 0^\circ$) e a radialidade da rede, é possível calcular algebricamente os ângulos dos nós em função das diferenças angulares em todos os ramos obtidos com (18).

¹ Todas as análises computacionais apresentadas neste capítulo forem feitas numa estação de trabalho com processador Intel® Core™ i5-4570.

Tabela 1 – Magnitudes e ângulos das tensões do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com *KNITRO*.

Nó [i]	V_i [p.u.]	θ_i [graus]	Nó [i]	V_i [p.u.]	θ_i [graus]	Nó [i]	V_i [p.u.]	θ_i [graus]
1	1,0000	0,0000	16	0,9859	-0,5274	31	1,0000	0,0000
2	1,0000	0,0000	17	0,9929	-0,2618	32	0,9929	-0,2618
3	0,9913	-0,3278	18	0,9806	-0,7291	33	0,9894	-0,3942
4	0,9913	-0,3278	19	0,9806	-0,7291	34	0,9894	-0,3942
5	0,9843	-0,5943	20	0,9806	-0,7291	35	0,9894	-0,3942
6	0,9843	-0,5943	21	0,9754	-0,9326	36	0,9788	-0,8869
7	0,9843	-0,5943	22	0,9754	-0,9326	37	0,9788	-0,8869
8	0,9790	-0,7966	23	0,9754	-0,9326	38	0,9788	-0,8869
9	0,9773	-0,8645	24	0,9754	-0,9326	39	0,9718	-1,1602
10	0,9790	-0,7966	25	0,9719	-1,0700	40	0,9718	-1,1602
11	0,9755	-0,9327	26	0,9719	-1,0700	41	0,9683	-1,2983
12	0,9755	-0,9327	27	0,9719	-1,0700	42	0,9683	-1,2983
13	0,9738	-1,0011	28	0,9701	-1,1389	43	1,0000	0,0000
14	0,9738	-1,0011	29	0,9701	-1,1389			
15	0,9859	-0,5274	30	0,9701	-1,1289			

Fonte: Elaboração do autor.**Tabela 2** – Magnitudes das correntes do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com *KNITRO*.

de [i]	para [j]	I_{ij} [A]	de [i]	para [j]	I_{ij} [A]	de [i]	para [j]	I_{ij} [A]
2	3	65,28	20	21	39,49	38	39	52,78
3	4	0,00	21	22	0,00	39	40	0,00
3	5	52,37	21	23	0,00	39	41	26,44
6	7	0,00	24	25	26,37	41	42	0,00
6	8	39,37	25	27	0,00	1	2	65,28
8	9	13,10	25	26	0,00	5	6	52,37
10	11	26,27	25	28	13,19	8	10	26,27
11	12	0,00	28	29	0,00	17	32	-52,47
11	13	13,15	28	30	0,00	18	20	39,49
13	14	0,00	31	32	52,47	21	24	26,37
15	16	0,00	31	33	78,74	33	35	78,94
15	17	-52,47	33	34	0,00	36	38	52,78
15	18	39,49	35	36	78,94	43	31	144,21
18	19	0,00	36	37	0,00			

Fonte: Elaboração do autor.

Nenhuma das restrições operativas foi violada e toda a demanda foi atendida. As perdas de potências ativa são $P_{\text{perdas}} = 31,57 \text{ kW}$ (aproximadamente 1,9% da potência total fornecida pelas fontes) e a tensão mínima se encontra no nó 42, com uma magnitude de tensão de $0,9683 \text{ p.u.}$ A Tabela 3 resume as potências ativa e reativa fornecidas pelas fontes.

Tabela 3 – Fluxos de potência ativa e reativa nas fontes do sistema da Fig. 2 obtidas com *KNITRO*.

Alimentador 1 (nó 1)		Alimentador 2 (nó 43)	
P_1^S	Q_1^S	P_{43}^S	Q_{43}^S
[kW]	[kVAr]	[kW]	[kVAr]
508,64	108,63	1122,93	242,90

Fonte: Elaboração do autor.

Embora o solver de PNL, *KNITRO*, se mostra eficiente para resolver o caso teste particular da Fig. 2; em sistemas de maior porte o solver pode não encontrar uma solução factível num tempo computacional razoável. Além disso, para resolver diferentes problemas associados ao planeamento da operação, expansão e investimento dos SDEE é necessário acrescentar novas restrições ao modelo (11)-(17), que podem inserir variáveis inteiras, as quais tornam o modelo num problema de Programação Não Linear Inteira-Mista (PNLIM) que o *KNITRO* não resolve, e cuja solução ótima não é garantida por nenhuma metodologia de otimização matemática existente até a data deste trabalho.

Porém, através de uma modificação simples da restrição (15), a única que torna o modelo não linear, é possível transformar o modelo (11)-(17) num problema de Programação Cônica de Segunda Ordem (PCSO), convexo, e cuja solução ótima é garantida pelos solvers de otimização cônica comerciais.

2.3 MODELO DE PROGRAMAÇÃO CÔNICA DE SEGUNDA ORDEM DO PONTO DE OPERAÇÃO DOS SDMT EM ESTADO ESTACIONÁRIO

Os modelos de Programação Cônica de Segunda Ordem (PCSO) são problemas de otimização convexa dados pela forma geral (19).

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \mathbf{f}^T \mathbf{x} \\ \text{s.a.} \\ \|\mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{b}_i\|_2 \leq \mathbf{c}_i^T \mathbf{x} + d_i \quad i = 1 \dots m \\ \mathbf{F} \mathbf{x} = \mathbf{g} \end{array} \right. \quad (19)$$

Onde $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ são as variáveis de decisão, $\mathbf{A}_i \in \mathbf{R}^{n_i \times n}$ é a matriz de coeficientes da i -ésima restrição cônica e $\mathbf{F} \in \mathbf{R}^{p \times n}$ é a matriz de coeficientes do sistema linear de equações. O operador $\|\mathbf{x}\|_2$ é a norma euclidiana de $\mathbf{x}$.

Todo sistema de equações da forma (20) representa um conjunto de restrições cônicas de segunda ordem que geram um cone de n_i dimensões. Se $c_i = 0, \forall i = 1 \dots m$, então o modelo se transforma em um problema de Programação Quadrática com Restrições Quadráticas. Por outro

lado, se $\mathbf{A}_i = \mathbf{0}$, $\forall i = 1 \dots m$, então (19) é reduzido a um problema de Programação Linear.

$$\|\mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{b}_i\|_2 \leq \mathbf{c}_i^T \mathbf{x} + d_i \quad i = 1 \dots m \quad (20)$$

Os problemas de PCSO são convexos (BOYD; VANDENBERGHE, 2004, p. 156), e sua solução ótima pode ser obtida eficientemente utilizando solvers comerciais de otimização que resolvam modelos de PCSO como *CPLEX*.

Seja $i = 1$ em (20), $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, $\mathbf{A}_1 = \mathbf{I}$, $\mathbf{b}_1 = \mathbf{0}$, $d_1 = 0$ e $\mathbf{c}_1^T = [1, 1, 0, \dots, 0]$, então:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{I}\mathbf{x} + \mathbf{0}\|_2 &\leq \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \\ \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} &\leq x_1 + x_2 \\ x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 &\leq (x_1 + x_2)^2 \\ 2x_1x_2 &\geq \sum_{j=3}^n x_j^2 \quad x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

A expressão (21) só pode ser satisfeita se $x_1, x_2 \geq 0$, pois o lado direito sempre é positivo. Desse modo, uma restrição que tenha a forma (21) é uma equação cônica de segunda-ordem.

Seja o modelo para o cálculo do ponto de operação dos SDMT das equações (11)-(17), que constitui um modelo de PNL, não convexo. Garante-se a convexidade do modelo através da relaxação da igualdade na restrição (15) numa desigualdade dada pela expressão (22).

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{sqr}} \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (22)$$

A expressão (22) é um conjunto de equações cônicas de segunda ordem, com a mesma estrutura de (21), para todos os ramos da rede. Lembre-se que as variáveis V_j^{sqr} e I_{ij}^{sqr} são maiores ou iguais a zero, como indicado pelas restrições operacionais (16) e (17).

O novo problema dado pelas equações (11)-(14), (22) e (16)-(17) é um problema de PCSO convexo, e sua solução ótima, caso o conjunto de restrições em (22) estejam todas ativas, é igual ao problema original das equações (11)-(17). O modelo (11)-(14), (22) e (16)-(17) pode ser resolvido eficientemente através de ferramentas clássicas de otimização matemática.

Se o modelo de PCSO das equações (11)-(14), (22) e (16)-(17) tem solução factível, e as variáveis duais relacionadas com o conjunto de restrições em (22) são maiores ao zero, então a solução do modelo de PCSO é igual à solução ótima do modelo de PNL original, como é demonstrado por Franco, Rider e Romero (2014), no problema da expansão ótima dos SDEE.

Para demonstrar as vantagens da formulação cônica, ela será utilizada novamente para calcular o ponto de operação do sistema teste de 43 nós da Fig. 2, através do solver de otimização *CPLEX* (ILOG INC., 2008) e a linguagem de programação matemática *AMPL* (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003) para descrever o modelo.

2.3.1 APLICAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO DO PONTO DE OPERAÇÃO UTILIZANDO O SOLVER DE PCSO *CPLEX*: SISTEMA TESTE DE 43 NÓS

Os dados da rede são os mesmos empregados na simulação anterior, as demandas dos nós e os limites operacionais da rede encontram-se na Tabela 38 no Anexo A. Os valores constantes do sistema são: $V^{\text{nom}} = 7,967 \text{ kV}$, $\underline{V} = 0,93V^{\text{nom}}$, $\bar{V} = V^{\text{nom}}$ e $c^{\text{lss}} = \$1/\text{kW}$.

A Tabela 4 apresenta os resultados das magnitudes de tensão dos nós e os erros relativos entre os mesmos resultados obtidos com a formulação não-linear original da Tabela 1. A Tabela 5 mostra as magnitudes das correntes pelos circuitos e os erros relativos comparados com as correntes da Tabela 2. Finalmente, a Tabela 6 resume as potências ativa e reativa fornecidas pelas subestações. A solução ótima global foi obtida pelo *CPLEX* em 0,48 s.

Tabela 4 – Magnitudes das tensões nos nós do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com *CPLEX* e os erros relativos.

Nó [i]	V_i [kV]	ϵ_r [kV]	Nó [i]	V_i [kV]	ϵ_r [kV]	Nó [i]	V_i [kV]	ϵ_r [kV]
1	1,0000	0,0000	16	0,9859	$1,49 \times 10^{-9}$	31	1,0000	$5,83 \times 10^{-12}$
2	1,0000	$5,44 \times 10^{-12}$	17	0,9929	$7,94 \times 10^{-10}$	32	0,9929	$7,49 \times 10^{-10}$
3	0,9913	$4,98 \times 10^{-12}$	18	0,9806	$2,06 \times 10^{-9}$	33	0,9894	$3,99 \times 10^{-10}$
4	0,9913	$5,33 \times 10^{-10}$	19	0,9806	$2,09 \times 10^{-9}$	34	0,9894	$4,35 \times 10^{-10}$
5	0,9843	$8,95 \times 10^{-10}$	20	0,9806	$2,06 \times 10^{-9}$	35	0,9894	$3,99 \times 10^{-10}$
6	0,9843	$8,95 \times 10^{-10}$	21	0,9754	$2,56 \times 10^{-9}$	36	0,9788	$6,88 \times 10^{-10}$
7	0,9843	$9,30 \times 10^{-10}$	22	0,9754	$2,60 \times 10^{-9}$	37	0,9788	$7,23 \times 10^{-10}$
8	0,9790	$1,18 \times 10^{-9}$	23	0,9754	$2,60 \times 10^{-9}$	38	0,9788	$6,88 \times 10^{-10}$
9	0,9773	$1,22 \times 10^{-9}$	24	0,9754	$2,56 \times 10^{-9}$	39	0,9718	$8,67 \times 10^{-10}$
10	0,9790	$1,18 \times 10^{-9}$	25	0,9719	$2,89 \times 10^{-9}$	40	0,9718	$9,02 \times 10^{-10}$
11	0,9755	$1,36 \times 10^{-9}$	26	0,9719	$2,92 \times 10^{-9}$	41	0,9683	$9,51 \times 10^{-10}$
12	0,9755	$1,40 \times 10^{-9}$	27	0,9719	$2,92 \times 10^{-9}$	42	0,9683	$9,85 \times 10^{-10}$
13	0,9738	$1,45 \times 10^{-9}$	28	0,9701	$3,04 \times 10^{-9}$	43	1,0000	0,0000
14	0,9738	$1,48 \times 10^{-9}$	29	0,9701	$3,08 \times 10^{-9}$			
15	0,9859	$1,45 \times 10^{-9}$	30	0,9701	$3,08 \times 10^{-9}$			

Fonte: Elaboração do autor.

O ponto de operação gerado pelo modelo de PCSO (11)-(14), (22) e (16)-(17) utilizando *CPLEX* é aproximadamente igual ao ponto gerado pelo solver de programação não-linear *KNITRO* do modelo original, como é demonstrado pelos erros relativos obtidos nas Tabelas 4 e 5.

Para valores pequenos de corrente nos ramos, $0 \leq |I_{ij}| \leq 1 \text{ A}$, o erro absoluto pode ser grande em comparação com a solução real do problema. Portanto, em cada solução obtida com o modelo de PCSO serão analisadas as restrições cônicas de segunda ordem da equação (22) para conferir se elas estão ativas em cada ramo da rede. Assim, o erro de aproximação do modelo de PCSO será avaliado segundo a expressão (23) para todos os casos testados doravante.

$$\epsilon_{\text{PCSO}} = \max_{ij \in \Omega_l} \left\{ \left| I_{ij}^* - \frac{\sqrt{P_{ij}^{*2} + Q_{ij}^{*2}}}{V_j^*} \right| \right\} \quad (23)$$

Tabela 5 – Magnitudes das correntes do sistema teste de 43 nós da Fig. 2 obtidas com *CPLEX* e os erros relativos.

de [i]	para [j]	I_{ij} [A]	ε_r [A]	de [i]	para [j]	I_{ij} [A]	ε_r [A]	de [i]	para [j]	I_{ij} [A]	ε_r [A]
2	3	65,28	$9,69 \times 10^{-6}$	20	21	39,49	$1,39 \times 10^{-5}$	38	39	52,78	$9,36 \times 10^{-6}$
3	4	0,03	0,0322	21	22	0,03	0,0312	39	40	0,03	0,0325
3	5	52,37	$1,08 \times 10^{-5}$	21	23	0,03	0,0312	39	41	26,44	$1,72 \times 10^{-5}$
6	7	0,03	0,0330	24	25	26,37	$1,08 \times 10^{-5}$	41	42	0,03	0,0324
6	8	39,37	$1,29 \times 10^{-5}$	25	27	0,03	0,0315	1	2	65,28	0,0064
8	9	13,10	$1,03 \times 10^{-4}$	25	26	0,03	0,0315	5	6	52,37	0,0093
10	11	26,27	$1,08 \times 10^{-5}$	25	28	13,19	$3,54 \times 10^{-5}$	8	10	26,27	0,0190
11	12	0,03	0,0325	28	29	0,03	0,0312	17	32	-52,47	0,0095
11	13	13,15	$3,48 \times 10^{-5}$	28	30	0,03	0,0312	18	20	39,50	0,0122
13	14	0,03	0,0326	31	32	52,47	$1,29 \times 10^{-5}$	21	24	26,37	0,0177
15	16	0,02	0,0177	31	33	78,74	$7,94 \times 10^{-6}$	33	35	78,94	0,0328
15	17	-52,47	$1,25 \times 10^{-5}$	33	34	0,03	0,0316	36	38	52,78	0,0091
15	18	39,49	$1,47 \times 10^{-5}$	35	36	78,94	$7,22 \times 10^{-6}$	43	31	144,21	0,0028
18	19	0,03	0,0322	36	37	0,03	0,0322				

Fonte: Elaboração do autor.**Tabela 6** – Fluxos de potência ativa e reativa nas fontes do sistema da Fig. 2 obtidas com *CPLEX*.

Alimentador 1 (nó 1)		Alimentador 2 (nó 43)	
P_1^S [kW]	Q_1^S [kVAr]	P_{43}^S [kW]	Q_{43}^S [kVAr]
508,64	108,63	1122,93	242,90

Fonte: Elaboração do autor.

Onde I_{ij}^* , P_{ij}^* , Q_{ij}^* e V_j^* são as magnitudes das correntes, potências ativas, potências reativas pelos ramos e as tensões dos nós respectivamente, obtidas pela solução do modelo de PCSO. No caso do sistema teste de 43 nós da Fig. 2, o erro de aproximação do modelo PCSO aplicando a equação (23) foi de $\varepsilon_{PCSO} = 0,0328$ A.

2.4 MODELO DE PCSO APLICADO AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT

Atualmente existem solvers comerciais para resolver eficientemente problemas de PCSO com variáveis inteira-mistas (PCSOIM) utilizando algoritmos de busca em árvore como *Branch & Bound* (B&B). Logo, o modelo de PCSO para o cálculo do ponto de operação dos SDMT, dado pelas equações (11)-(14), (22) e (16)-(17) pode ser ampliado para resolver problemas mais complexos e interessantes para as ED, relacionados com a otimização da operação, a expansão e o investimentos nos SDMT, que normalmente inserem variáveis inteiras de decisão nos modelos matemáticos.

Um dos problemas clássicos da otimização das redes elétricas é a reconfiguração ótima dos SDMT.

O problema da reconfiguração ótima dos sistemas de distribuição de energia elétrica (RSD) pode ser considerado como um problema de planejamento da operação das chaves alocadas ao longo dos alimentadores. Dependendo dos tipos, quantidade e a locação das chaves, a comutação é aproveitada pelas ED para vários propósitos, como: o confinamento e isolamentos de faltas em zonas específicas do alimentador que, em coordenação com os religadores, melhora a confiabilidade da rede; a RSD também pode ser utilizada para diminuir as perdas de potência ativa, fazer balanço de fluxo de potência pelos ramos, desconectar e transferir carga entre alimentadores diferentes para propósitos de atendimento em contingências e/ou restauração do sistema. Entretanto, existem restrições técnicas e operacionais que os operadores da rede devem respeitar na hora de reconfigurar a topologia da rede. Além das restrições relacionadas com os limites de tensão nos nós e da corrente pelos ramos, a maioria das redes de distribuição de energia elétrica operam radialmente por razões técnicas, tais como, a simplificação da coordenação de isolamento e proteção e a redução das correntes de curto-circuito em caso de falta.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos para resolver o problema da reconfiguração ótima com o objetivo de diminuir as perdas ativas nas redes de distribuição a partir do primeiro trabalho de Merlin e Back (1975). Encontram-se na literatura especializada várias propostas de modelagem e solução da RSD, onde a maioria pode ser classificada entre técnicas exatas de otimização de modelos aproximados e métodos heurísticos e meta-heurísticos, devido à natureza combinatória das variáveis de decisão e a complexidade dos modelos matemáticos².

Porém, a partir da contribuição de Lavorato et al. (2012), foi possível considerar a radialidade como uma restrição analítica explícita na construção dos modelos matemáticos de otimização que envolvem os SDMT.

Pela teoria de grafos pode-se comparar os SDEE com uma árvore conexa sem ciclos. A árvore de um grafo é um sub-grafo conexo com $m - 1$ arcos onde m representa o número de nós na rede (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2009). Logo, um sistema de distribuição com nb nós é radial se satisfaz as seguintes condições:

C1. A configuração deve apresentar $nb - 1$ circuitos (ou ramos).

C2. A configuração deve gerar uma topologia de árvore totalmente conexa.

Para um sistema com chaves em alguns ramos, a condição C1 é satisfeita através da seguinte expressão analítica:

$$|\Omega_l| + \sum_{ij \in \Omega_{ch}} y_{ij} = |\Omega_b| - 1 \quad (24)$$

² Uma revisão geral das propostas mais relevantes para a solução do problema da RSD até o ano 2013 foi feita por Narimani et al. (2014).

Onde Ω_b e Ω_l representam o conjunto de nós e ramos do sistema, respectivamente. Ω_{ch} é o conjunto de chaves na rede e y_{ij} é a variável de decisão binária que representa o estado da chave ij . Se $y_{ij} = 1$, então chave ij está fechada, caso contrário a chave ij está aberta. O operador de cardinalidade $|\Omega|$ calcula o número de elementos do conjunto Ω .

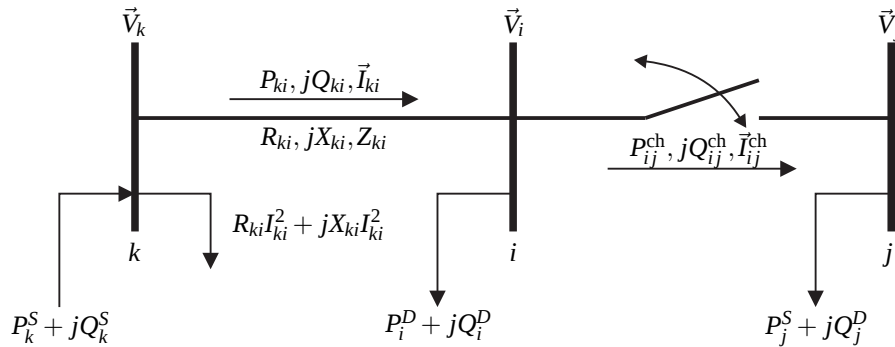
Para satisfazer a condição C2 deve existir um caminho físico entre a fonte e todos os nós de carga do alimentador. As restrições de balanço de fluxo de potência garantem C2 se os fluxos de potência pelas chaves que ficam fechadas também são considerados, como é mostrado pela Fig. 3, onde as chaves fechadas são representadas como circuitos curtos com impedância muito pequena. Portanto, as restrições de balanço de potência (12) e (13) são modificadas pelas restrições (25) e (26) que incluem os fluxos de potência ativa P_{ij}^{ch} e reativa Q_{ij}^{ch} pelas chaves fechadas.

$$\sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij} + R_{ij} I_{ij}^{sqf}) + \sum_{ji \in \Omega_{ch}} P_{ji}^{ch} - \sum_{ij \in \Omega_{ch}} P_{ij}^{ch} + P_i^S = P_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (25)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij} + X_{ij} I_{ij}^{sqf}) + \sum_{ji \in \Omega_{ch}} Q_{ji}^{ch} - \sum_{ij \in \Omega_{ch}} Q_{ij}^{ch} + Q_i^S = Q_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (26)$$

Concluindo, nos SDMT com chaves de interconexão, as restrições (24), (25) e (26) são suficientes e necessárias para gerar uma configuração radial conexa após a reconfiguração.

Figura 3 – Sistema que exemplifica a operação das chaves de interconexão nos SDMT.



Fonte: Elaboração do autor.

No caso de considerar mais de uma subestação ou diferentes alimentadores no modelo, pode-se generalizar a restrição (24) para construir $|\Omega_b^S|$ alimentadores que conectam $|\Omega_b| - |\Omega_b^S|$ nós de carga utilizando a expressão (27).

$$|\Omega_l| + \sum_{ij \in \Omega_{ch}} y_{ij} = |\Omega_b| - |\Omega_b^S| \quad (27)$$

Finalmente, o modelo matemático que formula o processo de reconfiguração dos SDMT para minimizar as perdas de potência ativa, considerando condições de radialidade e limites operativos, é apresentado em (28)-(34).

$$\min c^{\text{ls}} \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}} + R^{\text{ch}} \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \right) \quad (28)$$

Sujeito a:

$$(14)-(17) \text{ e } (25)-(27) \quad (29)$$

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} = \left(P_{ij}^{\text{ch}} \right)^2 + \left(Q_{ij}^{\text{ch}} \right)^2 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (30)$$

$$\left| V_j^{\text{sqr}} - V_i^{\text{sqr}} \right| \leq \left(\bar{V}^2 - \underline{V}^2 \right) (1 - y_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (31)$$

$$\left| P_{ij}^{\text{ch}} \right| \leq \left(\bar{V} I_{ij}^{\text{ch}} \right) y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (32)$$

$$\left| Q_{ij}^{\text{ch}} \right| \leq \left(\bar{V} I_{ij}^{\text{ch}} \right) y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (33)$$

$$0 \leq I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \leq \left(\bar{I}_{ij}^{\text{ch}} \right)^2 y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (34)$$

A função objetivo (28) minimiza as perdas totais de potência ativa nos circuitos e, para melhorar a precisão do modelo cônico, também minimiza a corrente pelas chaves, multiplicada por uma resistência R^{ch} muito pequena. A restrição (30) é equivalente à restrição (5) para o conjunto das chaves na rede. A restrição (31) controla o valor das magnitudes de tensão entre os nós das chaves; se a chave está fechada ($y_{ij} = 1$) as magnitudes de tensão entre os nós ij são iguais; caso a chave ij esteja aberta ($y_{ij} = 0$) as magnitudes de tensão podem variar livremente entre seus limites de tensão. As restrições (32), (33) e (34) definem os limites de potência ativa, reativa e fluxo de corrente permitidos através das chaves caso estarem fechadas ($y_{ij} = 1$); se as chaves estão abertas as três grandezas são zero. Outros autores já comprovaram a capacidade do modelo (28)-(34) para encontrar a topologia ótima do sistema que minimiza as perdas em função do estado de operação das chaves, utilizando técnicas heurísticas modernas ou linearizando o modelo, e utilizando solvers de Programação Linear para encontrar soluções bem aproximadas ao ótimo global do problema (LAVORATO et al., 2012; BORGES; FRANCO; RIDER, 2014).

Como já foi mencionado, o modelo (28)-(34) origina um problema de PNLIM, não convexo, devido aos produtos e quadrados das variáveis nas restrições (15) e (30) e a variável binária y_{ij} . No entanto, pode-se aplicar a mesma relaxação cônica da Seção 2.3 para garantir a convexidade do problema da RSD mediante a relaxação da igualdade na restrição (15) e (30), em duas desigualdades dadas pelas expressões (35) e (36).

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{sqr}} \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (35)$$

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \geq \left(P_{ij}^{\text{ch}} \right)^2 + \left(Q_{ij}^{\text{ch}} \right)^2 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (36)$$

O novo problema de RSD se transforma em um modelo de PCSOIM, convexa e sua solução ótima é igual ao problema original das equações (28)-(34), se as restrições (35) e (36) ficam ativas na solução final. Logo, pode ser resolvido eficientemente mediante solvers de otimização capazes de resolver modelos matemáticos de PCSOIM como o *CPLEX*.

A seguir, é apresentado o modelo de PCSOIM completo, dado pelo sistema de equações (37), para resolver o problema da RSD com o propósito de facilitar sua análise e referência posterior. O modelo de RSD cônico será utilizado para construir a formulação do problema da restauração dos SDMT na seção 2.5.

$$\min c^{\text{ls}} \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}} + R^{\text{ch}} \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \right) \quad (37a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij} + R_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}}) + \sum_{ji \in \Omega_{\text{ch}}} P_{ji}^{\text{ch}} - \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} P_{ij}^{\text{ch}} + P_i^S = P_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (37b)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij} + X_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}}) + \sum_{ji \in \Omega_{\text{ch}}} Q_{ji}^{\text{ch}} - \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} Q_{ij}^{\text{ch}} + Q_i^S = Q_i^D \quad \forall i \in \Omega_b \quad (37c)$$

$$V_i^{\text{sqr}} - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) - Z_{ij}^2 I_{ij}^{\text{sqr}} - V_j^{\text{sqr}} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (37d)$$

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{sqr}} \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (37e)$$

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \geq (P_{ij}^{\text{ch}})^2 + (Q_{ij}^{\text{ch}})^2 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (37f)$$

$$|V_j^{\text{sqr}} - V_i^{\text{sqr}}| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2) (1 - y_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (37g)$$

$$|P_{ij}^{\text{ch}}| \leq (\bar{V} I_{ij}^{\text{ch}}) y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (37h)$$

$$|Q_{ij}^{\text{ch}}| \leq (\bar{V} I_{ij}^{\text{ch}}) y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (37i)$$

$$0 \leq I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \leq (\bar{I}_{ij}^{\text{ch}})^2 y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (37j)$$

$$|\Omega_l| + \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} y_{ij} = |\Omega_b| - |\Omega_b^S| \quad (37k)$$

$$0 \leq I_{ij}^{\text{sqr}} \leq \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (37l)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{\text{sqr}} \leq \bar{V}^2 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (37m)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (37n)$$

2.5 MODELO DE PCSOIM DO PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT

Após a ocorrência de uma falta nos SDMT, esquemas de restauração inteligentes são utilizados com o objetivo de restabelecer o serviço de energia elétrica nas zonas da rede que foram desconectadas devido a uma falta em outras zonas da rede, através da operação dos equipamentos de manobra (chaves ou disjuntores) alocados ao longo dos alimentadores. Graças às ações de restauração dos SDMT (ReSD), a topologia da rede pode ser alterada para isolar a zona afetada diretamente pela falta permanente, e a maior quantidade possível da demanda pode ser restabelecida através de transferência da carga entre os alimentadores, desde que sejam respeitados os limites de tensão nos nós, os limites de corrente pelos circuitos, e as capacidades máximas das subestações. Denomina-se zona da carga um trecho da rede elétrica conexa, radial e delimitado pelas chaves ou disjuntores.

A reconfiguração só ocorrerá se, e somente se, a rede elétrica estiver em condições de permitir uma operação viável da nova configuração. Caso a demanda a ser transferida seja tal que não possa ser suprida totalmente pelo alimentador ou pela subestação que recebe a nova demanda, o modelo de ReSD deve gerar soluções que desligam inteligentemente zonas de carga, de forma a adequar a demanda elétrica à capacidade ótima momentânea de fornecimento de energia, considerando que a qualidade da resposta do modelo de ReSD piora em função do número de usuários e das zonas de carga desatendidas.

Dentro da filosofia das redes inteligentes ou Smart Grids, é desejável que as operações de restabelecimento sejam feitas de forma automatizada, de maneira a que as contingências sejam atendidas rapidamente, sem prejuízos significativos para as ED, e mantendo os níveis de confiabilidade dentro dos limites estabelecidos. O conjunto de tecnologias que fazem possível a automação da restauração é chamada “*Self-healing*” (AGUERO, 2012), pois as ações que aliviam (*heal*) a rede são feitas por algoritmos inteligentes que conseguem otimizar as ações de controle sob as chaves de interconexões, considerando as condições operativas da rede, para levar o sistema até um ponto de restabelecimento factível em pouco tempo. Outra característica interessante dos esquemas de *Self-healing* nas redes inteligentes é o corte de carga estratégico nos nós, ou seja, a possibilidade de desligar remotamente determinada porcentagem de carga não prioritária para diminuir a quantidade de zonas desenergizadas após a restauração da rede.

Nesta seção é apresentado um modelo matemático para restaurar os SDMT após a localização de uma falta em alguma zona da rede, considerando a possibilidade de ter corte de carga controlado nos nós. O modelo proposto pode ser utilizado num esquema de *self-healing* como agente de decisão, dentro de um sistema maior de localização, identificação de faltas e restauração do sistema aplicado às redes de distribuição.

Fica claro que o problema da ReSD precisa reconfigurar os SDMT para mudar a topologia da rede, portanto o modelo de PCSOIM para a RSD apresentado em (37) é a base da formulação do modelo da ReSD. A seguir é descrito o modelo matemático de PCSOIM para o problema da restauração com corte de carga nos nós, e considerando que o SDMT está dividido em zonas de carga delimitadas pelas chaves ou disjuntores alocadas nas fronteiras das zonas.

$$\min \sum_{z \in \Omega_z} c_z^z (1 - x_z) + \sum_{i \in \Omega_b} c_i^l P_i^D r_i + c^{lss} \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^{sqr} + R^{ch} \sum_{ij \in \Omega_{ch}} I_{ij}^{ch, sqr} \right) + c^{ch} \sum_{\substack{ij \in \Omega_{ch} \\ s_{ij}^{ini}=1}} (1 - y_{ij}) + c^{ch} \sum_{\substack{ij \in \Omega_{ch} \\ s_{ij}^{ini}=0}} y_{ij} \quad (38)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij} + R_{ij} I_{ij}^{sqr}) + \sum_{ji \in \Omega_{ch}} P_{ji}^{ch} - \sum_{ij \in \Omega_{ch}} P_{ij}^{ch} + P_i^S = P_i^D (x_{z_i} - r_i) \quad \forall i \in \Omega_b \quad (39)$$

$$\sum_{ji \in \Omega_l} Q_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij} + X_{ij} I_{ij}^{sqr}) + \sum_{ji \in \Omega_{ch}} Q_{ji}^{ch} - \sum_{ij \in \Omega_{ch}} Q_{ij}^{ch} + Q_i^S = Q_i^D (x_{z_i} - r_i) \quad \forall i \in \Omega_b \quad (40)$$

$$V_i^{\text{sqr}} - 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) - Z_{ij}^2 I_{ij}^{\text{sqr}} - V_j^{\text{sqr}} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (41)$$

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{sqr}} \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (42)$$

$$0 \leq r_i \leq \bar{r}_i x_{\hat{z}_i} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (43)$$

$$V_j^{\text{sqr}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \geq (P_{ij}^{\text{ch}})^2 + (Q_{ij}^{\text{ch}})^2 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (44)$$

$$|V_j^{\text{sqr}} - V_i^{\text{sqr}}| \leq \bar{V}^2 (1 - y_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (45)$$

$$0 \leq I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \leq (\bar{I}_{ij}^{\text{ch}})^2 y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (46)$$

$$|P_{ij}^{\text{ch}}| \leq (\bar{V} \bar{I}_{ij}^{\text{ch}}) y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (47)$$

$$|Q_{ij}^{\text{ch}}| \leq (\bar{V} \bar{I}_{ij}^{\text{ch}}) y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (48)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} x_{\hat{z}_{ij}} + \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} y_{ij} = \sum_{i \in \Omega_b} x_{\hat{z}_i} - |\Omega_b^s| \quad (49)$$

$$0 \leq I_{ij}^{\text{sqr}} \leq \bar{I}_{ij}^2 x_{\hat{z}_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (50)$$

$$\underline{V}^2 x_{\hat{z}_i} \leq V_i^{\text{sqr}} \leq \bar{V}^2 x_{\hat{z}_i} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (51)$$

$$(P_i^s)^2 + (Q_i^s)^2 \leq \bar{S}_i^2 \quad \forall i \in \Omega_b^s \quad (52)$$

$$\sum_{\substack{ij \in \Omega_{\text{ch}} \\ \hat{z}_i = z}} y_{ij} + \sum_{\substack{ji \in \Omega_{\text{ch}} \\ \hat{z}_j = z}} y_{ji} \geq x_z \quad \forall z \in \Omega_z \quad (53)$$

$$y_{ij} \leq x_{\hat{z}_i} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (54)$$

$$y_{ij} \leq x_{\hat{z}_j} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}} \quad (55)$$

$$y_{ij}, x_z \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}}, \forall z \in \Omega_z \quad (56)$$

Em (38)-(56), Ω_b^s , Ω_z e Ω_{ch} representam os conjuntos de fontes (ou subestações), zonas e chaves de interconexões, respectivamente. A função objetivo está formada por quatro critérios de otimização distintos e a solução final pode ser ajustada mudando os custos de cada um dos termos para priorizar uma ou outra solução. Assim, c_z^z representa o custo de corte de carga nas zonas, c_i^{ls} é o custo de corte de carga nos nós, c^{lss} é o custo das perdas de potência ativa na rede e c^{ch} é o custo da mudança de estado das chaves, respectivamente. r_i e $\bar{r}_i$ representam a porcentagem de corte de carga e o máximo corte de carga possível no nó i , respectivamente. Novamente, y_{ij} é a variável binária que determina o estado da chave ij . x_z é uma variável binária que representa o estado da zona z , se $x_z = 1$ a zona z está energizada, caso contrário se $x_z = 0$ a zona z está desenergizada. s_{ij}^{ini} representa o estado inicial da chave ij , se $s_{ij}^{\text{ini}} = 1$ então a chave ij está inicialmente fechada, caso contrário a chave ij está inicialmente aberta. P_{ij}^{ch} e Q_{ij}^{ch} representam o fluxo de potência ativa e reativa pela chave ij , respectivamente. $I_{ij}^{\text{ch,sqr}}$ representa o fluxo da magnitude de corrente pela chave ij ao quadrado. $\hat{z}_i$ e $\hat{z}_{ij}$ são funções que indicam a zona do nó i e a zona do circuito ij , respectivamente.

O primeiro termo da função objetivo (38) é a soma dos custos devido à desconexão das zonas de carga, o segundo é o custo total do corte de carga nos nós, o terceiro fornece o custo das perdas de potência ativa da rede elétrica e, o quarto e quinto termos representam o custo total das mudanças do estado das chaves. As restrições (39) e (40) fornecem o balanço de potência

ativa e reativa considerando que a demanda é limitada pelo estado da zona e a porcentagem de corte de carga no nó i . A restrição (41) representa a queda da magnitude de tensão entre duas barras consecutivas se a zona está energizada, caso contrário, todas as grandezas serão zero. A restrição cônica (42) calcula a magnitude do fluxo de corrente nos circuitos se a zona está energizada, caso contrário, todas as grandezas serão zero e a restrição ficará ativa. A restrição (43) canaliza a porcentagem de corte de carga permitido em cada nó da rede quando a zona está energizada, entre 0 e o máximo corte de carga $\bar{r}_i$ possível; para zonas desenergizadas o corte de carga é zero. A restrição cônica (44) é equivalente à restrição (42) para o cálculo das magnitudes do fluxo de corrente pelas chaves. A restrição (45) define o valor das magnitudes de tensão entre os nós de uma chave; se a chave está energizada ($y_{ij} = 1$) as magnitudes de tensão entre os nós são iguais; caso contrário, o valor absoluto da diferença entre as tensões dos nós de uma chave aberta ($y_{ij} = 0$) não pode ser maior que o valor da tensão máxima ao quadrado. As restrições (46), (47) e (48) representam o fluxo máximo de corrente, potência ativa e reativa permitidas nas chaves da rede elétrica quando elas estão energizadas; para chaves desenergizadas, as três grandezas são zero. A restrição (49), junto com as restrições de balanço de potência ativa e reativa (39) e (40), fornecem as condições necessárias e suficientes para garantir uma topologia final radial. Note que são apenas considerados os nós e ramos da rede que estão energizados, ou seja, $x_{\hat{z}_{ij}} = x_{\hat{z}_i} = x_{\hat{z}_j} = 1$. A restrição (50) representa o máximo fluxo de corrente permitido nos circuitos da rede elétrica para zonas energizadas; para zonas desenergizadas ($x_{\hat{z}_{ij}} = 0$) a magnitude do fluxo de corrente é zero. Os limites da magnitude de tensão são representados na restrição (51), note que se a zona está desenergizada ($x_{\hat{z}_i} = 0$) as magnitudes de tensão dos nós na zona z são zero. A restrição (52) representa a capacidade máxima das subestações existentes na rede elétrica. As restrições (53)-(55) são restrições auxiliares que ajudam a modelar o esquema de restauração, em função das variáveis binárias de decisão y_{ij} e x_z . Note que, a condição para que alguma zona não fique energizada ($x_z = 0$) é que nenhuma das chaves que deixam ou entram naquela zona esteja fechada, caso contrário, a zona ficará energizada. A restrição (56) define as características binárias das variáveis y_{ij} e x_z .

