Marcilyanne Moreira Gois

**Redução de perdas em sistemas de distribuição por
reconfiguração de redes utilizando aceleradores de
*hardware*¹**

Tese apresentada ao ,á Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências, programa de Engenharia Elétrica. Doutora .

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência:

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Jr.
Co-orientador: Vanderlei Bonato

**São Carlos
2017**

¹Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original encontra-se disponível na EESC/USP que aloja o programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

G616r	<p>Gois, Marcilyanne Moreira</p> <p>Redução de perdas em sistemas de distribuição por reconfiguração de redes utilizando aceleradores de hardware / Marcilyanne Moreira Gois; orientador João Bosco Augusto London Jr.; coorientador Vanderlei Bonato. São Carlos, 2017.</p> <p>Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.</p> <p>1. Heurística de pesos. 2. FPGA. 3. Reconfiguração. 4. Pesos. 5. Hardware. 6. HP-RNP. I. Título.</p>
-------	--

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCILYANNE MOREIRA GOIS.**

Título da tese: "Heurística de pesos para o problema de reconfiguração de redes em aceleradores de *hardware* para minimização de perdas em sistemas de distribuição de energia".

Data da defesa: 23/03/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **João Bosco Augusto London Junior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Alexandre Cláudio Botazzo Delbem**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC)

APROVADO

Dr. **Benvindo Rodrigues Pereira Junior**
(Pós-Doutorando/FAPESP)

APROVADO

Prof. Associado **Renato Tinós**
(Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/FFCLRP-USP)

APROVADO

Prof. Associado **Claudio Fabiano Motta Toledo**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares que me apoiaram em tudo em especial, a meus pais, especialmente minha mãe Franciscisca Regina e meus irmãos, que acreditaram em mim e na realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. João Bosco, pelo apoio, amizade e enorme dedicação e incentivo à este trabalho, o qual sempre esteve preocupado em realizar uma boa pesquisa e ao mesmo tempo garantir meu aprendizado.

Minha gratidão ao Prof. Alexandre Delbem por toda ajuda, paciência, apoio no desenvolvimento do meu trabalho de doutorado e sempre disponível para o esclarecimento de minhas dúvidas.

À querida Aline Delbem, pela amizade e atenção em todos momentos compartilhados.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Computação Reconfigurável por todos os momentos únicos de descontração, churrascos, conversas, todos esses momentos foram de grande contribuição para finalização deste trabalho.

Ao amigo André Perina pela ajuda e grande contribuição neste trabalho.

Às minhas queridas amigas de minha terra natal, Belém do Pará, Rita Gomes, Priscila Siqueira que mesmo distante, sempre estiveram presentes em minha vida, sempre confortando com palavras de motivação nos momentos difíceis.

Aos amigos especiais, Antônio Helson, Christiane Brasil, Erinaldo Silva, Jean Martins, Maria Natália, Maria Adelina, Naihara, amigos que em momentos de estresse e tristeza tornaram os dias melhores e foram de grande ajuda e força para a finalização deste trabalho.

Ao meu namorado e companheiro Alberto Hata, que acompanhou-me todas as etapas desde o início do meu doutorado e sempre me incentivou e compartilhando alegrias e me confortando em momentos difíceis.

Meu agradecimento às agências CNPQ e a FIPAI pelo apoio financeiro o qual viabilizou a

conclusão deste trabalho.

*“ Agradeço todas as dificuldades que enfrentei;
não fosse por elas, eu não teria saído do lugar.
As facilidades nos impedem de caminhar.
Mesmo as críticas nos auxiliam muito.
” Chico Xavier*

RESUMO

GOIS, M.M. (2017). **Redução de perdas em sistemas de distribuição por reconfiguração de redes utilizando aceleradores de *hardware***. 136 pg. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), São Carlos – SP.

A reconfiguração de redes é uma técnica utilizada para alterar topologias de redes por meio da mudança dos estados das chaves normalmente aberta e normalmente fechada. Essa técnica é muito utilizada para tratar problemas relacionados ao excesso de perdas ôhmicas em uma rede elétrica. Tais perdas representam um custo considerável no faturamento das empresas distribuidoras. O problema de redução de perdas via reconfiguração de redes pode ser modelado como um problema de otimização combinatória, em que se deve determinar a combinação de estados de chaves que correspondem a configuração radial da rede com menor nível de perdas. De modo a lidar com esse problema por reconfiguração da rede, diversas técnicas computacionais têm sido propostas. Dentre essas técnicas, estruturas de dados eficientes, como a Representação nó-profundidade (RNP), viabilizam a modelagem radial dos sistemas de distribuição (SDs) e o uso combinado com métodos de otimização possibilitam uma redução do espaço de busca de soluções consequentemente pode-se obter melhores soluções. Para otimizar a capacidade de processamento, este trabalho propõe tratar o problema de redução de perdas em SDs via reconfiguração de redes em aceleradores de *hardware* utilizando da arquitetura de *hardware* paralelizada em FPGA baseada na RNP (HP-RNP) proposta em (GOIS, 2011). Assim, um problema combinatório é tratado em aceleradoras de *hardware* reduzindo significativamente o custo computacional devido ao alto grau de paralelismo no processo de busca por soluções. Nesse sentido, foi proposto neste trabalho a extensão da HP-RNP, a partir de modificações no barramento de comunicação da arquitetura original para o envio e recebimentos dos dados que representam os SDs de forma mais eficiente. Além disso, o problema de redução de perdas por reconfiguração de redes foi mapeado em um problema de floresta geradora mínima com restrição de grau (dc-MSFP), a partir de uma aproximação que faz uso de uma heurística de pesos, em que informações relacionadas com grandezas elétricas e características topológicas da rede são transformadas em pesos. A partir da extensão da HP-RNP e do mapeamento do problema em um dc-MSFP, foi possível obter soluções de qualidade (próximas da ótima) em tempo significativamente reduzido quando comparado às outras abordagens.

Palavras-chave: Reconfiguração de redes, heurística de pesos, redução de perdas, paralelização, FPGA, sistemas de distribuição. .

ABSTRACT

GOIS, M.M. (2017). **Reduction of losses in distribution systems by network reconfiguration using hardware accelerators.** 136 pg. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), São Carlos – SP.

Network reconfiguration is a technique used to change network topologies by changing the normally open and normally closed switches states. This technique is widely used to problems related to the excess of ohmic losses in distribution companies. Such losses represent a considerable cost in the distribution companies. The problem of network reconfiguration can be modeled as a combinatorial optimization problem, in which the combination of switches states that represent the configuration of the network with the lowest level of losses must be determined. To deal with these problems by network reconfiguration, several computational techniques have been proposed. Among these techniques, efficient data structures, such as the Node-Depth Encoding (NDE), enable the radial modeling of the distribution systems and the combined use of the NDE with optimization methods allow the reduction of the search space of the solutions. In order to optimize the processing capacity, this work proposes to deal with the loss minimization problem in Distribution Systems (DSs) by network reconfiguration using the **H**ardware Parallelized **N**DE (HP-NDE) proposed in (GOIS, 2011) to accelerate the network reconfiguration. Thus, a combinatorial problem is addressed in hardware accelerators, reducing significantly the computational cost due to the high degree of the parallelism in the process of search of the solution search. In this context, it was proposed the extension of the HP-NDE, from modifications in the communication bus of the original HP-NDE to send and receive more efficiently the data that represent the DSs. Moreover, the problem of loss reduction was mapped in a minimum spanning forest problem with degree constraint (dc-MSFP), by using an approximation that use a weights heuristic based on the information of the electrical magnitudes and topological characteristics of the network. From the extension of the HP-RNP and the mapping of the problem in a dc-MSFP, it was possible to obtain solutions of the good quality (close to optimal) in a time significantly reduced when compared to the other approaches.