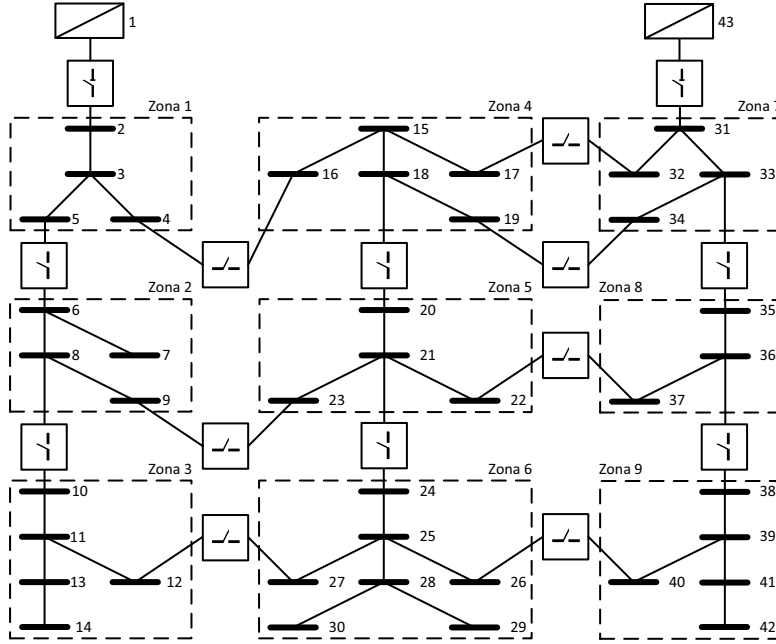
O modelo de ReSD (38)-(56) é um modelo de PCSOIM, convexo, e sua solução ótima é igual ao problema real da restauração se as restrições (42) e (44) ficam ativas para todos os ramos e as chaves da solução final. O modelo (38)-(56) pode ser resolvido eficientemente mediante solvers de otimização capazes de resolver modelos de PCSOIM como o *CPLEX*.

2.6 EXEMPLO DIDÁTICO DA UTILIZAÇÃO DO MODELO DE PCSOIM PARA A RESD

Para demonstrar a eficácia do modelo proposto, a rede elétrica fictícia mostrada na Fig. 4 é tomada como exemplo didático. A rede representa um SDEE com duas fontes de alimentação (subestações) nos nós 1 e 43, e 14 chaves de interconexões alocadas ao longo dos alimentadores. O sistema tem 43 nós, 31 ramos e 9 zonas de carga indicadas por linhas descontínuas. Note que as chaves interconectam diferentes zonas e cada uma delas é um trecho de rede radial. As constantes

do modelo matemático para o sistema da Fig. 4 são: $V^{\text{nom}} = 7,967 \text{ kV}$, $\underline{V} = 0,93V^{\text{nom}}$, $\overline{V} = V^{\text{nom}}$, $\bar{I}_{ij}^{\text{ch}} = 1000 \text{ A } \forall ij \in \Omega_{\text{ch}}$, $c_z^z = \$1000 \forall z \in \Omega_z$, $c_i^{\text{ls}} = \$1/\text{kW } \forall i \in \Omega_b$, $c^{\text{ch}} = \$0,2$ e $c^{\text{ls}} = \$1/\text{kW}$. Os dados dos nós e dos ramos encontram-se nas Tabelas 39 e 40, no Anexo A.

Figura 4 – Sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga.



Fonte: Elaboração do autor.

Os custos utilizados na função objetivo têm a finalidade de administrar a solução final segundo as exigências de quem utiliza o modelo para reconfigurar a rede. Esta aproximação é considerada uma metodologia simples de otimização multiobjetivo baseada em custos ou pesos numa única função objetivo (RAO, 2009, p. 781). Neste caso a principal prioridade é atender o maior número de zonas aplicando um custo de \$1000 por zona desligada, a segunda prioridade é penalizar, se é utilizado, o corte de carga nos nós aplicando um custo de \$1 por cada quilowatt desligado, a terceira prioridade é penalizar a operação das chaves utilizando um custo de \$0,2 por operação e, finalmente minimizar as perdas de potência ativa com um custo de \$1 por cada quilowatt de perdas.

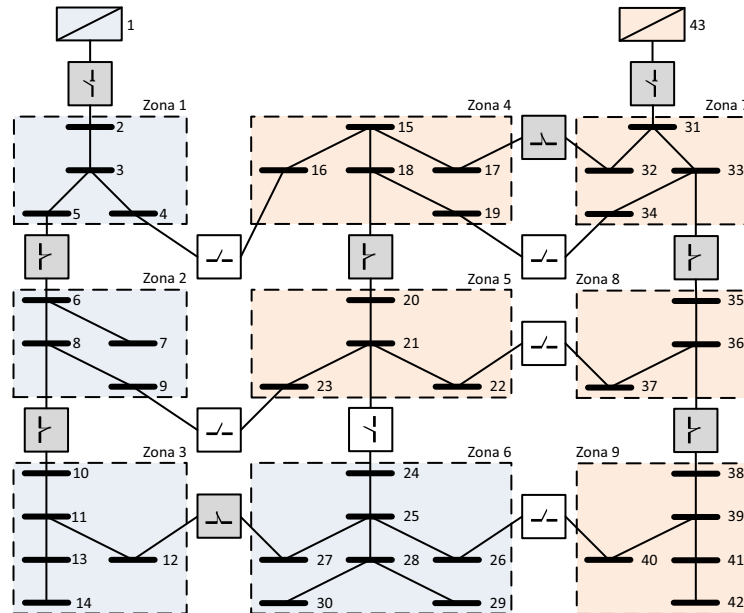
2.6.1 CONFIGURAÇÃO INICIAL DA REDE

Antes de fazer a restauração é preciso ter uma configuração inicial da rede didática da Fig. 4, a qual pode ser escolhida aleatoriamente. No entanto, é interessante utilizar a configuração radial que minimiza as perdas elétricas em função do estado de operação das chaves, como um ponto de operação em estado estacionário realista. Para isso, é possível utilizar o modelo de PCSOIM da RSD formulado em (37) agregando a restrição de capacidade das fontes. Contudo, o

mesmo modelo de ReSD das equações (38)-(56) pode ser utilizado para encontrar a configuração que minimiza as perdas elétricas, se o custo das perdas de energia é aumentado na função objetivo e nenhuma das zonas é desligada no modelo, ou seja, $x_z = 1 \forall z \in \Omega_z$.

Logo, a configuração que minimiza as perdas totais de potência ativa do sistema da Fig. 4 sem violar nenhuma das restrições operativas da rede, obtida com (38)-(56), é mostrada na Fig. 5. As chaves que ficaram fechadas estão de cor cinza e as chaves abertas estão de cor branco. A Tabela 7 mostra o relatório da operação das fontes para a configuração da Fig. 5. Note que dois alimentadores radiais independentes foram criados, e as zonas estão sombreadas segundo o alimentador ao qual pertencem, sendo azul para as zonas alimentadas pela fonte do nó 1 e vermelho para as zonas alimentadas pela fonte do nó 43.

Figura 5 – Configuração inicial com mínimas perdas do sistema didático de 43 nós.



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 7 – Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós da Fig. 5.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 43)		
P_1^S	Q_1^S	$\bar{S}_1$	P_{43}^S	Q_{43}^S	$\bar{S}_{43}$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kVA]
721,88	161,88	1000	915,85	195,85	1000

Fonte: Elaboração do autor.

As perdas de potência ativa totais da configuração da Fig. 5 são $P_{\text{perdas}} = 37,7\text{kW}$ (aproximadamente 2,4% da potência total fornecida pelas fontes) e a tensão mínima se encontra

no nó 30 com uma magnitude de tensão de $0,9518 p.u.$ A Tabela 7 mostra a operação das fontes para a topologia inicial da Fig. 5. Note que, se a restrição da capacidade máxima de fornecimento de potência aparente das fontes dada pelo conjunto de equações (52) for desconsiderada, então a topologia que minimiza as perdas de potência ativa do sistema da Fig. 4 seria diferente à topologia da Fig. 5 e as perdas seriam menores³. Porém, a potência aparente das fontes ultrapassariam os limites de geração estabelecidos na Tabela 39 no Anexo A.

O ponto de operação do sistema da Fig. 5 foi calculado pelo solver *CPLEX*, utilizando o modelo de PCSOIM da ReSD dado pelas equações (38)-(56), com um “gap” de convergência de 1% em 0,34 s e, com um erro de aproximação cônica, dada pela equação (23), de 0,055 A.

2.6.2 RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DIDÁTICO DE 43 NÓS DA FIG. 5. CASO 1: FALTA NA ZONA 6

Simula-se uma falta permanente em algum dos componentes da zona 6 do sistema da Fig. 5, formada pelos nós 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30; e que é atendida pela fonte do nó 1. O modelo de ReSD proposto desenergizou a zona com falta através da abertura de uma única chave entre os nós 12 e 27 como indicado na Fig. 6. A solução isolou efetivamente a zona 6, e nenhuma ação de transferência ou corte de carga foi necessária porque a zona 6 se encontra no extremo do alimentador da fonte 1. A operação das chaves que mudaram de estado na Fig. 6 é mostrada na Tabela 8.

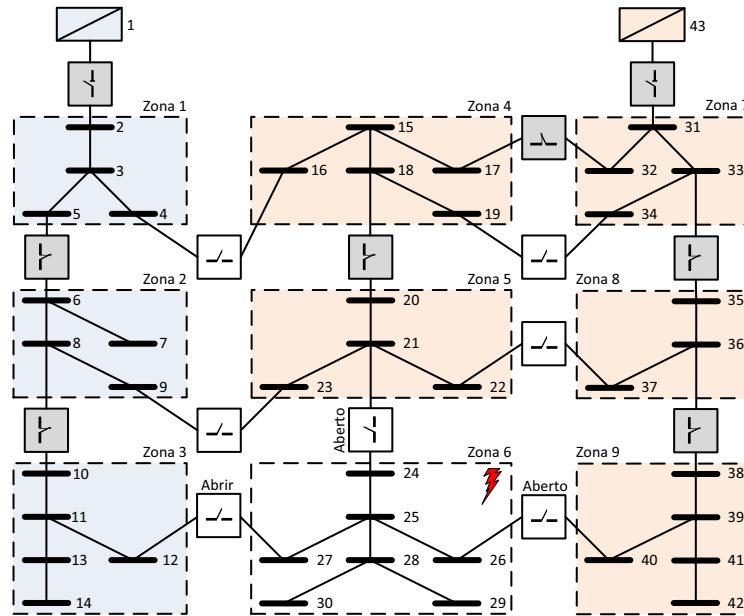
Tabela 8 – Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração da rede de 43 nós da Fig. 6.

de [i]	para [j]	Estado Inicial	Estado Final	P_{ij}^{ch} [kW]	Q_{ij}^{ch} [kVAr]	I_{ij}^{ch} [A]
12	27	Fechado	Aberto	0	0	0

Fonte: Elaboração do autor.

O estado de operação para a configuração da Fig. 6 apresenta perdas totais de potência ativa de 24,5 kW. A magnitude de tensão mínima é $0,9683 p.u.$ no nó 42. A zona 6 está totalmente desenergizada e o modelo não produz corte de carga adicional. O “gap” de convergência utilizado foi 1% e o solver *CPLEX* convergiu em 0,13 s. O erro de aproximação cônico foi de 0,052 A. A operação das fontes após a reconfiguração é resumida na Tabela 9.

³ As perdas do sistema da Fig. 4, sem considerar o conjunto de restrições (52), são $P_{perdas\ sem\ (52)} = 31,5\text{ kW}$ e as chaves que ficam abertas são as chaves entre os nós 4-16, 9-23, 12-27, 19-34, 22-37 e 26-40.

Figura 6 – Resultado da restauração da rede de 43 nós após a falta na zona 6.

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 9 – Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós após a restauração da Fig. 6.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 43)		
P_1^S	Q_1^S	$\bar{S}_1$	P_{43}^S	Q_{43}^S	$\bar{S}_{43}$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kVA]
508,63	108,63	1000	915,85	195,85	1000

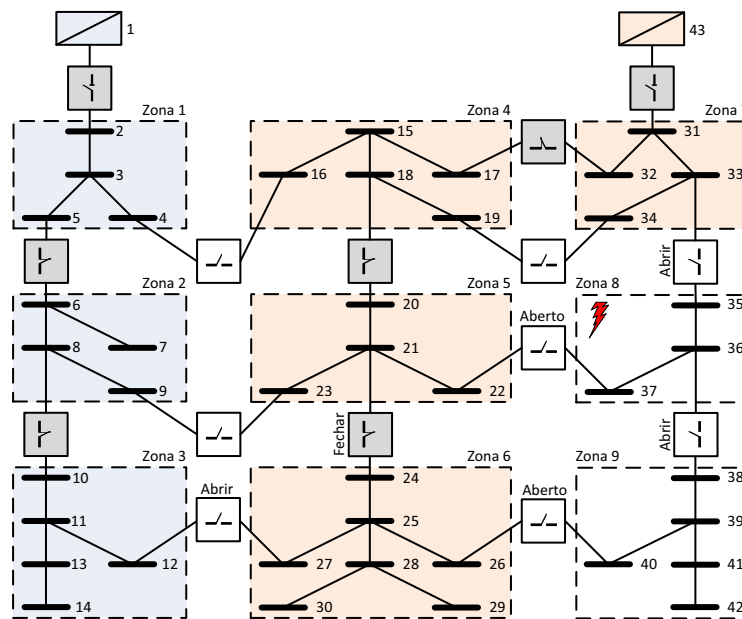
Fonte: Elaboração do autor.

2.6.3 RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DIDÁTICO DE 43 NÓS DA FIG. 5. CASO 2: FALTA NA ZONA 8 SEM CORTE DE CARGA

Simula-se uma falta permanente em algum componente da zona 8 do sistema da Fig. 5, formada pelos nós 35, 36 e 37; que é atendida pela fonte do nó 43. O modelo de ReSD proposto é modificado para desconsiderar o corte de carga controlado em todos os nós da rede, ou seja, $\bar{r}_i = 0, \forall i \in \Omega_b$, na restrição (43). A solução do modelo de ReSD desenergizou a zona com falta através da abertura da chave entre os nós 33 e 35 como mostrado na Fig. 7. A solução isolou efetivamente a zona 8 e também isolou a zona 9. Finalmente, o modelo transferiu a carga da zona 6 para o alimentador da fonte 1 através da abertura da chave entre os nós 12 e 27 e o fechamento da chave entre os nós 21 e 24. A operação das chaves que mudaram de estado na Fig. 7 é mostrada na Tabela 10.

O estado de operação para a configuração da Fig. 7 apresenta perdas totais de potência ativa de 17,2 kW. A magnitude de tensão mínima é 0,9701 p.u. no nó 30. As zona 8 e 9 ficaram totalmente desenergizadas o que constitui 37% da carga total da rede. As magnitudes dos fluxos de corrente nos circuitos, chaves e as fontes estão dentro de seus limites operativos. O “gap” de convergência utilizado foi 1% e o solver *CPLEX* convergiu em 0,23 s. O erro de aproximação cônico foi de 0,044 A. A operação das fontes após a reconfiguração é resumida na Tabela 11.

Figura 7 – Resultado da restauração da rede de 43 nós após a falta na zona 8, sem corte de carga.



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 10 – Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração da rede de 43 nós da Fig. 7.

de [i]	para [j]	Estado Inicial	Estado Final	P_{ij}^{ch} [kW]	Q_{ij}^{ch} [kVAr]	I_{ij}^{ch} [A]
12	27	Fechado	Aberto	0	0	0
21	24	Aberto	Fechado	200,78	40,78	26,38
33	35	Fechado	Aberto	0	0	0
36	38	Fechado	Aberto	0	0	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 11 – Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós após a restauração da Fig. 7.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 43)		
P_1^S	Q_1^S	$\bar{S}_1$	P_{43}^S	Q_{43}^S	$\bar{S}_{43}$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]
508,63	108,63	1000	508,64	108,54	1000

Fonte: Elaboração do autor.

2.6.4 RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DIDÁTICO DE 43 NÓS DA FIG. 5. CASO 3: FALTA NA ZONA 8 COM CORTE DE CARGA CONTROLADO NOS NÓS.

Repete-se a simulação da falta na zona 8 anterior, utilizando os limites de corte de carga nos nós ($\bar{r}_i$) estabelecidos na Tabela 39 no Anexo A. O modelo de ReSD proposto desenergizou a zona com falta através da abertura da chave entre os nós 33 e 35 e a chave entre os nós 36 e 38, como mostrado na Fig. 8. A solução isolou efetivamente a zona 8, e desligou 50% de carga no nó 41. O modelo também fez um balanço da carga entre os alimentadores através da abertura da chave entre os nós 12 e 27, e o fechamento da chave entre os nós 21 e 24 e da chave os nós 26 e 40. A operação das chaves que mudaram de estado na Fig. 8 é mostrada na Tabela 12.

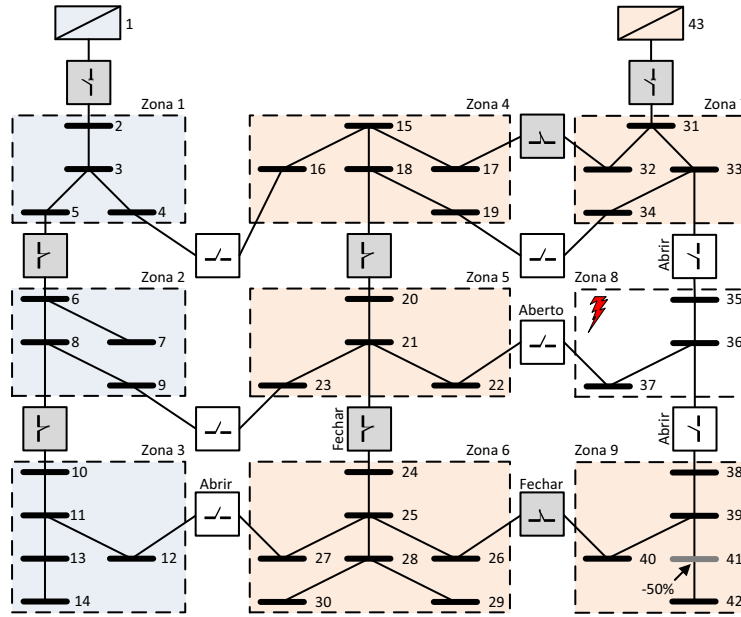
Tabela 12 – Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração da rede de 43 nós da Fig. 8.

de [i]	para [j]	Estado Inicial	Estado Final	P_{ij}^{ch} [kW]	Q_{ij}^{ch} [kVAr]	I_{ij}^{ch} [A]
12	27	Fechado	Aberto	0	0	0
21	24	Aberto	Fechado	509,64	108,08	68,69
26	40	Aberto	Fechado	303,68	62,12	41,52
33	35	Fechado	Aberto	0	0	0
36	38	Fechado	Aberto	0	0	0

Fonte: Elaboração do autor.

O estado de operação para a configuração da Fig. 8 apresenta perdas totais de potência ativa de 27,4 kW. A magnitude de tensão mínima é 0,9300 p.u. no nó 42. A zona 8 ficou totalmente desenergizada. O corte total de carga no sistema, considerando a desconexão controlada no nó 41 constitui um 7% de carga desatendida na rede, portanto, em comparação com a solução sem considerar corte de carga da seção 2.6.3, é possível atender 30% mais de demanda após a restauração. As magnitudes dos fluxos de corrente nos circuitos, chaves e as fontes estão dentro de seus limites operativos. O “gap” de convergência utilizado foi 1% e o solver *CPLEX* convergiu em 0,73 s. O erro de aproximação cônico foi de 0,103 A. A operação das fontes após a reconfiguração é resumida na Tabela 13.

Figura 8 – Resultado da restauração da rede de 43 nós após a falta na zona 8, com corte de carga.



Fonte: Elaboração do autor.

O modelo de ReSD encontra soluções factíveis para todas as possíveis situações de contingência no sistema didático de 43 nós, sendo possível alterar os custos da função objetivo da equação (38), para aprimorar configurações que diminuem o número de chaveamentos, ou a quantidade de carga desenergizada, ou penalizem as perdas elétricas. Para demonstrar a flexibilidade e eficiência do modelo de PCSOIM para ReSD, em seguida será aplicado o modelo (38)-(56) para encontrar soluções de restauração de um sistema de distribuição real brasileiro, correspondente a rede subterrânea de distribuição da cidade de Rio de Janeiro administrada pela empresa concessionária de energia Ligth S.A.

2.7 MODELO DE PCSOIM DA RESD APLICADO A UM SISTEMA REAL DE DISTRIBUIÇÃO

Para demonstrar a flexibilidade do modelo proposto em sistemas reais, utiliza-se uma rede de distribuição brasileira real, composto por três alimentadores independentes, 964 nós, 855 circuitos, 136 chaves e 106 zonas de carga. A Fig. 9 representa a conexão inicial das 106 zonas de carga da rede, onde as linhas sólidas são chaves de interconexão inicialmente fechadas e as linhas pontilhadas são chaves de interconexão inicialmente abertas. Os limites de tensão utilizados são: $V^{\text{nom}} = 7,967 \text{ kV}$, $\underline{V} = 0,93V^{\text{nom}}$, $\overline{V} = V^{\text{nom}}$. Os custos utilizados na função objetivo são: $c_z^z = \$500 \forall z \in \Omega_z$, $c_i^{\text{ls}} = \$1/\text{kW} \forall i \in \Omega_b$, $c^{\text{ch}} = \$0,2$ e $c^{\text{lss}} = \$1/\text{kW}$. A configuração inicial do sistema é radial. A Tabela 14 mostra os fluxos de potência para os nós de saída dos alimentadores

Tabela 13 – Relatório da operação das fontes do sistema teste de 43 nós após a restauração da Fig. 8.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 43)		
P_1^S	Q_1^S	$\tilde{S}_1$	P_{43}^S	Q_{43}^S	$\tilde{S}_{43}$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]
508,63	108,63	1000	838,12	196,55	1000

Fonte: Elaboração do autor.

1, 2 e 3.

Tabela 14 – Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores da configuração inicial do sistema real da Fig. 9.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 2)			Alimentador 3 (nó 3)		
P_1^S	Q_1^S	$\tilde{S}_1$	P_2^S	Q_2^S	$\tilde{S}_2$	P_3^S	Q_3^S	$\tilde{S}_3$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]
762,60	573,37	10000	793,66	596,00	10000	1422,61	1071,90	10000

Fonte: Elaboração do autor.

2.7.1 RESTAURAÇÃO DO SISTEMA REAL DA FIG. 9. CASO 1: DEFEITO NA ZONA 1 SEM CORTE DE CARGA

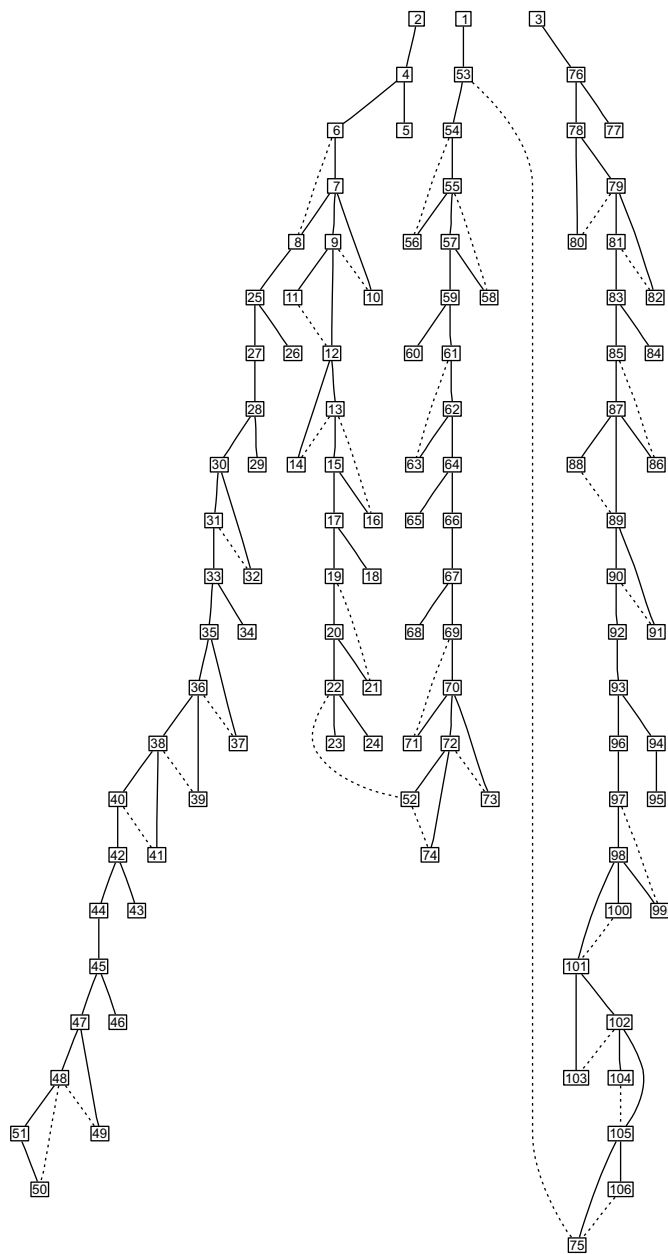
Simula-se um defeito na zona 1 da rede elétrica da Fig. 9. O modelo de ReSD proposto, sem corte de carga ativo ($\bar{r}_i = 0 \forall i \in \Omega_b$), desenergizou a zona com defeito 1 pela abertura da chave entre as zonas 1 e 53; transferiu a demanda das zonas desenergizadas que foram desconectadas do alimentador 1 para os alimentadores 2 e 3 através do fechamento da chave entre as zonas 53 e 75 e a chave entre as zonas 22 e 52, e da abertura da chave entre as zonas 64 e 66 do alimentador 1, como resumido na Tabela 15. A rede elétrica (zonas e chaves) após a reconfiguração é apresentada na Fig. 10.

Tabela 15 – Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração do sistema real da Fig. 10.

de	para	Estado Inicial	Estado Final	P_{ij}^{ch}	Q_{ij}^{ch}	I_{ij}^{ch}
$[\hat{z}_i]$	$[\hat{z}_j]$			[kW]	[kVAr]	[A]
22	52	Aberto	Fechado	400,05	300,07	63,65
1	53	Fechado	Aberto	0	0	0
64	66	Fechado	Aberto	0	0	0
53	75	Aberto	Fechado	-360,11	-270,15	-57,04

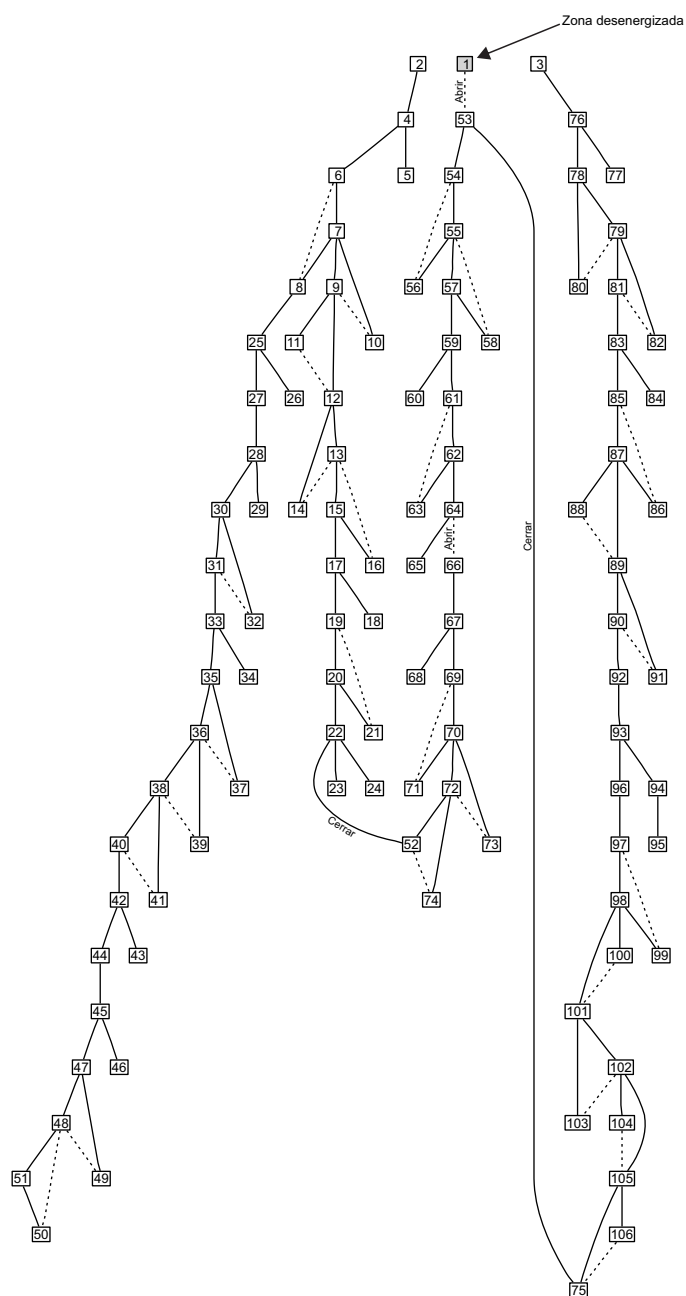
Fonte: Elaboração do autor.

Figura 9 – Configuração inicial do sistema real de distribuição. Zonas de carga e chaves de interconexão.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 10 – Resultado da restauração do sistema real da Fig. 9 após a falta na zona 1, sem corte de carga.



Fonte: Elaboração do autor.

O estado de operação da rede elétrica da Fig. 10 apresenta perdas totais de potência ativa iguais a 23,0 kW, uma magnitude de tensão mínima 0,9885 p.u. no nó 394, zona 50, magnitudes dos fluxos das correntes nos circuitos e chaves, e a operação das fontes dentro das suas capacidades máximas. Todas as zonas sem defeito estão energizadas sem corte de carga. A Tabela 16 mostra os fluxos de potência para os nós de saída dos alimentadores 1, 2 e 3.

Tabela 16 – Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores do sistema real após a restauração da Fig. 10.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 2)			Alimentador 3 (nó 3)		
P_1^S	Q_1^S	$\bar{S}_1$	P_2^S	Q_2^S	$\bar{S}_2$	P_3^S	Q_3^S	$\bar{S}_3$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]
0,00	0,00	10000	1158,36	875,03	10000	1828,63	1379,60	10000

Fonte: Elaboração do autor.

O “gap” de convergência utilizado foi 1% e o solver *CPLEX* convergiu em 92,30 s. O erro de aproximação cônico foi de 9,04 A.

2.7.2 RESTAURAÇÃO DO SISTEMA REAL DA FIG. 9. CASO 2: DEFEITO NA ZONA 9 COM CORTE DE CARGA

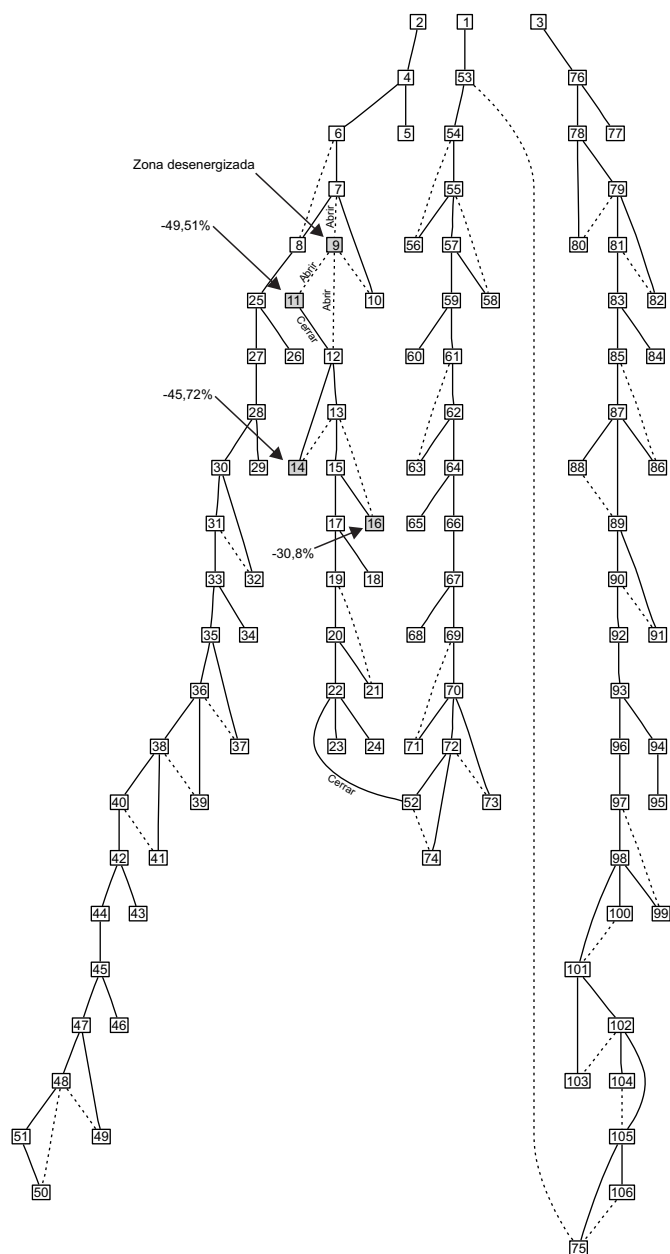
Simula-se um defeito na zona 9 da rede elétrica que é energizada pelo alimentador 2. O modelo de ReSD proposto, com corte de carga ativo, desenergizou a zona com defeito pela abertura da chave entre as zonas 7 e 9, a chave entre as zonas 9 e 11 e a chave entre as zonas 9 e 12; transferiu a demanda das zonas desenergizadas que foram desconectadas do alimentador 2 para os alimentadores 1 através do fechamento da chave entre as zonas 11 e 12 e a chave entre as zonas 22 e 52, como mostrado na Tabela 17 que resume as mudanças das chaves propostas pelo modelo. Além disso, o modelo desligou 49,5% de carga total da zona 11, 45,7% de carga total da zona 14 e 30,8% de carga total da zona 16. A rede elétrica (zonas e chaves) após a reconfiguração é apresentada na Fig. 11.

Tabela 17 – Relatório das chaves que mudaram de estado após a restauração do sistema real da Fig. 11.

de	para	Estado Inicial	Estado Final	P_{ij}^{ch}	Q_{ij}^{ch}	I_{ij}^{ch}
$[\hat{z}_i]$	$[\hat{z}_j]$			[kW]	[kVAr]	[A]
7	9	Fechado	Aberto	0	0	0
9	11	Fechado	Aberto	0	0	0
9	12	Fechado	Aberto	0	0	0
11	12	Aberto	Fechado	-67,27	-50,45	-14,79
22	52	Aberto	Fechado	-403,96	-303,01	-64,44

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 11 – Resultado da restauração do sistema real da Fig. 9 após a falta na zona 9 com corte de carga.



Fonte: Elaboração do autor.

O estado de operação da rede elétrica da Fig. 11 apresenta perdas totais de potência ativa igual a 13,9kW, magnitude de tensão mínima de 0,9917p.u. no nó 107 da zona 11, magnitudes dos fluxos das correntes nos circuitos e chaves, e a operação das fontes dentro das suas capacidades máximas. Todas as zonas sem defeito estão energizadas com alguns cortes de carga especificados na Fig. 11. A Tabela 18 mostra os fluxos de potência para os nós de saída dos alimentadores 1, 2 e 3.

Tabela 18 – Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores do sistema real após a restauração da Fig. 11.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 2)			Alimentador 3 (nó 3)		
P_1^S	Q_1^S	$\tilde{S}_1$	P_2^S	Q_2^S	$\tilde{S}_2$	P_3^S	Q_3^S	$\tilde{S}_3$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]
1169,67	881,00	10000	793,66	596,04	10000	884,15	665,39	10000

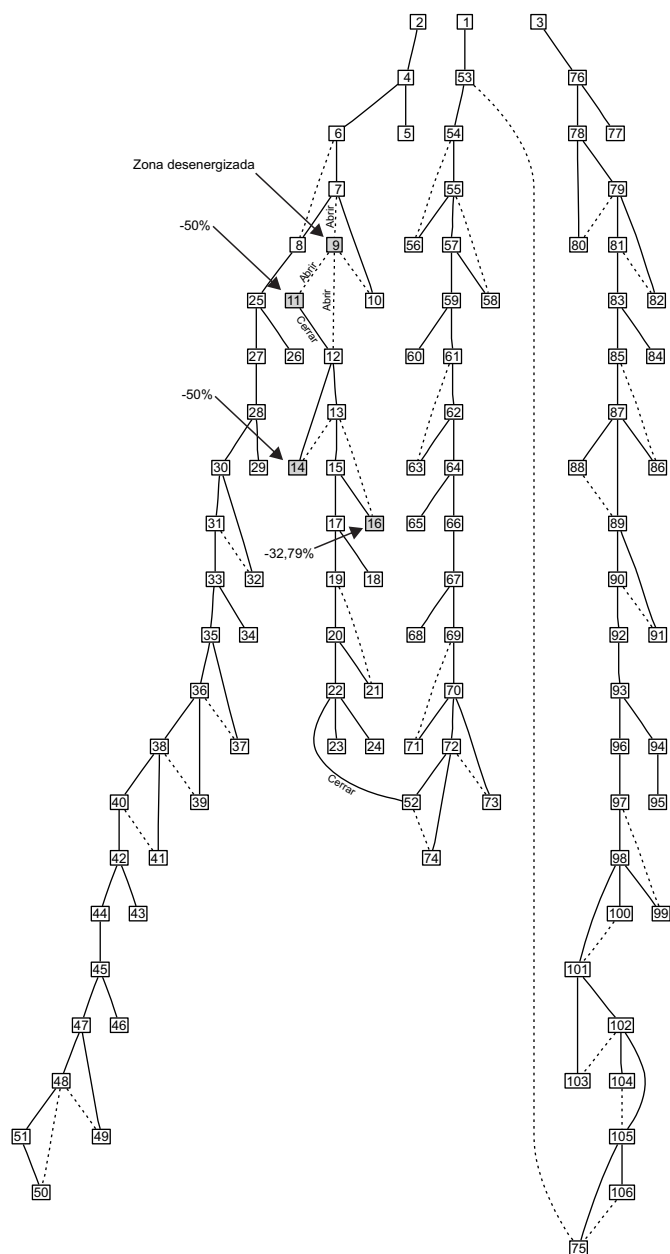
Fonte: Elaboração do autor.

O “gap” de convergência utilizado foi 1% e o solver *CPLEX* convergiu em 22,80 s, porém, o erro de aproximação cônico foi de 153,53 A. Portanto, é recomendável ajustar o ponto de operação do sistema fixando os valores das variáveis binárias de decisão y_{ij} que representam o estado de operação das chaves encontradas pelo modelo cônico da ReSD, e resolver o modelo de PNL dado pelas equações (38)-(55) para obter o ponto de operação exato da configuração do sistema da Fig. 11.

Logo, mantendo a topologia do sistema da Fig. 11 e utilizando o solver de PNL, *Ipopt* (WÄCHTER; BIEGLER, 2006), os valores das variáveis elétricas da rede e a porcentagem de corte de carga são recalculados para obter o ponto de operação exato da rede. A Fig. 12 contém o resultado da restauração do caso 2, incluído os valores ajustados de corte de carga obtidos pelo modelo de PNL.

O estado de operação real da rede elétrica da Fig. 12 tem perdas totais de potência ativa igual a 13,9kW. A magnitude de tensão mínima foi de 0,9917p.u. (no nó 107, zona 11). As porcentagens de corte de carga das zonas 11, 14 e 16 ajustadas estão especificadas na Fig. 12. A Tabela 19 mostra os fluxos de potência reais para os nós de saída dos alimentadores 1, 2 e 3. Note que os valores das potências obtidas pelo modelo de PCSOIM na Tabela 18 para o Caso 2 são muito próximos aos valores reais obtidos pelo modelo de PNL na Tabela 19. A solução foi gerada pelo *Ipopt* com um erro de factibilidade de $3,14 \times 10^{-7}$ em 46,8 s.

Figura 12 – Porcentagens de corte de carga ajustadas para a reconfiguração do sistema real da Fig. 9 após a falta na zona 9.



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 19 – Relatório da operação dos nós de saída dos alimentadores do sistema real após o ajuste do ponto de operação da restauração da Fig. 12.

Alimentador 1 (nó 1)			Alimentador 2 (nó 2)			Alimentador 3 (nó 3)		
P_1^S	Q_1^S	$\tilde{S}_1$	P_2^S	Q_2^S	$\tilde{S}_2$	P_3^S	Q_3^S	$\tilde{S}_3$
[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]	[kW]	[kVAr]	[kV·A]
1169,67	880,99	10000	793,64	596,00	10000	884,12	665,34	10000

Fonte: Elaboração do autor.

3 O PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT CONSIDERANDO OS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

Nas últimas décadas, houve um aumento constante no interesse das ED pela automação e monitoramento remoto dos seus sistemas de distribuição de energia, principalmente incentivado pela regulação da qualidade do serviço aos usuários finais e a busca permanente de atenuar as perdas de potência ativa dos SDMT, que representam perdas monetárias para as empresas.

A utilização das tecnologias na automação do processo de distribuição (AD), junto ao desenvolvimento das telecomunicações e os softwares de controle e aquisição de dados, constituem a infraestrutura para a construção de uma rede inteligente, cujas ações de controle sob os equipamentos de chaveamento e proteção não somente abrangem as situações de contingência, mas também tentam otimizar o ponto de operação do sistema. Comutações inteligentes dos estados das chaves alocadas na rede de distribuição, durante a operação normal do sistema, podem contribuir na diminuição das perdas de potência ativa, fornecer um equilíbrio no carregamento das linhas (balanço do fluxo de carga), regular os níveis de tensão dos nós, entre outras aplicações (TOLEDO, 2012).

Porém, a principal razão pela qual as ED investem em equipamentos de proteção e/ou manobra nas redes de distribuição é prevenir o prolongamento e o impacto das faltas nos alimentadores, as quais podem acontecer em qualquer ponto da rede, e comprometem diretamente a qualidade e continuidade do serviço elétrico para os usuários e a infraestrutura física do sistema.

A medição da capacidade da rede (ou algum dos seus componentes) para manter a qualidade do serviço em estado estacionário num período definido de tempo é quantificada pelos indicadores de confiabilidade. Assim, a principal tarefa dos equipamentos de proteção e manobra como fusíveis, disjuntores, religadores ou seccionadores é manter os índices de confiabilidade do sistema de distribuição, onde a maioria das faltas de longa duração acontecem, em níveis menores aos preestabelecidos pelo agente regulador do sistema. Para isso, os dispositivos de proteção particionam a rede em zonas de proteção que restringem a quantidade de usuários afetados pelas faltas que acontecem por fora de suas zonas (SHORT, 2003).

Este capítulo apresenta uma modelagem matemática e uma metodologia de solução ao problema da reconfiguração ótima dos SDMT, considerando os principais indicadores de confiabilidade na rede. As ações de controle adotadas são o estado de operação das chaves, sejam de isolamento ou interconexão de zonas de carga. O modelo procura a configuração da rede que minimiza as perdas elétricas do sistema e diminui o número de interrupções anuais, tempo das interrupções anuais e energia não suprida esperada no período de um ano. Além dos parâmetros elétricos dos nós e dos ramos do sistema, utilizados no cálculo do ponto de operação elétrico, também são necessários os dados históricos ou preditivos da confiabilidade dos ramos, ou seja, as taxas de faltas anuais e os tempos de reparação, restauração, comutação e isolamento dos componentes do sistema, para o cálculo da avaliação esperada dos níveis de confiabilidade (CHOWDHURY; KOVAL, 1998). Finalmente, as ações coordenadas das chaves em caso de falta, e a alocação de equipamentos passivos de proteção como os fusíveis nas derivações, são

considerados para o cálculo da confiabilidade do serviço elétrico por ponto de carga.

O modelo de reconfiguração com critérios de confiabilidade (RSDC) apresentado neste capítulo foi desenvolvido aproveitando a construção do modelo de PCSOIM do problema da RSD, apresentado na seção 2.4 do capítulo anterior, dado pelo conjunto de equações (37). O modelo proposto de RSDC agrega novas restrições ao problema clássico da reconfiguração, com o objetivo de avaliar a confiabilidade experimentada pelos usuários conectados aos SDMT, em função do estado de operação das chaves de interconexão alocadas ao longo dos alimentadores. A formulação de um modelo de PCSOIM permite a utilização de solvers comerciais de otimização matemática como *CPLEX* (CPLEX, 2010), e linguagens de programação matemática como *AMPL* (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003), os quais garantem convergência ao ótimo global dos modelos de PCSOIM.

Embora a convexidade do modelo de PCSOIM proposto neste capítulo garanta a convergência ao ótimo global do problema proposto da RSDC, existe um conflito entre a topologia que minimiza as perdas de potência ativa e a topologia que melhora os indicadores gerias de confiabilidade nos SDMT. Portanto, duas metodologias são propostas neste capítulo para levar em conta a característica mutiobjetivo do problema da RSDC. A primeira aproveita a convexidade do modelo de PCSOIM proposto para construir uma superfície ótima de soluções não dominadas, chamada Superfície de Soluções de Pareto que, utilizando uma metodologia chamada ϵ -constraint (EHRGOTT, 2005, p. 98), aloca num mesmo gráfico as topologias que apresentam os melhores indicadores de confiabilidade em detrimento das perdas de potência ativa. A segunda proposta considera a incerteza nos parâmetros de confiabilidade dos ramos, especificamente as taxas de faltas ao longo de um ano (λ_{ij}), para transformar o problema da RSDC num problema de Programação Robusta. O modelo robusto tenta encontrar a topologia da rede que, além de minimizar as perdas de potência ativa nos SDMT, também mantenha os níveis de confiabilidade abaixo dos limites estabelecidos pelas agências reguladoras, ainda nos casos que as taxas de falta nas linhas sejam inesperadamente elevadas, ou maiores aos níveis de falta médios estabelecidos para cada sistema.

3.1 MODELO DE PCSOIM APLICADO AO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT: MODELO MONO-OBJETIVO

Na seção 2.4 do capítulo anterior já foi formulado o modelo de PCSOIM para resolver eficientemente o problema da minimização das perdas de potência ativa dos SDMT em função do estado de operação das chaves de interconexão, ou seja, o problema clássico mono-objetivo da RSD. No Capítulo 2, o modelo de RSD dado pelo conjunto de equações (37) foi utilizado para construir o modelo de PCSOIM da Restauração dos SDMT (ReSD). Neste capítulo, o conjunto de equações (37) fornecerá a base matemática para a formulação de um novo problema relacionado com o planejamento dos SDMT: a reconfiguração dos SDMT para diminuir as perdas de potência ativa e melhorar os indicadores globais de confiabilidade SAIDI e SAIFI.

3.2 AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE

As equações básicas para o cálculo dos coeficientes de confiabilidade em cada nó numa rede radial é dado pelas seguintes equações:

$$\lambda_k = \sum_i \lambda_i \quad (57)$$

$$U_k = \sum_i \lambda_i r_i \quad (58)$$

$$r_k = \frac{U_k}{\lambda_k} = \frac{\sum_i \lambda_i r_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (59)$$

Onde os parâmetros λ_i e r_i são dados estatísticos ou preditivos, que as concessionárias estimam nos componentes das redes. Em (57)-(59), λ_i representa a taxa de faltas esperadas, num período de apuração de um ano, e r_i representa o tempo de restauração de cada componente i alocado entre o nó k e sua fonte de fornecimento de energia. Na formulação proposta, os parâmetros conhecidos λ_i e r_i correspondem às taxas de faltas e reparação de cada ramo da rede.

Segundo IEEE (2004), a confiabilidade nos SDEE é quantificada pelo impacto das faltas em termos do número de usuários afetados pelas contingências, utilizando os seguintes indicadores gerais de confiabilidade:

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_k N_k}{\sum N_k} \quad (60)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_k N_k}{\sum N_k} \quad (61)$$

Onde o *SAIFI* em (60) indica a média da frequência pela qual os usuários experimentam uma interrupção ao longo de um ano, e *SAIDI* em (61) indica a média da duração das interrupções que os usuários experimentam ao longo de um ano.

Na prática, o indicador *SAIFI* depende diretamente das causas externas ou intrínsecas das redes que produzem as faltas nos SDEE, tais como:

1. Exposição a condições ambientais que podem afetar a infraestrutura das redes como as descargas elétricas atmosféricas, árvores ou animais nas linhas, vento, acidentes de trânsito, etc.
2. Danos ou mau funcionamento dos equipamentos das redes por causa elétricas como sobrecargas, sobre-tensões, perda de isolamento elétrico e induções eletromagnéticas.
3. Interrupções programadas ou erros na operação do sistema por parte das concessionárias.

Portanto, as melhores ações para diminuir o indicador *SAIFI* são aquelas que evitam as causas diretas das interrupções. Por exemplo: poda de árvores, mudança dos cabos por cabos isolados, barreiras para animais, supressores de sobre-tensão, treinamento do pessoal de operação, manutenção preventiva, entre outros.

Igualmente, é possível diminuir o *SAIFI* melhorando o ponto de operação do sistema. Uma configuração adequada da rede pode melhorar os perfis de tensão dos nós, e manter a magnitude de corrente pelos cabos e carregamento dos transformadores dentro dos limites operativos. Além disso, é possível reconfigurar a rede para distribuir as taxas de faltas entre diferentes alimentadores, logo, *existe uma topologia da rede que minimiza a frequência das interrupções que os usuários experimentam, em função do estado de operação das chaves de interconexões nos SDEE.*

Do mesmo modo, o indicador *SAIDI* depende da capacidade da rede para encontrar, isolar e atender as faltas eficientemente. Portanto, as ações que melhoram o indicador *SAIDI* são aquelas que diminuem o tempo de restauração das faltas e o número de usuários afetados por elas. Para isso, as ED podem investir em equipamentos para a detecção de faltas, ou dispositivos de proteção como fusíveis, religadores e seccionalizadores que, corretamente coordenados com a proteção principal dos alimentadores, possam restaurar as zonas automaticamente. Neste contexto, existe uma configuração da rede que maximiza a quantidade de zonas que podem ser restauradas pelos esquemas de proteção, em caso de alguma falta permanente acontecer em qualquer uma das zonas da rede; ou seja, *existe uma topologia que minimiza a duração das interrupções que os usuários experimentam, em função do estado de operação das chaves de interconexões nos SDEE.*

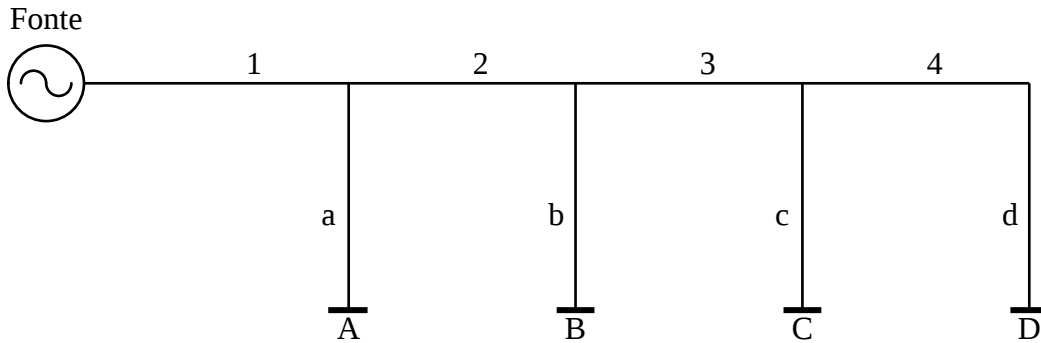
Em conclusão, a reconfiguração dos SDEE pode ser utilizada tanto para melhorar o ponto de operação em estado estacionário dos sistemas, como para melhorar os indicadores gerais de confiabilidade, *SAIDI* e *SAIFI*, conhecendo os parâmetros da taxa média de faltas por ano λ_{ij} e reparação r_{ij} dos ramos da rede.

3.2.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE EM SDEE RADIAIS

A avaliação da confiabilidade em SDMT utilizada ao longo deste capítulo está baseada na metodologia de avaliação da confiabilidade em redes radiais proposta por Billinton e Allan (1996). Para isso, deve-se considerar que os sistemas são construídos radialmente e as faltas são permanentes, ou seja, o esquema de proteções e/ou restauração produz uma des-energização dos circuitos que alimentam a falta, até que ela seja reparada.

Neste contexto, se deseja avaliar a confiabilidade experimentada pelos usuários do sistema de distribuição radial da Fig. 13, desenhado pelo seu equivalente monofásico. A Tabela 20 contém os parâmetros de confiabilidade dos ramos do sistema da Fig. 13.

Segundo as equações (57) e (58), a confiabilidade de cada nó do sistema da Fig. 13 é idêntica e igual à soma das taxas de falta e duração das faltas de todos os componentes da rede. Ou seja, toda falta em qualquer um dos componentes de uma rede sem equipamentos de desconexão instalados ao longo do alimentador, produz a perda do fornecimento da energia em todos os nós da rede.

Figura 13 – Sistema radial de distribuição: Avaliação da confiabilidade.

Fonte: Adaptado de Billinton e Allan (1996, p. 230).

Tabela 20 – Parâmetros de confiabilidade do sistema da Fig. 13.

Componente [ramo]	λ [faltas/ano]	r [horas]
1	0,2	4
2	0,1	4
3	0,3	4
4	0,2	4
a	0,2	2
b	0,6	2
c	0,4	2
d	0,2	2

Fonte: Billinton e Allan (1996, p. 230).

Assim, as taxas de falta por ano de cada nó do sistema da Fig. 13 são:

$$\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \lambda_D = \sum_i \lambda_i = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 + 0,6 + 0,4 + 0,2$$

$$= 2,2 \text{ faltas/ano}$$

E as durações das faltas em cada nó são:

$$U_A = U_B = U_C = U_D = \sum_i \lambda_i r_i = (0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2) \cdot 4 + (0,2 + 0,6 + 0,4 + 0,2) \cdot 2$$

$$= 6,0 \text{ horas/ano}$$

A Tabela 21 indica o número de usuários conectados e a carga média de cada nó. Logo, os índices gerais de confiabilidade do sistema da Fig. 13, dados pelas equações (60) e (61), são:

$$SAIFI = 2,2 \text{ faltas/usuário ano}$$

$$SAIDI = 6,0 \text{ horas/usuário ano}$$

Tabela 21 – Número de usuários e carga média dos nós da Fig. 13.

Nó [k]	Número de usuários [N _k]	Carga média conectada [P _k ^D]
A	1000	5000
B	800	4000
C	700	3000
D	500	2000

Fonte: Billinton e Allan (1996, p. 231).

Aliás, se a carga média conectada a cada nó é conhecida, então a energia média que a ED deixa de fornecer aos usuários é dada pela equação (62).

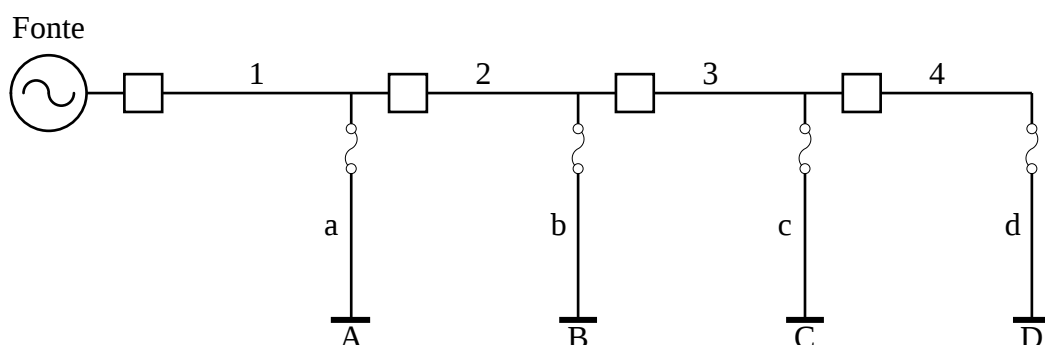
$$ENS = \sum P_k^D U_k \quad (62)$$

Logo, a Energia Não Fornecida (ENS) do sistema da Fig. 13, segundo a equação (62) é:

$$ENS = 84,0 \text{ MWh/ano}$$

Agora, se no sistema de distribuição original da Fig. 13 são alocadas chaves de desconexões ao longo do alimentador principal e fusíveis em cada um dos ramos laterais, como mostrado na Fig. 14, então o sistema se torna setorizado em zonas de carga, e a avaliação da confiabilidade depende do esquema de operação dos equipamentos de desconexão alocados.

Figura 14 – Sistema radial de distribuição com equipamentos de proteção alocados ao longo do alimentador: Avaliação da Confiabilidade.



Fonte: Adaptado de Billinton e Allan (1996, p. 231).

Os fusíveis alocados nas laterais do sistema da Fig. 14 estão encarregados de isolar as faltas permanentes que ocorrem a jusante do ponto de conexão dos fusíveis. Neste caso,

um curto-circuito nas laterais da rede produz a abertura do seu fusível respetivo. Isto produz uma desconexão dos pontos de carga a jusante do fusível até que a falta seja reparada, sem de-energizar os demais pontos de carga. O esquema de proteção melhora a confiabilidade porque diminui o impacto da interrupções, restringindo o número de usuários afetados pelas faltas nas laterais da rede.

Outro esquema que melhora a confiabilidade geral da rede é a alocação de chaves de desconexão ao longo do alimentador, representados por quadrados na Fig. 14. Estas chaves normalmente não são programadas para operar isoladamente. Elas trabalham em coordenação com o disjuntor principal da rede. Portanto, qualquer falta ao longo da rede produz pelo menos uma operação do disjuntor principal. Depois que a falta tenha sido detectada, as chaves podem-se abrir para isolar os trechos da rede que alimentam a falta, e o disjuntor principal pode ser fechado para restabelecer o serviço elétrico aos usuários que não são afetados pela falta. Este procedimento permite a restauração dos pontos da rede alocados entre a fonte de fornecimento de energia e o ponto de isolamento das faltas, num tempo de restauração automático menor que o tempo normal de reparação nominal das faltas nos ramos.

Os índices de confiabilidade de cada um dos nós do sistema da Fig. 14, considerando a operação perfeita dos fusíveis e a coordenação perfeita entre o disjuntor principal e as chaves de interconexões, são calculados como segue (o tempo de restauração automático utilizado é de 0,5 horas):

$$\lambda_A = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 = 1,0 \text{ faltas/ano}$$

$$\lambda_B = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,6 = 1,4 \text{ faltas/ano}$$

$$\lambda_C = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,4 = 1,2 \text{ faltas/ano}$$

$$\lambda_D = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 = 1,0 \text{ faltas/ano}$$

$$U_A = (0,2) \cdot 4 + (0,1 + 0,3 + 0,2) \cdot 0,5 + (0,2) \cdot 2 = 1,5 \text{ horas/ano}$$

$$U_B = (0,2 + 0,1) \cdot 4 + (0,3 + 0,2) \cdot 0,5 + (0,6) \cdot 2 = 2,65 \text{ horas/ano}$$

$$U_C = (0,2 + 0,1 + 0,3) \cdot 4 + (0,2) \cdot 0,5 + (0,4) \cdot 2 = 3,3 \text{ horas/ano}$$

$$U_D = (0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2) \cdot 4 + (0,2) \cdot 2 = 3,6 \text{ horas/ano}$$

Neste caso, todos os índices de confiabilidade melhoram. A maior diminuição da duração das interrupções (U_i) se apresenta nos nós mais pertos da fonte de fornecimento de energia, e piora a medida que se afastam da fonte. Note que, toda falta que acontece por fora do “caminho mínimo” entre o nó ao qual se está calculando sua confiabilidade e a subestação é isolada num tempo igual ao tempo de restauração automático. As faltas que acontecem dentro do “caminho mínimo” devem ser totalmente reparadas num tempo igual ao tempo de reparo nominal de cada ramo. Assim, por exemplo, para o nó B da Fig. 14, a duração das interrupções (U_B) é equivalente à soma das taxas de falta dos ramos alocados por fora do “caminho mínimo” entre o nó B e a fonte, ou seja, os ramos 3 e 4, multiplicado pelo tempo de restauração automático (0,5 horas),

mais a soma das taxas de falta dos ramos dentro do “caminho mínimo”, ou seja, os ramos 1 e 2, multiplicadas pelos seus tempos de restauração nominais.

Esta hipótese, pela qual, *a duração das interrupções dos nós numa rede de distribuição radial depende dos ramos alocados no “caminho mínimo” entre o nó avaliado e sua fonte*, é o fundamento da formulação das restrições de confiabilidade apresentadas neste capítulo.

Finalmente, utilizando as equações (60) e (61), os índices gerais de confiabilidade do sistema da Fig. 14 são:

$$SAIFI = 1,15 \text{ faltas/usuários ano}$$

$$SAIDI = 2,58 \text{ horas/usuários ano}$$

E a Energia Não Fornecida do sistema da Fig. 14, segundo a equação (62) é:

$$ENS = 35,2 \text{ MWh/ano}$$

Visivelmente, os índices de confiabilidade do sistema da Fig. 14 são melhores que os índices do sistema da Fig. 13 sem equipamentos de desconexão alocados.

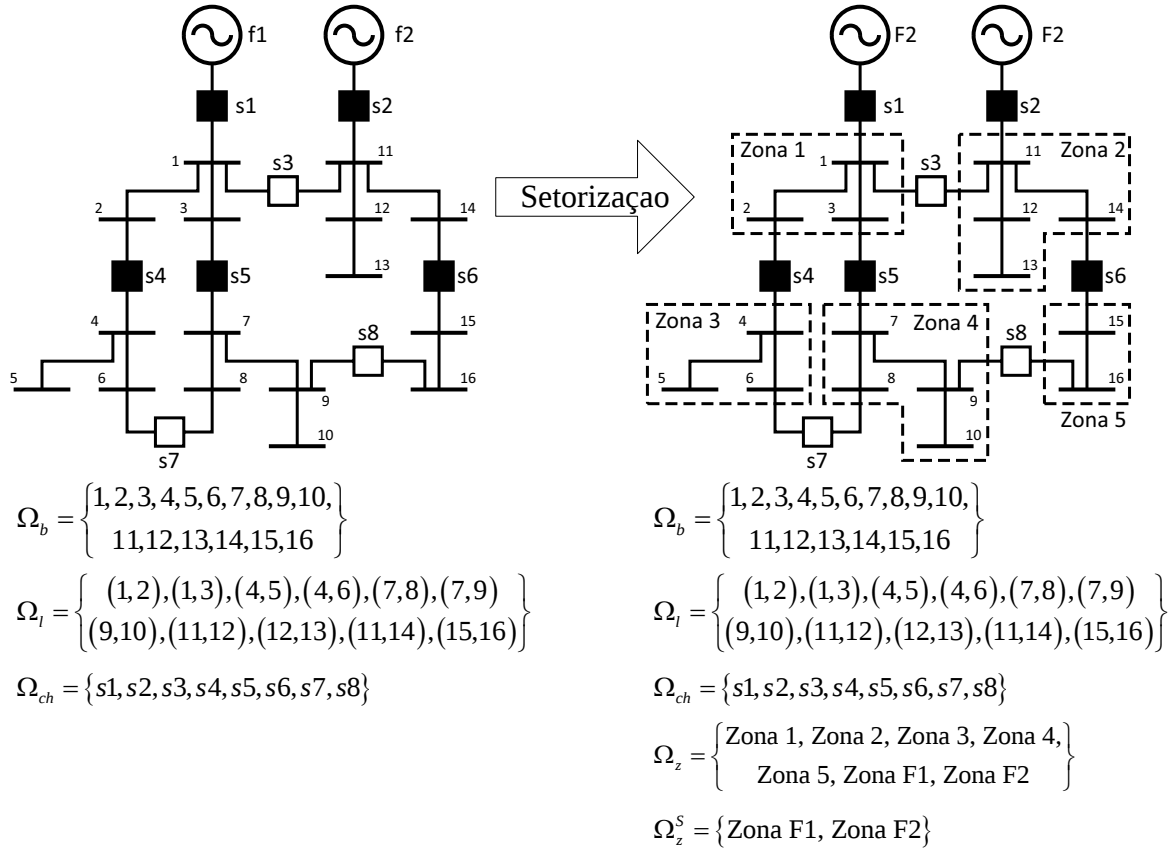
3.3 MODELO DE PCSOIM DO PROBLEMA DA RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DOS SDMT CONSIDERANDO OS ÍNDICES DE CONFIABILIDADE

O objetivo deste capítulo é propor um modelo matemático que defina o estado da operação das chaves nos SDMT com o triplo propósito de: (a) minimizar as perdas de potência ativa nos sistemas, (b) reduzir os custos devido à violação dos limites de confiabilidade de cada nó estabelecidos pelas agências reguladoras de energia, e (c) diminuir a ENS ao longo do ano. O modelo de (a) é o problema clássico da reconfiguração formulado em (37), porém, para produzir (b) e (c) é necessário agregar novas restrições ao modelo de PCSOIM da reconfiguração para calcular a confiabilidade em função da topologia, o esquema de restauração e a alocação de fusíveis nos SDMT. Para isso, a metodologia de avaliação da confiabilidade em sistemas radiais de Billinton e Allan (1996) analisada na seção 3.2.1 será transformada num conjunto de restrições lineares para construir um modelo de PCSOIM do problema da reconfiguração ótima dos SDMT considerando os índices de confiabilidade (RSDC).

3.3.1 PRE-PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS DE CONFIABILIDADE

Para avaliar os índices de confiabilidade gerais da rede, a análise dos coeficientes de confiabilidade de cada um dos nós será feita considerando a setorização da rede em zonas de carga, onde cada zona é um trecho radial dos alimentadores, totalmente conexo e delimitado pelas chaves de interconexões na fronteira das zonas. A Fig. 15 mostra o processo de setorização utilizado para gerar um novo conjunto de zonas de carga, Ω_z , a partir de um sistema de distribuição com $|\Omega_b|$ nós e $|\Omega_l|$ ramos. Note que, cada fonte na Fig. 15 é considerada uma única zona de carga que pertencem ao subconjunto de zonas de geração Ω_z^g .

Figura 15 – Processo de setorização dos SDMT.



Fonte: Elaboração do autor.

A metodologia de avaliação da confiabilidade em SDEE radiais proposto por Billinton e Allan (1996) é modificada neste capítulo para considerar a existência de zonas de carga, onde cada um dos nós que pertencem a uma única zona compartilham o mesmo valor esperado de taxa de faltas por zona (λ_z) e tempo de restauração por zona (r_z), dados pelas equações (63)-(64).

$$\lambda_z = \sum_{\substack{ij \in \Omega_{l_z} \\ ij \text{ não está} \\ \text{protegido} \\ \text{por fusíveis}}} \lambda_{ij} \quad \forall z \in \Omega_z \quad (63)$$

$$r_z = \frac{1}{|\Omega_{l_z}|} \sum_{ij \in \Omega_{l_z}} r_{ij} \quad \forall z \in \Omega_z \quad (64)$$

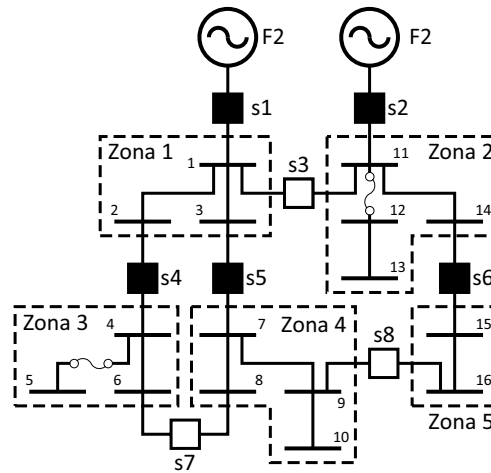
Onde o conjunto Ω_{l_z} em (63) e (64), contém todos os ramos que pertencem à mesma zona $z \in \Omega_z$. Adicionalmente, deve-se calcular de forma separada a taxa de falta daqueles nós que estão protegidos por fusíveis nas laterais da rede utilizando a expressão (65).

$$\lambda_{\text{fused}_k} = \begin{cases} \sum_{ij \in \Omega_l} \lambda_{ij} & \text{se } l_{\text{fused}_{ij}} = 1, \text{ e } k, i \text{ e } j \text{ pertencem ao mesmo caminho} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \forall k \in \Omega_b \quad (65)$$

O parâmetro λ_{fused_k} permite diferenciar os nós protegidos por fusíveis nas laterais da rede, daqueles alocados nos alimentadores principais das zonas. A condição de k, i e j em (65) considera o efeito abrangente dos fusíveis, os quais protegem os nós alocados a jusante do ponto de conexão do fusível nos SDEE radiais.

Considere o sistema da Fig. 16 e os parâmetros de confiabilidade de cada ramo indicados na Tabela 22. O sistema da Fig. 16 está formado por 16 nós, 5 zonas de carga, dois alimentadores independentes e possui dois ramos protegidos por fusíveis, ou seja, com $l_{\text{fused}_{ij}} = 1$.

Figura 16 – Sistema didático de 16 nós e dois fusíveis alocados.



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 22 – Parâmetros de confiabilidade do sistema da Fig. 16.

de [i]	para [j]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	$l_{\text{fused}_{ij}}$	de [i]	para [j]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	$l_{\text{fused}_{ij}}$
1	2	0,1	2	0	9	10	0,1	2	0
1	3	0,1	2	0	11	12	0,1	2	1
4	5	0,1	3	1	12	13	0,1	2	1
4	6	0,1	3	0	11	14	0,1	2	0
7	8	0,1	2	0	15	16	0,1	3	0
7	9	0,1	2	0					

Fonte: Elaboração do autor.

Segundo a equação (63) e (64), as taxas médias de faltas (λ_z) e os tempos de restauração (r_z) de cada zona do sistema da Fig. 16 estão indicados na Tabela 23. Note que, embora a Zona 2 tenha três ramos, dois deles estão protegidos pelo mesmo fusível, portanto o único ramo considerado pela equação (63) na Zona 2 é o ramo entre os nó 11 e 14. A Tabela 23 também apresenta o conjunto Ω_{l_z} de cada zona.

Tabela 23 – Taxas médias de faltas (λ_z) e os tempos de restauração (r_z) de cada zona do sistema da Fig. 16.

Zona [z]	λ_z [faltas/ano]	r_z [horas]	Ω_{l_z}
1	0,2	2	$\{(1, 2), (1, 3)\}$
2	0,1	2	$\{(11, 12), (12, 13), (11, 14)\}$
3	0,1	3	$\{(4, 5), (4, 6)\}$
4	0,3	2	$\{(7, 8), (7, 9), (9, 10)\}$
5	0,1	3	$\{(15, 16)\}$

Fonte: Elaboração do autor.

Por outro lado, os parâmetro λ_{fused_k} de cada nó do sistema da Fig. 16 estão indicados na Tabela 24, segundo a equação (65). Note que o nó 13 apresenta uma taxa de faltas igual a 0,2 faltas/ano porque o fusível que protege o nó 13 se encontra dois ramos a montante do nó.

Tabela 24 – Parâmetro λ_{fused_k} de cada nó do sistema da Fig. 16.

Nó [k]	λ_{fused_k} [faltas/ano]	Nó [i]	λ_{fused_k} [faltas/ano]	Nó [i]	λ_{fused_k} [faltas/ano]
1	0,0	7	0,0	13	0,2
2	0,0	8	0,0	14	0,0
3	0,0	9	0,0	15	0,0
4	0,0	10	0,0	16	0,0
5	0,1	11	0,0		
6	0,0	12	0,1		

Fonte: Elaboração do autor.

3.3.2 RESTRIÇÕES DE CONFIABILIDADE

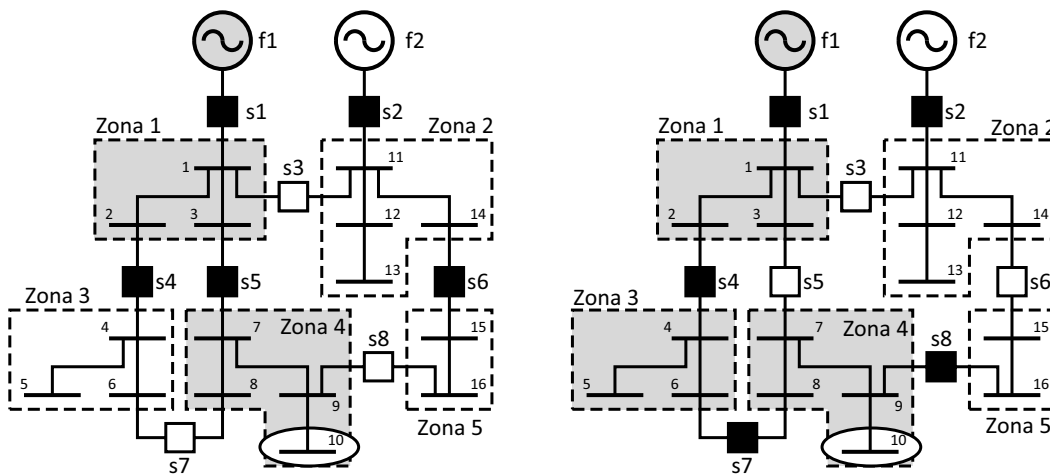
A avaliação da confiabilidade neste capítulo está fundamentada nas seguintes hipóteses do sistema:

1. Todas as faltas são consideradas curtos-circuitos prolongados. Portanto, toda falta que acontece em um ramo não protegido por fusíveis produz uma operação do disjuntor principal do alimentador que alimenta a falta.

2. Em todos os casos, as faltas que acontecem em ramos protegidos por fusíveis são isoladas pela abertura total do fusível, sem produzir uma operação do disjuntor principal.
3. As chaves coordenadas com o disjuntor principal, permitem a desconexão rápida das zonas que não pertencem ao caminho mínimo do nó cuja confiabilidade esteja sendo avaliada, em caso de falta. Em outras palavras, se uma falta acontece em uma zona que não pertence ao caminho mínimo do nó cuja confiabilidade esteja sendo avaliada, o esquema de restauração irá restaurar o sistema em pelo menos r_{sw} horas. Por exemplo, considere o sistema de 16 nós apresentado na Fig. 17a e b. Se o nó cuja confiabilidade está sendo avaliada é o nó 10, então o caminho mínimo na Fig. 2a está formado pelas zonas 4 e 1 (áreas sombreadas), e todas as faltas nas demais zonas 2,3 e 5, são rapidamente isoladas através da operação coordenada das chaves. Por outro lado, se a falta está localizada em alguma das zonas que pertencem ao caminho mínimo, então a restauração da falta irá demorar o tempo nominal de restauração da zona. Note que, como mostrado na Fig. 17b, se a topologia da rede muda, então o caminho mínimo do nó 10 também muda, e a confiabilidade experimentada pelos usuários conectados ao nó 10 é diferente à confiabilidade da Fig. 17a.

Figura 17 – Hipóteses 3. Influência da topologia do sistema na avaliação da confiabilidade.

(a) O caminho mínimo do nó 10 está formado pelas zonas 1 e 4. (b) O caminho mínimo do nó 10 está formado pelas zonas 4, 3 e 1.



Fonte: Elaboração do autor.

4. Fusíveis alocados nos ramos principais das zonas de carga são desconsiderados da análise de confiabilidade proposta.

A partir das hipóteses descritas anteriormente, e considerando a metodologia de avaliação da confiabilidade em sistemas radiais analisada na seção 3.2, o modelo de PCSOIM da RSDC é dado pelo conjunto de equações (66)-(79), após o pre-processamento dos parâmetros de confiabilidade.

$$\min \quad c^{\text{lss}} f_{\text{perdas}} \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}} + R^{\text{ch}} \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \right) \quad (66)$$

Sujeito a:

$$(37b)-(37m) \quad (67)$$

$$\sum_{\substack{ji \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} f_{ji,k} - \sum_{\substack{ij \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} f_{ij,k} + f_{z,k}^S = f_{z,k}^D \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (68)$$

$$|f_{ij,k}| \leq y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (69)$$

$$z_{\text{act}\hat{z}_j,k} \geq |f_{ij,k}| \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (70)$$

$$z_{\text{act}\hat{z}_i,k} \geq |f_{ij,k}| \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (71)$$

$$\omega_{\hat{z}_j,k} \geq \omega_{\hat{z}_i,k} + y_{ij} - 1 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (72)$$

$$\omega_{\hat{z}_i,k} \geq \omega_{\hat{z}_j,k} + y_{ij} - 1 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (73)$$

$$z_{\text{act}z,k} \leq \omega_{z,k} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (74)$$

$$\omega_{z,k} \leq f_{z,k}^S \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z^S \quad (75)$$

$$z_{\text{act}z,k} \leq \sum_{\substack{ij \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} |f_{ij,k}| + \sum_{\substack{ji \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} |f_{ji,k}| \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (76)$$

$$SAIFI_{\text{médio}} = \frac{\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} \omega_{z,k} N_k \lambda_z + \sum_{k \in \Omega_b} N_k \lambda_{\text{fused}_k}}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \quad (77)$$

$$SAIDI_{\text{médio}} = \frac{\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} [z_{\text{act}k,z} N_k r_z \lambda_z + (\omega_{z,k} - z_{\text{act}k,z}) N_k r_{\text{sw}} \lambda_z] + \sum_{k \in \Omega_b} N_k \lambda_{\text{fused}_k} r_{\hat{z}_k}}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \quad (78)$$

$$y_{ij}, z_{\text{act}z,k}, \omega_{z,k} \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}}, \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (79)$$

As equações (66)-(79) formulam o modelo de PCSOIM do problema da RSDC. A função objetivo (66) minimiza as perdas totais de potência ativa nas linhas considerando o fator de perdas do sistema. O conjunto de restrições (67) fornecem o ponto de operação em estado estacionário dos SDEE, garantem as restrições elétricas da rede (limites de tensão nos nós e corrente nas barras), e formulam a operação das chaves no sistema, garantindo a radialidade da topologia final, e respeitando os limites elétricos das chaves. Novamente, a variável binária y_{ij} define o estado de operação da chave $ij \in \Omega_{\text{ch}}$. Se a chave ij fica fechada na topologia final, então $y_{ij} = 1$, caso contrário, $y_{ij} = 0$ se a chave fica aberta na topologia final.

A restrição (68) representa um balanço de fluxo artificial que identifica o caminho mínimo entre cada nó k e sua fonte correspondente, onde $ij \in \Omega_{\text{ch}}$ (BAZARAA; JARVIS; SHERALI,

2009). A identificação do caminho mínimo é necessário para determinar a duração média das interrupções em cada nó (U_k), como indicado pela terceira hipóteses da seção 3.3.2.