Keywords: Network reconfiguration, weight heuristic, loss reduction, parallelization, FPGA, distribution systems. .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Percentual de perdas em relação a energia injetada ao longo dos anos.	20
Figura 2 – SD e sua representação por grafo. Fonte: (ZAN, 2015).	40
Figura 3 – Método de Varredura Direta/Inversa	43
Figura 4 – Exemplo de uma representação de um alimentador de um sistema de distribuição. (Adaptada de (BARAN; WU, 1989).	45
Figura 5 – Exemplo de uma floresta geradora contendo três árvores A_1, A_2, A_3 (a) e Arrays de RNPs das três árvores da floresta geradora (b).	50
Figura 6 – Exemplo de aplicação do operador PAO entre duas árvores.	52
Figura 7 – Exemplo de aplicação do operador CAO entre duas árvores.	53
Figura 8 – Visão geral da arquitetura de <i>hardware</i> HP-RNP, em que $\sqrt{n}$ Workers são paralelizados em que n é número de nós no grafo.	56
Figura 9 – Máquina de estados finitos de um <i>Worker</i>	59
Figura 10 – Estratégia de paralelização em $\lceil \sqrt{n} \rceil$ Workers (Seção 5.3).	60
Figura 11 – Tempo de comunicação para HP-RNP original proposta em (GOIS, 2011) e para a extensão da HP-RNP, desenvolvida para lidar com o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes	63
Figura 12 – Diagrama de blocos do método proposto. O método é executado em <i>software</i> em que essencialmente se calculam os pesos para a floresta de grafos que representa um SD utilizando uma heurística de pesos. O acelerador em <i>hardware</i> possui uma MEF correspondente ao PAO, que realiza a reconfiguração de redes.	65
Figura 13 – Exemplo simples de mapeamento/heurística, em que resistências (R_{ij}) são transformadas em pesos (W_{ij})	67
Figura 14 – Configurações inicial (a) e final (b) obtida pelo algoritmo de árvore geradora mínima de Kruskal.	69
Figura 15 – Exemplo de cálculo do Nível de ramo, usado na utilização na formulação da heurística de pesos.	70
Figura 16 – Configuração obtida com base na Equação 6.6.	71
Figura 17 – Exemplo de como uma carga alta pode influenciar no aumento das perdas em um SD	72
Figura 18 – Heurística de pesos baseada nas características globais.	73
Figura 19 – Fluxograma da heurística de pesos local.	76

Figura 20 – Sistema-teste de 16 barras com 3 alimentadores, 13 chaves NF e 3 chaves NA. A configuração inicial possui perdas de 511,5 kW (a) e a configuração final possui perdas de 468,2 kW.	80
Figura 21 – Sistema-teste 70 barras que contém 4 alimentadores, 78 ramos, das quais 11 são chaves NA. A perda inicial dessa configuração é de 227,53 kW.	82
Figura 22 – Configuração gerada a partir da heurística de pesos em <i>software</i> e HP-RNP para o sistema de 70 barras. As perdas da configuração final foram de 202,25 kW.	83
Figura 23 – Sistema de 94 barras com 11 alimentadores, 13 chaves NA, tensão de 11,4 kV e com perda inicial de 531,99 kW.	84
Figura 24 – Configuração gerada a partir da heurística de pesos em <i>software</i> e HP-RNP. A perda da configuração é de 470,05 kW.	85
Figura 25 – Sistema de 143 barras com 8 alimentadores , 21 chaves NA e com perda inicial de 320,3 kW.	87
Figura 26 – Configuração gerada por meio da heurística de pesos pela HP-RNP e <i>software</i> . A perda da configuração é de 299,75 kW.	88
Figura 27 – Configurações iniciais dos sistemas-teste de 470 e 940 barras.	93
Figura 28 – Tempo médio por <i>Worker</i> da HP-RNP	96
Figura 29 – Tempo total dos <i>Workers</i> da HP-RNP	96
Figura 30 – Comparação entre as configurações inicial e melhor encontrada na literatura, verificando o número de nós que possuem profundidades máximas e o número de nós que possuem o grau máximo.	118
Figura 31 – Análise do número de nós com grau máximo por região, sendo a primeira metade mais próxima da subestação e a segunda metade mais distante. . . .	119
Figura 32 – Estrutura original implementada em (GOIS, 2011).	128
Figura 33 – Estrutura modificada para viabilizar a HP-RNP para o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes.	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Termos equivalente para SDs e grafos.	41
Tabela 2 – Grau máximo das soluções iniciais e da solução melhor encontrada	77
Tabela 3 – Resultados para sistema de 16 barras e comparação entre diferentes métodos.	81
Tabela 4 – Resultados para sistema de 70 barras e comparação entre diferentes métodos	83
Tabela 5 – Resultados para sistema de 94 barras e comparação entre diferentes métodos.	86
Tabela 6 – Resultados para sistema de 143 barras e comparação entre diferentes métodos.	89
Tabela 7 – Resultados para sistema de 470 barras e comparação entre diferentes métodos	91
Tabela 8 – Resultados para sistema de 940 barras e comparação entre diferentes métodos	92
Tabela 9 – Tempo dos Workers e tempo de comunicação para cada sistema-teste.	95
Tabela 10 – Análise relativa ao <i>gap</i> entre as perdas das configurações obtidas através do método proposto, melhor configuração encontrada e heurística de peso baseada na resistência (R).	97
Tabela 11 – Número de barras no sistema-teste por número de <i>Workers</i> e alimentadores.	97
Tabela 13 – Sistema de 70 barras	105
Tabela 12 – Sistema de 16 barras	108
Tabela 14 – Sistema de 94 barras	108
Tabela 15 – Sistema de 143 barras	111
Tabela 16 – Chaves abertas adicionais para interconexão dos 5 sistemas de 94 barras.	115
Tabela 17 – Chaves abertas adicionais para interconexão dos 10 sistemas de 94 barras.	116
Tabela 18 – Análise de grau e profundidades das configurações antes e depois da reconfi- guração de redes	120
Tabela 19 – Resultados e comparação para o sistema de 470 barras	124
Tabela 20 – Resultados e comparação para o sistema de 940barras	125

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Proposição	23
1.2	Organização do Texto	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	Métodos exatos para problemas com relaxações	28
2.2	Métodos baseados em heurísticas	29
2.3	Comparação de métodos exatos e baseados em heurísticas	34
2.4	Métodos baseados em heurísticas de pesos	34
2.5	Considerações Finais	36
3	RECONFIGURAÇÃO DE REDES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	39
3.1	Representação de um SD através de grafos	39
3.2	Formulação Matemática	40
3.3	Cálculo do fluxo de carga	42
3.4	Métodos de Varredura Direta/Inversa	43
3.4.1	<i>Método de Soma de Correntes</i>	44
3.4.2	<i>Método de Soma de Potências</i>	45
3.5	Modelagem da carga corrente constante com a tensão	46
3.6	Considerações Finais	47
4	REPRESENTAÇÃO NÓ-PROFUNDIDADE	49
4.1	Representação Nó-profundidade	50
4.2	Operadores da RNP	50
4.2.1	<i>Operador PAO</i>	51
4.2.2	<i>Operador CAO</i>	52
4.3	Considerações Finais	54
5	ARQUITETURA DE <i>HARDWARE</i>	55
5.1	FPGA	55
5.2	Arquitetura de <i>hardware</i>	56
5.2.1	<i>P-PAO-S</i>	57
5.3	<i>Worker</i>	58