Visto que o parâmetro $f_{z,k}^D$ é igual a 1 se $\hat{z}_k = z$, 0 em caso contrário; então a restrição (68) é a formulação analítica que encontra o caminho mínimo desde o nó k até a fonte de geração, através de um sistema radial. Para manter a linearidade da formulação, o fluxo artificial é representado utilizado o conjunto de equações (80)-(82).

$$f_{ij,k} = f_{ij,k}^+ - f_{ij,k}^- \quad \forall ij \in \Omega_{sw} \forall k \in \Omega_b \quad (80)$$

$$f_{ij,k}^+ \geq 0 \quad \forall ij \in \Omega_{sw} \forall k \in \Omega_b \quad (81)$$

$$f_{ij,k}^- \geq 0 \quad \forall ij \in \Omega_{sw} \forall k \in \Omega_b \quad (82)$$

Assim, o valor absoluto da variável $f_{ij,k}$ é substituído pelo seu equivalente linear, $|f_{ij,k}| = f_{ij,k}^+ + f_{ij,k}^-$, em todos os casos. A restrição (69) liga o fluxo artificial ($f_{ij,k}$) com a variável de decisão binária y_{ij} que define a topologia do sistema. Se a chave ij está aberta, então (69) impede o fluxo artificial através daquela chave, caso contrário, a restrição (68) decide se ij faz parte do caminho mínimo de k .

As variáveis de confiabilidade binárias $z_{act,k}$ e $\omega_{z,k}$ estão definidas pelo conjunto de restrições (70)-(71) e (72)-(73), respectivamente. $z_{act,k}$ determina se a zona z faz parte do caminho mínimo do nó k avaliado. Se o fluxo artificial através da chave ij é positiva, então (70)-(71) estabelece que as duas zonas, $\hat{z}_i$ e $\hat{z}_j$, fazem parte do caminho mínimo do nó k . Por outro lado, $\omega_{z,k}$ determina se a zona z e o nó k pertencem ao mesmo alimentador, ou seja, se ambos estão sendo alimentados pela mesma fonte de geração. Logo, nas restrições (72)-(73), se a chave ij está fechada, então $\hat{z}_i$ e $\hat{z}_j$ pertencem ao mesmo alimentador de k se, e somente se, $\hat{z}_k = \hat{z}_i$ ou $\hat{z}_k = \hat{z}_j$.

As restrições (74)-(76) estabelecem um conjunto de relações triviais entre as variáveis de decisão binárias $z_{act,k}$ e $\omega_{z,k}$ e o fluxo artificial $f_{ij,k}$:

1. A restrição (74) define que, se uma zona z não pertence ao mesmo alimentador do nó k , eventualmente aquela zona não pode fazer parte do caminho mínimo de k . Logo, se $\omega_{z,k} = 0$, então $z_{act,k} = 0$.
2. A restrição (75) estabelece que se nenhum fluxo artificial é gerado na subestação $z \in \Omega_z^S$, para um nó k determinado, então k não pertence ao mesmo alimentador da fonte z . Logo, se $f_{z,k}^S = 0$, então $\omega_{z,k} = 0$.
3. A restrição (76) determina que $z_{act,k} = 0$, se todos os fluxos artificiais associados à zona z são zero, para um nó k determinado.

As restrições (74)-(76) evitam inconsistências entre as variáveis binárias de decisão e melhoram a precisão da solução final provida pelo solver.

Finalmente, as equações (77) e (78) representam as expressões que calculam os índices gerais de confiabilidade média nos SDEE radiais $SAIFI_{\text{médio}}$ e $SAIDI_{\text{médio}}$, em função das

variáveis de decisão binárias $z_{actz,k}$ e $\omega_{z,k}$ calculadas nas restrições (69)-(76), os parâmetros de confiabilidade das zonas λ_z , r_z e ramos com fusíveis λ_{fused_k} calculados em (63)-(65), o número de usuários de cada nó N_k e o tempo de restauração automática r_{sw} .

A equação (77) calcula o índice de confiabilidade *SAIFI*, adaptado da equação geral (60), utilizando a variável contínua $SAIFI_{\text{médio}}$. Considera-se que, se uma falta acontecer num único alimentador da topologia final, então ela não irá afetar os demais alimentadores que estão protegidos por disjuntores principais diferentes. A equação (77) também considera a confiabilidade dos ramos protegidos por fusíveis nas laterais como sistemas isolados, segundo a hipótese 2 e 4 enumeradas na seção 3.3.2.

A equação (78) calcula o índice de confiabilidade *SAIDI*, adaptado da equação geral (61), utilizando a variável contínua $SAIDI_{\text{médio}}$. Considera-se a ação do esquema de restauração automática o qual, num tempo médio de restauração r_{sw} dado em horas, permite isolar automaticamente as faltas nas zonas que não pertencem ao caminho mínimo entre cada um dos nós k e suas respectivas fontes, ou seja, aquelas zonas z tal que $z_{actz,k} = 0$. As faltas nas zonas que de fato pertencem ao caminho mínimo ($z_{actz,k} = 1$), só podem ser restauradas num tempo médio de restauração de zona dado pela equação (64), pois a falta deverá ser totalmente reparada segundo a hipótese 3. A soma dos produtos entre o tempo de restauração e a taxa média de faltas no ano é equivalente à duração média das faltas no ano (ver equação (58)). A análise é feita para cada um dos diferentes alimentadores da topologia final. A equação (78) também considera a confiabilidade dos ramos protegidos por fusíveis nas laterais como sistemas isolados, segundo a hipótese 2 e 4 enumeradas na seção 3.3.2.

A restrição (79) determina a natureza binária das variáveis de decisão y_{ij} , $z_{actz,k}$ e $\omega_{z,k}$.

3.4 METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO MULTI-OBJETIVO DO PROBLEMA DA RSDC

A topologia que otimiza os índices de confiabilidade *SAIDI* e *SAIFI* não é necessariamente a mesma que minimiza as perdas do potência ativa nos SDMT. Portanto, uma análise multi-objetivo do problema da RSDC deve ser feita para obter as soluções não dominadas dos objetivos conflitantes.

O modelo de PCSOIM do problema da RSDC, dado pelas equações (66)-(79), pode ser utilizado para construir a fronteira de soluções não dominadas das funções objetivo conflitantes. No caso do modelo matemático das equações (66)-(79), as três funções objetivos são: 1) as perdas de potência ativa, proporcionais aos quadrados das correntes pelos ramos; 2) o índice geral da frequência das interrupções no sistema *SAIFI* e 3) o índice geral da duração das interrupções no sistema *SAIDI*. As soluções não dominadas das três funções objetivo podem ser representadas numa mesma Superfície de Soluções não Dominadas, também chamada Superfície de Soluções de Pareto (SSP), construída utilizando uma metodologia multi-objetivo denominada: Método ε -constraint.

Junto ao método de soma de custos na função objetivo, o método ε -constraint é uma

estratégia reconhecida para resolver problemas de otimização combinatórias multi-objetivo. Este método gera sub-problemas mono-objetivos, chamados problemas ε -constraints, transformando todas as funções objetivo, exceto uma, em novas restrições do problema. Os limites superiores das novas restrições são salvos num vetor chamado ε -vetor e, a fronteira de soluções de Pareto é construída mudando iterativamente os elementos do ε -vetor. Se o modelo matemático é convexo, então todas as soluções produzidas são ótimas e a SSP é ótima (EHRGOTT, 2005, p. 98).

Sejam $SAIDI_{\text{máximo}}$ e $SAIFI_{\text{máximo}}$ os limites de confiabilidade estabelecidos pelas agências reguladoras, então as restrições (83) e (84) são agregadas ao modelo de PCSOIM do problema da RSDC.

$$SAIDI_{\text{médio}} \leq SAIDI_{\text{máximo}} \quad (83)$$

$$SAIFI_{\text{médio}} \leq SAIFI_{\text{máximo}} \quad (84)$$

A construção da SSP do problema da RSDC é feita aplicando os seguintes passos adaptados da metodologia ε -constraint.

1. Seja $i \leftarrow 1$ e $j \leftarrow 1$, definir os limites iniciais de $SAIDI_{\text{máximo}i}$ e $SAIFI_{\text{máximo}j}$.
2. Resolver o modelo (66)-(84) para gerar a topologia (i, j) . Se a solução (i, j) é factível então salvar o valor das perdas de potência ativa e continuar ao Passo 3. Caso contrário, vai ao Passo 4.
3. Seja $j \leftarrow j + 1$, fazer $SAIFI_{\text{máximo}j} = SAIFI_{\text{máximo}j-1} - 0,01$ e retornar ao Passo 2.
4. Seja $i \leftarrow i + 1$, fazer $SAIDI_{\text{máximo}i} = SAIDI_{\text{máximo}i-1} - 0,01$ e resolver o modelo (66)-(84) resultante. Se factível, retornar ao Passo 2. Caso contrário, parar o algoritmo e construir a SSP.

3.4.1 TESTES E RESULTADOS

Dois sistemas testes, de 43 e 136 nós, são apresentados nesta seção para demonstrar o desempenho e robustez da metodologia ε -constraint aplicada ao modelo de PCSOIM do problema da RSDC, dado pelo conjunto de equações (66)-(79).

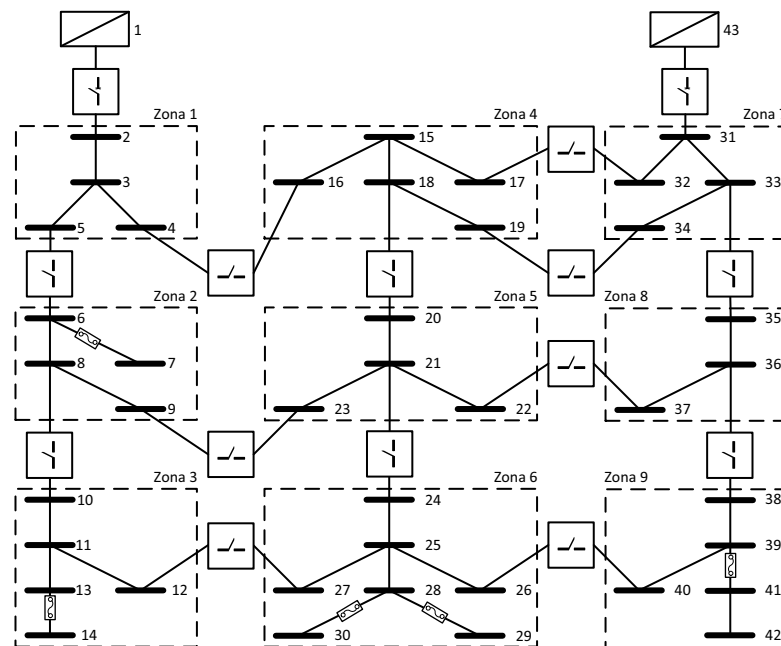
Para os dois modelos, as constantes dos sistemas são: $c^{\text{ls}} = \$1/\text{kW}$, $f_{\text{perdas}} = 0,3$, $V^{\text{nom}} = 7,967 \text{ kV}$, $\underline{V} = 0,9V^{\text{nom}}$, $\bar{V} = V^{\text{nom}}$, $R^{\text{ch}} = 0,001 \Omega$ e $r_{\text{sw}} = 0,5 \text{ h}$.

Toda a metodologia de otimização foi desenvolvida na linguagem de programação matemática AMPL (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003) e os modelos de PCSOIM foram resolvidos utilizando as opções padrões do CPLEX (ILOG INC., 2008), com um “gap” de convergência de 1%. Todos os casos foram executados numa estação de trabalho com processador Intel® Core™ i5-4570.

3.4.1.1 Sistema Teste de 43 nós

O sistema teste de 43 nós da Fig. 18 tem duas fontes de alimentação no nó 1 e 43, respectivamente, 9 zonas de carga, 32 ramos (alguns deles protegidos por fusíveis nas laterais), e 15 chaves de interconexão entre as diferentes zonas. Por simplicidade, todas as chaves e disjuntores do sistema da Fig. 18 possuem parâmetros idênticos. Os dados elétricos e de confiabilidade do sistema da Fig. 18 se encontram resumidos na Tabela 41 no Anexo A. As linhas sombreadas da Tabela 41 representam chaves ou disjuntores da rede¹.

Figura 18 – Sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga: Construção da PSS.



Fonte: Elaboração do autor.

A Tabela 25 contém as taxas de falta média (λ_z) e os tempos de restauração (r_z) de cada zona do sistema da Fig. 18, calculados utilizando as equações (63) e (64).

A SSP da Fig. 19 foi construída utilizando a metodologia ε -constraint estabelecida na seção 3.4. O padrão de cores na Fig. 19 representa as perdas de potência ativa calculadas para cada topologia da fronteira de soluções, e cada coordenada (x,y) indica os limites de confiabilidade $SAIDI_{\text{máximo}}$ e $SAIFI_{\text{máximo}}$ estabelecidos para essa solução. As áreas brancas da Fig. 19 são as regiões inefectíveis do problema da RSDC.

A Tabela 26 identifica a topologia correspondente a cada uma das regiões da Fig. 19, em função das chaves que ficaram abertas após a convergência dos modelos de RSDC resolvidos.

¹ Note que os parâmetros de confiabilidade das chaves são desconsiderados da análise proposta, caso eles sejam necessários, então cada chave e disjuntor pode ser separado num novo ramo com os dados de confiabilidade da chave, conectado a uma chave ideal através de um nó artificial.

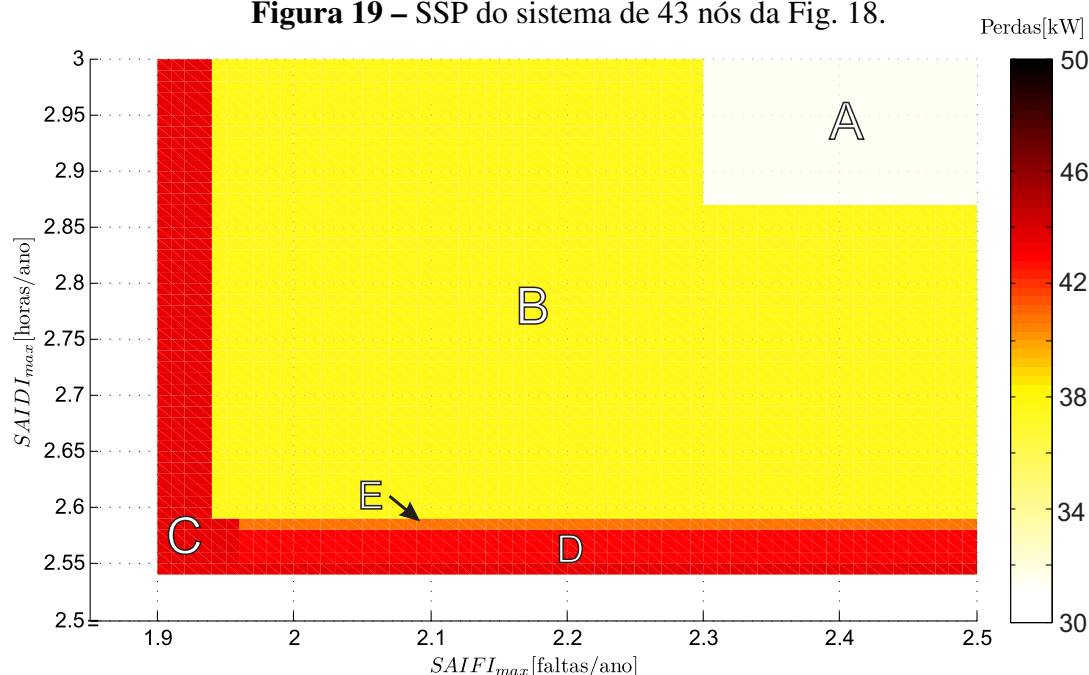
Tabela 25 – λ_z e r_z calculados para cada zona do sistema da Fig. 18.

Zone z	λ_z [faltas/ano]	r_z [horas]	Zone z	λ_z [faltas/ano]	r_z [horas]	Zone z	λ_z [faltas/ano]	r_z [horas]
1	0,30	2,00	4	0,40	2,00	7	0,60	2,00
2	0,20	2,00	5	0,30	2,00	8	0,40	2,00
3	0,30	2,00	6	0,80	2,00	9	0,40	2,00

Fonte: Elaboração do autor.

Note que, para $SAIFI_{\text{máximo}} > 2,29$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{máximo}} > 2,87$ horas/ano (Configuração A), a solução é equivalente à topologia da rede que minimiza as perdas de potência ativas (31,5 kW) desconsiderando a confiabilidade. Por outro lado, a configuração com os melhores índices de confiabilidade corresponde a configuração C, porém, as perdas se incrementam até 43,7 kW.

Figura 19 – SSP do sistema de 43 nós da Fig. 18.



Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 26 – Topologias da SSP da Fig. 19.

Sector	Configuração [Chaves abertas]	Perdas kW	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
A	4-16, 9-23, 12-27, 19-34, 22-37, 26-40	31,5	2,87	2,29
B	4-16, 9-23, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	37,7	2,60	1,93
C	4-16, 18-20, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	43,7	2,53	1,90
D	9-23, 17-32, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	43,0	2,55	1,96
E	9-23, 12-27, 17-32, 19-34, 22-37, 26-40	40,8	2,59	1,96

Fonte: Elaboração do autor.

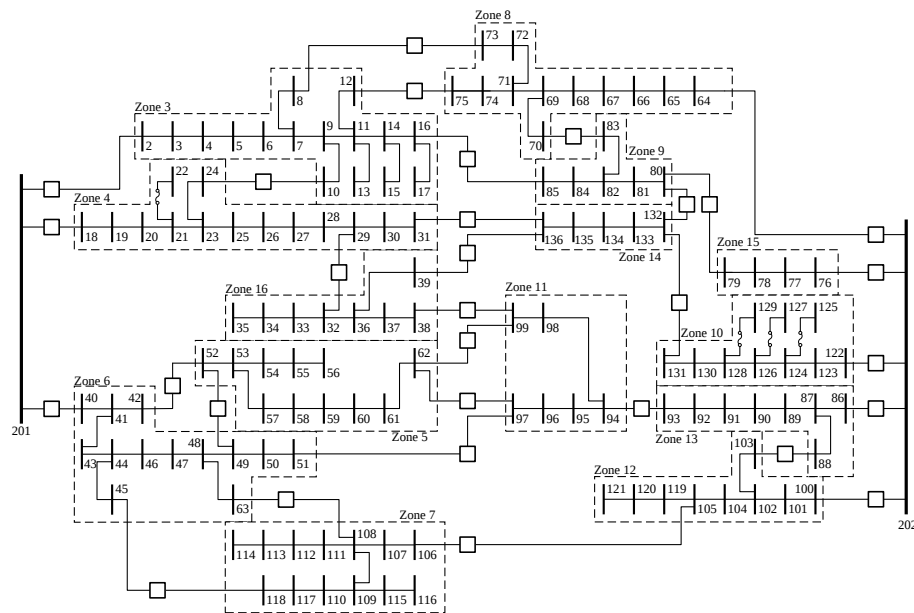
As ED encarregadas de planejar a operação dos SDMT poderão aproveitar o SSP da Fig. 19 para escolher a topologia da rede que melhor se adapte aos seus critérios econômicos e de qualidade do serviço.

3.4.1.2 Sistema real de 136 nós

O sistema real de 136 nós da Fig. 20 foi adaptado de Lavorato et al. (2010). O sistema tem duas fontes (nós 201 e 202) e 16 zonas de carga indicadas na Fig. 20. A zona 1 e 2 correspondem aos nós fonte 201 e 202, respectivamente. Todos as 30 chaves estão indicadas com quadrados, e alguns ramos estão protegidos por fusíveis nas laterais. Os dados elétricos e de confiabilidade do sistema da Fig. 20 se encontram resumidos na Tabela 42 no Anexo A.

A Tabela 27 contem as taxas de falta média (λ_z) e os tempos de restauração (r_z) de cada zona do sistema da Fig. 20, calculados utilizando as equações (63) e (64).

Figura 20 – Sistema teste de 136 nós e 16 zonas de carga: Construção da PSS.



Fonte: Elaboração do autor.

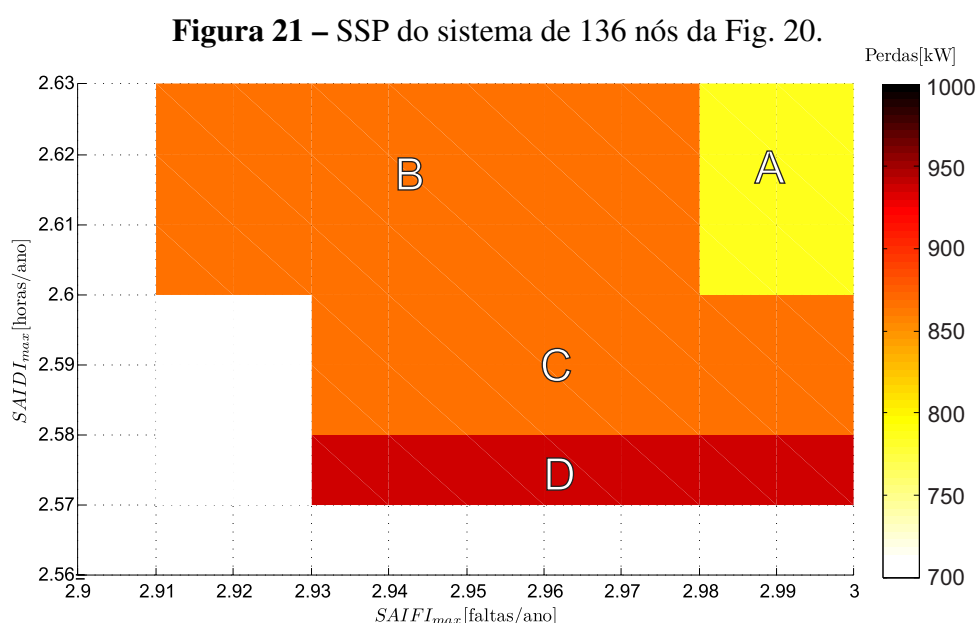
Tabela 27 – λ_z e r_z calculados para cada zona do sistema da Fig. 20.

Zone z	λ_z [faltas/ano]	r_z [horas]	Zone z	λ_z [faltas/ano]	r_z [horas]	Zone z	λ_z [faltas/ano]	r_z [horas]
3	0,75	2,00	8	0,55	2,00	13	0,35	2,00
4	0,60	2,00	9	0,25	2,00	14	0,20	2,00
5	0,50	3,00	10	0,30	2,00	15	0,15	2,00
6	0,60	2,00	11	0,25	2,00	16	0,35	2,00
7	0,60	3,00	12	0,40	3,00			

Fonte: Elaboração do autor.

Mais uma vez, a SSP da Fig. 21 do sistema real de 136 nós foi construída utilizando a metodologia ε -constraint e o modelo de PCSOIM da RSCD, dado pelo conjunto de equações (66)-(79). O PSS resultante estabelece para as ED quais são as consequências de escolher uma ou outra topologia da rede, em termos das perdas de potência e os indicadores gerais de confiabilidade médios dos SDMT.

A Tabela 28 identifica a topologia correspondente a cada um das regiões da Fig. 21, em função de aquelas chaves que ficaram abertas após a convergência dos modelos de RSDC resolvidos, e os valores médios dos índices de confiabilidade, $SAIDI_{\text{médio}}$ e $SAIFI_{\text{médio}}$, calculados para cada configuração.



Fonte: Adaptado de Lavorato et al. (2010).

Tabela 28 – Topologias da SSP da Fig. 21.

Sector	Configuração [Chaves abertas]	Perdas kW	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
A	49-52, 105-106, 12-75, 16-85, 31-136, 39-136, 38-99, 62-99, 62-97, 51-97, 45-118, 8-73, 70-83, 88-103, 80-132, 24-10	787.60	2,61	2,97
B	12-75, 16-85, 31-136, 39-136, 38-99, 62-99, 62-97, 45-118, 63-108, 8-73, 70-83, 88-103, 42-52, 80-132, 93-94, 24-10	866.70	2,60	2,91
C	49-52, 105-106, 12-75, 16-85, 31-136, 39-136, 38-99, 62-97, 51-97, 45-118, 8-73, 70-83, 88-103, 42-52, 80-132, 24-10	867.14	2,58	2,93
D	49-52, 105-106, 12-75, 16-85, 31-136, 38-99, 62-99, 62-97, 51-97, 45-118, 8-73, 70-83, 88-103, 80-132, 32-29, 24-10	934,47	2,57	2,94

Fonte: Elaboração do autor.

3.4.2 A METODOLOGIA ε -CONSTRAINT PARA RESOLVER O PROBLEMA DA RSDC

A metodologia ε -constraint é um procedimento simples de implementar e garante a geração da fronteira ótima de soluções não-dominadas, ou SSP, quando aplicado a problemas convexos combinatórios com múltiplas funções objetivo conflitantes (EHRGOTT, 2005, p. 98). Porém, é uma metodologia computacionalmente custosa, pois cada um dos pontos (x, y) da SSP requer a solução de um modelo completo de PCSOIM, dado pelo conjunto de equações (66)-(84). Quanto maior o sistema e/ou o número de chaves alocadas, o solver de problemas de PCSOIM precisará de mais tempo para convergir até a solução ótima em cada ponto da SSP. Ainda com excelentes recursos computacionais, a construção da SSP pode demorar várias horas ou até dias, e o tempo aumenta se os valores iniciais dos limites de confiabilidade $SAIDI_{\text{máximo } 1}$ e $SAIFI_{\text{máximo } 1}$, utilizados como ponto inicial na metodologia ε -constraint da seção 3.4, estão muito afastados da região infactível da SSP.

Contudo, a maior deficiência da modelagem proposta é o desconhecimento da natureza aleatória dos fenômenos associados à confiabilidade dos SDMT. Os valores médios das taxas de falta nos ramos (λ_{ij}) são valores obtidos da análise estatística dos registros históricos das faltas nos ramos, e sua precisão depende da qualidade da informação obtidas pelas ED ao longo dos anos. Se a qualidade da informação estatística não é boa, então a predição da confiabilidade baseada nos valores médios de λ_{ij} pode resultar irreal, e as soluções geradas pelos modelos matemáticos baseadas nessa informação são sub-ótimas.

Para lidar com a incerteza das taxas de falta dos ramos e, aliás, diminuir o número de vezes que o modelo matemático deve ser resolvido, o modelo determinístico de PCSOIM do problema da RSDC, dado pelo conjunto de equações (66)-(79), será transformado em um modelo de Programação Robusta. O novo modelo matemático do problema da RSDC Robusto também é um modelo de PCSOIM, mas, ele incorpora a incerteza dos parâmetros da taxa de faltas nos ramos através da *geração de soluções que são ótimas para os valores médios das taxas de falta e confiáveis ainda nos casos onde as taxas sejam maiores do que o esperado*.

Nas seguintes seções está detalhado o desenvolvimento do modelo Robusto para o problema da RSDC. Começando pela teoria geral da Otimização Robusta até a formulação e análise do modelo de PCSOIM da RSDC Robusta na seção 3.6.

3.5 PROGRAMAÇÃO ROBUSTA

O propósito geral da programação robusta é desenvolver modelos imunes à incerteza dos dados. A metodologia utilizada para tornar modelos de programação linear em modelos de programação robusta foi desenvolvida por Bertsimas e Sim (2004). A metodologia protege a restrição i de ser violada deterministicamente, quando só um número Γ_i preestabelecido de coeficientes da restrição i mudam aleatoriamente de valor. Ou seja, garante-se que a solução do modelo robusto é factível se pelo menos Γ_i coeficientes mudam de valor. A metodologia

considera que os parâmetros sob incerteza não alcançaram seus valores críticos todos ao mesmo tempo, em outras palavras, a solução gerada pelo modelo robusto é factível ainda nos casos que a natureza produza mudanças incertas em alguns, e não todos, os parâmetros do modelo; como realmente acontece na realidade.

A construção da formulação robusta é uma aproximação linear que pode ser generalizada para problemas de otimização linear inteira-mista sem provocar não-linearidades no modelo, e sem acrescentar o número de variáveis inteiras do problema original. A metodologia protege as restrições robustas das infactibilidades, tanto deterministicamente (Γ_i coeficientes da restrição i podem alcançar seus valores críticos sem violar a restrição) como probabilisticamente (BERTSIMAS; SIM, 2004).

3.5.1 FORMULAÇÃO GERAL DA PROGRAMAÇÃO ROBUSTA

Seja o modelo padrão de otimização dado pela expressão (85).

$$\left\{ \begin{array}{ll} \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.a.} \\ \mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \\ \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \end{array} \right. \quad (85)$$

Onde todas as incertezas estão contidas em alguns (ou todos) os coeficientes que formam a matriz de coeficientes $\mathbf{A}$. Caso existam incertezas nos coeficientes do vetor de custos $\mathbf{c}$, pode-se inserir a função objetivo como uma nova restrição do problema através da expressão $z - \mathbf{c}^T \mathbf{x} \leq 0$ e maximizando z em (85). O vetor $\mathbf{x}$ contém as variáveis de decisão do modelo de otimização.

Agora, considere uma linha particular i da matriz $\mathbf{A}$ e permita que $\mathbf{J}_i$ represente o conjunto de coeficientes da linha i da matriz $\mathbf{A}$ que estão sujeitos à incerteza. Logo, cada um dos coeficientes $\tilde{a}_{ij}, j \in \mathbf{J}_i$ da matriz $\mathbf{A}$, representa um parâmetro aleatório, com um intervalo definido e limitado de incerteza simétrico, que pode alcançar valores entre $\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij} \leq \tilde{a}_{ij} \leq \bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}$, onde $\bar{a}_{ij}$ representa o valor médio do coeficiente $\tilde{a}_{ij}$, e $\hat{a}_{ij}$ representa o grau máximo de desvio simétrico positivo que pode tomar o coeficiente $\tilde{a}_{ij}$ em torno do seu valor médio. Logo, a formulação que fornece o maior grau de proteção contra a incerteza em $\mathbf{A}$ é dada pelo modelo (86). Note que a formulação em (86) está reescrita na forma do conjunto de somatórias, incorporando o grau máximo de desvio simétrico positivo $\hat{a}_{ij}$ em torno do valor médio dos coeficientes $\bar{a}_{ij}$.

O modelo robusto de (86) produz o maior grau de proteção possível, e foi formulado originalmente por Soyster (1973). A demonstração da validade da solução robusta utilizando a formulação (86) pode ser consultada em Bertsimas e Sim (2004). Porém, a formulação robusta em (86) é extremadamente conservadora na prática, no sentido que a solução gerada por (86) tem o pior valor da função objetivo possível, comparado com o modelo considerando só os valores médios dos coeficientes $\bar{a}_{ij}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.a.} \\ \sum_j \bar{a}_{ij} x_j + \sum_{j \in \mathbf{J}_i} \hat{a}_{ij} y_j \leq b_i \quad \forall i \\ -y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \\ \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \\ \mathbf{y} \geq \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (86)$$

3.5.2 FORMULAÇÃO ROBUSTA DE Bertsimas e Sim (2004)

A formulação robusta proposta por Bertsimas e Sim (2004), tem a capacidade de manter a factibilidade da solução gerada pelo modelo robusto sob incerteza dos parâmetros da matriz $\mathbf{A}$, sem degradar excessivamente o valor da função objetivo da solução final, como sucede na formulação conservadora de Soyster (1973) em (86).

Para cada restrição i , utiliza-se o parâmetro Γ_i (não necessariamente inteiro), que pode tomar valores no intervalo entre $[0, |\mathbf{J}_i|]$. A função do parâmetro Γ_i é ajustar o grau de robustez da modelo em detrimento do nível de conservadorismo da solução final. Naturalmente, é improvável que todos os parâmetros $\bar{a}_{ij}$ mudem ao mesmo tempo. Logo, o propósito da formulação robusta de Bertsimas e Sim (2004) é manter a factibilidade da solução ainda nos casos onde pelo menos $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ coeficientes mudam em cada restrição i .

Seja o parâmetro Γ_i inteiro para cada restrição i , a formulação do modelo robusto (ainda não linear) é dado pela expressão (87).

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.a.} \\ \sum_j \bar{a}_{ij} x_j + \max_{\{S_i | S_i \subseteq \mathbf{J}_i, |S_i| = \Gamma_i\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} y_j \right\} \leq b_i \quad \forall i \\ -y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \\ \mathbf{l} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u} \\ \mathbf{y} \geq \mathbf{0} \end{array} \right. \quad (87)$$

Note que em (87), se $\Gamma_i = 0$, as restrições são equivalentes ao modelo considerando só os valores médios dos coeficientes $\bar{a}_{ij}$, caso $\Gamma_i = |\mathbf{J}_i|$, então se transforma no modelo de Soyster.

O modelo linear equivalente de (87) é dado pela formulação (88). O procedimento de transformação do modelo de programação robusto não linear de (87) no seu equivalente linear em (88) é demonstrado em Bertsimas e Sim (2004).

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.a.} \\ \sum_j \bar{a}_{ij} x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in \mathbf{J}_i} p_{ij} \leq b_i \quad \forall i \\ z_i + p_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_j \quad \forall i, \forall j \in \mathbf{J}_i \\ -y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \\ l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \\ p_{ij} \geq 0 \quad \forall i, \forall j \in \mathbf{J}_i \\ y_j \geq 0 \quad \forall j \\ z_i \geq 0 \quad \forall i \end{array} \right. \quad (88)$$

O modelo de programação robusta em (88) introduz novas variáveis contínuas z_i e $p_{ij} \forall i, \forall j \in \mathbf{J}_i$ além do parâmetro de ajuste Γ_i , originadas da transformação dual do problema de maximização $\max_{\{S_i | S_i \subseteq \mathbf{J}_i, |S_i| = \Gamma_i\}} \{\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} y_j\}$ da formulação em (87).

3.5.3 RESTRIÇÕES DE CONFIABILIDADE ROBUSTAS: MOTIVAÇÃO

A programação robusta, dada pela formulação (88), pode ser aproveitada na modelagem da reconfiguração ótima de SDMT considerando a melhora dos indicadores de confiabilidade (RSDC), para fornecer soluções que consideram a incerteza na magnitude das taxas de faltas por ano em cada ramo da rede (λ_{ij}). Até agora, o valor médio de λ_{ij} foi utilizado para fazer o cálculo dos índices *SAIDI* e *SAIFI* da topologia que minimiza as perdas elétricas e melhora a confiabilidade da rede. Porém, λ_{ij} é um parâmetro aleatório (BILLINTON; ALLAN, 1996, p. 244), pois os fenômenos que produzem as faltas nos ramos da rede são pouco controláveis, como no caso das descargas elétricas atmosféricas, e estão sujeitos à incerteza e estocasticidade.

Assim, uma configuração que seja ótima para o valor médio da taxa de faltas por ano em cada ramo (λ_{ij}), planejada utilizando o modelo de reconfiguração com critérios de confiabilidade dado pelas equações (66)-(79), pode apresentar valores de *SAIDI* e *SAIFI* acima dos limites estabelecidos pelos reguladores no caso que um, vários, ou até todos as taxas λ_{ij} resultem maiores aos seus valores médios prognosticados.

Em conclusão, a solução fornecida pela formulação robusta do problema da RSDC pode gerar uma solução de pior valor da função objetivo, comparado com a formulação determinística (66)-(79) que utiliza os valores médios de λ_{ij} , porém, o sistema será confiável (em termos dos índices da confiabilidade), ainda nos casos em que os parâmetros sob incerteza apresentem valores afastados da média estabelecida.

3.5.4 RESTRIÇÕES DE CONFIABILIDADE ROBUSTAS: FORMULAÇÃO

Seja o parâmetro sob incerteza, λ_{ij} , que representa as taxas de faltas ao longo do ano para cada ramo $ij \in \Omega_l$. Considera-se que os parâmetros aleatórios λ_{ij} têm um intervalo definido de incerteza simétrico e limitado, que pode tomar valores entre 0, $0 \leq \lambda_{ij} \leq \lambda_{ij}^{\max}$ faltas/ano. Se os valores máximos de λ_{ij} são estimados, então os valores das taxas de falta média por zona (λ_z) da equação (63) é modificada pela equação (89). Os tempos de restauração dos ramos (r_{ij}) são considerados determinísticos e nominais, portanto, a equação (64) para o cálculo dos tempos de restauração das zonas (r_z) se repete em (90).

$$\lambda_z = \sum_{\substack{ij \in \Omega_{l_z} \\ ij \text{ não está} \\ \text{protegido} \\ \text{por fusíveis}}} \frac{1}{2} \lambda_{ij}^{\max} \quad \forall z \in \Omega_z \quad (89)$$

$$r_z = \frac{1}{|\Omega_{l_z}|} \sum_{ij \in \Omega_{l_z}} r_{ij} \quad \forall z \in \Omega_z \quad (90)$$

Se o intervalo de incerteza do parâmetro λ_z é simétrico e limitado, então λ_z pode tomar valores entre $[\lambda_z - \hat{\lambda}_z, \lambda_z + \hat{\lambda}_z]$, onde $\hat{\lambda}_z$ representa a magnitude do desvio simétrico de λ_z em torno do valor médio λ_z dado pela expressão (91).

$$\hat{\lambda}_z = \lambda_z \quad \forall z \in \Omega_z \quad (91)$$

Logo, o parâmetro λ_z pode tomar valores aleatórios entre 0,0 e $2\hat{\lambda}_z$, com probabilidade constante. Portanto, no pior dos cenários possíveis, todas as zonas da rede terão uma taxa anual de faltas iguais a $2\hat{\lambda}_z$, simultaneamente.

Agora, sejam as equações (83) e (84) que limitam os indicadores gerais de confiabilidade $SAIFI$ e $SAIDI$, respectivamente. Substituindo os termos $SAIFI_{\text{médio}}$ e $SAIDI_{\text{médio}}$ em (83) e (84) pelas restrições matemáticas dadas por (77) e (78), se obtém:

$$\frac{\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} \omega_{z,k} N_k \lambda_z + \sum_{k \in \Omega_b} N_k \lambda_{\text{fused}k}}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \leq SAIFI_{\text{máximo}}$$

$$\frac{\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} [z_{z,k} N_k r_z \lambda_z + (\omega_{z,k} - z_{z,k}) N_k r_{sw} \lambda_z] + \sum_{k \in \Omega_b} N_k \lambda_{\text{fused}k} r_{\hat{z}_k}}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \leq SAIDI_{\text{máximo}}$$

Deixando as variáveis de decisão binárias no lado esquerdo das desigualdades, e reagrupando os somatórios se consegue as equações (92) e (93).

$$\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} \omega_{z,k} N_k \lambda_z \leq \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIFI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k}) \quad (92)$$

$$\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} [z_{\text{act}k,z} N_k r_z \lambda_z + (\omega_{z,k} - z_{\text{act}k,z}) N_k r_{sw} \lambda_z] \leq \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIDI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k} r_{\hat{z}_k}) \quad (93)$$

As equações (92) e (93) são da forma $\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b}$. Na equação (92) os vetores $\mathbf{A}_{1 \times (|\Omega_b| |\Omega_z|)}$, $\mathbf{x}_{(|\Omega_b| |\Omega_z|) \times 1}$ e $\mathbf{b}_{1 \times 1}$ são:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} N_1 \lambda_1 & N_2 \lambda_1 & \dots & N_k \lambda_z & \dots & N_{\bar{k}} \lambda_{\bar{z}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_{1,1} \\ \omega_{2,1} \\ \vdots \\ \omega_{k,z} \\ \vdots \\ \omega_{\bar{k},\bar{z}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIFI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k})$$

Onde $\bar{k}$ representa o último dos nós do conjunto Ω_b , e $\bar{z}$ representa a último das zonas do conjunto Ω_z . Note que todos os coeficientes do vetor $\mathbf{A}$ estão multiplicados pela incerteza do parâmetro λ_z . Então, a equação (92) pode ser transformada num conjunto de restrições robustas dada pelas equações (94)-(97), utilizando a formulação da expressão (88), que melhoram a capacidade da restrição para se manter factível ainda em condições extremas dos parâmetros aleatórios λ_z .

$$\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} \omega_{z,k} N_k \bar{\lambda}_z + z^{(\lambda)} \Gamma^{(\lambda)} + \sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} P_{z,k}^{(\lambda),\omega} \leq \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIFI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k}) \quad (94)$$

$$z^{(\lambda)} + P_{z,k}^{(\lambda),\omega} \geq N_k \hat{\lambda}_z \omega_{z,k} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (95)$$

$$z^{(\lambda)} \geq 0 \quad (96)$$

$$P_{z,k}^{(\lambda),\omega} \geq 0 \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (97)$$

A equação (94) é o equivalente robusto da equação (92). O parâmetro de ajuste robusto relacionado com a frequência das faltas $\Gamma^{(\lambda)}$, pode ser ajustado entre 0 e $|\Omega_b| |\Omega_z|$. Caso $\Gamma^{(\lambda)} = 0$, a solução só considera os valores médios das taxas de falta anuais das zonas (λ_z) na avaliação do índice de confiabilidade *SAIFI*. Caso $\Gamma^{(\lambda)} = |\Omega_b| |\Omega_z|$, a restrição será totalmente conservadora e, se a resposta é factível, então a restrição (92) será garantida ainda no caso crítico em que todos os coeficientes aleatórios λ_z estejam nos seus máximos valores estimados (formulação de Soyster). Note que, o conjunto de coeficientes sob incerteza $\mathbf{J}_i$ é dado pela combinação dos conjuntos Ω_b e Ω_z , segundo a dimensão do vetor $\mathbf{A}$. As equações (95)-(97) complementam a formulação robusta do índice de confiabilidade *SAIFI*, e provêm da modelagem robusta formulada em (88).