5.3.1	<i>Máquina de estados de um Worker</i>	58
5.4	Considerações Finais	60
6	RECONFIGURAÇÃO DE REDES PELA HP-RNP E MAPEAMENTO DO PROBLEMA	61
6.1	Extensão da HP-RNP para o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes	62
6.2	Mapeamento e heurística de pesos utilizada para o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes	66
6.3	Heurística de pesos baseada em características globais	72
6.4	Heurística de pesos local	74
6.5	Restrição de grau para o dc-MSFP aplicada ao mapeamento do problema de redução de perdas	76
6.6	Considerações Finais	77
7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	79
7.1	Resultados para o sistema de 16 barras	79
7.2	Resultados para o sistema de 70 barras	81
7.3	Resultados para o sistema de 94 barras	82
7.4	Resultados para o sistema de 143 barras	87
7.5	Resultados para o sistema de 470 barras e 940 barras	90
7.6	Análise de tempos utilizando a HP-RNP e em <i>software</i>	93
7.6.1	<i>Resultados para a HP-RNP</i>	93
7.7	Avaliação da qualidade das soluções	96
7.8	Considerações Finais	97
8	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	99
8.1	Perspectivas futuras	100
8.2	Artigos publicados	101

APÊNDICES 103

APÊNDICE A	– DADOS DOS SISTEMAS-TESTE	105
A.1	Sistema 16 barras	105
A.2	Sistema de 70 barras	105
A.3	Sistema de 94 barras	107
A.4	Sistema de 143 barras	111
A.5	Sistema de 470 barras	115
A.6	Sistema de 940 barras	115

APÊNDICE B	–	ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DO GRAU E DAS PROFUNDIDADES DAS CONFIGURAÇÕES ANTES E DEPOIS DA RECONFIGURAÇÃO DE REDES	117
B.1		Análise da importância do grau e da profundidade para a redução de perdas	117
APÊNDICE C	–	DADOS DOS SISTEMAS DE 470 E 940 BARRAS . .	123
APÊNDICE D	–	EXTENSÃO DA HP-RNP PARA O PROBLEMA DE REDUÇÃO DE PERDAS VIA RECONFIGURAÇÃO DE REDES	127
REFERÊNCIAS			131

INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência (SEPs) têm como função fornecer energia elétrica dentro de padrões de qualidade e atendendo a demanda dos consumidores a cada instante. Os SEPs possuem a seguinte organização: geração, transmissão e distribuição. O sistema de geração é responsável em transformar uma forma de energia qualquer (hidráulica, térmica, entre outras) em energia elétrica. O sistema de transmissão tem a função de transportar a energia produzida para os centros de distribuição. Por fim, o sistema de distribuição (SD) realiza o fornecimento da energia aos consumidores finais.

A diferença entre a energia medida pelas distribuidoras nas unidades consumidoras e a energia fornecida pelos agentes supridores é denominada perda de energia que pode ser dividida em duas parcelas: perdas no sistema de transmissão, que ocorrem entre a geração nas usinas até o limite dos SDs, e perdas que ocorrem no SD.

As perdas no SD são geralmente divididas em duas categorias: perdas técnicas e perdas não técnicas. As perdas técnicas são inerentes ao transporte da energia elétrica nas redes de distribuição e as perdas não técnicas, que estão diretamente associadas à gestão comercial das distribuidoras, correspondem à diferença entre as perdas totais (diferença entre a energia injetada no SD e a comercializada ou faturada) e as perdas técnicas ([BENEDICT *et al.*, 1992](#)). As perdas técnicas e não técnicas podem ser ainda subdivididas da seguinte forma:

- Perdas técnicas:
 - Perdas por efeito Joule nos condutores;
 - Perdas nos núcleos dos transformadores;
 - Perdas devidas às correntes de fuga no ar e nos isoladores/isolantes, etc.
- Perdas não técnicas:
 - Furtos de energia;

- Erros de medição;
- Erros no processo de faturamento;
- Unidades consumidoras sem equipamento de medição, etc.

O problema abordado neste trabalho é o de redução de perdas técnicas por efeito Joule nos condutores da rede de distribuição, conhecido também como problema de minimização de perdas ôhmicas em SDs.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Elétrica (ABRADEE), no Brasil em 2015, as perdas na distribuição foram de 13,5% sobre toda a energia injetada na rede, esse valor corresponde a 13 MWh de energia perdida. De acordo com uma estimativa elaborada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em termos de custo estes 13 MWh representam um prejuízo de R\$ 11,021 bilhões¹ apenas em 2015. Desse montante, as perdas técnicas correspondem R\$ 5,917 bilhões. A Figura 1 ilustra uma estatística elaborada pela ABRADEE que mostra o percentual de perdas técnicas e comerciais para o conjunto das 64 distribuidoras de energia ao longo dos anos². Pode-se observar que as perdas técnicas as quais englobam as perdas por efeito joule são maiores em relação as perdas comerciais.

Figura 1 – Percentual de perdas em relação a energia injetada ao longo dos anos.

¹Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/Excel/Base_Perdas_Internetnov2015_19-11.xlsx>

²Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/perdas/furto-e-fraude-de-energia>>

Uma das técnicas utilizadas para reduzir as perdas ôhmicas em SDs é o processo de reconfiguração de redes, que consiste na alteração da configuração (ou topologia) da rede por meio da mudança dos estados de chaves seccionadoras que operam no estado normalmente aberto (NA), ou normalmente fechado (NF), transferindo blocos de cargas entre alimentadores (ver Capítulo 3.1) e, conseqüentemente, alterando as correntes nas linhas. A minimização de perdas a partir da reconfiguração de redes é um problema de otimização combinatória, em que se deve determinar a combinação de estados de chaves que resulte em uma topologia radial da rede com menor perda ôhmica. Como o número de combinações de estados cresce com o número de chaves, a utilização de técnicas de busca exaustiva é inviável para problemas de larga-escala (WANG; CHENG, 2008). Importa destacar que o problema de redução de perdas em SDs através da reconfiguração de redes foi primeiramente abordado em (MERLIN; BACK, 1975) e vem sendo bastante estudado desde então.

O desempenho do processo de reconfiguração de redes para redução de perdas depende tanto da precisão das técnicas para estimar as perdas quanto da eficiência computacional do processo para obter uma configuração mais adequada (ABABEI; KAVASSERI, 2011). Usualmente, em um processo de reconfiguração de redes, a cada mudança na topologia é necessário analisar as margens operacionais da rede (correntes nas linhas, queda de tensão, carregamento), para então determinar as perdas de cada configuração. Essa análise é realizada por meio de um algoritmo para cálculo de fluxo de carga (ou fluxo de potência), em que a cada mudança topológica são determinados a amplitude e o ângulo de fase da tensão de cada barra da rede além das correntes nos trechos de linha, possibilitando determinar as perdas em cada linha e as perdas totais de uma configuração do SD. Entretanto, a necessidade de execução do algoritmo para cálculo de fluxo de carga para cada topologia gerada compromete o desempenho do processo de reconfiguração em termos de tempo de computação. Assim, alguns métodos têm considerado também a redução do número de análises requeridas. A partir da análise por meio do fluxo de carga, pode-se avaliar o desempenho da rede (qualidade da energia fornecida), as condições de operação (carregamento dos seus equipamentos), além de possibilitar a sugestão de planos de melhoria ou expansão da rede.