No caso da equação (93) os vetores $\mathbf{A}_{1 \times (2|\Omega_b||\Omega_z|)}$, $\mathbf{x}_{(2|\Omega_b||\Omega_z|) \times 1}$ e $\mathbf{b}_{1 \times 1}$ são:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} N_1(r_1 - r_{sw})\lambda_1 & N_2(r_1 - r_{sw})\lambda_1 & \dots & N_k(r_z - r_{sw})\lambda_z & \dots \\ N_{\bar{k}}(r_{\bar{z}} - r_{sw})\lambda_{\bar{z}} & N_1 r_{sw}\lambda_1 & N_2 r_{sw}\lambda_1 & \dots & N_k r_{sw}\lambda_z & \dots & N_{\bar{k}} r_{sw}\lambda_{\bar{z}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} z_{act1,1} \\ z_{act2,1} \\ \vdots \\ z_{actk,z} \\ \vdots \\ z_{act\bar{k},\bar{z}1} \\ \omega_{1,1} \\ \omega_{2,1} \\ \vdots \\ \omega_{k,z} \\ \vdots \\ \omega_{\bar{k},\bar{z}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIDI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k} r_{\hat{z}_k})$$

Onde $\bar{k}$ representa o último dos nós do conjunto Ω_b , e $\bar{z}$ representa a último das zonas do conjunto Ω_z . Note que todos os coeficientes do vetor $\mathbf{A}$ da equação (93) estão multiplicados pela incerteza do parâmetro λ_z , porém, o número de variáveis de decisão da equação (93) é o dobro em comparação com a equação (92).

Finalmente, a equação (93) pode ser transformada num conjunto de restrições robustas dada pelas equações (98)-(103), utilizando a formulação da expressão (88), e dobrando o número de variáveis $p_{ij} \forall i, \forall j \in \mathbf{J}_i$ num total de $2|\Omega_b||\Omega_z|$.

$$\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} [z_{actk,z} N_k r_z \lambda_z + (\omega_{z,k} - z_{actk,z}) N_k r_{sw} \lambda_z] + z^{(U)} \Gamma^{(U)} + \sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} P_{z,k}^{(U),z_{act}} + \sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} P_{z,k}^{(U),\omega} \leq \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIDI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k} r_{\hat{z}_k}) \quad (98)$$

$$z^{(U)} + P_{z,k}^{(U),z_{act}} \geq N_k (r_z - r_{sw}) \hat{\lambda}_z z_{actk,z} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (99)$$

$$z^{(U)} + P_{z,k}^{(U),\omega} \geq N_k r_{sw} \hat{\lambda}_z \omega_{z,k} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (100)$$

$$z^{(U)} \geq 0 \quad (101)$$

$$P_{z,k}^{(U),z_{act}} \geq 0 \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (102)$$

$$P_{z,k}^{(U),\omega} \geq 0 \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (103)$$

A equação (98) é o equivalente robusto da equação (93). O parâmetro de ajuste relacionado com a duração das faltas $\Gamma^{(U)}$, pode ser ajustado entre 0 e $2|\Omega_b||\Omega_z|$. Caso $\Gamma^{(U)} = 0$, a solução do modelo robusto considera os valores médios das taxas de falta anual das zonas

(λ_z) na avaliação do índice de confiabilidade *SAIDI*. Caso $\Gamma^{(U)} = 2|\Omega_b||\Omega_z|$, a restrição será totalmente conservadora e, se a resposta é factível, então a restrição (93) será garantida ainda no caso crítico em que todos os λ_z atinjam seus máximos valores esperados (formulação de Soyster). As equações (99)-(103) complementam a formulação robusta do índice de confiabilidade *SAIDI*, e provêm da modelagem robusta formulada em (88).

3.6 MODELO DE PROGRAMAÇÃO ROBUSTA DO PROBLEMA DA RSDC

Finalmente, o modelo da RSDC Robusto está representado pelo conjunto de equações (104)-(124). O conjunto de equações (104)-(124) formam um modelo de PCSOIM convexo e sua solução ótima pode ser encontrada utilizando solvers comerciais de otimização como *CPLEX* e a linguagem de programação matemática *AMPL*.

$$\min \quad c^{\text{loss}} f_{\text{perdas}} \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^{\text{sqr}} + R^{\text{ch}} \sum_{ij \in \Omega_{\text{ch}}} I_{ij}^{\text{ch,sqr}} \right) \quad (104)$$

Sujeito a:

$$(37b)-(37m) \quad (105)$$

$$\sum_{\substack{ji \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} f_{ji,k} - \sum_{\substack{ij \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} f_{ij,k} + f_{z,k}^S = f_{z,k}^D \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (106)$$

$$|f_{ij,k}| \leq y_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (107)$$

$$z_{\text{act}\hat{z}_j,k} \geq |f_{ij,k}| \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (108)$$

$$z_{\text{act}\hat{z}_i,k} \geq |f_{ij,k}| \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (109)$$

$$\omega_{\hat{z}_j,k} \geq \omega_{\hat{z}_i,k} + y_{ij} - 1 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (110)$$

$$\omega_{\hat{z}_i,k} \geq \omega_{\hat{z}_j,k} + y_{ij} - 1 \quad \forall ij \in \Omega_{\text{sw}}, \forall k \in \Omega_b \quad (111)$$

$$z_{\text{act}z,k} \leq \omega_{z,k} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (112)$$

$$\omega_{z,k} \leq f_{z,k}^S \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z^S \quad (113)$$

$$z_{\text{act}z,k} \leq \sum_{\substack{ij \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} |f_{ij,k}| + \sum_{\substack{ji \in \Omega_{\text{sw}} \\ \hat{z}_i = z}} |f_{ji,k}| \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (114)$$

$$SAIFI_{\text{médio}} = \frac{\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} \omega_{z,k} N_k \lambda_z + \sum_{k \in \Omega_b} N_k \lambda_{\text{fused}_k}}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \quad (115)$$

$$SAIDI_{\text{médio}} = \frac{\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} [z_{\text{act}k,z} N_k r_z \lambda_z + (\omega_{z,k} - z_{\text{act}k,z}) N_k r_{\text{sw}} \lambda_z] + \sum_{k \in \Omega_b} N_k \lambda_{\text{fused}_k} r_{\hat{z}_k}}{\sum_{k \in \Omega_b} N_k} \quad (116)$$

$$\sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} \omega_{z,k} N_k \lambda_z + z^{(\lambda)} \Gamma^{(\lambda)} + \sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} P_{z,k}^{(\lambda),\omega} \leq \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIFI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k}) \quad (117)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} [z_{\text{act}k,z} N_k r_z \lambda_z + (\omega_{z,k} - z_{\text{act}k,z}) N_k r_{sw} \lambda_z] + z^{(U)} \Gamma^{(U)} + \sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} P_{z,k}^{(U),z_{\text{act}}} + \\ \sum_{k \in \Omega_b} \sum_{z \in \Omega_z} P_{z,k}^{(U),\omega} \leq \sum_{k \in \Omega_b} N_k (SAIDI_{\text{máximo}} - \lambda_{\text{fused}k} r_{\hat{z}k}) \end{aligned} \quad (118)$$

$$z^{(\lambda)} + P_{z,k}^{(\lambda),\omega} \geq N_k \hat{\lambda}_z \omega_{z,k} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (119)$$

$$z^{(U)} + P_{z,k}^{(U),z_{\text{act}}} \geq N_k (r_z - r_{sw}) \hat{\lambda}_z z_{\text{act}k,z} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (120)$$

$$z^{(U)} + P_{z,k}^{(U),\omega} \geq N_k r_{sw} \hat{\lambda}_z \omega_{z,k} \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (121)$$

$$z^{(\lambda)} \geq 0 \text{ e } z^{(U)} \geq 0 \quad (122)$$

$$P_{z,k}^{(\lambda),\omega} \geq 0, P_{z,k}^{(U),z_{\text{act}}} \geq 0 \text{ e } P_{z,k}^{(U),\omega} \geq 0 \quad \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (123)$$

$$y_{ij}, z_{\text{act}k,z}, \omega_{z,k} \in \{0, 1\} \quad \forall ij \in \Omega_{\text{ch}}, \forall k \in \Omega_b, \forall z \in \Omega_z \quad (124)$$

Note que as equações (115) e (116) calculam os valores médios dos índices de confiabilidade geral da configuração gerada pelo modelo de RSDC Robusto. A magnitude de desvio positivo simétrico das taxas de falta por zona ($\hat{\lambda}_z$) são calculadas utilizando a equação (91).

3.6.1 EXEMPLO DIDÁTICO DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO ROBUSTO DA RSDC

Para demonstrar o funcionamento do modelo robusto das equações (104)-(124) é utilizado novamente o sistema didático da Fig. 22. A rede simula um SDEE com duas fontes e 14 chaves alocadas ao longo do sistema. O sistema didático tem 43 nós, 31 ramos, 9 zonas de carga, e possui alguns ramos protegidos por fusíveis. As quatro hipóteses da secção 3.3.2 são consideradas na avaliação dos critérios de confiabilidade.

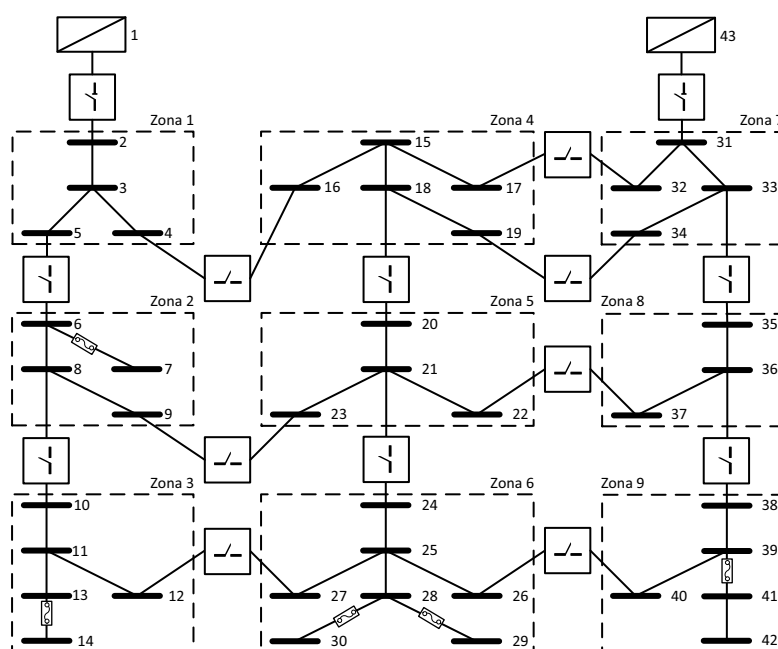
As constantes do sistema da Fig. 22 são: $c^{\text{ls}} = \$1/\text{kW}$, $f_{\text{perdas}} = 0,3$, $V^{\text{nom}} = 7,967 \text{ kV}$, $\underline{V} = 0,93 V^{\text{nom}}$, $\bar{V} = V^{\text{nom}}$, $R^{\text{ch}} = 0,001 \Omega$ e $r_{sw} = 0,5 \text{ h}$. Os dados elétricos dos nós e os ramos (incluindo as chaves de interconexão) encontram-se na Tabela 41 no Anexo A.

Note que, todos os parâmetros de confiabilidade estão associados com os ramos da rede e representam os valores médios das taxas de falta e os tempos de restauração anuais nos ramos. Caso sejam necessários considerar os parâmetros dos equipamentos conectados aos nós (transformadores, postes, aterramentos, etc.) então eles devem ser somados aos parâmetros dos ramos associados com cada um dos nós. Os parâmetros de confiabilidade das chaves de interconexão podem ser levados em conta através da transformação de cada chave num arranjo formado por um ramo e uma chave, utilizando um nó intermediário sem carga, onde o ramo contenha os parâmetros de confiabilidade da chave.

Antes de realizar a análise robusta da reconfiguração do sistema didático da Fig. 22, será testado o modelo de reconfiguração considerando os índices de confiabilidade gerais dado pelas

equações (66)-(84), para encontrar a solução do problema utilizando os valores médios das taxas de falta por ano do sistema didático da Fig. 22. Considere que, segundo ANEEL (2012b), os limites dos indicadores de continuidade anuais por cada ponto de conexão nos SDEE Categoria 4 (1 - 69 kV) são 5,24 horas de interrupção por ano e 4 interrupções de longa duração por ano, então, os indicadores gerais de confiabilidade máximas das equações (83) e (84) serão fixadas nos seguintes valores: $SAIFI_{\text{máximo}} = 4$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{máximo}} = 5,24$ horas/ano.

Figura 22 – Sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga: Modelo Robusto da RSDC.



Fonte: Elaboração do autor.

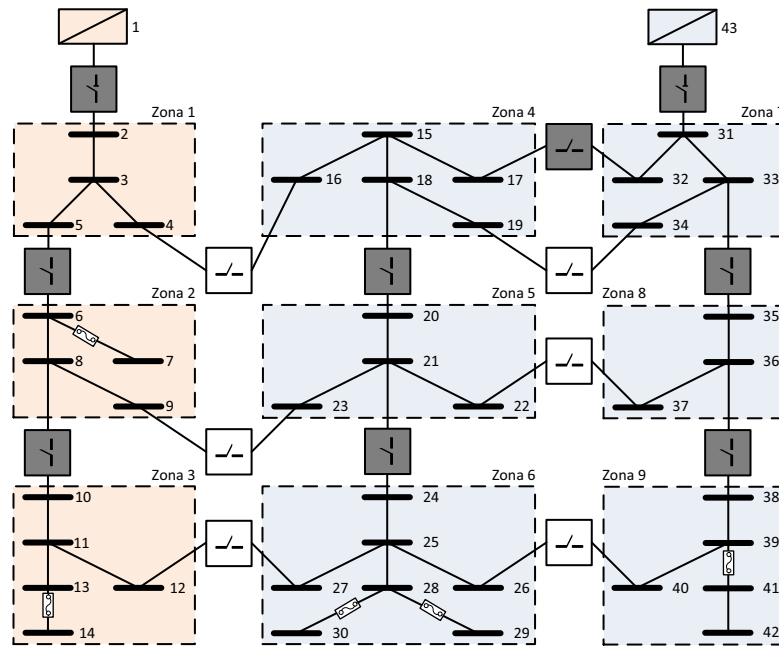
A Fig. 23 mostra a configuração do sistema obtida pelo modelo de reconfiguração com critérios de confiabilidade dado pelas equações não robustas (66)-(84). A topologia da Fig. 23 está formada por dois alimentadores, ambos radiais, diferenciados pelas cores vermelho e azul. As perdas totais de potência ativa obtidas são 31,5 kW e a magnitude de tensão mínima é de 0,9682 p.u. no nó 42 da zona 9. Os limites de tensão nos nós e corrente pelos ramos estão dentro de seus limites operativos. Os valores dos índices de confiabilidade médios da rede, calculados a partir das equações (78) e (79) são $SAIFI_{\text{médio}} = 2,29$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{médio}} = 2,87$ horas/ano.

A configuração do sistema da Fig. 23 corresponde à topologia que minimiza as perdas ativas no sistema didático de 43 nós. Isto acontece porque os valores dos índices de confiabilidade médios da rede são menores aos limites de confiabilidade estabelecidos, $SAIFI_{\text{máximo}} = 4$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{máximo}} = 5,24$ horas/ano. Portanto, a desigualdade das equações (83) e (84) são garantidas e o modelo aprimora as perdas de potência ativa na topologia da solução final.

Contudo, a solução da Fig. 23 não considera a incerteza dos parâmetros λ_{ij} nos ramos. Suponha que, num ano atípico, a média da taxa de falta dos ramos aumenta +75% em todos

os circuitos. Então, para a configuração da Fig. 23 o valor do SAIFI se acrescenta até 4,02 faltas/ano². Neste caso, a maior parte dos usuários da rede experimentarão uma média acima do valor do SAIFI permitido pela regulação, e as ED deverão compensá-los pela baixa qualidade do serviço.

Figura 23 – Configuração do sistema didático de 43 nós obtida pelo modelo de reconfiguração com critérios de confiabilidade das equações não robustas (66)-(84).



Fonte: Elaboração do autor.

Para incorporar a influencia da incerteza do parâmetro λ_{ij} na reconfiguração dos SDMT considerando os índices de confiabilidade gerais da rede, será utilizado o modelo do RSDC Robusto das equações (104)-(124). Os parâmetros sob incerteza λ_{ij} , $\forall ij \in \Omega_l$, são parâmetros aleatórios, com um intervalo definido de incerteza simétrico e limitado entre 0, $0 \leq \lambda_{ij} \leq \lambda_{ij}^{\max}$ faltas/ano. Para o caso do sistema didático de 43 nós da Fig. 22, os parâmetros de taxa máxima de faltas por ano para cada ramo, correspondem ao dobro do valor médio da taxa de faltas por ano da Tabela 41. Ou seja, $\lambda_{ij}^{\max} = 2\lambda_{ij}$, $\forall ij \in \Omega_l$. Assim, utilizando o procedimento descrito na seção 3.5.4, os valores médios (λ_z) e os desvios simétricos em torno do valor médio ($\hat{\lambda}_z$) do parâmetro λ_z para cada zona, e os tempos de restauração médios de cada zona (r_z) para o sistema didático de 43 nós, são mostrados na Tabela 29.

² Por outro lado, o SAIDI se acrescenta até 5,03 horas/ano

Tabela 29 – Parâmetros das taxas de falta por ano (λ_z) e reparação (r_z) das zonas do sistema da Fig. 22.

Zona	λ_z	$\hat{\lambda}_z$	r_z	Zona	λ_z	$\hat{\lambda}_z$	r_z
[z]	[faltas/ano]	[faltas/ano]	[horas]	[z]	[faltas/ano]	[faltas/ano]	[horas]
1	0,3	0,3	2	6	0,8	0,8	2
2	0,2	0,2	2	7	0,6	0,6	2
3	0,3	0,3	2	8	0,4	0,4	2
4	0,4	0,4	2	9	0,4	0,4	2
5	0,3	0,3	2				

Fonte: Elaboração do autor.

3.6.2 ESCOLHA DO PARÂMETRO DE AJUSTE ROBUSTO Γ PARA O PROBLEMA DA RSDC ROBUSTO

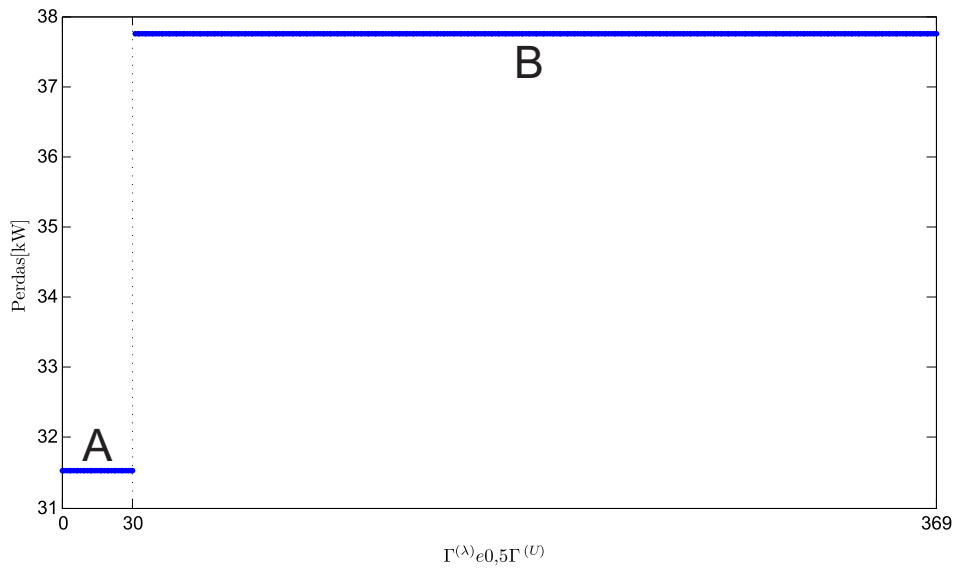
Uma das desvantagens da formulação robusta é a escolha adequada do parâmetro de ajuste robusto Γ . Valores muito baixos de Γ produz soluções relaxadas e valores muito elevados de Γ produz soluções conservadoras. Caso $\Gamma = |\mathbf{J}_i|$, onde $\mathbf{J}_i$ é o conjunto de parâmetros sob incerteza da restrição i , então a formulação é totalmente protegida e é equivalente á formulação de Soyster em (86).

3.6.2.1 CURVA DE SOLUÇÕES ROBUSTAS

Para obter uma perspectiva maior da influência das restrições robustas na reconfiguração dos SDMT considerando os índices de confiabilidade, é recomendável construir a curva de soluções obtidas para os diferentes valores de $\Gamma^{(\lambda)}$ entre 0,0 e $|\Omega_b||\Omega_z|$ e $\Gamma^{(U)}$ entre 0,0 e $2|\Omega_b||\Omega_z|$. Os passos para a construção da curva de soluções robustas em função dos parâmetros de ajuste $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$ são:

1. Seja $k \leftarrow 0$, fazer $\Gamma^{(\lambda)} = 0$ e $\Gamma^{(U)} = 0$ e resolver o modelo (104)-(124).
2. Salvar $SAIFI_{\text{médio}k}$, $SAIDI_{\text{médio}k}$ e o ponto de operação obtido na iteração k .
3. Fazer $k \leftarrow k + 1$, $\Gamma^{(\lambda)} = k$ e $\Gamma^{(U)} = 2\Gamma^{(\lambda)}$, e resolver o modelo (104)-(124). Se factível voltar ao passo 2, caso contrário continuar ao passo 4.
4. Construir a curva de soluções robustas do problema.

A curva da Fig. 24 mostra a magnitude das perdas de potência ativa para cada configuração obtida utilizando a metodologia descrita acima para o sistema da Fig. 22, à medida que os valores de $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$ aumentam. Cada um dos pontos da Fig. 24 representa uma configuração obtida pelo solver após a convergência. cada trecho da curva está identificada com uma letra para sua posterior referência.

Figura 24 – Curva de soluções robustas do sistema didático de 43 nós da Fig. 22.

Fonte: Elaboração do autor.

Na Fig. 24, pode-se verificar que a configuração (B), para $\Gamma^{(\lambda)} \geq 31$ ($\Gamma^{(U)} \geq 62$), corresponde à configuração totalmente conservadora (formulação de Soyser), cujos índices de confiabilidade estão abaixo de seus limites ainda na pior das incertezas possíveis.

A solução da configuração (A) é equivalente à resposta do problema de reconfiguração dos SDMT considerando os valores médios das taxas de falta durante a avaliação da confiabilidade do sistema da Fig. 22. A configuração (A) corresponde à topologia que minimiza as perdas de potência ativa, porém, ela não pode garantir que os limites de confiabilidade dados das equações (117) e (118) não sejam violados, caso as taxas de falta mudem aleatoriamente.

Finalmente, segundo a curva de soluções robusta da Fig. 24, somente existe uma única topologia que minimiza as perdas e garante, ao mesmo tempo, uma proteção robusta no intervalo $31 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 369$ ($62 \leq \Gamma^{(U)} < 738$). A configuração (B) protege totalmente o sistema, e impede que os índices de confiabilidade, SAIDI e SAIFI, sejam maiores do que os limites estabelecidos pelas agências, ainda se todos os parâmetros aleatórios λ_z dobrem seus valores médios. A Tabela 30 resume os dados das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas do sistema didático de 43 nós da Fig. 22, segundo a curva de soluções robustas da Fig. 24.

Além das configurações e as perdas de potência ativas, a Tabela 30 agrega os valores dos índices médios de confiabilidade $SAIFI_{\text{médio}}$ e $SAIDI_{\text{médio}}$, calculados para cada configuração robusta do sistema didático de 43 nós da Fig. 22, utilizando as equações (115) e (116).

Uma característica importante da curva de soluções robustas, é que ela mostra a resposta da função objetivo para cada configuração a medida em que os parâmetros de ajuste Γ aumentam, e a solução se torna mais robusta. Aliás, pode ser que não existam configurações totalmente robustas que garantem a factibilidade das restrições (117) e (118) frente a toda incerteza. Neste

Tabela 30 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 24.

Trecho	Intervalo dos parâmetros $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$	Topologia [Chaves fechadas]	Perdas [kW]	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
(A)	$0 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 30$ ($0 \leq \Gamma^{(U)} < 60$)	4-16, 9-23, 12-27, 19-34, 22-37, 26-40	31,5	2,87	2,29
(B)	$31 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 369$ ($62 \leq \Gamma^{(U)} < 738$)	4-16, 9-23, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	37,7	2,60	1,93

Fonte: Elaboração do autor.

caso, a curva de soluções se trunca no ponto onde os parâmetros de ajuste não podem ser acrescentados sem prejudicar a factibilidade do modelo (104)-(124).

Para evidenciar o caso anterior, tal que a curva de soluções se trunca no ponto de perda de factibilidade, é suficiente aumentar 10% os valores das taxas máximas de faltas por ano para cada ramo ($\lambda_{ij}^{\max}$) do sistema didático da Fig. 22. Assim, aplicando o mesmo procedimento de construção da curva de soluções robustas anterior obteve-se a curva da Fig. 25.

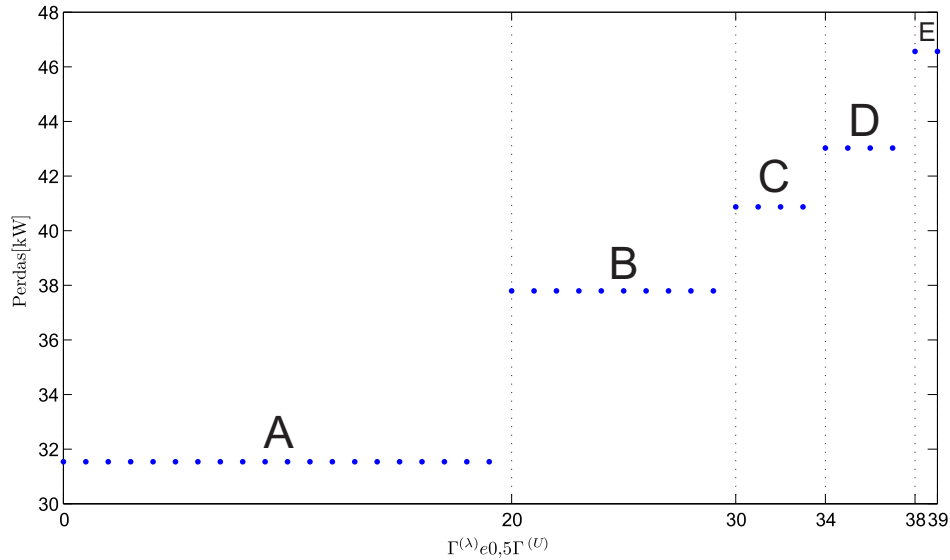
A curva da Fig. 25 demonstra que, se os valores máximos das taxas de faltas por ano de cada ramo ($\lambda_{ij}^{\max}$) do sistema didático aumentam 10%, então não existirá nenhuma configuração do sistema que garanta valores dos índices de confiabilidade menores aos limites estabelecidos, $SAIFI_{\text{máximo}}$ e $SAIDI_{\text{máximo}}$, a partir de $\Gamma^{(\lambda)} \geq 39$ ($\Gamma^{(U)} \geq 78$). Logo, a melhor escolha, será a configuração robusta que não comprometa drasticamente as perdas na rede. Segundo a curva de soluções da Fig. 25 a melhor escolha seria a configuração (E) com 46,5 kW de perdas. A Tabela 31 resume os dados das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 25.

Tabela 31 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 25.

Trecho	Intervalo dos parâmetros $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$	Topologia [Chaves fechadas]	Perdas [kW]	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
(A)	$0 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 19$ ($0 \leq \Gamma^{(U)} < 38$)	4-16, 9-23, 12-27, 19-34, 22-37, 26-40	31,5	3,16	2,52
(B)	$20 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 29$ ($40 \leq \Gamma^{(U)} < 58$)	4-16, 9-23, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	37,7	2,86	2,12
(C)	$30 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 33$ ($60 \leq \Gamma^{(U)} < 66$)	9-23, 12-27, 17-32, 19-34, 22-37, 26-40	40,8	2,85	2,15
(D)	$34 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 37$ ($68 \leq \Gamma^{(U)} < 74$)	9-23, 17-32, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	43,0	2,81	2,15
(E)	$38 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 39$ ($76 \leq \Gamma^{(U)} < 78$)	17-32, 18-20, 19-34, 21-24, 22-37, 26-40	46,5	2,79	2,15

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 25 – Curva de soluções robustas do sistema didático de 43 acrescentando os valores das taxas de falta por ano em +10%.



Fonte: Elaboração do autor.

Note que, embora as configurações (A) e (B) da Tabela 31 são as mesmas da Tabela 30, os índices de confiabilidade médios pioram devido ao aumento num 10% das taxas de faltas por ano para cada ramo ($\lambda_{ij}^{\max}$) do sistema didático de 43 nós.

3.6.3 MODELO ROBUSTO DA RSDC: TESTES E RESULTADOS

Para demonstrar a flexibilidade e eficiência do modelo de RSDC Robusto proposto, será construída a curva de soluções robustas do sistema de 136 nós da Fig. 20, adaptado de Lavorato et al. (2010). O sistema da Fig. 20 tem duas fontes (nós 201 e 202) e 16 zonas de carga. Todas as 30 chaves estão representadas por caixas inicialmente abertas e alguns ramos estão protegidos por fusíveis nas laterais.

Os valores dos parâmetros elétricos, demandas e parâmetros de confiabilidade do sistema de 136 nós da Fig. 20 se encontram na Tabela 42 no Anexo A. A Tabela 32 mostra os valores médios (λ_z) e os desvios simétricos em torno do valor médio ($\hat{\lambda}_z$) do parâmetro λ_z para cada zona, e os tempos de restauração médios de cada zona (r_z) para o sistema da Fig. 20, após o procedimento descrito na seção 3.5.4.

A curva da Fig. 26 mostra que não existe nenhuma configuração factível a partir de $\Gamma^{(\lambda)} \geq 87$ ($\Gamma^{(U)} \geq 174$). Logo, a melhor escolha, será a configuração (D), pois é a configuração que apresenta o maior grau de robustez possível, tal que as perdas da rede são 1233,7 kW (ver Tabela 33), ou seja, 57% maiores que as perdas da configuração (A), que é a topologia que minimiza as perdas do sistema. Lembre-se que para obter robustez máxima, $\Gamma^{(\lambda)} = |\Omega_b| |\Omega_z| =$

Tabela 32 – Parâmetros das taxas de falta por ano (λ_z) e reparação (r_z) das zonas do sistema da Fig. 20.

Zona [z]	λ_z [faltas/ano]	$\hat{\lambda}_z$ [faltas/ano]	r_z [horas]	Zona [z]	λ_z [faltas/ano]	$\hat{\lambda}_z$ [faltas/ano]	r_z [horas]
3	0,75	0,75	2	10	0,30	0,30	2
4	0,60	0,60	2	11	0,25	0,25	2
5	0,50	0,50	3	12	0,40	0,40	3
6	0,60	0,60	2	13	0,35	0,35	2
7	0,60	0,60	3	14	0,20	0,20	2
8	0,55	0,55	2	15	0,15	0,15	2
9	0,25	0,25	2	16	0,35	0,35	2

Fonte: Elaboração do autor.

$136 \cdot 16 = 2176 \gg 86$, portanto, a configuração (D) é apenas a configuração factível com melhor grau de robustez possível no sistema da Fig. 20.

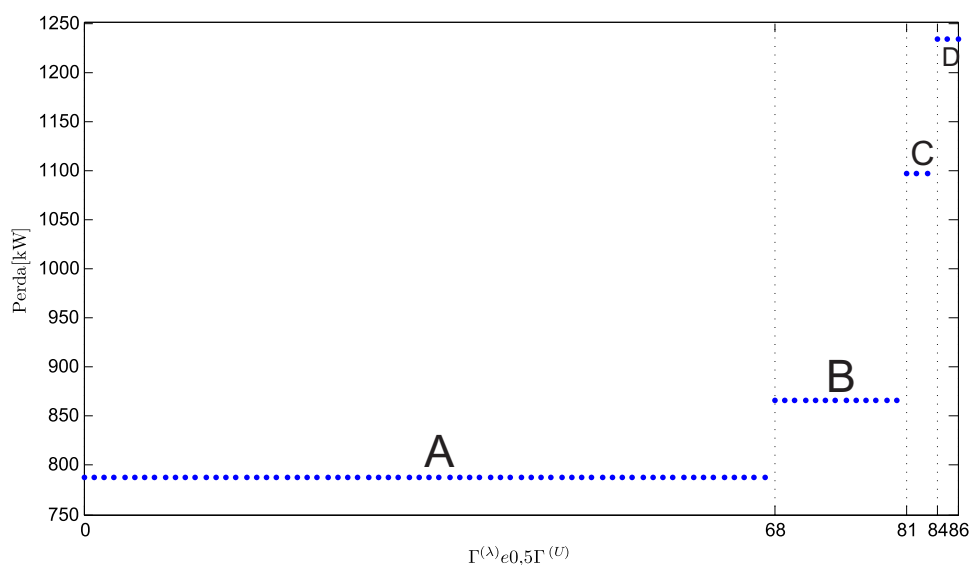
A Tabela 33 resume as dados das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 26.

Tabela 33 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 26.

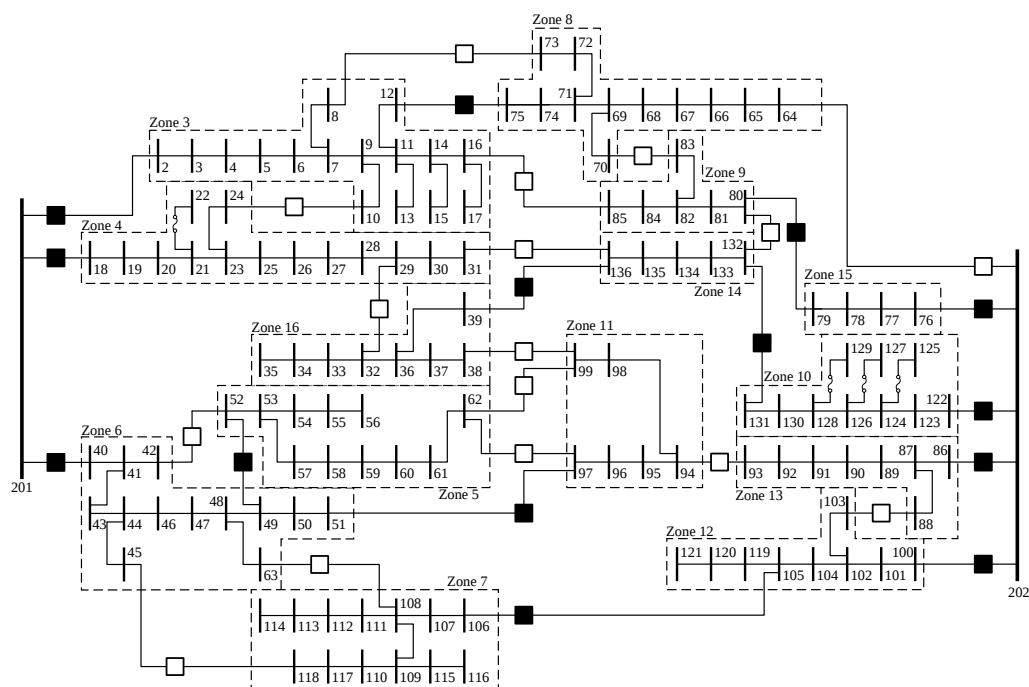
Trecho	Intervalo dos parâmetros $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$	Topologia [Chaves abertas]	Perdas [kW]	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
(A)	$0 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 68$ $(0 \leq \Gamma^{(U)} < 136)$	49-52, 105-106, 12-75, 16-85, 31-136, 39-136, 38-99, 62-99, 62-97, 51-97, 45-118, 8-73, 70-83, 88-103, 80-132, 24-10	787,62	2,61	2,97
(B)	$68 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 81$ $(136 \leq \Gamma^{(U)} < 162)$	49-52, 105-106, 12-75, 16-85, 31-136, 39-136, 38-99, 62-97, 51-97, 45-118, 8-73, 70-83, 88-103, 42-52, 80-132, 24-10	866,70	2,60	2,91
(C)	$81 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 84$ $(162 \leq \Gamma^{(U)} < 168)$	202-64, 16-85, 31-136, 39-136, 38-99, 62-99, 62-97, 51-97, 45-118, 63-108, 8-73, 70-83, 88-103, 42-52, 80-132, 24-10	1097,15	2,68	2,91
(D)	$84 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 87$ $(168 \leq \Gamma^{(U)} < 174)$	202-64, 16-85, 31-136, 38-99, 62-99, 62-97, 45-118, 63-108, 8-73, 70-83, 88-103, 42-52, 80-132, 93-94, 32-29, 24-10	1233,67	2,67	2,89

Fonte: Elaboração do autor.

A Fig. 27 mostra a configuração robusta proposta para o sistema de 136 nós, ou seja, a configuração (D) da Tabela 33, segundo a curva de soluções robustas da Fig. 26. Note que a resposta (D) é a topologia que apresenta maior robustez possível caso alguns dos parâmetros aleatórios aumentem aleatoriamente seu valor médio durante a operação do sistema.

Figura 26 – Curva de soluções robustas do sistema 136 nós da Fig. 20.

Fonte: Elaboração do autor.

Figura 27 – Configuração robusta proposta para o SDMT de 136 nós.

Fonte: Adaptado de Lavorato et al. (2010).

4 METODOLOGIA DA SOLUÇÃO DO PROBLEMA DA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CHAVES DE INTERCONEXÃO NOS SDMT

No Capítulo 2 foi apresentado um modelo de PCSOIM para resolver eficientemente o problema combinatorial da restauração dos SDMT após uma contingência $n - 1$, onde a rede foi setorizada em zonas de carga, e considerando as restrições elétricas e operacionais dos SDMT. O modelo da ReSD do Capítulo 2, dado pelo conjunto de equações (38)-(56), foi resolvido utilizando o solver de PCSOIM, *CPLEX* (CPLEX, 2010), e foi formulado utilizando a linguagem de programação matemática *AMPL* (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2003).

Analogamente, no Capítulo 3, foi construído mais um modelo de PCSOIM para resolver outro problema combinatorial que envolve a operação das chaves de interconexão alocadas ao longo dos alimentadores: o problema da reconfiguração dos SDMT para diminuir as perdas de potência ativa e melhorar, intrinsecamente, os índices gerais de confiabilidade SAIDI e SAIFI (RSDC). Devido a natureza multiobjetivo do problema da RSDC, no Capítulo 3 foram apresentadas duas metodologias que consideram o conflito entre as funções objetivo do problema da RSDC. A primeira aproveita a convexidade do modelo de PCSOIM proposto, dado pelo conjunto de equações (66)-(79), para construir a superfície de soluções não dominadas, também chamada Superfície de Soluções de Pareto (SSP). A SSP junta num mesmo plano ordenado as configurações que melhoram os índices de confiabilidade SAIFI e SAIFI em detrimento das perdas elétricas na rede. Embora a construção da SSP seja a alternativa mais completa para identificar as melhores soluções dos problemas com funções objetivos conflitantes, sua construção requer um alto custo computacional que aumenta em função do tamanho do sistema. Aliás, a incerteza nos parâmetros de taxa de faltas nos sistemas é desconsiderada pelo modelo da RSDC das equações (66)-(79). Assim, as soluções obtidas na SSP são totalmente baseadas em valores médios que não levam em conta a aleatoriedade dos fenômenos que envolvem a avaliação da confiabilidade nos SDMT. Portanto, uma segunda alternativa que converte o problema da RSDC em um modelo de Programação Robusta dado pelas equações (104)-(124) também foi apresentada no Capítulo 3. Esta nova alternativa, além de considerar a incerteza nos dados das taxas de falta nos ramos utilizados na avaliação da confiabilidade dos SDMT, produz topologias que diminuem as perdas nos alimentadores e mantém os níveis de confiabilidade gerais abaixo dos limites estabelecidos pelas agências reguladoras, ainda em condições críticas de faltas nos ramos ao longo do ano.

Neste capítulo serão aproveitados os modelos da ReSD do Capítulo 2 e da RSDC robusta do Capítulo 3, ambos modelos de PCSOIM, para construir a função objetivo ou, como será chamada doravante, a função *Fitness* do problema da Alocação Ótima de Chaves de Interconexão nos SDMT (AOCSD). A metodologia escolhida para gerar soluções de qualidade no problema da AOCSD está baseada na meta-heurística GRASP, mais qualquer outra metaheurística pode ser adaptada indistintamente.

O objetivo global deste capítulo é demonstrar a efectividade da função *Fitness* proposta, a qual utiliza o modelo de ReSD e da RSDC robusta, para determinar os ramos onde devem ser

alocadas um número determinado de chaves nos SDMT, e garantir um aproveitamento ótimo das chaves, tanto em condição de falta como durante a operação normal da rede.

Como foi analisado na revisão bibliográfica da seção 1.2.3, existem múltiplas propostas na literatura especializada que geram soluções de qualidade ao problema da AOCSD. A grande maioria delas estão baseadas em procedimentos heurísticos ou meta-heurísticas devido a natureza combinatória do problema da AOCSD, e a dificuldade para formular um modelo matemático que consiga representar, simultaneamente, o problema do investimento, operação e alocação das chaves nos SDMT. Aliás, a principal razão pela qual as ED investem em equipamentos de chaveamento e proteção é o melhoramento da confiabilidade experimentada pelos usuários dos SDMT. Portanto, a função objetivo mais comum no problema da AOCSD é a maximização da confiabilidade¹, a qual pode ser avaliada com diferentes metodologias, dependendo dos autores ou normas consultados, algumas delas não analíticas ou determinísticas (BILLINTON; ALLAN, 1996; WILLIS, 2004). Contudo, nenhuma das metodologias de alocação encontradas até a data deste trabalho consideram, numa mesma solução, o aproveitamento das chaves para, além de restaurar a rede após uma falta acontecer nos SDMT, reconfigurar a rede com o propósito de diminuir as perdas de potência ativa, garantindo bons níveis de confiabilidade, SAIDI e SAIFI, durante a operação normal do sistema.

Em cada proposta de alocação das chaves feita pela metodologia proposta neste capítulo, a função *Fitness* resolve e soma as funções objetivo dos problemas da ReSD, considerando todos os cenários possíveis de contingência $n - 1$, e da RSDC robusta, para produzir um indicador da qualidade da solução corrente. Portanto, a solução final considera o máximo aproveitamento da operação das chaves de interconexões alocadas em dois cenários diferentes: a restauração eficientemente da rede após uma contingência (operação de emergência), e a reconfiguração da rede para manter bons níveis das perdas e dos indicadores de confiabilidade em função da topologia (operação normal).

Em seguida é analisado o diagrama de fluxo geral da metodologia proposta neste capítulo para resolver o problema da AOCSD.

4.1 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA PARA A AOCSD

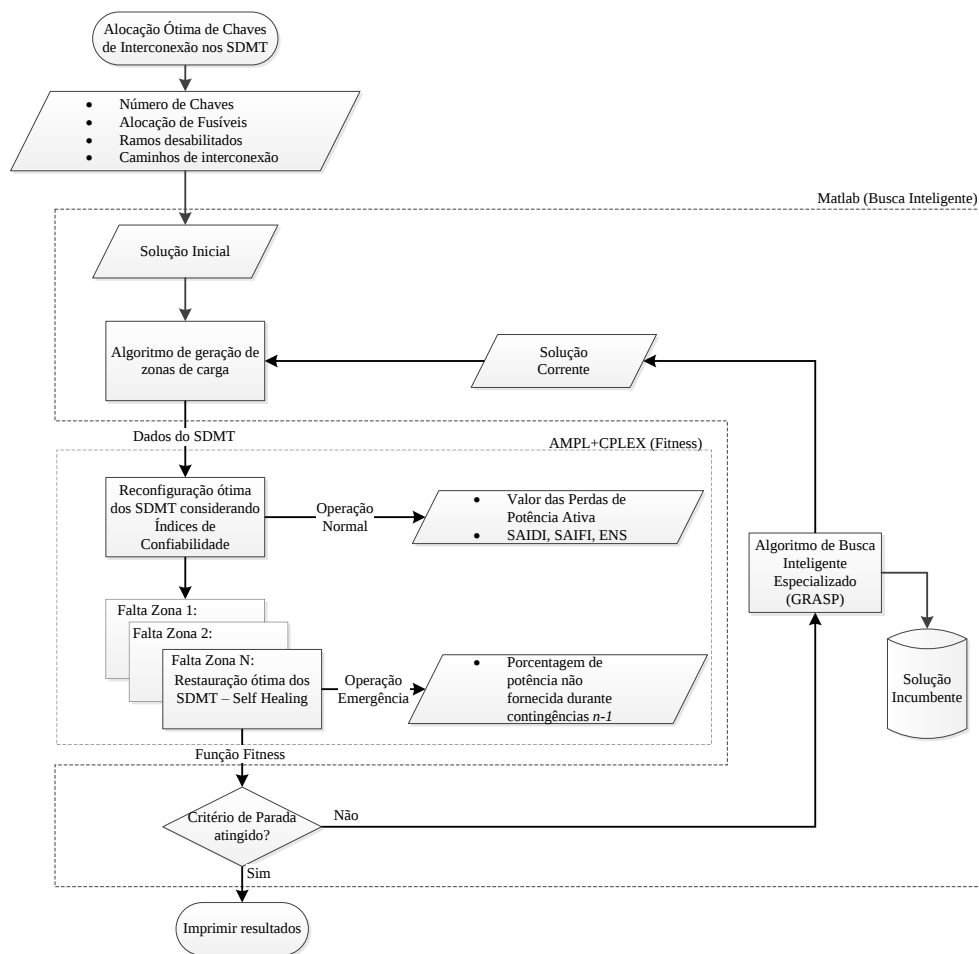
O digrama de fluxo da Fig. 28 explica a sequência de passos da metodologia proposta para resolver o problema da AOCSD. Além dos parâmetros elétricos e de confiabilidade dos SDMT, os dados de entrada do processo são:

- O número especificado de chaves de interconexões que se deseja alocar, incluindo os disjuntores conectados diretamente às fontes da rede.
- Os ramos que estão protegidos por fusíveis são desconsiderados da lista de candidatos para alocar as chaves.

¹ Embora também é comum que os autores considerem múltiplos objetivos além da confiabilidade, tais como os custos de instalação e manutenção das chaves, e o número de chaves alocadas (ver seção 1.2.3)

- Se tiver outros ramos que não possam alocar chaves por razões técnicas ou operativas, também devem ser desconsiderados da lista de ramos candidatos.
- Caminhos possíveis de interconexão entre os alimentadores devem ser inclusos na lista de ramos candidatos, e seus parâmetros elétricos e de confiabilidade devem ser estimados.

Figura 28 – Fluxograma da metodologia para o problema da AOCSD.



Fonte: Elaboração do autor.

Uma vez indicados os dados de entrada da metodologia e os ramos candidatos para a alocação das chaves, começa o processo de busca inteligente da solução. Para isso foi utilizado a ferramenta de desenvolvimento de software Matlab[®] na sua versão R2010a.

O processo de busca inteligente produz uma solução inicial que pode ser aleatória ou construída utilizando um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) especializado. Todas as soluções geradas pelo algoritmo de busca inteligente, seja a solução inicial, corrente ou incumbente, são vetores de dimensão igual ao número de chaves $|\Omega_{ch}|$, e seus elementos são os números que identificam cada um dos ramos onde esteja alocada uma chave. Por exemplo, se a

solução inicial de um sistema hipotético é $x_{\text{inicial}} = \{2, 6, 10, 3\}$, quer dizer que a solução inicial consiste na alocação de quatro chaves nos ramos identificados pelos números 2, 6, 10 e 3. Aliás, todas as soluções geradas neste caso terão quatro chaves alocadas. Logicamente, não podem existir ramos repetidos nas soluções produzidas pela busca inteligente e os ramos que conectam as fontes ao sistema (disjuntores) sempre devem estar presentes nos elementos da solução.

Após a geração da solução inicial, um algoritmo de geração de zonas de carga é executado como indicado no fluxograma da Fig. 28. O algoritmo de geração de zonas está encarregado de identificar as zonas produzidas como consequência da alocação de chaves nos ramos dos SDMT. Lembre-se que uma zona é um trecho de rede radial delimitado pelas chaves de interconexão nas fronteiras da zona, como já foi indicado na seção 3.3.1 do Capítulo 3. O algoritmo produz um arquivo de saída, extensão *.dat, com os dados do sistema utilizados pela linguagem de programação matemática *AMPL* para construir os modelos de RSDC robusta e ReSD, executados na etapa de cálculo do valor *Fitness*. Os dados do sistema incluem os parâmetros elétrico e de confiabilidade dos nós e dos ramos, os parâmetros das zonas geradas e a zona a qual pertence cada um dos nós e ramos, respectivamente. O algoritmo de geração de zonas utiliza uma metodologia de busca em grafos chamada *Breath First Search* para identificar a zona a qual pertence cada nó e cada ramo em função das chaves alocadas. A seção 4.3 explica detalhadamente o algoritmo gerador de zonas programado.

Conhecidos todos os parâmetros dos nós, ramos e zonas da rede; o seguinte passo da metodologia consiste em calcular a função *Fitness* da solução corrente gerada pelo Algoritmo de Busca inteligente Especializado. A função *Fitness* é um número escalar que identifica a qualidade da solução corrente, também chamada função objetivo da busca inteligente. Porém, ao longo deste trabalho será chamada função *Fitness* para evitar confusões com a função objetivo dos modelos matemáticos da RSDC Robusta e ReSD, embutidas de fato na função *Fitness*.

O valor da função *Fitness* é dado pela equação (125).

$$\text{Fitness} = F.O_{\text{RSDC}} + \sum_{f \in \Omega_z} F.O_{\text{ReSD}}(z^f) \quad (125)$$

Na equação (125) o valor da função *Fitness* é igual à soma do valor da função objetivo da solução do modelo da RSDC robusto, mais a soma de todas as soluções objetivos das soluções aos modelos de ReSD, onde em cada restauração é considerada uma contingência $n - 1$ na zona z^f , tal que $f \in \Omega_z$.

Como mostrado na Fig. 28, para cada solução corrente do problema da AOCSO primeiro é resolvido o problema da RSDC Robusta, utilizando o modelo de PCSOIM dado pelo conjunto de equações (104)-(124) e o solver comercial de otimização *CPLEX*. A solução da RSDC Robusta gera o estado de operação das chaves alocadas para minimizar as perdas no sistema, considerando os índices gerais de confiabilidade SAIDI e SAIFI e, representa o estado de operação normal do sistema. O valor da função objetivo após a convergência do modelo da RSDC Robusta é salvo na variável $F.O_{\text{RSDC}}$, e o estado de operação das chaves, ou seja y_{ij}^* , $\forall ij \in \Omega_{\text{ch}}$, é considerado o valor do estado de operação inicial das chaves no modelo de ReSD.

Finalmente, para cada possível cenário de contingência $n - 1$ nas zonas da rede é resolvido o problema da ReSD, utilizando o modelo de PCSOIM dado pelo conjunto de equações (38)-(56) e o solver comercial de otimização *CPLEX*, para determinar os custos da restauração em cada cenário de contingência. O valor da função objetivo após a convergência de cada modelo da ReSD é salvo na variável $F.O_{ReSD}(z^f)$ e é somado ao valor atual da função *Fitness* até atingir todos os casos de contingência. Caso alguma contingência não tenha solução factível então um valor muito grande (10×10^{14}) é somado à função *Fitness*.

Note que a solução do modelo de RSDC robusto têm como resultado, além do ponto de operação do sistema, o valor das perdas de potência ativa e os indicadores globais de confiabilidade, SAIDI e SAIFI, encontrados para a topologia da rede que opera em condições normais de atendimento da carga. Igualmente, a solução do modelo de ReSD para cada cenário de contingência, produz a porcentagem de carga que desenergizada após o esquema de restauração reagir, o que fornece o custo da Energia Não Suprida (ENS) em cada caso de contingência $n - 1$.

O que diferencia a solução gerada pela metodologia proposta de outras metodologias de alocação encontradas na literatura, é o aproveitamento das chaves tanto na melhora da confiabilidade quanto na operação normal do sistema, considerando as variáveis elétricas da rede, incerteza nos parâmetros de confiabilidade e a aplicação de um esquema de restauração inteligente.

Na Fig. 28, se o critério de parada da metodologia não é satisfeito, então o valor da função *Fitness* é transferido ao algoritmo de Busca Inteligente encarregado de comparar os valores *Fitness* das soluções geradas anteriormente. Se o valor *Fitness* da nova solução corrente é o melhor conhecido até o momento, então aquela solução é armazenada como a nova solução incumbente do algoritmo de Busca. O algoritmo de Busca Inteligente também é encarregado de produzir a nova solução corrente que será testada pela metodologia. Se for factível gerar todas as soluções possíveis do problema da alocação no sistema, então o Algoritmo de busca Inteligente Especializado ideal seria um procedimento de Busca Exaustiva através de todas as soluções existentes, e a solução final seria o ótimo global do problema. Porém, o problema da AOCS é um problema combinatorial, cujo universo de soluções (Ψ) cresce segundo a expressão fatorial dada pela equação (126).

$$|\Psi| = \frac{|\Omega_l^*|!}{(|\Omega_l^*| - |\Omega_{ch}|)!} \quad (126)$$

Onde Ω_l^* é o conjunto de linhas candidatas para alocar as chaves e Ω_{ch} é o conjunto de chaves. Portanto, ainda para instâncias pequenas do problema da AOCS e excelentes recursos computacionais, o procedimento de Busca Exaustiva não é uma alternativa factível para resolver o problema num tempo razoável.

Na atualidade existe um sem número de algoritmos computacionais que tentam produzir soluções de qualidade aos problemas combinatoriais como a AOCS, caso não seja possível desenvolver um modelo matemático eficiente ou sejam exigidos tempos ou recursos computacionais limitados. Entre os algoritmos mais destacados para resolver problemas de otimização, mesmo

de outras áreas da engenharia, estão as meta-heurísticas. As meta-heurísticas são algoritmos que procuram soluções de qualidade aos problemas combinatórios, tendo a capacidade de fugir de soluções ótimas locais na tentativa de localizar a solução ótima do problema. Existem infinidade de meta-heurísticas, muitas delas baseadas em fenômenos da natureza como os Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing* ou Enxame de Partículas, e outras em procedimentos adaptados da pesquisa operacional, que possuem técnicas para fugir dos ótimos locais como Busca Tabu ou GRASP (ROMERO; LAVORATO, 2012; LOPES; RODRIGUES; STEINER, 2013). Na metodologia proposta da Fig. 28, o Algoritmo de Busca Inteligente Especializado, encarregado de procurar eficientemente através do universo de soluções Ψ , pode ser substituído por qualquer uma das meta-heurísticas conhecidas. Neste trabalho a meta-heurística escolhida foi o GRASP, mas qualquer outra pode ser adaptada eficientemente à metodologia de AOCSD proposta.

Em seguida são descritas as características principais da meta-heurística GRASP e as adaptações feitas neste trabalho para utilizar o GRASP como o Algoritmo de Busca Inteligente da metodologia de solução ao problema da AOCSD.

4.2 ALGORITMO DE BUSCA INTELIGENTE: GRASP

O procedimento de busca guloso, aleatório e adaptativo (GRASP pelas siglas em inglês) é uma meta-heurística, que ao contrário de outras heurísticas modernas, está fundamentada em conceitos derivados puramente da pesquisa operacional. Na procura de soluções de boa qualidade para problemas complexos de otimização, o GRASP aproveita duas técnicas próprias da pesquisa operacional: Os Algoritmos Heurísticos Construtivos (AHCs) de tipo guloso e a Busca através da Vizinhaça (SDH pelas siglas em inglês). Segundo os mesmos autores, as principais vantagens da meta-heurística GRASP são:

One methodology that has a strong intuitive appeal, a prominent empirical track record, and is trivial to efficiently implement on parallel processors is GRASP. [...] GRASP is an iterative randomized sampling technique in which each iteration provides a solution to the problem at hand (FEO; RESENDE, 1995).

No GRASP, a partir de soluções construídas com um AHC de tipo guloso, aleatório e adaptativo, é aplicada uma fase de melhoria local através de um SDH. A melhor das soluções obtidas pelas diferentes execuções do GRASP é retornada como a solução incumbente obtida até satisfazer o critério de parada.

Seja x uma solução corrente factível ao problema de otimização que se deseja resolver e $f(x)$ o valor da função objetivo do problema avaliado em x . Então x^* é a solução incumbente do GRASP se $f(x^*)$ é a melhor das soluções encontradas pelo GRASP em cada iteração. O Algoritmo 1 apresenta um pseudo-código do GRASP para um problema genérico de minimização.

Dados: critério de parada, α

Resultado: Solução incumbente x^*

```

1  $x^* \leftarrow \infty$ ;
2 enquanto critério de parada não for satisfeito faça
3    $x \leftarrow []$ ;
4   /* Fase construtiva */
5    $x \leftarrow \text{AHC}(\alpha)$ ;
6   /* Fase de melhoria local */
7    $x \leftarrow \text{SDH}(x)$ ;
8   se  $f(x) < f(x^*)$  então
9      $x^* \leftarrow x$ 
10  fim
11 retorna  $x^*$ 

```

Algoritmo 1: Pseudo-código simplificado do GRASP.

No Algoritmo 1, o critério de parada para o GRASP pode ser um número de iterações pre-estabelecido, ou a melhor solução obtida num intervalo de tempo definido, ou a solução obtida após um número de iterações tal que a função incumbente não melhore. O parâmetro real $\alpha \in [0, 1]$ é utilizado na fase construtiva e controla o tamanho da lista de candidatos que formarão parte da solução x produzida pelo AHC.

A solução incumbente inicial (x^*) pode ser um vetor vazio ou pode ser inicializado com um tamanho igual ao número de chaves que se deseja alocar ($|\Omega_{\text{ch}}|$). Lembre-se que a codificação proposta forma um vetor cujos elementos são os números que identificam cada um dos ramos onde esteja alocada uma única chave.

4.2.1 FASE CONSTRUTIVA: AHC

Em termos gerais, um AHC é um procedimento para produzir soluções, geralmente de boa qualidade, a problemas complexos através da construção iterativa da solução x . Partindo de uma solução vazia, em cada passo do AHC é agregado um novo elemento até encher uma única solução final completa. A entrada de um elemento está condicionada por um índice de sensibilidade (ISS) que indica a qualidade da função objetivo da solução final se aquele novo elemento for inserido (ROMERO; LAVORATO, 2012).

Definir um bom ISS ao problema da AOCSD não é uma tarefa simples, devido à complexidade no cálculo da função *Fitness* da metodologia proposta, dada pela equação (125), que abrange a solução de vários modelos matemáticos completos para definir o estado de operação normal e de emergência de cada solução corrente x gerada pelo GRASP. Portanto, no algoritmo GRASP proposto neste capítulo não será utilizado um AHC especializado para gerar a

solução inicial, e os elementos do vetor x da fase construtiva serão escolhidos aleatoriamente entre os ramos candidatos para alocar as chaves, garantindo que nenhum dos elementos estejam repetidos.

A escolha totalmente aleatória na fase construtiva melhora a diversidade da busca inteligente. Porém, um ISS adequado pode melhorar o desempenho da metaheurística. Portanto, incluímos nos trabalhos futuros a definição de um ISS para gerar soluções de boa qualidade ao problema da AOCS D durante a fase construtiva do GRASP.

4.2.2 FASE MELHORIA LOCAL: SDH

SDH é um algoritmo que parte de uma solução corrente do problema que se deseja resolver, e a partir de uma estrutura de vizinhança estabelecida, procura através dos vizinhos da solução corrente aqueles que melhoram a função objetivo. Se nenhum dos vizinhos melhora a solução corrente então a busca para, caso contrário, o melhor vizinho encontrado será a nova solução corrente e a melhoria local continua. O Algoritmo 2 mostra o pseudo-código do SDH aplicado na fase de melhoria local do GRASP.

Dados: Ω_l^* , x_{corrente}

Resultado: Ótimo local (x^*)

```

1  $x^* \leftarrow x_{\text{corrente}};$ 
2 enquanto existe  $x_v \in N_v(x^*)$  tal que  $f(x_v) < f(x^*)$  faça
3   |  $x^* \leftarrow x_v;$ 
4 fim
5 retorna  $x^*$ 

```

Algoritmo 2: Pseudo-código do algoritmo de busca local do GRASP.

A partir de uma solução corrente, por exemplo $x_{\text{corrente}} = \{2, 6, 10, 3\}$, onde cada número representa um único ramo da rede, a estrutura de vizinhança $N_v(x_{\text{corrente}})$ utilizada faz uma troca simples de cada um dos elementos do conjunto x_{corrente} por seu caminho seguinte e anterior, segundo a numeração natural utilizada. Deve-se desconsiderar da troca aqueles ramos que conectam as fontes do sistema aos alimentadores (disjuntores) e que não pertencem ao conjunto de caminhos candidatos Ω_l^* . Aliás, não podem existir elementos repetidos nas soluções vizinhas de x_{corrente} . Nesse contexto, as soluções vizinhas de $x_{\text{corrente}} = \{2, 6, 10, 3\}$ geradas utilizando a estrutura de vizinhança proposta e considerando que a chave no ramo 2 é um disjuntor principal, são:

$$x_{\text{corrente}} = \{2, 6, 10, 3\}$$

$$x_{v1} = \{2, 7, 10, 3\}$$

$$x_{v2} = \{2, 5, 10, 3\}$$

$$x_{v3} = \{2, 6, 11, 3\}$$

$$x_{v4} = \{2, 6, 9, 3\}$$

$$x_{v5} = \{2, 6, 10, 4\}$$

A estrutura de vizinhança do SDH é computacionalmente simples de implementar e o número de soluções vizinhas (N_v) em cada iteração, segundo a equação (127), é sempre menor ou igual ao duplo das chaves a ser alocadas no sistema.

$$N_v \leq 2|\Omega_{\text{ch}}| \quad (127)$$

4.3 ALGORITMO DE GERAÇÃO DE ZONAS DE CARGA

O Algoritmo de geração de zonas de carga, executado em cada iteração da metodologia de solução da AOCS, é a interface entre a Busca Inteligente desenvolvida em Matlab[®] e o cálculo da função *Fitness* desenvolvida em *AMPL* (ver Fig. 28). O Algoritmo recebe um vetor solução corrente x_{corrente} e, a partir dos dados da rede, produz um arquivo de saída com extensão *.dat que contém os parâmetros dos nós, ramos, chaves e zonas; prontos para serem inseridos nos modelos matemáticos da reconfiguração e restauração. O Algoritmo 3 mostra o pseudo-código do procedimento de geração de zonas de carga simplificado.

O algoritmo de busca em grafos *Breath First Search* de Cormen et al. (2009, p. 594) é aproveitado para construir o Algoritmo de geração de zonas de carga². O arquivo de saída, “Dados.dat”, ordena a informação da rede da maneira que a linguagem de modelamento matemático *AMPL* possa executar os modelos de RSDC robusta e da ReSD. As zonas geradas pela alocação das chaves estabelecidas pelo vetor de solução x_{corrente} são decodificadas no conjunto de chaves Ω_{ch} na primeira linha do Algoritmo 3. Nas linhas 3 até 8 são estabelecidas as zonas as quais pertencem as fontes e, nas linhas 9 até 33 são estabelecidas as zonas as quais pertencem cada um dos nós e ramos da rede. As zonas identificadas são salvas no conjunto Ω_z . O Algoritmo 3 garante que nenhum dos nós e ramos da rede fiquem sem zona.

² Lembre-se que uma zona de carga é um trecho radial do SDMT, delimitado nas fronteiras pelas chaves de interconexão.

Dados: Ω_b , Ω_l e x_{corrente}

Resultado: Ω_{ch} , Ω_z e *Dados.dat*

```

1   $\Omega_{\text{ch}} \leftarrow \text{Decodificar}(x_{\text{corrente}});$ 
2   $z \leftarrow 0;$ 
3  para cada fonte  $s$  da rede faça
4       $s.\text{zona} \leftarrow z;$ 
5       $s.\text{cor} \leftarrow \text{preto};$ 
6       $z \leftarrow z + 1;$ 
7       $\Omega_z \leftarrow z;$ 
8  fim
9  para cada nó  $k \in \Omega_b$  de cor branco faça
10      $k.\text{cor} \leftarrow \text{cinza};$ 
11      $\text{fila} \leftarrow [];$ 
12      $\text{inserir na fila}(k);$ 
13     enquanto início da fila  $\neq$  final da fila faça
14          $u \leftarrow \text{retirar da fila};$ 
15         para cada  $ij \in \Omega_l$  tal que  $ij \notin \Omega_{\text{ch}}$  faça
16             se  $i = u$  e  $j.\text{cor} = \text{branco}$  então
17                  $j.\text{cor} \leftarrow \text{cinza};$ 
18                  $j.\text{zona} \leftarrow z;$ 
19                  $ij.\text{zona} \leftarrow z;$ 
20                  $\text{inserir na fila}(j);$ 
21             fim
22             se  $j = u$  e  $i.\text{cor} = \text{branco}$  então
23                  $i.\text{cor} \leftarrow \text{cinza};$ 
24                  $j.\text{zona} \leftarrow z;$ 
25                  $ij.\text{zona} \leftarrow z;$ 
26                  $\text{inserir na fila}(i);$ 
27             fim
28         fim
29          $u.\text{cor} \leftarrow \text{preto};$ 
30     fim
31      $\Omega_z \leftarrow z;$ 
32      $z \leftarrow z + 1;$ 
33 fim

```

34 **retorna** Ω_{ch} , Ω_z e *Dados.dat*

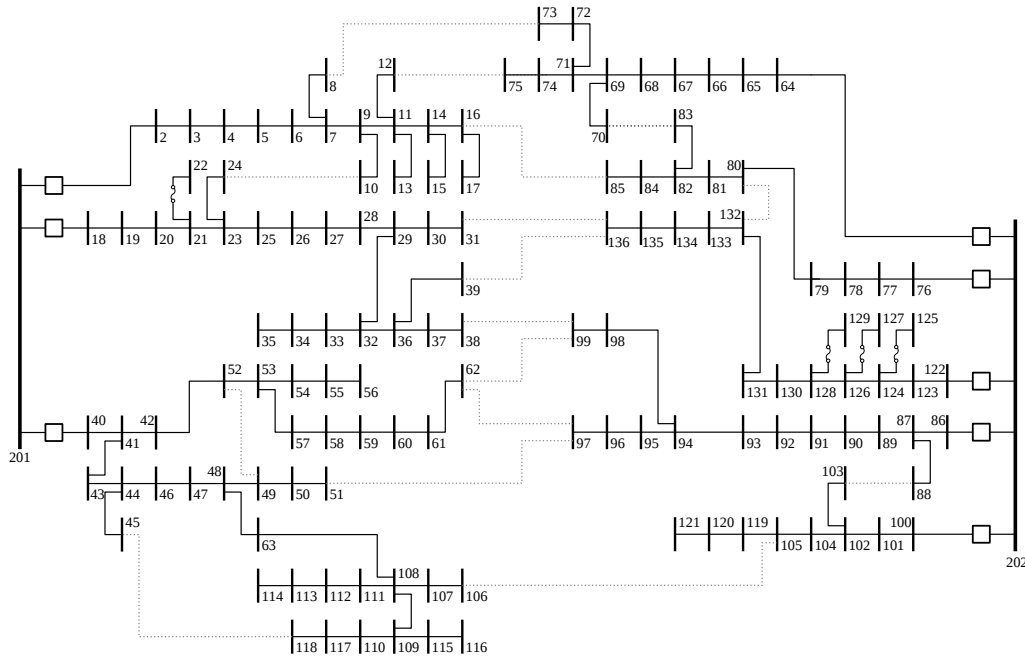
Algoritmo 3: Pseudo-código do procedimento de geração de zonas de carga simplificado.

Para demonstrar a eficiência do Algoritmo gerador de zonas proposto, o sistema teste de 136 nós da Fig. 29, adaptado de Lavorato et al. (2010), será setorizado a partir da solução corrente:

$$x_{\text{corrente}} = \{(42 - 52), (24 - 10), (62 - 97), (80 - 132), (16 - 85), (103 - 88)\}$$

O Algoritmo foi desenvolvido em Matlab[®] na versão R2010a, utilizando uma estação de trabalho com processador Intel[®] Core[™] i3-2330 e sistema operacional Microsoft[®] Windows 7. No sistema da Fig. 29 as chaves que conectam as fontes ao sistema já estão alocadas. As linhas pontilhadas da Fig. 29 representam caminhos factíveis de interconexão.

Figura 29 – Sistema teste de 136: Aplicação do algoritmo de geração de zonas de carga.

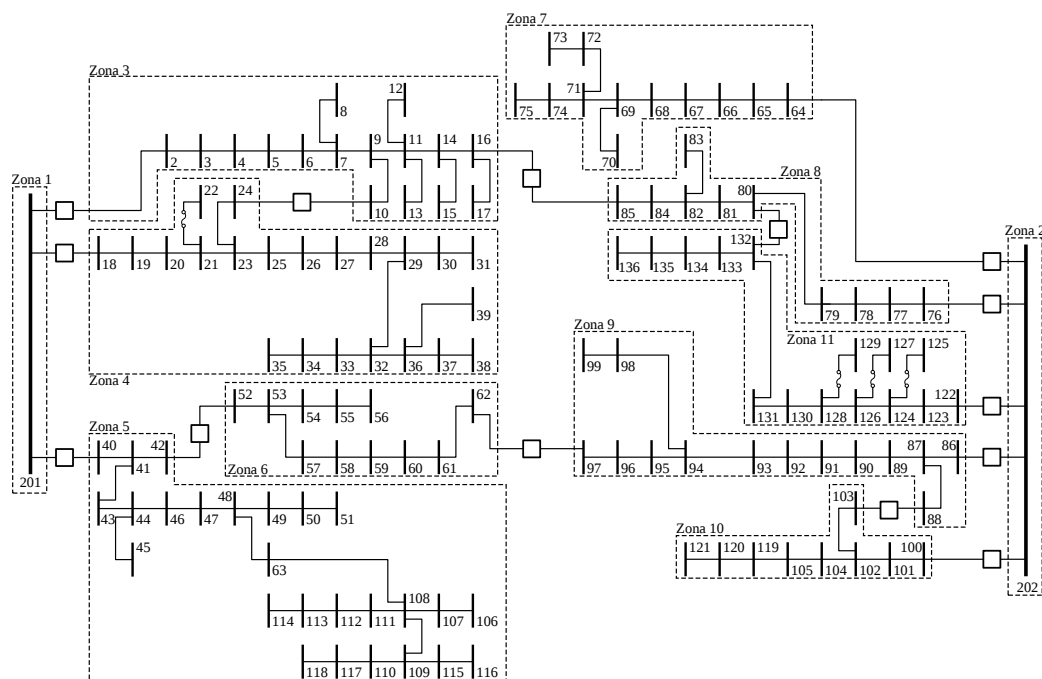


Fonte: Adaptado de Lavorato et al. (2010).

O sistema da Fig. 30 mostra o resultado da execução do algoritmo de geração de zonas de carga de forma gráfica. Todas os 136 nós e 134 linhas estão inseridas em alguma das 11 zonas geradas pelo algoritmo. As chaves de interconexão estão indicadas com quadros brancos e os caminhos de interconexão que não são utilizados foram apagados do desenho. O algoritmo demorou 15,2 s para gerar o arquivo de dados *.dat do sistema teste de 136 nós.

No Capítulo 5 serão apresentados os resultados da aplicação da metodologia de AOCS D apresentadas neste capítulo para diferentes sistemas e instâncias do problema da alocação.

Figura 30 – Resultado da aplicação do algoritmo de geração de zonas de carga do sistema da Fig. 29.



Fonte: Adaptado de Lavorato et al. (2010).

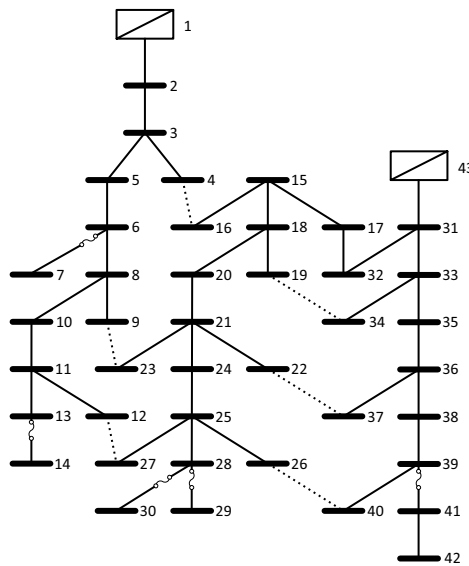
5 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos após a implementação da metodologia de solução ao problema da AOCS D descrita no Capítulo 4. Os sistemas testes de 43 nós da Fig. 31 e de 136 nós da Fig. 32 forem escolhidos para demonstrar a eficiência da metodologia de alocação de chaves proposta. Para ambos sistemas, os valores das constantes do modelo da RSDC Robusta, dado pelas equações (104)-(124), e do e modelo da ReSD, dado pelas equações (38)-(56) são: $c^{lss} = \$1/\text{kW}$, $f_{\text{perdas}} = 0,3$, $c_z^z = \$1000 \forall z \in \Omega_z$, $c_i^{ls} = \$1/\text{kW} \forall i \in \Omega_b$, $c^{\text{ch}} = 0$, $V^{\text{nom}} = 7,967 \text{ kV}$, $\underline{V} = 0,9 \cdot V^{\text{nom}}$, $\bar{V} = V^{\text{nom}}$, $SAIFI_{\text{máximo}} = 4,00 \text{ faltas/ano}$, $SAIDI_{\text{máximo}} = 5,24 \text{ horas/ano}$ e $r_{sw} = 0,5 \text{ h}$.

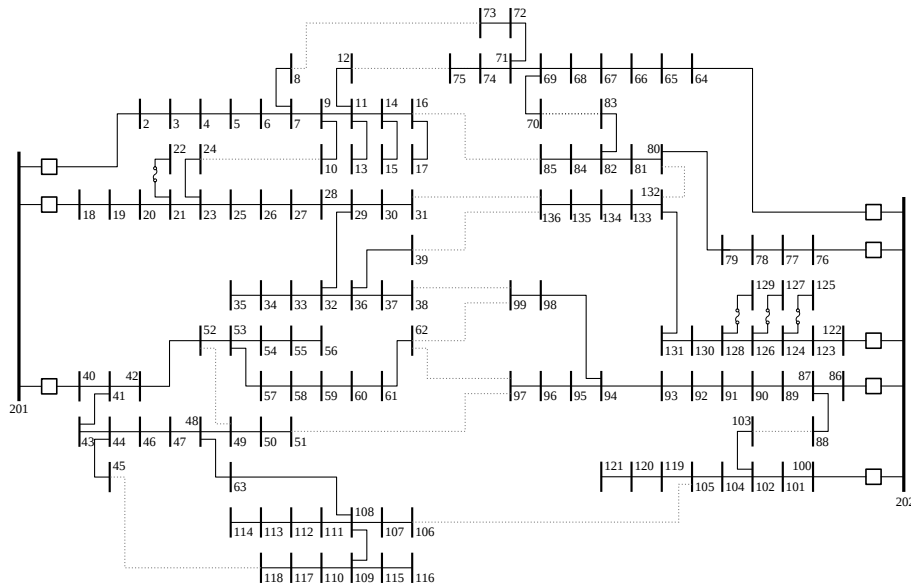
Os parâmetros elétricos e de confiabilidade do sistema de 43 nós da Fig. 31 se encontram nas Tabelas 43 e 44, no Anexo A. Analogamente, para o sistema de 136 nós da Fig. 32, as Tabelas 45 e 46 fornecem os dados elétricos e de confiabilidade dos nós e os caminhos de interconexão. Os caminhos factíveis de interconexão para os dois sistemas estão representados por linhas pontilhadas.

Todos os casos testes foram resolvidos utilizando uma estação de trabalho com processador Intel® Core™ i5-4570. O “gap” de convergência do solver de programação matemática CPLEX foi de 1% para todos os modelos testados, e o solver foi executado utilizando suas opções padrões.

Figura 31 – Sistema teste de 43 nós e 6 caminhos possíveis de interconexão.



Fonte: Elaboração do autor.

Figura 32 – Sistema teste de 136 nós e 15 caminhos possíveis de interconexão.

Fonte: Adaptado de Lavorato et al. (2010).