Diversas técnicas computacionais têm sido propostas de modo a lidar com problemas relacionados à redução de perdas via reconfiguração de redes. Dentre as quais podem ser citadas técnicas que envolvem métodos baseados em programação matemática, em heurísticas e em meta-heurísticas (CARRENO; ROMERO; PADILHA-FELTRIN, 2008). Os métodos exatos ou baseados em programação matemática encontram as soluções ótimas ou garantem uma distância máxima entre a solução encontrada e a ótima. Entretanto, geralmente esses métodos utilizam modelos simplificados da rede ou uma formulação do problema em que algumas restrições são relaxadas em certo grau.

Os métodos baseados em heurísticas e metaheurísticas englobam estratégias para encontrar boas soluções, ou até ótimas, porém sem garantia de otimalidade e em tempo computacional

razoável. Usualmente, tais métodos utilizam certo grau de informação relacionado ao problema, isso possibilita uma relativa redução do espaço de busca de soluções. Esses métodos podem demandar uma grande quantidade de memória e, principalmente, de tempo de computação, quando aplicados a grandes instâncias de problemas combinatórios. Com isso, para melhorar o desempenho para os problemas de larga-escala, como a redução de perdas por reconfiguração de grandes SDs, novas estruturas de dados (representações computacionais e combinadas a procedimentos-operadores para a sua manipulação) têm sido desenvolvidas e testadas.

Há diversos tipos de representações na literatura (GOIS, 2011), entre as representações capazes de representar grafos esparsos estão as seguintes: Conjunto de arestas e a Representação Nó-Profundidade (DELBEM *et al.*, 2004), as quais possuem complexidade de tempo de $O(n)$ e $O(\sqrt{n})$ respectivamente.

Nesse contexto, a Representação Nó-Profundidade (RNP), proposta em (DELBEM *et al.*, 2004), tem mostrado resultados relevantes (SANTOS *et al.*, 2010; SANCHES *et al.*, 2011). A eficiência computacional da RNP em termos de tamanho de memória é de $O(n)$, em que n é o número de nós (barras) do grafo correspondente ao SD e o tempo médio por aplicação de operadores da RNP é $O(\sqrt{n})$ (LIMA, 2009). Além da complexidade de tempo relativamente baixa da RNP, os seus operadores geram exclusivamente configurações factíveis no contexto de reconfiguração de redes, isto é, redes radiais que fornecem energia para todo o sistema. Isso evita o uso de métodos de penalização de configurações infactíveis ou algoritmos de reparo dos aspectos que tornam uma configuração infactível.

O interesse das companhias de energia por ferramentas computacionais para lidar com SDs de grande porte tem aumentado com a automação e a informatização dos SDs e com o interesse cada vez maior por aspectos de *Smart Power Grids* (LO; ANSARI, 2012). Nesse contexto, técnicas de paralelização em *hardware* mostram-se importantes para aumentar o desempenho da RNP, uma vez que a sua paralelização a nível de *software* é intrínseca à RNP. O uso das arquiteturas de *hardware* viabiliza lidar com problemas mais complexos e de larga-escala sem comprometer a sua eficiência, possibilitando explorar o paralelismo em alto grau.

Um dispositivo que pode ser utilizado para a implementação de arquiteturas de *hardware* é o *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) (BOBDA, 2007). Há trabalhos envolvendo aplicações de FPGAs em SEPs propostos recentemente na literatura para acelerar aplicações relacionadas ao cálculo de fluxo de carga. Em geral, os métodos propostos são aplicados em sistemas de transmissão, uma vez que consideram métodos para cálculo de fluxo de carga utilizando métodos de decomposição de matrizes (NAGVAJARA; NWANKPA; JOHNSON, 2013; WANG *et al.*, 2007).

Há também trabalhos envolvendo a reconfiguração de redes para tratamento dos problemas de restabelecimento de energia e de redução de perdas que utilizam FPGAs. Por exemplo, (MOHANRAM; SUDHAKAR, 2011) propuseram um algoritmo baseado na teoria de grafos denominado *Reverse Delete* aplicado aos problemas de restabelecimento de energia e de mi-

minimização de perdas. Um algoritmo de árvore geradora mínima é implantado em FPGA para encontrar o caminho de menor impedância até uma subestação que fornece energia às áreas que ficaram sem energia após a ocorrência de faltas permanentes. Por fim, um fluxo de carga de Varredura Inversa/Direta é utilizado para avaliar as novas configurações geradas. Os testes foram limitados para redes com apenas 33 barras e os detalhes da arquitetura de *hardware* implementada não são apresentados pelos autores.

Também no contexto de métodos computacionais para encontrar configurações de redes mais eficientemente, (GOIS *et al.*, 2014) propuseram uma arquitetura de *Hardware* Paralelizado baseado na RNP (HP-RNP) para solucionar o problema da floresta geradora mínima com restrição de grau (dc-MSFP, do inglês *Degree-constrained Minimum Spanning Forest Problem* (CORMEN, 2002)). O trabalho mostrou que a HP-RNP é capaz de produzir e gerar novas configurações de redes a partir dos operadores da RNP em tempo médio limitado por uma constante independente do tamanho da rede (número de nós e arestas do grafo subjacente) desde que haja recursos de *hardware* suficiente para armazenar tal rede. A partir dos resultados obtidos nesse trabalho vislumbrou-se a possibilidade de obtenção de configurações de boa qualidade (ótimas ou próximas do ótimo), em tempo médio limitado por uma constante, a partir da extensão da arquitetura de *hardware* (HP-RNP) para o problema de redução de perdas em SDs via reconfiguração de redes.

1.1 Proposição

Ante o exposto na seção anterior, propõe-se, nesta tese de doutorado, a extensão da arquitetura de *hardware* paralela baseada na RNP (HP-RNP) (GOIS *et al.*, 2014) como um acelerador para tratamento do problema de redução de perdas via reconfiguração de redes. Tendo em vista que se trata de um problema combinatório, o uso de aceleradoras de *hardware* pode reduzir significativamente o custo computacional devido ao seu alto grau de paralelismo no processo de busca por soluções.

Para viabilizar a HP-RNP conforme proposto, para o problema de minimização de perdas via reconfiguração de redes, foram necessárias algumas modificações a nível de *hardware*. As modificações foram realizadas no barramento de comunicação, tal barramento foi modificado por um barramento *ethernet* para enviar e receber os dados dos sistemas eficientemente. Uma vez que na original HP-RNP proposta em (GOIS, 2011), os dados de entrada eram gerados aleatoriamente.

O problema de reconfiguração de redes para minimização de perdas será transformado em um dc-MSFP, a partir de uma aproximação que fará uso de uma heurística de pesos também proposta neste trabalho.

No dc-MSFP, o SD é tratado como um grafo cujas arestas correspondem às chaves pertencentes aos trechos de linha. Para cada aresta é associado um peso que é definido em

função das características elétricas e/ou topológicas encontradas em SDs e propícias à redução de perdas. Como algumas das principais características podem ser citadas as seguintes, as grandes variações de cargas ao longo dos alimentadores e a alta relação resistência/reatância para grande parte das linhas, as quais podem produzir uma significativa queda de tensão e consequentemente um aumento nas perdas em SDs. Nesse sentido, o processo de escolha de grandezas elétricas para compor o peso torna-se difícil, havendo a necessidade de analisar também aspectos comportamentais de um SD, como por exemplo a região onde estão situadas grande concentração de cargas.