5.1 CASO 1: SISTEMA TESTE DE 43 E 5 CHAVES DE INTERCONEXÃO

O Caso 1 exige a alocação de 5 chaves de interconexão no sistema de 43 nós e 6 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 31. Os parâmetros de ajuste robusto $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$ são estabelecidos inicialmente em zero para determinar, após o processo de alocação, quais são as configurações que melhoram probabilisticamente os índices de confiabilidade, SAIDI e SAIFI. A melhor solução obtida pelo GRASP após 100 iterações foi:

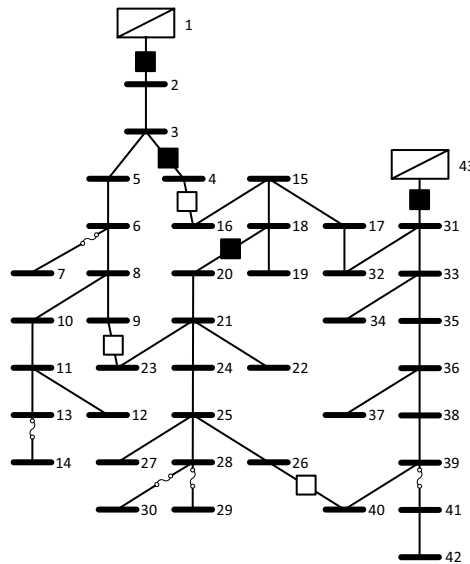
$$\Omega_{ch} = \{(4 - 16), (9 - 23), (26 - 40), (3 - 4), (18 - 20)\}$$

A Fig. 33 mostra a configuração que foi gerada pela metodologia após a alocação das 5 chaves no sistema de 43 nós e 6 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 31.

O ponto de operação da solução na Fig. 33 tem 31,5 kW de perdas de potência ativas, a tensão mínima é de $0,9683 p.u.$ no nó 42. Os índices de confiabilidade médio são: $SAIFI_{\text{médio}} = 2,60$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{médio}} = 4,30$ horas/ano, respectivamente. A ENS total da solução é 1600 kW·h. Os caminhos de interconexão não utilizadas foram apagados.

A solução da Fig. 33 foi obtida pelo CPLEX, após 100 iterações do GRASP, num tempo de execução total da metodologia de 4321,73 s, aproximadamente 1,2 h.

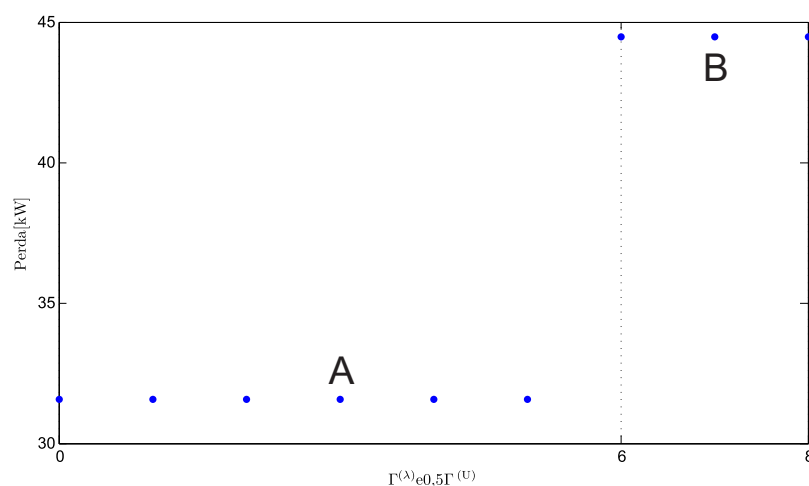
Figura 33 – Alocação das 5 chaves de interconexão para o sistema de 43 nós da Fig. 31 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS.



Fonte: Elaboração do autor.

A curva de soluções robustas do sistema da Fig. 33 é mostrada na Fig. 34. Lembre-se que a metodologia para gerar a curva de soluções robusta foi apresentada na Seção 3.6.2.1 do Capítulo 3.

Figura 34 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 33.



Fonte: Elaboração do autor.

Segundo a curva de soluções robustas da Fig. 34, somente existem duas topologias que melhoram probabilisticamente os índices gerais de confiabilidade do sistema da Fig. 33. Aliás, não existe nenhuma topologia que garanta 100% de proteção das restrições de confiabilidade (83) e (84). A Tabela 34 apresenta as topologias e os valores dos índices de confiabilidade médios de cada configuração da Fig. 34.

Tabela 34 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 34.

Trecho	Intervalo dos parâmetros $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$	Topologia [Chaves abertas]	Perdas [kW]	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
(A)	$0 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 6$ $(0 \leq \Gamma^{(U)} < 12)$	9-23, 4-16, 26-40	31,5	4,30	2,60
(B)	$6 \leq \Gamma^{(\lambda)} \leq 8$ $(12 \leq \Gamma^{(U)} \leq 16)$	3-4, 18-20, 26-40	44,5	3,74	2,15

Fonte: Elaboração do autor.

5.2 CASO 2: SISTEMA TESTE DE 43 E 10 CHAVES DE INTERCONEXÃO

O Caso 2 exige a alocação de 10 chaves de interconexão no sistema de 43 nós e 6 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 31.

A melhor solução obtida pelo GRASP após 100 iterações foi:

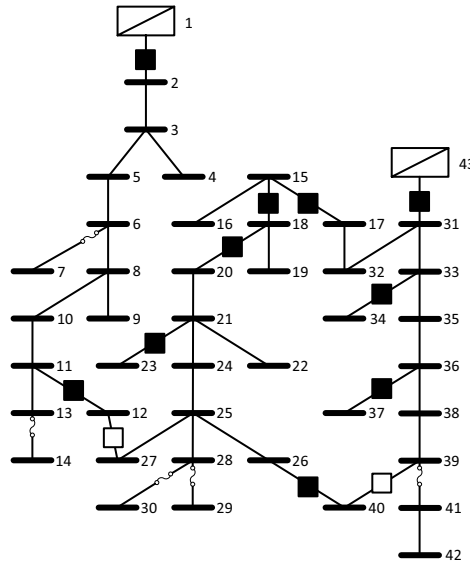
$$\Omega_{\text{ch}} = \{(12 - 27), (26 - 40), (11 - 12), (15 - 17), (15 - 18), (21 - 23), (33 - 34), \\ (36 - 37), (39 - 40), (18 - 20)\}$$

A Fig. 35 mostra a configuração que foi gerada pela metodologia após a alocação das 10 chaves no sistema de 43 nós e 6 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 31.

A solução da Fig. 35 tem 27,7 kW de perdas de potência ativas, a tensão mínima é de 0,9683 p.u. no nó 42. Os índices de confiabilidade médio são: $SAIFI_{\text{médio}} = 1,98$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{médio}} = 3,00$ horas/ano respectivamente. A ENS total da solução é 1600 kW·h.

Na Fig. 35 a maioria das chaves estão alocadas entre os no alimentador da fonte no nó 43, isto acontece porque aquele trecho da rede apresenta os maiores índices de falta na rede e as cargas de maior potência (ver Tabelas 43 e 44, no Anexo A). Aliás, as chaves abertas estão alocadas nos ramos mais afastados dos alimentadores, o que melhora a capacidade do esquema de restauração para transferir as cargas em caso de uma contingência.

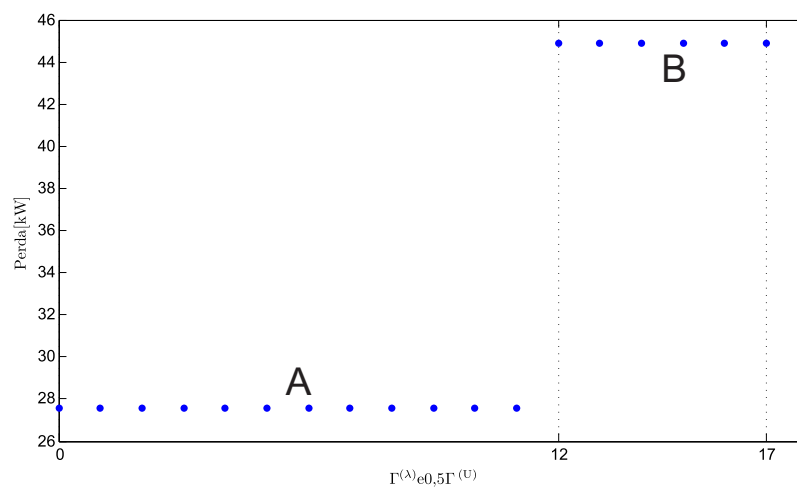
Figura 35 – Alocação das 10 chaves de interconexão para o sistema de 43 nós da Fig. 31 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS.



Fonte: Elaboração do autor.

A solução da Fig. 35 foi obtida pelo CPLEX, após 100 iterações do GRASP, num tempo de execução total da metodologia de 8462,85 s, aproximadamente 2,35 h. A curva de soluções robustas do sistema da Fig. 35 é mostrada na Fig. 36.

Figura 36 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 35.



Fonte: Elaboração do autor.

Novamente, só existem duas topologias que melhoram probabilisticamente os índices gerais de confiabilidade do sistema da Fig. 35. Aliás, não existe nenhuma topologia que garanta 100% de proteção das restrições de confiabilidade (83) e (84). A Tabela 35 apresenta as topologias e os valores dos índices de confiabilidade médios de cada configuração da Fig. 36.

Tabela 35 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 36.

Trecho	Intervalo dos parâmetros $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$	Topologia [Chaves abertas]	Perdas [kW]	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
(A)	$0 \leq \Gamma^{(\lambda)} < 12$ $(0 \leq \Gamma^{(U)} < 24)$	12-27, 39-40	27,2	3,00	1,98
(B)	$12 \leq \Gamma^{(\lambda)} \leq 17$ $(24 \leq \Gamma^{(U)} \leq 34)$	18-20, 26-40	44,9	2,75	1,70

Fonte: Elaboração do autor.

5.3 CASO 3: SISTEMA TESTE DE 136 NÓS E 5 CHAVES DE INTERCONEXÃO

O Caso 3 exige a alocação de 5 chaves de interconexão no sistema de 136 nós e 15 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 32. Novamente, os parâmetros de ajuste robusto $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$ são estabelecidos inicialmente em zero para determinar, após o processo de alocação, quais são as configurações que melhoram probabilisticamente os índices de confiabilidade, SAIDI e SAIFI.

A melhor solução obtida pelo GRASP após 300 iterações foi:

$$\Omega_{\text{ch}} = \{(110 - 109), (38 - 99), (82 - 83), (91 - 92), (45 - 118)\}$$

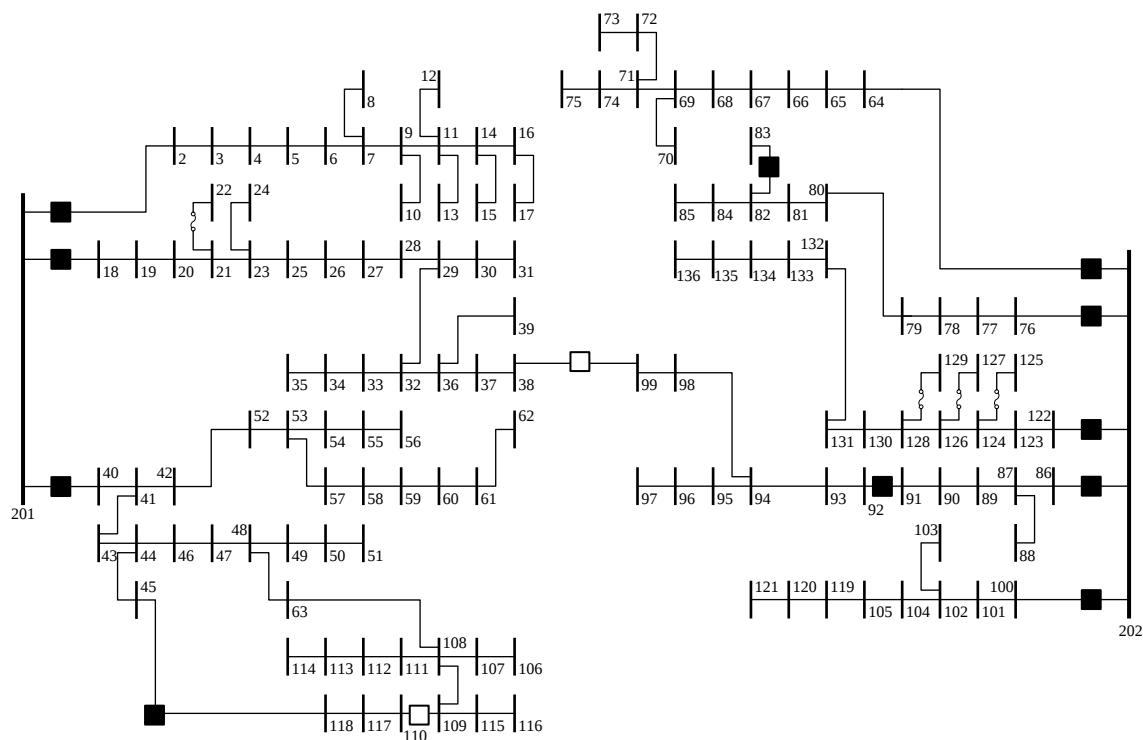
A Fig. 37 mostra a configuração que foi gerada pela metodologia após a alocação das 5 chaves no sistema de 136 nós e 15 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 32.

A solução da Fig. 37 tem 766,8 kW de perdas de potência ativas, a tensão mínima é de 0,9030 p.u. no nó 106. Os índices de confiabilidade médio são: $SAIFI_{\text{médio}} = 3,00$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{médio}} = 3,12$ horas/ano, respectivamente. A ENS total da solução é 18650 kW.h.

Note que, no sistema da Fig. 37, a metodologia de alocação proposta modificou a configuração inicial do sistema através do fechamento da chave entre os nós 45 e 118 e a abertura da chave entre os nós 110 e 109. Esta transferência é utilizada para melhorar o nível de tensão mínimo acima de 0,9 p.u. no nó 106.

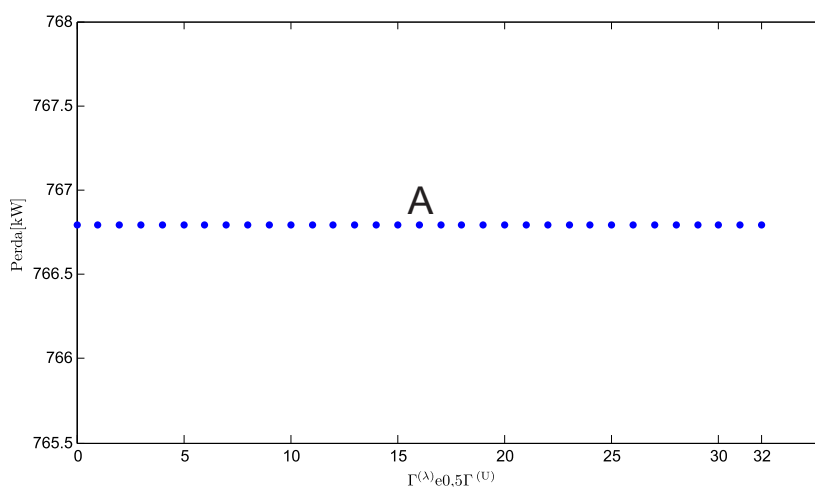
A solução da Fig. 37 foi obtida pelo CPLEX, após 300 iterações do GRASP, num tempo de execução total da metodologia de 38732,66 s, aproximadamente 10,75 h. A curva de soluções robustas do sistema da Fig. 37 é mostrada na Fig. 38.

Figura 37 – Alocação das 5 chaves de interconexão para o sistema de 136 nós da Fig. 32 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS.



Fonte: Adaptado de Lavorato et al. (2010).

Figura 38 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 37.



Fonte: Elaboração do autor.

Neste caso, só existe uma única topologia factível que garante que as restrições de confiabilidade (83) e (84) não sejam violadas. Isto acontece porque o nível de tensão está muito perto de seu limite inferior, portanto, é possível que existam outras topologias que melhorem os índices médios de confiabilidade, porém, elas são infactíveis no ponto de vista do limite da tensão. A Tabela 36 apresenta a topologia e os valores dos índices de confiabilidade médios da única configuração na curva de soluções robusta da Fig. 38.

Tabela 36 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 38.

Trecho	Intervalo dos parâmetros $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$	Topologia	Perdas	$SAIDI_{\text{médio}}$	$SAIFI_{\text{médio}}$
		[Chaves abertas]	[kW]	[horas/ano]	[faltas/ano]
(A)	$0 \leq \Gamma^{(\lambda)} \leq 32$ $(0 \leq \Gamma^{(U)} < 64)$	110-109, 38-99	766.8	3,12	3,00

Fonte: Elaboração do autor.

5.4 CASO 4: SISTEMA TESTE DE 136 NÓS E 10 CHAVES DE INTERCONEXÃO

O Caso 4 exige a alocação de 10 chaves de interconexão no sistema de 136 nós e 15 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 32.

A melhor solução obtida pelo GRASP após 300 iterações foi:

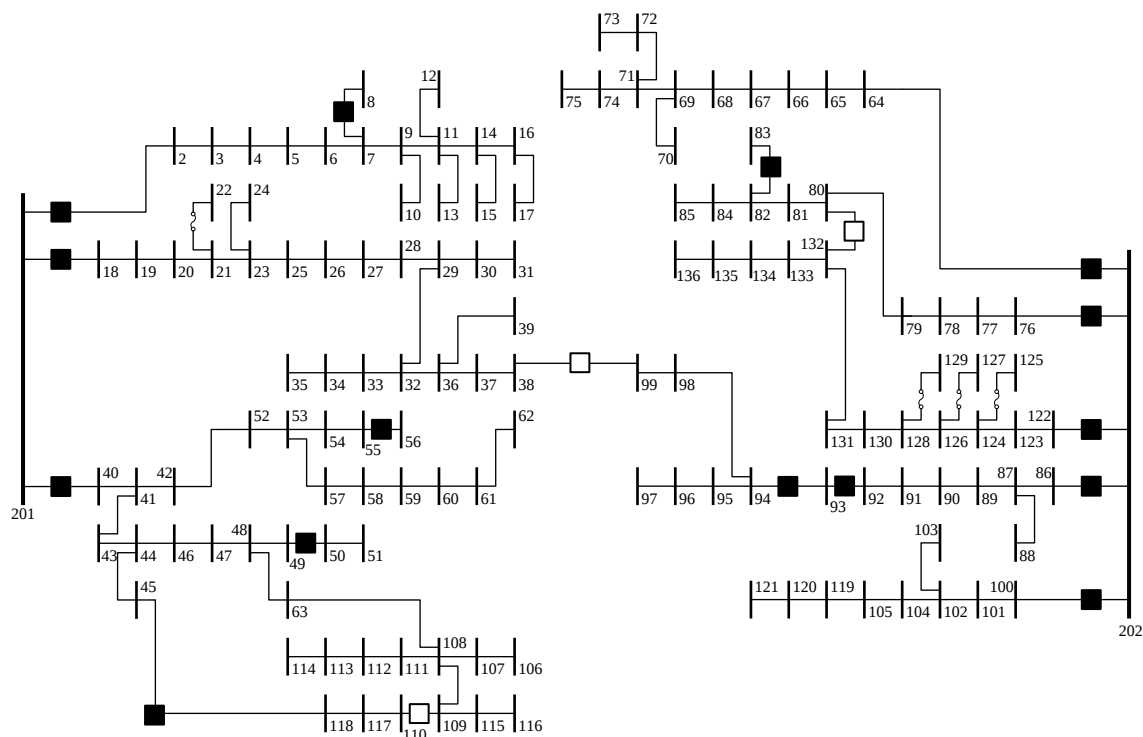
$$\Omega_{\text{ch}} = \{(109 - 110), (38 - 99), (80 - 132), (7 - 8), (49 - 50), (55 - 56), (82 - 83), \\ (92 - 93), (45 - 118), (93 - 94)\}$$

A Fig. 39 mostra a configuração robusta que foi gerada pela metodologia após a alocação das 10 chaves no sistema de 136 nós e 15 caminhos possíveis de interconexão da Fig. 32.

A solução da Fig. 39 tem 766,8 kW de perdas de potência ativas, a tensão mínima é de 0,9030 p.u. no nó 106. Os índices de confiabilidade médio são: $SAIFI_{\text{médio}} = 2,90$ faltas/ano e $SAIDI_{\text{médio}} = 2,98$ horas/ano, respectivamente. A ENS total da solução é 18 300 kW·h. Note que, comparado com a solução do sistema de 5 chaves, a configuração obtida neste caso é a mesma devido à restrição da tensão mínima no nó 106. Porém, todos os índices de confiabilidade melhoram circunstancialmente.

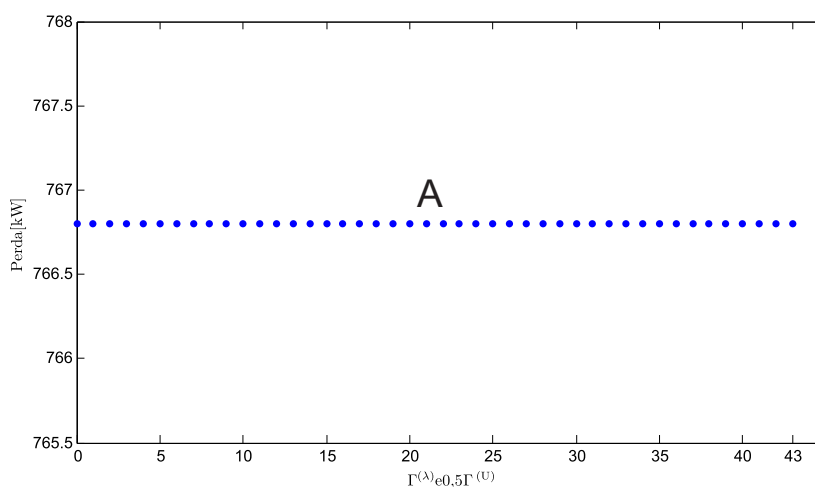
A solução da Fig. 39 foi obtida pelo CPLEX, após 300 iterações do GRASP, num tempo de execução total da metodologia de 104 800,80 s, aproximadamente 29,1 h. A curva de soluções robustas do sistema da Fig. 39 é mostrada na Fig. 40.

Figura 39 – Alocação das 10 chaves de interconexão para o sistema de 136 nós da Fig. 32 e a configuração robusta geradas pela metodologia de AOCS.



Fonte: Adaptado de Lavorato et al. (2010).

Figura 40 – Curva de soluções robustas do sistema da Fig. 39.



Fonte: Elaboração do autor.

Novamente, só existe uma única topologia factível que garante que as restrições de confiabilidade (83) e (84) não sejam violadas, portanto, a única solução robusta factível é a solução que minimiza as perdas de potência ativa do sistema da Fig. 39. A Tabela 37 apresenta a topologia e os valores dos índices de confiabilidade médios da única configuração na curva de soluções robusta da Fig. 40.

Tabela 37 – Resumo das configurações obtidas para cada intervalo de soluções robustas da Fig. 40.

Trecho	Intervalo dos parâmetros $\Gamma^{(\lambda)}$ e $\Gamma^{(U)}$	Topologia [Chaves abertas]	Perdas [kW]	$SAIDI_{\text{médio}}$ [horas/ano]	$SAIFI_{\text{médio}}$ [faltas/ano]
(A)	$0 \leq \Gamma^{(\lambda)} \leq 43$ $(0 \leq \Gamma^{(U)} < 86)$	110-109, 38-99, 132-80	766.8	2,98	2,90

Fonte: Elaboração do autor.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

1. O problema da alocação ótima de chaves de interconexão nos SDMT é um problema de planejamento dos sistemas de energia de natureza combinatória, e sujeito a restrições técnicas e operacionais que derivam em modelos complexos, não-lineares, não determinísticos, e em muitos casos, não analíticos e difíceis de representar matematicamente. Portanto, a melhor opção para resolver o problema da AOCSD, em tempo razoável e com recursos computacionais limitados, são as técnicas heurísticas modernas. Este trabalho apresenta uma metodologia que, utilizando o algoritmo de busca inteligente GRASP, gera soluções de boa qualidade ao problema da AOCSD, considerando que as chaves alocadas podem ser otimamente aproveitadas durante a operação normal da rede, tanto para melhorar o ponto de operação do sistema como para melhorar, probabilisticamente, a confiabilidade geral rede. Por outro lado, a alocação das chaves considera a implementação de um esquema de restauração inteligente que, caso aconteça uma contingência na rede, possa reagir eficientemente para isolar a zona afetada pela falta e restaurar o serviço da maior quantidade possível de usuários.
2. O modelo de PCSOIM da reconfiguração dos SDMT com critérios de confiabilidade apresentados no Capítulo 3 é utilizado pela metodologia de AOCSD para otimizar a operação das chaves durante o estado normal de atendimento de carga. O modelo de RSDC é uma alternativa que junta o problema clássico da reconfiguração para minimizar as perdas com o problema da reconfiguração para melhorar a confiabilidade. Os dois objetivos são tratados inicialmente no Capítulo 3, utilizando uma metodologia de otimização multiobjetivo chamada ϵ -constraint para visualizar todas as configurações não dominadas que minimizam as perdas de potência ativa, o índice de confiabilidade SAIFI, e o SAIDI, simultaneamente. Na segunda parte do Capítulo 3, o modelo de RSDC é transformado em um modelo de Otimização Robusta para considerar a incerteza dos parâmetros de taxa de faltas nos ramos (λ_{ij}) na avaliação da confiabilidade. A solução gerada pelo modelo da RSDC Robusta melhora o ponto de operação da rede e mantém os índices de confiabilidade, SAIFI e SAIDI, abaixo dos limites estabelecido pelas agências reguladoras ainda no caso que os parâmetros sob incerteza (λ_{ij}) atinjam seus máximos históricos, ou seja, o modelo RSDC produz uma solução robusta desde o ponto de vista da confiabilidade.
3. No Capítulo 2 é apresentado um modelo de PCSOIM da reconfiguração ótima dos SDMT (ReSD) utilizado pela metodologia de alocação para otimizar o esquema de restauração das chaves em caso de uma contingência $n - 1$ na rede. O modelo de ReSD proposto encontra a topologia do sistema que isola a zona com falta e minimiza o número de usuários e zonas desenergizados, transferindo a carga entre os diferentes alimentadores, mantendo as

restrições operacionais da rede dentro de seus limites, e desconectando carga específica nos nós, não prioritária, se for necessário.

4. Não existe na literatura especializada propostas de alocação que otimizem tanto o esquema de restauração e da reconfiguração com confiabilidade das chaves nos SDMT. Aliás, poucas metodologias de alocação utilizam formulações da função objetivo que considerem tanto os parâmetros elétricos da rede para calcular o ponto de operação em estado estacionário, e os parâmetros de confiabilidade para avaliar a qualidade da solução final. A abordagem de alocação proposta neste trabalho consegue enxergar as três principais funções que abrangem a operação das chaves nos SDMT: diminuir as perdas de potência ativa, melhorar probabilisticamente a confiabilidade da rede e otimizar o esquema de restauração automática.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

1. Considerar demandas variáveis, dependentes da tensão no ponto de conexão e incerteza na demanda.
2. Considerar a operação de geradores distribuídos, OLTCs e reguladores de tensão no esquema de restauração da rede.
3. Inserir novos objetivos e restrições ao problema da AOCS D como o custo de instalação e manutenção das chaves, o número de chaves e a selectividade entre o religador principal e as chaves de interconexão.
4. Definir um ISS eficiente para construir soluções de boa qualidade ao problema da AOCS D através de um AHC, durante a fase construtiva do GRASP.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Módulo 1 – Introdução**: Revisão 6. Resolução normativa nº517/2012. Brasília, DF, 2012. 61 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Módulo 8 – Qualidade da energia elétrica**: Revisão 6. Resolução normativa nº469/2011. Brasília, DF, 2012. 72 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Módulo 6 – Informações requeridas e obrigações**: Revisão 6. Resolução normativa nº543/2013. Brasília, DF, 2013. 229 p.
- AGUERO, J. R. Applying self-healing schemes to modern power distribution systems. In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 2012, San Diego, CA. **Proceedings of the...** New York: IEEE, 2012. p. 1–4.
- AMANULLA, B.; CHAKRABARTI, S.; SINGH, S. N. Reconfiguration of power distribution systems considering reliability and power loss. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 27, n. 2, p. 918–926, 2012.
- ARRILLAGA, J.; ARNOLD, C. **Computer analysis of power systems**. New York: Wiley, 1990. 361 p.
- BARAN, M.; WU, F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 1, p. 725–734, 1989.
- BARAN, M.; WU, F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 1, p. 735–743, 1989.
- BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear programming and network flows**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009. 748 p.
- BENAVIDES, A. J.; RITT, M.; BURIOL, L. S.; FRANÇA, P. M. An iterated sample construction with path relinking method: Application to switch allocation in electrical distribution networks. **Computers & Operations Research**, New York, v. 40, n. 1, p. 24 – 32, 2013.
- BERNARDON, D. P.; GARCIA, V. J.; FERREIRA, A. S. Q.; CANHA, L. N. Multicriteria distribution network reconfiguration considering subtransmission analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 25, n. 4, p. 2684–2691, 2010.
- BERTSIMAS, D.; SIM, M. The price of robustness. **Operations Research**, New York, v. 52, n. 1, p. 35–53, 2004.
- BILLINTON, R.; ALLAN, R. N. **Reliability evaluation of power systems**. 2. ed. New York: Springer, 1996. 540 p.
- BILLINTON, R.; JONNAVITHULA, S. Optimal switching device placement in radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 11, n. 3, p. 1646–1651, 1996.

- BORGES, M. C. O.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. Optimal reconfiguration of electrical distribution systems using mathematical programming. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Berlin, v. 25, n. 1, p. 103–111, 2014.
- BOYD, S.; VANDENBERGHE, L. **Convex optimization**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. 716 p.
- CARVALHO, P. M. S.; FERREIRA, L. A. F. M.; SILVA, A. da. A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 20, n. 2, p. 1031–1036, 2005.
- CESPEDES, R. New method for the analysis of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 1, p. 391–396, 1990.
- CHEN, C.-S.; LIN, C.-H.; CHUANG, H.-J.; LI, C.-S.; HUANG, M.-Y.; HUANG, C.-W. Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 21, n. 3, p. 1209–1217, 2006.
- CHOWDHURY, A. A.; KOVAL, D. O. Value-based distribution system reliability planning. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, New York, v. 34, n. 1, p. 23–29, 1998.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to algorithms**. 3. ed. Cambridge, MS: MIT Press, 2009. 1292 p.
- EHRGOTT, M. **Multicriteria optimization**. 2. ed. Berlin: Springer, 2005. 328 p.
- ESMAEILIAN, H. R.; FADAEINEDJAD, R.; ATTARI, S. M. Distribution network reconfiguration to reduce losses and enhance reliability using binary gravitational search algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 22, 2013, Stockholm. **Proceedings of the...** London: IET, 2013. p. 1–4.
- FALAGHI, H.; HAGHIFAM, M.; SINGH, C. Ant colony optimization-based method for placement of sectionalizing switches in distribution networks using a fuzzy multiobjective approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 24, n. 1, p. 268–276, 2009.
- FEO, T.; RESENDE, M. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, Berlin, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.
- FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. **AMPL: a modeling language for mathematical programming**. 2. ed. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003. 540 p.
- FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. A mixed-integer quadratically-constrained programming model for the distribution system expansion planning. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, New York, v. 62, p. 265–272, 2014.
- HSIAO, Y.-T. Multiobjective evolution programming method for feeder reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 19, n. 1, p. 594–599, 2004.

HSU, Y.-Y.; HUANG, H.-M.; KUO, H.-C.; PENG, S. K.; CHANG, C.; CHANG, K. J.; YU, H. S.; CHOW, C. E.; KUO, R. T. Distribution system service restoration using a heuristic search approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 7, n. 2, p. 734–740, 1992.

IBM ILOG CPLEX. **IBM ILOG AMPL Version 12.2: User's guide**. New York, 2010.

ILOG INC. **CPLEX Optimization Subroutine Library Guide and Reference**. Incline Village, NV, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 1366-2003: Guide for electric power distribution reliability indices**. New York, 2004. 1-50 p.

KAVOUSHI-FARD, A.; NIKNAM, T. Optimal distribution feeder reconfiguration for reliability improvement considering uncertainty. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 29, n. 3, p. 1344–1353, 2013.

KUMAR, R. M.; THANUSHKODI, K. Network reconfiguration and restoration in distribution systems through opposition based differential evolution algorithm and PGSA. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CURRENT TRENDS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2013, Coimbatore. **Proceedings of the...** New York: IEEE, 2013. p. 284–290.

LAMBERT-TORRES, G.; MARTINS, H.; COUTINHO, M.; SALOMON, C.; VIEIRA, F. Particle swarm optimization applied to system restoration. In: IEEE BUCHAREST POWERTECH, 2009, Bucharest. **Proceedings of the...** New York: IEEE, 2009. p. 1–6.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2012.

LAVORATO, M.; RIDER, M. J.; GARCIA, A. V.; ROMERO, R. A constructive heuristic algorithm for distribution system planning. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 25, n. 3, p. 1734–1742, 2010.

LING, L.; ZHIWEI, L.; SHAOXIAN, H.; GANG, W. A distributed model for power system restoration based on ant colony optimization algorithm. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION: ASIA AND PACIFIC, 2005, Dalian. **Proceedings of the...** New York: IEEE, 2005. p. 1–5.

LIU, C.-C.; LEE, S.-J.; VENKATA, S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 3, n. 2, p. 619–626, 1988.

LOPES, H. S.; RODRIGUES, L. C. d. A.; STEINER, M. T. A. (Ed.). **Meta-heurísticas em pesquisa operacional**. Curitiba, PR: Ominipax, 2013. 472 p. Disponível em: <<http://www.omnipax.com.br>>.

MENDOÇA, L. O. d. Q. **Estimação e análise das perdas técnicas na distribuição de energia elétrica**. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade em Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, 2010.

MENDOZA, J. E.; LOPEZ, M. E.; COELLO, C. A. C.; LOPEZ, E. A. Microgenetic multiobjective reconfiguration algorithm considering power losses and reliability indices for medium voltage distribution network. **IET Generation, Transmission Distribution**, London, v. 3, n. 9, p. 825–840, 2009.

- MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operation spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: POWER SYSTEMS COMPUTER CONFERENCE, 5, 1975, CAMBRIDGE, UK. **Proceedings of the...** [S.l.], 1975. p. 1–18.
- MONTICELLI, A. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo, SP: Editora Edgar Blücher Ltda, 1983.
- MORADI, A.; FOTUHI-FIRUZABAD, M. Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 23, n. 1, p. 271–279, 2008.
- MORELATO, A. L.; MONTICELLI, A. Heuristic search approach to distribution system restoration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 4, p. 2235–2241, 1989.
- NARIMANI, M. R.; VAHED, A. A.; AZIZIPANAH-ABARGHOOEE, R.; JAVIDSHARIFI, M. Enhanced gravitational search algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration considering reliability, loss and operational cost. **IET Generation, Transmission Distribution**, London, v. 8, n. 1, p. 55–69, 2014.
- PABLA, A. **Electric power distribution**. New York: McGraw-Hill Professional, 2004. 878 p.
- RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009. 813 p.
- ROMERO, R.; LAVORATO, M. Metaheurísticas em sistemas elétricos de potência: Introdução ao estudo e aplicações. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE. **Minicurso**. Goiânia, GO, 2012. p. 1–52.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.
- SHORT, T. **Electric power distribution handbook**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003. 784 p.
- SILVA, L. G. da; PEREIRA, R. A.; MANTOVANI, J. R. Allocation of protective devices in distribution circuits using nonlinear programming models and genetic algorithms. **Electric Power Systems Research**, New York, v. 69, n. 1, p. 77 – 84, 2004.
- SOHN, J.-M.; NAM, S.-R.; PARK, J.-K. Value-based radial distribution system reliability optimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 21, n. 2, p. 941–947, 2006.
- SOUDI, F.; TOMSOVIC, K. Optimized distribution protection using binary programming. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 13, n. 1, p. 218–224, 1998.
- SOYSTER, A. L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. **Operations Research**, Berlin, v. 21, n. 5, p. 1154–1157, 1973.
- TOLEDO, F. **Desvendando as redes elétricas inteligentes: Smart grid handbook**. Rio de Janeiro, RJ: BRASPORT, 2012. 336 p.
- TOUNE, S.; FUDO, H.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 17, n. 1, p. 173–181, 2002.

WÄCHTER, A.; BIEGLER, L. T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. **Mathematical Programming**, Belin, v. 106, n. 1, p. 25–57, 2006.

WILLIS, H. L. **Power distribution planning reference book**. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004. 1248 p.

ZAMBON, E.; BOSSOIS, D. Z.; GARCIA, B. B.; AZEREDO, E. F. A novel nonlinear programming model for distribution protection optimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 24, n. 4, p. 1951–1958, 2009.

ZIENA OPTIMIZATION LLC. **KNITRO Documentation**: Release 8.1. Evanston, IL, 2012.

Anexos

ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTES

Nesta anexo são apresentados todos os dados dos sistemas testes utilizados neste trabalho. Para cada sistema são apresentados os parâmetros elétricos e de confiabilidade dos circuitos (caso sejam necessários), as demandas dos nós e os limites operativos da rede para cada nó e ramo respectivamente.

Tabela 38 – Parâmetros elétricos da rede do sistema da Fig. 2 na página 47.

de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	P_j^D [kW]	Q_j^D [kVAr]
1	2	1000	0,0010	0,0000	0	0
2	3	500	0,9000	0,9000	100	20
3	4	500	0,9000	0,9000	0	0
3	5	500	0,9000	0,9000	0	0
5	6	1000	0,0010	0,0000	100	20
6	7	500	0,9000	0,9000	0	0
6	8	500	0,9000	0,9000	0	0
8	9	500	0,9000	0,9000	100	20
8	10	1000	0,0010	0,0000	0	0
10	11	500	0,9000	0,9000	100	20
11	12	500	0,9000	0,9000	0	0
11	13	500	0,9000	0,9000	100	20
13	14	500	0,9000	0,9000	0	0
17	15	500	0,9000	0,9000	100	20
15	16	500	0,9000	0,9000	0	0
32	17	1000	0,0010	0,0000	0	0
15	18	500	0,9000	0,9000	0	0
18	19	500	0,9000	0,9000	0	0
18	20	1000	0,0010	0,0000	0	0
20	21	500	0,9000	0,9000	100	20
21	22	500	0,9000	0,9000	0	0
21	23	500	0,9000	0,9000	0	0
21	24	1000	0,0010	0,0000	0	0
24	25	500	0,9000	0,9000	100	20
25	26	500	0,9000	0,9000	0	0
25	27	500	0,9000	0,9000	0	0
25	28	500	0,9000	0,9000	100	20
28	29	500	0,9000	0,9000	0	0
28	30	500	0,9000	0,9000	0	0
43	31	1000	0,0010	0,0000	100	20
31	32	500	0,9000	0,9000	0	0
31	33	500	0,9000	0,9000	0	0
33	34	500	0,9000	0,9000	0	0
33	35	1000	0,0010	0,0000	0	0
35	36	500	0,9000	0,9000	200	40
36	37	500	0,9000	0,9000	0	0
36	38	1000	0,0010	0,0000	0	0
38	39	500	0,9000	0,9000	200	40
39	40	500	0,9000	0,9000	0	0
39	41	500	0,9000	0,9000	200	40
41	42	500	0,9000	0,9000	0	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 39 – Dados das barras do sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga na página 60.