Importa destacar que uma heurística de pesos adequada viabiliza o uso de algoritmos com tempo computacional relativamente rápido, como os de árvore geradora mínima de Prim e Kruskal (CORMEN, 2002), os quais possuem complexidade de tempo $O(m \log n)$, em que m é o número de arestas e n é o número de nós. Esses algoritmos combinados com heurísticas de pesos podem encontrar soluções de boa qualidade. Vale ressaltar, que a inclusão do grau, ao problema de árvore geradora mínima, não garante a otimalidade desses algoritmos, podendo encontrar soluções distantes da ótima.

Com isso, a partir da heurísticas de pesos, mesmo não gerando as soluções ótimas, estas podem reduzir o espaço de busca de soluções reduzindo o tempo para obtenção de boas soluções, consequentemente, aumentam o desempenho de métodos aplicados em uma segunda etapa. Além disso, o uso de arquiteturas em *hardware* como a HP-RNP, aceleram o processo de busca de soluções via reconfiguração de redes em sistemas de larga-escala, podendo encontrar soluções ótimas ou próximas da ótima em tempo significativamente reduzido.

Assim, nesse trabalho foi proposto uma heurística de pesos para transformar um problema de redução de perdas via reconfiguração de redes em um dc-MSFP correspondente. A topologia (configuração) mínima encontrada pelo dc-MSFP é uma solução aproximada para o problema original (o de reconfiguração de SD para redução de perdas). Portanto, a nova configuração obtida pelo HP-RNP será avaliada pelo método de cálculo de fluxo de carga de Varredura Direta/Inversa baseado na RNP, implementado em *software* (SANTOS *et al.*, 2008). Observe que nesse contexto, o SD é tratado como uma floresta e seus alimentadores são as árvores dessa floresta. A avaliação das árvores é realizada por meio da soma dos pesos de cada árvore.

Outro ponto importante, sobre a transformação do problema de redução de perdas via reconfiguração de redes em um dc-MSFP, embora a inclusão da restrição de grau aumente a complexidade do problema, o grau (número de arestas que incidem a um nó) (CORMEN, 2002) é uma informação importante no contexto do problema de reconfiguração de redes. Pois o grau de um nó representa a quantidade de cargas acumuladas em um único ponto de carga. Essa é a razão de ser recomendável que nós com grau alto estejam próximos da subestação, caso contrário, pode produzir configurações com altas perdas.

Face ao exposto, destacam-se, como principais contribuições desta tese:

- A extensão da HP-RNP e o mapeamento do problema de redução de perdas via reconfiguração de redes em um dc-MSFP possibilitando acelerar o processo de reconfiguração de redes para encontrar boas soluções com perdas reduzidas em tempo médio limitado por uma constante.

1.2 Organização do Texto

O restante deste texto está dividido em sete capítulos os quais estão organizados da seguinte forma:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica. Neste capítulo são descritos trabalhos desenvolvidos envolvendo problemas de reconfiguração de redes, com foco para o problema de redução de perdas. Destacam-se métodos exatos resolvendo formulações com relaxações do problema e métodos baseados em heurísticas, em geral, resolvendo o problema original, sem relaxações na formulação. Além de descrever alguns métodos existentes na literatura da área baseados em heurísticas de pesos.

Capítulo 3 – Reconfiguração de SDs. Neste capítulo são introduzidos conceitos relacionados a reconfiguração de redes em SDs, além de alguns métodos para cálculo de fluxo de carga de Varredura direta/inversa desenvolvidos para SDs.

Capítulo 4 – Representação Nó-profundidade. Neste capítulo é descrita a estrutura de dados utilizada para representar computacionalmente redes e modificar de forma eficiente a configuração dela por meio de seus operadores. A extensão do fluxo de carga de Varredura direta/inversa para utilização da RNP também é apresentada nesse capítulo.

Capítulo 5 – Arquitetura de *Hardware*. Neste capítulo são introduzidos conceitos sobre FPGA e é descrita a arquitetura de *hardware* que será estendida para ser utilizada como um acelerador para tratamento do problema de minimização de perdas a partir do processo de reconfiguração de rede.

Capítulo 6 – Reconfiguração de redes utilizando a HP-RNP e heurística de peso Neste capítulo é apresentado o método proposto neste trabalho, isto é, a extensão da HP-RNP para a reconfiguração de redes e a heurística de pesos construída para encontrar soluções para o problema de redução de perdas em SDs.

Capítulo 7 – Resultados Neste capítulo são apresentados os resultados deste trabalho a partir da arquitetura de *hardware* juntamente com a heurística de pesos desenvolvida.

Capítulo 8 – Conclusões e Perspectivas Futuras Neste capítulo são descritas as conclusões e as perspectivas futuras a partir do presente trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme mencionado anteriormente, a eficiência do processo de reconfiguração de redes para redução de perdas depende tanto da precisão das técnicas para estimar as perdas quanto da eficiência computacional do processo para obter uma configuração mais adequada (ABABEI; KAVASSERI, 2011). Nesse sentido, diferentes métodos de otimização têm sido propostos para tratar esse problema.

Dentre os métodos utilizados estão os métodos exatos e os métodos aproximados (CARRENO; ROMERO; PADILHA-FELTRIN, 2008). Os métodos exatos encontram as soluções ótimas ou garantem uma distância máxima entre a solução encontrada e a ótima. No entanto, para utilizar esses métodos para sistemas de larga-escala, em geral, considera-se modelos simplificados da rede (com menos elementos priorizando os principais) ou uma formulação do problema em que algumas restrições são relaxadas em certo grau. O nível de aproximação desses métodos é em geral avaliado experimentalmente. Por outro lado, o uso de modelos simplificados e/ou relaxados pode distanciar significativamente a solução obtida pelo método exato da solução ótima relativa a uma rede sem simplificações ou relativa a uma formulação sem relaxação. Assim, pode-se dizer que na prática métodos exatos também obtêm soluções aproximadas da ótima para sistemas de larga-escala.

Métodos baseados em heurística podem encontrar a solução ótima, porém, em geral são utilizados por obterem soluções adequadas para problemas complexos, mas sem garantia da proximidade da solução ótima. Níveis de aproximação podem ser estabelecidos experimentalmente para sistemas pequenos e, para alguns problemas de *benchmark*. A seguir são apresentados alguns trabalhos propostos para o problema de redução de perdas em SDs, utilizando métodos exatos como programação matemática (Seção 2.1) e métodos baseados em heurísticas (Seção 2.2). Por fim, a Seção 2.3 destaca alguns desses trabalhos, comparando resultados entre métodos exatos e os métodos baseados em heurísticas.

2.1 Métodos exatos para problemas com relaxações

Ramos *et al.* (2005) apresentou um método baseado no conceito de caminho-para-nó (*path-to-node*) para tratamento do problema de redução de perdas em SDs através da reconfiguração de redes. O uso dessa abordagem permite que as restrições topológicas e elétricas de um SD sejam formuladas algebricamente antes de determinar a configuração radial final. O funcionamento do método é realizado identificando previamente os caminhos alternativos que energizam uma barra, ou seja, um conjunto de ramos que conectam uma barra i qualquer a uma subestação devem ser encontrados a partir da construção de uma árvore auxiliar por meio de uma busca em largura. Aplica-se um Algoritmo baseado em programação linear inteira e mista (PLIM) e foram obtidos resultados próximos do valor ótimo. Isso ocorre porque a formulação do problema não garante a factibilidade das soluções exclusivamente (ou seja, há uma relaxação em relação à formulação original, que garante a factibilidade), uma vez que as magnitudes das tensões complexas das barras são retiradas do modelo (assim, o processo de solução não requer fluxo de carga). A solução por PLIM também é afetada devido aos intervalos escolhidos no processo de linearização do fluxo de carga, uma vez que a função objetivo e as restrições de operação devem ser previamente convertidas em funções lineares por trecho. Além disso, o número de intervalos de linearização de ramos e o número de caminhos candidatos crescem com o tamanho do sistema, afetando o tempo computacional e a quantidade de memória requerida para o problema. Isso a princípio torna o método inadequado para sistemas de larga-escala. Os experimentos foram realizados para sistemas de 32 a 205 barras. Para a rede com 205 barras, a solução por PLIM foi obtida em 134 segundos.

Llorens-Iborra, Riquelme-Santos e Romero-Ramos (2012) propuseram uma melhoria do método proposto por (RAMOS *et al.*, 2005) para reconfiguração de redes em redução de perdas. O método é baseado também na abordagem caminho-para-nó apresentado em (RAMOS *et al.*, 2005) com a adição do critério de máxima queda de tensão permitida (considerou magnitude das tensões nas barras). Com isso, essa formulação busca encontrar a solução para redes de larga-escala vencendo as limitações da abordagem de (RAMOS *et al.*, 2005). Na abordagem, determina-se a árvore com mínimas perdas de potência ativa para sistemas de média e larga-escala balanceados, utilizando o algoritmo de caminho-para-nó. Além do critério de impedância utilizado na abordagem de Ramos *et al.* (2005), cada candidato do caminho é associado a uma queda de tensão, utilizando esse critério é verificado o conjunto de candidatos de um caminho de uma barra a subestação que possui menores quedas de tensão. Assim, os caminhos com altas quedas de tensão também são descartados do modelo, minimizando o número de caminhos a ser avaliado, viabilizando o uso em aplicações em SDs de larga-escala. PLIM são aplicadas ao problema, por meio da linearização por parte das equações do fluxo de carga. O número de caminhos para o modelo é reduzido em 24% para redes de 1043 barras quando comparado ao modelo de (RAMOS *et al.*, 2005). Com uma tolerância de optimalidade GAP^1 de 5,13% quando

¹ $GAP(\%)$ é a distância até o valor ótimo ou exato, o qual é dado por $((f^* - f)/f^*) \times 100$, onde f^* é

comparado a abordagem de (RAMOS *et al.*, 2005). O método foi testado para sistemas de 32 a 1043 barras. A abordagem resulta em valores de perdas de potência ativa aproximados dos valores exatos.

Jabr, Singh e Pal (2012) propuseram duas novas abordagens para a reconfiguração de redes com geração distribuída (GD) a fim de minimizar perdas no SD. Na primeira abordagem, a formulação é baseada na programação não-linear inteira mista (PNLIM) utilizando a técnica de programação cônica inteira mista (PCIM) (JABR, 2006). Nessa abordagem, o modelo possui relaxação contínua convexa, em que a rede é modelada como uma representação convexa baseada no formato cônico quadrático das equações de fluxo de potência, para então otimizar de forma exata a redução de perdas. Na outra abordagem a rede é modelada por uma representação poliédrica, partindo das restrições cônicas utilizadas na primeira abordagem, aplica-se ao modelo a técnica PLIM. A radialidade da rede é imposta por restrições de árvore geradora (JABR; SINGH; PAL, 2012) permitindo a aplicação de um fluxo de potência bidirecional a partir da GD. Ambas as técnicas foram aplicadas em SDs de 83 a 830 nós. Os testes foram realizados considerando dois níveis de tolerância de optimalidade GAP, sendo uma de 5%. Nesse caso, para o sistema de 830 nós, tanto PCIM quanto PLIM podem encontrar as soluções aproximadas, as quais foram obtidas em 5.0 e 25.2 (s) respectivamente. As soluções mais próximas do valor ótimo são obtidas utilizando a tolerância de optimalidade GAP de 0.01%. No entanto, para os sistemas a partir de 135 barras, as soluções são obtidas em até 30 minutos.

2.2 Métodos baseados em heurísticas

Conforme mencionado no Capítulo 1, em (MERLIN; BACK, 1975) foi desenvolvido o primeiro trabalho relacionado ao problema de redução de perdas via o processo de reconfiguração de rede. Nesse trabalho foram desenvolvidos dois diferentes métodos de resolução. O primeiro é um método heurístico conhecido como abertura sequencial de chaves, onde parte-se de uma rede em que todas as chaves se encontram fechadas e através de uma heurística baseada nos fluxos dos arcos, abre-se as chaves até alcançar uma configuração radial. Importa destacar que o segundo método desenvolvido é uma abordagem exata que encontra a configuração ótima de mínimas perdas através da técnica de programação inteira *branch-and-bound*. Segundo os autores, a aplicação do segundo método é viável apenas em redes de pequeno porte.

A partir do trabalho apresentado em (MERLIN; BACK, 1975) várias extensões e diferentes técnicas para redução de perdas foram propostas na literatura. Em (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989) é utilizada a mesma técnica da abertura sequencial proposta em (MERLIN; BACK, 1975) com melhorias em termos de uma rede mais elaborada e a utilização de uma modelagem de carga mais adequada. O método foi testado em redes com até 8 alimentadores e 742 chaves, obtendo uma redução de perdas de 28.8% em relação a configuração original, com um tempo de

o valor exato de perdas e f é o valor aproximado gerado por meio da abordagem descrita.

computação de 110 segundos.

Civanlar *et al.* (1988) apresentaram uma nova heurística para reconfiguração de redes, conhecida como troca de ramos (do inglês *branch-exchange*), onde a cada etapa realiza-se uma permutação de estados entre pares de chaves, uma aberta e outra fechada, de forma a obter redução de perdas.

Nara *et al.* (1992) propuseram uma abordagem utilizando algoritmo genético (AG) para o problema de minimização de perdas em SDs a partir da reconfiguração de redes. Nesse trabalho é proposto o uso de uma *string* binária para os cromossomos (estrutura de dados do AG representando os estados das chaves seccionadoras). Os resultados mostraram que embora soluções com perdas mínimas tenham sido obtidas para os SDs testados, o tempo de execução excedeu 15 minutos para um sistema com 97 barras e 106 chaves.

Ramos *et al.* (2005) propuseram no mesmo trabalho, além do uso de método de PLIM (seção 2.1) também um AG baseado no conceito de caminho-para-nó para o problema da reconfiguração de redes para minimização de perdas. O conceito de caminho-para-nó é descrito na Seção 2.1. Os caminhos alternativos encontrados formam a população inicial para o problema. A metodologia apresentou os valores ótimos para as redes menores testadas (32 e 69 barras), porém para as redes maiores (137 e 205 barras) foram encontradas soluções próximas do ótimo. O desempenho do AG pode ter sido afetado por alguns parâmetros, como tamanho da população, número de gerações e probabilidade de mutação. Os tempos computacionais não foram apresentados.