Nó [i]	Usuários [N _i]	P_i^D [kW]	Q_i^D [kVAr]	$\bar{S}_i$ [kVA]	c_i^{ls} [\$ / kW]	$\bar{r}_i$ [p.u.]	$\hat{z}_i$
1	1	0	0	1000	0	0,0	0
2	1	0	0	0	0	0,0	1
3	100	100	20	0	1	0,5	1
4	1	0	0	0	0	0,0	1
5	1	0	0	0	0	0,0	1
6	100	100	20	0	1	0,5	2
7	1	0	0	0	0	0,0	2
8	1	0	0	0	0	0,0	2
9	100	100	20	0	1	0,5	2
10	1	0	0	0	0	0,0	3
11	100	100	20	0	1	0,5	3
12	1	0	0	0	0	0,0	3
13	100	100	20	0	1	0,5	3
14	1	0	0	0	0	0,0	3
15	100	100	20	0	1	0,5	4
16	1	0	0	0	0	0,0	4
17	1	0	0	0	0	0,0	4
18	1	0	0	0	0	0,0	4
19	1	0	0	0	0	0,0	4
20	1	0	0	0	0	0,0	5
21	100	100	20	0	1	0,5	5
22	1	0	0	0	0	0,0	5
23	1	0	0	0	0	0,0	5
24	1	0	0	0	0	0,0	6
25	100	100	20	0	1	0,5	6
26	1	0	0	0	0	0,0	6
27	1	0	0	0	0	0,0	6
28	100	100	20	0	1	0,5	6
29	1	0	0	0	0	0,0	6
30	1	0	0	0	0	0,0	6
31	100	100	20	0	1	0,5	7
32	1	0	0	0	0	0,0	7
33	1	0	0	0	0	0,0	7
34	1	0	0	0	0	0,0	7
35	1	0	0	0	0	0,0	8
36	200	200	40	0	1	0,5	8
37	1	0	0	0	0	0,0	8
38	1	0	0	0	0	0,0	9
39	200	200	40	0	1	0,5	9
40	1	0	0	0	0	0,0	9
41	200	200	40	0	1	0,5	9
42	1	0	0	0	0	0,0	9
43	1	0	0	1000	0	0,0	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 40 – Dados dos ramos do sistema teste de 43 nós e 9 zonas de carga na página 60.

de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}	$\hat{z}_{ij}$
2	3	500	0,9	0,9	0,1	2	0	1
3	4	500	0,9	0,9	0,1	2	0	1
3	5	500	0,9	0,9	0,1	2	0	1
6	7	500	0,9	0,9	0,1	2	1	2
6	8	500	0,9	0,9	0,1	2	0	2
8	9	500	0,9	0,9	0,1	2	0	2
10	11	500	0,9	0,9	0,1	2	0	3
11	12	500	0,9	0,9	0,1	2	0	3
11	13	500	0,9	0,9	0,1	2	0	3
13	14	500	0,9	0,9	0,1	2	1	3
15	16	500	0,9	0,9	0,1	2	0	4
15	17	500	0,9	0,9	0,1	2	0	4
15	18	500	0,9	0,9	0,1	2	0	4
18	19	500	0,9	0,9	0,1	2	0	4
20	21	500	0,9	0,9	0,2	2	0	5
21	22	500	0,9	0,9	0,2	2	0	5
21	23	500	0,9	0,9	0,2	2	0	5
24	25	500	0,9	0,9	0,2	2	0	6
25	27	500	0,9	0,9	0,2	2	0	6
25	26	500	0,9	0,9	0,2	2	0	6
25	28	500	0,9	0,9	0,2	2	0	6
28	29	500	0,9	0,9	0,2	2	1	6
28	30	500	0,9	0,9	0,2	2	1	6
31	32	500	0,9	0,9	0,4	3	0	7
31	33	500	0,9	0,9	0,4	3	0	7
33	34	500	0,9	0,9	0,4	3	0	7
35	36	500	0,9	0,9	0,4	3	0	8
36	37	500	0,9	0,9	0,4	3	0	8
38	39	500	0,9	0,9	0,6	3	0	9
39	40	500	0,9	0,9	0,6	3	0	9
39	41	500	0,9	0,9	0,6	3	1	9
41	42	500	0,9	0,9	0,6	3	1	9

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 41 – Dados elétricos e de confiabilidade do sistema teste de 43 nós da Fig. 18 na página 91 e da Fig. 22 na página 104.

de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}	P_j^D [kW]	Q_j^D [kVA]	$[N_j]$	$\hat{z}_{ij}$
1	2	500	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
2	3	500	0,900	0,900	0,1	2	0	100,00	20,00	100	1
3	4	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	1
3	5	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	1
5	6	1000	0,001	0,000	-	-	-	100,00	20,00	100	-
6	7	500	0,900	0,900	0,1	2	1	0,00	0,00	1	2
6	8	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	2
8	9	500	0,900	0,900	0,1	2	0	100,00	20,00	100	2
8	10	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
10	11	500	0,900	0,900	0,1	2	0	100,00	20,00	100	3
11	12	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	3
11	13	500	0,900	0,900	0,1	2	0	100,00	20,00	100	3
13	14	500	0,900	0,900	0,1	2	1	0,00	0,00	1	3
16	15	500	0,900	0,900	0,1	2	0	100,00	20,00	100	4
4	16	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
15	17	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	4
15	18	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	4
18	19	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	4
18	20	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
20	21	500	0,900	0,900	0,1	2	0	100,00	20,00	100	5
21	22	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	5
21	23	500	0,900	0,900	0,1	2	0	0,00	0,00	1	5
21	24	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
24	25	500	0,900	0,900	0,2	2	0	100,00	20,00	100	6
25	26	500	0,900	0,900	0,2	2	0	0,00	0,00	1	6
25	27	500	0,900	0,900	0,2	2	0	0,00	0,00	1	6
25	28	500	0,900	0,900	0,2	2	0	100,00	20,00	100	6
28	29	500	0,900	0,900	0,2	2	1	0,00	0,00	1	6
28	30	500	0,900	0,900	0,2	2	1	0,00	0,00	1	6
32	31	500	0,900	0,900	0,2	2	0	100,00	20,00	100	7
17	32	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
31	33	500	0,900	0,900	0,2	2	0	0,00	0,00	1	7
33	34	500	0,900	0,900	0,2	2	0	0,00	0,00	1	7
33	35	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
35	36	500	0,900	0,900	0,2	2	0	200,00	40,00	200	8
36	37	500	0,900	0,900	0,2	2	0	0,00	0,00	1	8
36	38	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
38	39	500	0,900	0,900	0,2	2	0	200,00	40,00	200	9
39	40	500	0,900	0,900	0,2	2	0	0,00	0,00	1	9
39	41	500	0,900	0,900	0,2	2	1	200,00	40,00	200	9
41	42	500	0,900	0,900	0,2	2	1	0,00	0,00	1	9
9	23	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
12	27	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
19	34	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
22	37	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
26	40	1000	0,001	0,000	-	-	-	0,00	0,00	1	-
43	31	1000	0,001	0,000	-	-	-	100,00	20,00	100	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 42 – Dados elétricos e de confiabilidade do sistema teste de 136 nós da Fig. 20 na página 93.

(continuação)

de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}	P_j^D [kW]	Q_j^D [kVA]	$[N_j]$	$\hat{z}_{ij}$
2	3	9999	0,0019	0,0043	0,05	2	0	47,78	19,01	19	3
3	4	9999	0,2234	0,5154	0,05	2	0	42,55	16,93	16	3
4	5	9999	0,0994	0,2295	0,05	2	0	87,02	34,62	34	3
5	6	9999	0,1557	0,3595	0,05	2	0	311,31	123,86	123	3
6	7	9999	0,1632	0,3768	0,05	2	0	148,87	59,23	59	3
7	8	9999	0,1144	0,2642	0,05	2	0	238,67	94,96	94	3
7	9	9999	0,0568	0,0567	0,05	2	0	62,30	24,79	24	3
9	10	9999	0,5212	0,2742	0,05	2	0	124,59	49,57	49	3
9	11	9999	0,1088	0,1086	0,05	2	0	140,16	55,77	55	3
11	12	9999	0,3980	0,2094	0,05	2	0	116,81	46,47	46	3
11	13	9999	0,9174	0,3147	0,05	2	0	249,20	99,15	99	3
11	14	9999	0,1182	0,1181	0,05	2	0	291,45	115,59	115	3
14	15	9999	0,5023	0,2642	0,05	2	0	303,72	120,84	120	3
14	16	9999	0,0568	0,0567	0,05	2	0	215,39	85,70	85	3
16	17	9999	0,2938	0,1545	0,05	2	0	198,59	79,01	79	3
201	18	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
18	19	9999	0,0019	0,0043	0,05	2	0	0,00	0,00	0	4
19	20	9999	0,2232	0,5154	0,05	2	0	0,00	0,00	0	4
20	21	9999	0,1088	0,2512	0,05	2	0	30,13	14,73	14	4
21	22	9999	0,7108	0,3739	0,05	2	1	230,97	112,92	112	4
21	23	9999	0,1820	0,4201	0,05	2	0	60,26	29,46	29	4
23	24	9999	0,3033	0,1595	0,05	2	0	230,97	112,92	112	4
23	25	9999	0,0244	0,0563	0,05	2	0	120,51	58,92	58	4
25	26	9999	0,0450	0,1039	0,05	2	0	0,00	0,00	0	4
26	27	9999	0,0188	0,0433	0,05	2	0	56,98	27,86	27	4
27	28	9999	0,1182	0,1123	0,05	2	0	364,67	178,28	178	4
28	29	9999	0,0237	0,0236	0,05	2	0	0,00	0,00	0	4
29	30	9999	0,1895	0,0997	0,05	2	0	124,65	60,94	60	4
30	31	9999	0,3980	0,2094	0,05	2	0	56,98	27,86	27	4
29	32	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
32	33	9999	0,0948	0,0499	0,05	2	0	85,47	41,79	41	16
33	34	9999	0,4170	0,2193	0,05	2	0	0,00	0,00	0	16
34	35	9999	0,1137	0,0598	0,05	2	0	396,74	193,96	193	16
32	36	9999	0,0757	0,0756	0,05	2	0	0,00	0,00	0	16
36	37	9999	0,3696	0,1944	0,05	2	0	181,15	88,56	88	16
37	38	9999	0,2654	0,1396	0,05	2	0	242,17	118,39	118	16
36	39	9999	0,0568	0,0566	0,05	2	0	75,32	36,82	36	16
201	40	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
40	41	9999	0,1182	0,2728	0,05	2	0	1,25	0,00	0	6
41	42	9999	2,9629	1,0163	0,05	2	0	6,27	2,66	2	6
41	43	9999	0,0019	0,0043	0,05	2	0	0,00	0,00	0	6
43	44	9999	0,0694	0,1602	0,05	2	0	117,88	49,97	49	6
44	45	9999	0,8150	0,4287	0,05	2	0	62,67	25,57	25	6
44	46	9999	0,0638	0,1472	0,05	2	0	172,29	73,03	73	6
46	47	9999	0,1313	0,3032	0,05	2	0	458,56	194,39	194	6
47	48	9999	0,0619	0,1429	0,05	2	0	262,96	111,47	111	6
48	49	9999	0,1144	0,2642	0,05	2	0	235,76	99,94	99	6
49	50	9999	0,2837	0,2833	0,05	2	0	0,00	0,00	0	6
50	51	9999	0,2837	0,2832	0,05	2	0	109,22	46,30	46	6
49	52	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 42 – Dados elétricos e de confiabilidade do sistema teste de 136 nós da Fig. 20 na página 93.

(continuação)

de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}	P_j^D [kW]	Q_j^D [kVA]	$[N_j]$	$\hat{z}_{ij}$
52	53	9999	0,0263	0,0606	0,05	3	0	72,81	30,87	30	5
53	54	9999	0,0600	0,1386	0,05	3	0	258,47	109,57	109	5
54	55	9999	0,0300	0,0693	0,05	3	0	69,17	29,32	29	5
55	56	9999	0,0206	0,0476	0,05	3	0	21,84	9,26	9	5
53	57	9999	0,1088	0,2512	0,05	3	0	0,00	0,00	0	5
57	58	9999	0,2559	0,1346	0,05	3	0	20,53	8,70	8	5
58	59	9999	0,4170	0,2193	0,05	3	0	150,55	63,82	63	5
59	60	9999	0,5023	0,2642	0,05	3	0	220,69	93,55	93	5
60	61	9999	0,3317	0,1745	0,05	3	0	92,38	39,16	39	5
61	62	9999	0,2085	0,1097	0,05	3	0	0,00	0,00	0	5
48	63	9999	0,1388	0,3205	0,05	2	0	226,69	96,10	96	6
202	64	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
64	65	9999	0,2701	0,6236	0,05	2	0	294,02	116,97	116	8
65	66	9999	0,3827	0,8835	0,05	2	0	83,02	33,03	33	8
66	67	9999	0,3302	0,7622	0,05	2	0	83,02	33,03	33	8
67	68	9999	0,3283	0,7579	0,05	2	0	103,77	41,29	41	8
68	69	9999	0,1707	0,3941	0,05	2	0	176,41	70,18	70	8
69	70	9999	0,5591	0,2941	0,05	2	0	83,02	33,03	33	8
69	71	9999	0,0582	0,1343	0,05	2	0	217,92	86,70	86	8
71	72	9999	0,7013	0,3689	0,05	2	0	23,29	9,27	9	8
72	73	9999	1,0235	0,5384	0,05	2	0	5,08	2,02	2	8
71	74	9999	0,0675	0,1559	0,05	2	0	72,64	28,90	28	8
74	75	9999	1,3235	0,4540	0,05	2	0	405,99	161,52	161	8
202	76	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
76	77	9999	0,7298	1,6846	0,05	2	0	100,18	42,47	42	15
77	78	9999	0,2251	0,5197	0,05	2	0	142,52	60,42	60	15
78	79	9999	0,2082	0,4807	0,05	2	0	96,04	40,71	40	15
79	80	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	300,45	127,37	127	-
80	81	9999	0,6195	0,6186	0,05	2	0	141,24	59,87	59	9
81	82	9999	0,3405	0,3400	0,05	2	0	279,85	118,63	118	9
82	83	9999	0,5686	0,2991	0,05	2	0	87,31	37,01	37	9
82	84	9999	0,1088	0,1086	0,05	2	0	243,85	103,37	103	9
84	85	9999	0,5686	0,2991	0,05	2	0	247,75	105,03	105	9
202	86	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
86	87	9999	0,4184	0,9658	0,05	2	0	89,88	38,10	38	13
87	88	9999	0,1050	0,1364	0,05	2	0	1137,30	482,11	482	13
87	89	9999	0,4390	1,0134	0,05	2	0	458,34	194,30	194	13
89	90	9999	0,0752	0,0258	0,05	2	0	385,20	163,29	163	13
90	91	9999	0,0769	0,1776	0,05	2	0	0,00	0,00	0	13
91	92	9999	0,3321	0,7665	0,05	2	0	79,61	33,75	33	13
92	93	9999	0,0844	0,1949	0,05	2	0	87,31	37,01	37	13
93	94	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
94	95	9999	0,2932	0,2928	0,05	2	0	74,00	31,37	31	11
95	96	9999	0,2175	0,2172	0,05	2	0	232,05	98,37	98	11
96	97	9999	0,2648	0,2644	0,05	2	0	141,82	60,12	60	11
94	98	9999	0,1032	0,2382	0,05	2	0	0,00	0,00	0	11
98	99	9999	0,1351	0,3118	0,05	2	0	76,45	32,41	32	11
202	100	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
100	101	9999	0,1688	0,3898	0,05	3	0	51,32	21,76	21	12
101	102	9999	0,1182	0,2728	0,05	3	0	59,87	25,38	25	12

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 42 – Dados elétricos e de confiabilidade do sistema teste de 136 nós da Fig. 20 na página 93.

(continuação)											
de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}	P_j^D [kW]	Q_j^D [kVA]	$[N_j]$	$\hat{z}_{ij}$
102	103	9999	2,2861	0,7841	0,05	3	0	9,07	3,84	3	12
102	104	9999	0,4559	1,0524	0,05	3	0	2,09	0,00	0	12
104	105	9999	0,6960	1,6067	0,05	3	0	16,74	7,09	7	12
105	106	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	1506,50	638,63	638	-
106	107	9999	0,2030	0,2637	0,05	3	0	313,02	132,69	132	7
107	108	9999	0,2135	0,2774	0,05	3	0	79,83	33,84	33	7
108	109	9999	0,5497	0,2891	0,05	3	0	51,32	21,76	21	7
109	110	9999	0,5402	0,2842	0,05	3	0	0,00	0,00	0	7
108	111	9999	0,0455	0,0591	0,05	3	0	202,44	85,82	85	7
111	112	9999	0,4739	0,2493	0,05	3	0	60,82	25,87	25	7
112	113	9999	0,8624	0,4536	0,05	3	0	45,62	19,34	19	7
113	114	9999	0,5686	0,2991	0,05	3	0	0,00	0,00	0	7
109	115	9999	0,7771	0,4088	0,05	3	0	157,07	66,58	66	7
115	116	9999	1,0804	0,5683	0,05	3	0	0,00	0,00	0	7
110	117	9999	1,0663	0,5783	0,05	3	0	250,15	106,04	106	7
117	118	9999	0,4739	0,2493	0,05	3	0	0,00	0,00	0	7
105	119	9999	0,3227	0,7449	0,05	3	0	68,81	28,59	28	12
119	120	9999	0,1463	0,3378	0,05	3	0	32,07	13,60	13	12
120	121	9999	0,1238	0,2858	0,05	3	0	61,08	25,89	25	12
202	122	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
122	123	9999	0,6491	1,4984	0,05	2	0	94,62	46,26	46	10
123	124	9999	0,0450	0,1039	0,05	2	0	49,86	24,38	24	10
124	125	9999	0,5264	0,1806	0,05	2	1	123,16	60,21	60	10
124	126	9999	0,0206	0,0476	0,05	2	0	78,35	38,30	38	10
126	127	9999	0,5307	0,2792	0,05	2	1	145,48	71,12	71	10
126	128	9999	0,0976	0,2252	0,05	2	0	21,37	10,45	10	10
128	129	9999	0,1182	0,2728	0,05	2	1	74,79	36,56	36	10
128	130	9999	0,1388	0,3205	0,05	2	0	227,93	111,43	111	10
130	131	9999	0,0432	0,0996	0,05	2	0	35,61	17,41	17	10
131	132	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	249,29	121,88	121	-
132	133	9999	0,1613	0,3724	0,05	2	0	316,72	154,84	154	14
133	134	9999	0,3783	0,3778	0,05	2	0	333,82	163,20	163	14
134	135	9999	0,3972	0,3966	0,05	2	0	249,29	121,88	121	14
135	136	9999	0,2932	0,2928	0,05	2	0	0,00	0,00	0	14
12	75	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	405,99	161,52	161	-
16	85	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	247,75	105,03	105	-
31	136	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
39	136	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
38	99	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	76,45	32,41	32	-
62	99	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	76,45	32,41	32	-
51	97	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	141,82	60,12	60	-
45	118	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
63	108	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	79,83	33,84	33	-
8	73	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	5,08	2,02	2	-
70	83	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	87,31	37,01	37	-
88	103	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	9,07	3,84	3	-
42	52	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	0,00	0,00	0	-
80	132	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	249,29	121,88	121	-
24	10	9999	0,0001	0,0000	-	-	-	124,59	49,57	49	-

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 43 – Dados das barras do sistema teste de 43 nós da Fig. 31 na página 125.

Nó [i]	Usuários [N_i]	P_i^D [kW]	Q_i^D [kVAr]	$\bar{S}_i$ [kVA]	c_i^{ls} [\$ /kW]	$\bar{r}_i$ [$p.u.$]
1	1	0	0	1500	0	0,0
2	1	0	0	0	0	0,0
3	100	100	20	0	1	0,5
4	1	0	0	0	0	0,0
5	1	0	0	0	0	0,0
6	100	100	20	0	1	0,5
7	1	0	0	0	0	0,0
8	1	0	0	0	0	0,0
9	100	100	20	0	1	0,5
10	1	0	0	0	0	0,0
11	100	100	20	0	1	0,5
12	1	0	0	0	0	0,0
13	100	100	20	0	1	0,5
14	1	0	0	0	0	0,0
15	100	100	20	0	1	0,5
16	1	0	0	0	0	0,0
17	1	0	0	0	0	0,0
18	1	0	0	0	0	0,0
19	1	0	0	0	0	0,0
20	1	0	0	0	0	0,0
21	100	100	20	0	1	0,5
22	1	0	0	0	0	0,0
23	1	0	0	0	0	0,0
24	1	0	0	0	0	0,0
25	100	100	20	0	1	0,5
26	1	0	0	0	0	0,0
27	1	0	0	0	0	0,0
28	100	100	20	0	1	0,5
29	1	0	0	0	0	0,0
30	1	0	0	0	0	0,0
31	100	100	20	0	1	0,5
32	1	0	0	0	0	0,0
33	1	0	0	0	0	0,0
34	1	0	0	0	0	0,0
35	1	0	0	0	0	0,0
36	200	200	40	0	1	0,5
37	1	0	0	0	0	0,0
38	1	0	0	0	0	0,0
39	200	200	40	0	1	0,5
40	1	0	0	0	0	0,0
41	200	200	40	0	1	0,5
42	1	0	0	0	0	0,0
43	1	0	0	1500	0	0,0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 44 – Dados dos caminhos de interconexão do sistema teste de 43 nós da Fig. 31 na página 125.

de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}
1	2	500	0,001	0,000	0,1	2	0
2	3	500	0,9	0,9	0,1	2	0
3	4	500	0,9	0,9	0,1	2	0
3	5	500	0,9	0,9	0,1	2	0
5	6	500	0,001	0,000	0,1	2	0
6	7	500	0,9	0,9	0,1	2	1
6	8	500	0,9	0,9	0,1	2	0
8	9	500	0,9	0,9	0,1	2	0
8	10	500	0,001	0,000	0,1	2	0
10	11	500	0,9	0,9	0,1	2	0
11	12	500	0,9	0,9	0,1	2	0
11	13	500	0,9	0,9	0,1	2	0
13	14	500	0,9	0,9	0,1	2	1
17	15	500	0,9	0,9	0,1	2	0
15	16	500	0,9	0,9	0,1	2	0
32	17	500	0,001	0,000	0,1	2	0
15	18	500	0,9	0,9	0,1	2	0
18	19	500	0,9	0,9	0,1	2	0
18	20	500	0,001	0,000	0,1	2	0
20	21	500	0,9	0,9	0,1	2	0
21	22	500	0,9	0,9	0,1	2	0
21	23	500	0,9	0,9	0,1	2	0
21	24	500	0,001	0,000	0,1	2	0
24	25	500	0,9	0,9	0,2	2	0
25	27	500	0,9	0,9	0,2	2	0
25	26	500	0,9	0,9	0,2	2	0
25	28	500	0,9	0,9	0,2	2	0
28	29	500	0,9	0,9	0,2	2	1
28	30	500	0,9	0,9	0,2	2	1
31	32	500	0,9	0,9	0,2	2	0
31	33	500	0,9	0,9	0,2	2	0
33	34	500	0,9	0,9	0,2	2	0
33	35	500	0,9	0,9	0,2	2	0
35	36	500	0,9	0,9	0,2	2	0
36	37	500	0,9	0,9	0,2	2	0
36	38	500	0,9	0,9	0,2	2	0
38	39	500	0,9	0,9	0,2	2	0
39	40	500	0,9	0,9	0,2	2	0
39	41	500	0,9	0,9	0,2	2	1
41	42	500	0,9	0,9	0,2	2	1
31	43	500	0,9	0,9	0,2	2	0
4	16	1000	0,001	0,000	0,1	2	0
9	23	1000	0,001	0,000	0,1	2	0
12	27	1000	0,001	0,000	0,1	2	0
19	34	1000	0,001	0,000	0,1	2	0
22	37	1000	0,001	0,000	0,1	2	0
26	40	1000	0,001	0,000	0,1	2	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 45 – Dados das barras do sistema teste de 136 nós da Fig. 32 na página 126.

(continuação)						
Nó [i]	Usuários [N _i]	P_i^D [kW]	Q_i^D [kVAr]	$\bar{S}_i$ [kVA]	c_i^{ls} [\$/kW]	$\bar{r}_i$ [p.u.]
201	0	0,00	0,00	20000	0,00	0,00
202	0	0,00	0,00	20000	0,00	0,00
2	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
3	19	47,78	19,00	0	0,00	0,00
4	16	42,55	16,92	0	0,00	0,00
5	34	87,02	34,62	0	0,00	0,00
6	123	311,31	123,86	0	0,50	1,00
7	59	148,87	59,22	0	0,00	0,00
8	94	238,67	94,95	0	0,00	0,00
9	24	62,29	24,78	0	0,00	0,00
10	49	124,59	49,57	0	0,00	0,00
11	55	140,16	55,76	0	0,00	0,00
12	46	116,81	46,47	0	0,00	0,00
13	99	249,20	99,14	0	0,00	0,00
14	115	291,45	115,59	0	0,00	0,00
15	120	303,72	120,84	0	0,00	0,00
16	85	215,39	85,69	0	0,00	0,00
17	79	198,59	79,00	0	0,00	0,00
18	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
19	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
20	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
21	14	30,12	14,72	0	0,00	0,00
22	112	230,97	112,92	0	0,00	0,00
23	29	60,25	29,45	0	0,00	0,00
24	112	230,97	112,92	0	0,00	0,00
25	58	120,51	58,91	0	0,00	0,00
26	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
27	27	56,98	27,85	0	0,00	0,00
28	178	364,67	178,28	0	0,50	1,00
29	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
30	60	124,65	60,93	0	0,00	0,00
31	27	56,98	27,85	0	0,00	0,00
32	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
33	41	85,47	41,78	0	0,00	0,00
34	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
35	193	396,74	193,96	0	0,50	1,00
36	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
37	88	181,15	88,56	0	0,00	0,00
38	118	242,17	118,39	0	0,00	0,00
39	36	75,31	36,82	0	0,00	0,00
40	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
41	0	1,25	0,53	0	0,00	0,00
42	2	6,27	2,66	0	0,00	0,00
43	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
44	49	117,88	49,97	0	0,00	0,00
45	25	62,66	25,56	0	0,00	0,00
46	73	172,29	73,03	0	0,00	0,00
47	194	458,56	194,39	0	0,50	1,00
48	111	262,96	111,47	0	0,00	0,00

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 45 – Dados das barras do sistema teste de 136 nós da Fig. 32 na página 126.

(continuação)						
Nó [i]	Usuários [N_i]	P_i^D [kW]	Q_i^D [kVAr]	$\bar{S}_i$ [kVA]	c_i^{ls} [\$ / kW]	$\bar{r}_i$ [p.u.]
49	99	235,76	99,94	0	0,00	0,00
50	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
51	46	109,22	46,29	0	0,00	0,00
52	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
53	30	72,80	30,86	0	0,00	0,00
54	109	258,47	109,57	0	0,00	0,00
55	29	69,16	29,32	0	0,00	0,00
56	9	21,84	9,26	0	0,00	0,00
57	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
58	8	20,52	8,70	0	0,00	0,00
59	63	150,55	63,81	0	0,00	0,00
60	93	220,69	93,55	0	0,00	0,00
61	39	92,38	39,16	0	0,00	0,00
62	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
63	96	226,69	96,09	0	0,00	0,00
64	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
65	116	294,02	116,97	0	0,00	0,00
66	33	83,01	33,02	0	0,00	0,00
67	33	83,01	33,02	0	0,00	0,00
68	41	103,77	41,28	0	0,00	0,00
69	70	176,41	70,18	0	0,00	0,00
70	33	83,01	33,02	0	0,00	0,00
71	86	217,92	86,69	0	0,00	0,00
72	9	23,29	9,26	0	0,00	0,00
73	2	5,07	2,01	0	0,00	0,00
74	28	72,63	28,89	0	0,00	0,00
75	161	405,99	161,52	0	0,50	1,00
76	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
77	42	100,18	42,46	0	0,00	0,00
78	60	142,52	60,41	0	0,00	0,00
79	40	96,04	40,71	0	0,00	0,00
80	127	300,45	127,37	0	0,50	1,00
81	59	141,24	59,87	0	0,00	0,00
82	118	279,85	118,63	0	0,00	0,00
83	37	87,31	37,01	0	0,00	0,00
84	103	243,85	103,37	0	0,00	0,00
85	105	247,75	105,03	0	0,00	0,00
86	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
87	38	89,87	38,10	0	0,00	0,00
88	482	1137,30	482,11	0	0,50	1,00
89	194	458,34	194,30	0	0,50	1,00
90	163	385,20	163,29	0	0,00	0,00
91	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
92	33	79,60	33,74	0	0,00	0,00
93	37	87,31	37,01	0	0,00	0,00
94	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
95	31	74,00	31,37	0	0,00	0,00
96	98	232,05	98,36	0	0,00	0,00

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 45 – Dados das barras do sistema teste de 136 nós da Fig. 32 na página 126.

(continuação)						
Nó [i]	Usuários [N _i]	P_i^D [kW]	Q_i^D [kVAr]	$\bar{S}_i$ [kVA]	c_i^{ls} [\$/kW]	$\bar{r}_i$ [p.u.]
97	60	141,82	60,11	0	0,00	0,00
98	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
99	32	76,44	32,40	0	0,00	0,00
100	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
101	21	51,32	21,75	0	0,00	0,00
102	25	59,87	25,38	0	0,00	0,00
103	3	9,06	3,84	0	0,00	0,00
104	0	2,09	0,88	0	0,00	0,00
105	7	16,73	7,09	0	0,00	0,00
106	638	1506,50	638,63	0	0,50	1,00
107	132	313,02	132,69	0	0,00	0,00
108	33	79,83	33,84	0	0,00	0,00
109	21	51,32	21,75	0	0,00	0,00
110	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
111	85	202,44	85,81	0	0,00	0,00
112	25	60,82	25,87	0	0,00	0,00
113	19	45,61	19,33	0	0,00	0,00
114	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
115	66	157,07	66,58	0	0,00	0,00
116	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
117	106	250,15	106,04	0	0,00	0,00
118	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
119	28	68,80	28,59	0	0,00	0,00
120	13	32,07	13,59	0	0,00	0,00
121	25	61,08	25,89	0	0,00	0,00
122	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
123	46	94,62	46,26	0	0,00	0,00
124	24	49,85	24,37	0	0,00	0,00
125	60	123,16	60,21	0	0,00	0,00
126	38	78,35	38,30	0	0,00	0,00
127	71	145,48	71,12	0	0,00	0,00
128	10	21,36	10,44	0	0,00	0,00
129	36	74,78	36,56	0	0,00	0,00
130	111	227,93	111,43	0	0,00	0,00
131	17	35,61	17,41	0	0,00	0,00
132	121	249,29	121,88	0	0,00	0,00
133	154	316,72	154,84	0	0,00	0,00
134	163	333,82	163,20	0	0,50	1,00
135	121	249,29	121,88	0	0,00	0,00
136	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 46 – Dados dos caminhos de interconexão do sistema teste de 136 nós da Fig. 32 na página 126.

(continuação)							
de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}
2	3	9999	0,00188	0,00433	0,05	2	0
3	4	9999	0,22340	0,51535	0,05	2	0
4	5	9999	0,09943	0,22953	0,05	2	0
5	6	9999	0,15571	0,35945	0,05	2	0
6	7	9999	0,16321	0,37677	0,05	2	0
7	8	9999	0,11444	0,26417	0,05	2	0
7	9	9999	0,05675	0,05666	0,05	2	0
9	10	9999	0,52124	0,27418	0,05	2	0
9	11	9999	0,10877	0,10860	0,05	2	0
11	12	9999	0,39803	0,20937	0,05	2	0
11	13	9999	0,91744	0,31469	0,05	2	0
11	14	9999	0,11823	0,11805	0,05	2	0
14	15	9999	0,50228	0,26421	0,05	2	0
14	16	9999	0,05675	0,05666	0,05	2	0
16	17	9999	0,29379	0,15454	0,05	2	0
18	19	9999	0,00188	0,00433	0,05	2	0
19	20	9999	0,22324	0,51535	0,05	2	0
20	21	9999	0,10881	0,25118	0,05	2	0
21	22	9999	0,71078	0,37388	0,05	2	1
21	23	9999	0,18197	0,42008	0,05	2	0
23	24	9999	0,30326	0,15952	0,05	2	0
23	25	9999	0,02439	0,05630	0,05	2	0
25	26	9999	0,04502	0,10394	0,05	2	0
26	27	9999	0,01876	0,04331	0,05	2	0
27	28	9999	0,11823	0,11230	0,05	2	0
28	29	9999	0,02365	0,02361	0,05	2	0
29	30	9999	0,18954	0,09970	0,05	2	0
30	31	9999	0,39803	0,20937	0,05	2	0
32	33	9999	0,09477	0,04985	0,05	2	0
33	34	9999	0,41699	0,21934	0,05	2	0
34	35	9999	0,11372	0,05982	0,05	2	0
32	36	9999	0,07566	0,07555	0,05	2	0
36	37	9999	0,36960	0,19442	0,05	2	0
37	38	9999	0,26536	0,13958	0,05	2	0
36	39	9999	0,05675	0,05660	0,05	2	0
40	41	9999	0,11819	0,27283	0,05	2	0
41	42	9999	2,96288	1,01628	0,05	2	0
41	43	9999	0,00188	0,00433	0,05	2	0
43	44	9999	0,06941	0,16024	0,05	2	0
44	45	9999	0,81502	0,42872	0,05	2	0
44	46	9999	0,06378	0,14724	0,05	2	0
46	47	9999	0,13132	0,30315	0,05	2	0
47	48	9999	0,06191	0,14291	0,05	2	0
48	49	9999	0,11444	0,26417	0,05	2	0
49	50	9999	0,28374	0,28331	0,05	2	0
50	51	9999	0,28374	0,28321	0,05	2	0
48	63	9999	0,13882	0,32047	0,05	2	0
52	53	9999	0,02626	0,06063	0,05	3	0
53	54	9999	0,06003	0,13858	0,05	3	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 46 – Dados dos caminhos de interconexão do sistema teste de 136 nós da Fig. 32 na página 126.

(continuação)							
de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}
54	55	9999	0,03002	0,06929	0,05	3	0
55	56	9999	0,02064	0,04764	0,05	3	0
53	57	9999	0,10881	0,25118	0,05	3	0
57	58	9999	0,25588	0,13460	0,05	3	0
58	59	9999	0,41699	0,21934	0,05	3	0
59	60	9999	0,50228	0,26421	0,05	3	0
60	61	9999	0,33170	0,17448	0,05	3	0
61	62	9999	0,20849	0,10967	0,05	3	0
64	65	9999	0,27014	0,62362	0,05	2	0
65	66	9999	0,38270	0,88346	0,05	2	0
66	67	9999	0,33018	0,76220	0,05	2	0
67	68	9999	0,32830	0,75787	0,05	2	0
68	69	9999	0,17072	0,39409	0,05	2	0
69	70	9999	0,55914	0,29412	0,05	2	0
69	71	9999	0,05816	0,13425	0,05	2	0
71	72	9999	0,70130	0,36890	0,05	2	1
72	73	9999	1,02352	0,53839	0,05	2	1
71	74	9999	0,06754	0,15591	0,05	2	0
74	75	9999	1,32352	0,45397	0,05	2	0
76	77	9999	0,72976	1,68464	0,05	2	0
77	78	9999	0,22512	0,51968	0,05	2	0
78	79	9999	0,20824	0,48071	0,05	2	0
80	81	9999	0,61950	0,61857	0,05	2	0
81	82	9999	0,34049	0,33998	0,05	2	0
82	83	9999	0,56862	0,29911	0,05	2	0
82	84	9999	0,10877	0,10860	0,05	2	0
84	85	9999	0,56862	0,29911	0,05	2	0
86	87	9999	0,41835	0,96575	0,05	2	0
87	88	9999	0,10499	0,13641	0,05	2	0
87	89	9999	0,43898	1,01338	0,05	2	0
89	90	9999	0,07520	0,02579	0,05	2	0
90	91	9999	0,07692	0,17756	0,05	2	0
91	92	9999	0,33205	0,76653	0,05	2	0
92	93	9999	0,08442	0,19488	0,05	2	0
94	95	9999	0,29320	0,29276	0,05	2	0
95	96	9999	0,21753	0,21721	0,05	2	0
96	97	9999	0,26482	0,26443	0,05	2	0
94	98	9999	0,10318	0,23819	0,05	2	0
98	99	9999	0,13507	0,31181	0,05	2	0
100	101	9999	0,16884	0,38976	0,05	3	0
101	102	9999	0,11819	0,27283	0,05	3	0
102	103	9999	2,28608	0,78414	0,05	3	0
102	104	9999	0,45587	1,05236	0,05	3	0
104	105	9999	0,69600	1,60669	0,05	3	0
105	119	9999	0,32267	0,74488	0,05	3	0
119	120	9999	0,14633	0,33779	0,05	3	0
120	121	9999	0,12382	0,28583	0,05	3	0
106	107	9999	0,20298	0,26373	0,05	3	0
107	108	9999	0,21348	0,27737	0,05	3	0
108	109	9999	0,54967	0,28914	0,05	3	0
109	110	9999	0,54019	0,28415	0,05	3	0

Fonte: Elaboração do autor.

Tabela 46 – Dados dos caminhos de interconexão do sistema teste de 136 nós da Fig. 32 na página 126.

(continuação)							
de [i]	para [j]	$\bar{I}_{ij}$ [A]	R_{ij} [Ω]	X_{ij} [Ω]	λ_{ij} [faltas/ano]	r_{ij} [horas]	l_{fused}
108	111	9999	0,04550	0,05911	0,05	3	0
111	112	9999	0,47385	0,24926	0,05	3	0
112	113	9999	0,86241	0,45364	0,05	3	0
113	114	9999	0,56862	0,29911	0,05	3	0
109	115	9999	0,77711	0,40878	0,05	3	0
115	116	9999	1,08038	0,56830	0,05	3	0
110	117	9999	1,06633	0,57827	0,05	3	0
117	118	9999	0,47385	0,24926	0,05	3	0
122	123	9999	0,64910	1,49842	0,05	2	0
123	124	9999	0,04502	0,10394	0,05	2	0
124	125	9999	0,52640	0,18056	0,05	2	1
124	126	9999	0,02064	0,04764	0,05	2	0
126	127	9999	0,53071	0,27917	0,05	2	1
126	128	9999	0,09755	0,22520	0,05	2	0
128	129	9999	0,11819	0,27283	0,05	2	1
128	130	9999	0,13882	0,32047	0,05	2	0
130	131	9999	0,04315	0,09961	0,05	2	0
132	133	9999	0,16134	0,37244	0,05	2	0
133	134	9999	0,37832	0,37775	0,05	2	0
134	135	9999	0,39724	0,39664	0,05	2	0
135	136	9999	0,29320	0,29276	0,05	2	0
201	2	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
201	18	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
201	40	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
49	52	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
202	64	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
202	76	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
202	86	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
202	100	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
105	106	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
202	122	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
12	75	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
16	85	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
31	136	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
39	136	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
38	99	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
62	99	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
62	97	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
51	97	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
45	118	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
63	108	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
8	73	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
70	83	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
88	103	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
42	52	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
80	132	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
79	80	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
131	132	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
93	94	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
32	29	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0
24	10	9999	0,00100	0,00000	0,05	2	0

Fonte: Elaboração do autor.