Gomes *et al.* (2006) formularam o problema da reconfiguração de redes para redução de perdas como um problema de fluxo de potência ótimo (FPO), no qual os estados das chaves (aberta/fechada) são convertidos em funções contínuas e as restrições de operação da rede são incluídas no problema do FPO. A função objetivo para essa abordagem é baseada na somatória de dois termos, as perdas de potência e o somatório do custo de utilização das linhas, o qual garante que o fluxo de energia será preferencialmente através dos ramos com os menores custos. Nesse método, as chaves são modeladas utilizando variáveis contínuas para representar sua posição. No início do processo todos os ramos da rede são considerados fechados (rede completamente malhada). Uma heurística baseada na sensibilidade das chaves é dada por meio dos resultados de um fluxo de carga para essa rede, de modo a determinar quais chaves devem ser abertas de modo a minimizar as perdas da rede. O processo de abertura de chaves é realizado sequencialmente até atingir uma configuração radial. O maior SD testado possui 476 barras, 2 alimentadores e 22 chaves seccionadoras. A solução para o sistema de 476 barras foi obtido em 9.73 segundos.

Carreno, Romero e Padilha-Feltrin (2008) propõe uma adaptação do AG apresentado em (CHU; BEASLEY, 1997) utilizando uma nova codificação capaz de garantir a radialidade de todas as configurações geradas pelo AG. A partir da codificação proposta é gerada uma população inicial contendo apenas topologias radiais. Após isso, são aplicados operadores de recombinação gerando novas soluções. O operador de recombinação utilizado é similar ao

PMX (do inglês, *Partially Matched Crossover*), no qual são necessárias duas configurações pais (cromossomos pais). Após o processo de recombinação, as soluções geradas são submetidas a um processo de busca local que examina cada configuração e substitui a topologia atual pela melhor (caso seja encontrada). A função objetivo dessa abordagem são as perdas ativas, as quais são calculadas por meio do fluxo de potência de Varredura Direta/Inversa para cada nova configuração obtida. O método de busca local pode afetar as soluções em termos de convergência prematura, devido a possibilidade de encontrar soluções ótimas locais e a falta de diversidade de soluções (BARBOSA, 2012). O maior SD testado possui 136 barras e 156 chaves. Os resultados apresentaram redução de perdas de 12.55% quando comparado com as perdas da solução original. O tempo médio para obtenção da solução foi de 0.4 segundos.

Braz e Souza (2011) propuseram uma abordagem de reconfiguração de redes para minimizar perdas e número de operações de chaves. Foi proposto um AG com duas codificações sequenciais nomeadas de codificação sequencial subtrativa (CSS) e codificação sequencial aditiva (CSA), ambas são capazes de representar apenas topologias radiais. A CSS inicia a partir de uma rede em malha obtida pelo fechamento de todas as chaves. Em seguida uma chave de cada vez é aberta até obter uma topologia radial conectando todas as barras (procedimento similar ao utilizando em (GOMES *et al.*, 2006)). A CSA inicia com todas as chaves da rede abertas. Cada chave é fechada sequencialmente, até ser obtida uma configuração radial conectando todas as barras. Uma matriz de incidência contendo os nós (que representam as barras do SD) é utilizada para monitorar os possíveis ciclos causados pela abertura e fechamento das chaves (BARBOSA, 2012). Os experimentos foram realizados através de um sistema com 70 barras, 11 chaves NA e 67 NF. A solução utilizando CSA foi obtida em aproximadamente 461 apresentando uma redução de perdas de 10.75%, enquanto que na solução utilizando CSS houve uma redução 10.78 % sendo obtida em aproximadamente 198 segundos.

Em Zhu (2002) é proposto um AG para minimização de perdas em SDR. O mesmo é denominado AG refinado, devido algumas alterações na codificação do cromossomo da abordagem proposta por (NARA *et al.*, 1992). Neste trabalho, um cromossomo é representado por uma *string* contendo somente o número de chaves seccionadoras NA representada por números binários. Uma análise dos algoritmos das duas abordagens foi realizado, indicando que a complexidade do método proposto por (NARA *et al.*, 1992) aumenta com o número de chaves do sistema enquanto que a do AG refinado proposto por (ZHU, 2002) aumenta com a quantidade de chaves seccionadoras NA em uma configuração factível.

Rao *et al.* (2011) propuseram um algoritmo de busca harmônica (ABH) (GEEM; KIM; LOGANATHAN, 2001) para o problema. Esse algoritmo utiliza basicamente o processo que busca o melhor estado de harmonia em situações de improviso musical utilizado por músicos. O ABH funciona da seguinte maneira, inicialmente são configurados parâmetros essenciais: o tamanho da memória de harmonia (TMH), ou seja, o número de vetores de soluções na memória harmônica (MH); uma taxa de MH que é uma taxa de valores entre 0 e 1 para a escolha de

um valor armazenado na MH e uma taxa de ajuste para melhorar o vetor de soluções. Em uma matriz de MH gerada aleatoriamente são armazenadas todas as soluções possíveis (possíveis chaves candidatas em cada ramo), factíveis e infactíveis, apesar de o algoritmo forçar a busca por soluções em áreas factíveis. As soluções presentes na matriz de MH são avaliadas considerando a redução de perdas. Funções de penalidades são utilizadas para calcular o custo de uma solução infactível. Assim, um novo vetor de harmonia é gerado baseado em três critérios: na MH antiga, na escolha aleatória e nas taxas de ajuste. As soluções presentes na MH são comparadas com as soluções geradas, ou seja, se a nova solução (harmonia) for melhor que a pior solução armazenada na MH antiga, a nova solução substitui essa solução. O método proposto foi comparado com 3 abordagens propostas na literatura para redução de perdas: o AG proposto em (NARA *et al.*, 1992), o AG refinado de (ZHU, 2002) e uma busca tabu melhorada (ZHANG; FU; ZHANG, 2007). Para um sistema de 119 barras, o método proposto em (RAO *et al.*, 2011) obteve a solução com 34% de redução de perdas em 8.61 segundos, melhor solução em termos de redução de perdas quando comparadas às 3 abordagens comparadas. O método foi testado em redes de 33 e 119 barras.

Ababei e Kavasseri (2011) propuseram a combinação de duas técnicas heurísticas para reduzir o tempo computacional na busca de soluções para o problema da reconfiguração de redes para redução de perdas. A técnica de troca de ramos foi melhorada modelando o problema de reconfiguração de redes como fluxo máximo de custo mínimo (FMCM) (ABABEI; KAVASSERI, 2011). Para isso, cargas são transferidas entre alimentadores de modo que tenha maior redução de perdas. A função custo é baseada na redução de perdas e no fluxo nos ramos. Em cada iteração buscam-se os melhores conjuntos de trocas de ramos de primeira ordem que reduzam as perdas do sistema. As trocas de ramos podem ser realizadas concorrentemente. Para estimar as perdas no sistema foi proposta uma técnica de caminhadas aleatórias (DOYLE; SNELL, 1984), para estimar as amplitudes de tensões nas barras. Os experimentos realizados para redução de perdas foram comparados com os resultados apresentados em (BARAN; WU, 1989). Para redes de até 10.476 barras foi demonstrado que a técnica proposta reduz o tempo computacional em até 6.31x com uma redução de perdas de 10.22% superior a abordagem proposta por (BARAN; WU, 1989), o qual utilizou a técnica heurística denominada troca de ramos para encontrar configurações com perdas mínimas.

Tomoiağă *et al.* (2013) propuseram um AG baseado em grafos conectados para reconfiguração de SDs para encontrar a combinação de estados de chaves que mais contribuem para a minimização de perdas. Neste trabalho, o SD é representado por uma lista de ramos e codificação binária. Cada configuração é verificada quanto a radialidade, caso seja uma solução válida (radial), o algoritmo de fluxo de carga é executado para analisar as condições operacionais do SD (tais como queda de tensão e carregamento da rede). Este método não tem garantias de gerar apenas configurações factíveis. Um operador de mutação é aplicado apenas para soluções infactíveis que forem obtidas após a aplicação do operador de recombinação. Além disso, após a aplicação dos operadores de recombinação e mutação, o algoritmo requer ainda a aplicação de

um terceiro operador denominado inversão para tratar as soluções desconexas.

Wang e Gao (2013) apresentaram um AG sem revisitas (NrGA, do inglês *Non-revisiting Genetic Algorithm*) (YUEN; CHOW, 2009) para determinar a configuração de rede radial que minimiza as perdas do sistema sem violar as restrições elétricas da rede (por exemplo, limites máximos de corrente nos ramos e limite de queda de tensão). Nesse método é utilizado o particionamento binário do espaço (PBE), que é um método para subdividir recursivamente um espaço de busca em dois hiperplanos. Uma estrutura de dados em árvore é construída para armazenar todas as soluções que foram exploradas nos espaços particionados, denominada de árvore de PBE (KRISHNASWAMY; ALIJANI; SU, 1990). Com isso, o NrGA pode rapidamente consultar no arquivo árvore PBE se houve revisita quando uma nova solução é gerada pelo AG. No caso de revisita, aplica-se mutação aleatoriamente dentro de um subespaço não visitado. Um algoritmo de busca em largura (CORMEN, 2002) é utilizado para procurar por *loops* independentes e as chaves incluídas em cada *loop* do SD. A metodologia foi aplicada em sistemas de até 136 barras com redução de perdas de 12.52% em relação à configuração original. Os tempos de computação não foram especificados no artigo.

Santos *et al.* (2010) propuseram a combinação de um algoritmo evolutivo multiobjetivo (AEMO) com a RNP e seus operadores de reprodução que manipulam o processo de reconfiguração de rede de forma mais eficiente. A abordagem foi chamada de MEAN (do inglês, *Multi-objective Evolutionary Algorithm with Node-depth encoding*). Cada configuração gerada por meio dos operadores da RNP possui naturalmente todos os nós (ou barras) ordenados de acordo com uma relação conhecida como Modelo Pai-Filho (MPF). Isso possibilita a execução de um algoritmo de fluxo de carga de Varredura Direta/Inversa de forma mais eficiente (SANTOS; DELBEM; BRETAS, 2008). A metodologia trabalha em paralelo com várias subpopulações armazenadas em tabelas (BENAYOUN J. DE MONTGOLFIER; LARITCHEV, 1973), realizando uma melhor exploração do espaço de busca e de objetivos. Dessa forma, os melhores indivíduos (configurações do sistema) para cada característica do problema (número de manobras, perdas resistivas, queda de tensão, carregamento da rede, carregamento da subestação) são armazenados em subpopulações distintas. Assim, é possível encontrar de forma eficiente soluções pertencentes ou próximas do específico conjunto de Pareto-ótimo, que consiste de soluções (configurações do sistema) que não são dominadas por outra solução no espaço dos objetivos (DEB, 2001). Os testes foram realizados para sistemas de 3.860 barras a 30.880 barras. Os resultados para o sistema de 30.880 barras apresentaram uma redução de 29.27 % em 187.59 segundos.

Em Sanches *et al.* (2011) foi proposto um AEMO para reconfiguração de SDs a fim de minimizar as perdas da rede. A nova abordagem denominada MEAN-NDS (do inglês, *Multi-objective Evolutionary Algorithm with Node-depth Encoding and Non-Dominated Solutions*) combina o MEAN (SANTOS *et al.*, 2010) com subpopulações de tabelas não-dominadas conforme realizado pelo NSGA II (do inglês, *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) para melhorar o desempenho do algoritmo. Basicamente, a diferença em relação ao MEAN é o fato de

a abordagem proposta armazenar os subconjuntos de soluções não-dominadas. O MEAN-NDS explora melhor o espaço das funções objetivo e, consequentemente, aproxima mais da fronteira de Pareto-ótima em relação ao MEAN. Os testes foram realizados em sistemas de 3.860 barras (com 632 chaves) e de 7.770 barras (com 1.227 chaves). Para o sistema de 7.770 barras, a melhor solução obtida pelo MEAN-NDS apresentou uma redução de perdas de 18.27 % exigindo um tempo de processamento de 23.35 segundos, enquanto que a melhor solução do MEAN possibilitou uma redução de 16.71 % em 27.47 segundos.

2.3 Comparação de métodos exatos e baseados em heurísticas

Em geral, as técnicas de programação matemática desenvolvidas para reconfiguração de rede para redução de perdas utilizam simplificações do problema no modelo matemático (como linearizações) e relaxações de restrições. Devido à característica combinatória do problema o desempenho para uma rede de tamanho real pode ser inviável para o uso desses métodos. Outro aspecto que restringe o uso desse tipo de método em reconfiguração de SDs é que poucas mudanças na topologia da rede ou nas restrições do problema podem resultar em grandes variações nos valores das funções objetivo e das distâncias para os limites impostos pelas restrições.

Os métodos baseados em heurísticas são mais adequados para problemas combinatoriais e de larga-escala. Com esses métodos pode-se obter soluções ótimas ou aproximadas, porém sem garantia de otimalidade da solução. Em termos de tempo computacional, dependendo da abordagem utilizada pode-se não obter a solução em tempo adequado. Para contornar esse problema, técnicas de paralelização em *software* e em *hardware* podem ser utilizadas para acelerar o processamento para redes com grande quantidade de barras e chaves.

2.4 Métodos baseados em heurísticas de pesos

Alguns métodos utilizam critérios de avaliação baseados em heurísticas de pesos associados à trechos de linha de SDs. Tais abordagens possuem em sua formulação limites superiores de algumas grandezas elétricas como, por exemplo, a queda de tensão e a impedância das linhas.

Recentemente, (WEN; TAN; JIANG, 2016) propuseram um estratégia para reconfiguração de redes baseada no grau de importância de um nó cujo os objetivos consideram a minimização de perdas e maximização do grau de importância do nó. Nesse trabalho, a função objetivo é formulada com coeficientes de pesos que representam a prioridade de cada um dos objetivos. Os autores utilizaram o método de otimização de enxame de partículas para resolver o problema de reconfiguração de redes para ambos objetivos.

Ahmadi e Martí (2015) desenvolveram uma heurística para encontrar boas soluções iniciais para o problema de reconfiguração de redes para minimização de perdas. O problema foi mapeado como um problema de árvore geradora mínima (MST) de um grafo e o algoritmo de Prim foi utilizado para encontrar a MST. Após aplicar o algoritmo de MST, executa-se um processo de busca local baseado na análise de sensibilidade em torno da vizinhança das possíveis chaves abertas. Para reavaliar as perdas é necessária uma execução do algoritmo de fluxo de carga depois de cada mudança dos estados das chaves.

Mohanram e Sudhakar (2011) propuseram um algoritmo para reconfiguração de redes que faz uso da teoria de grafos denominado *Reverse Delete* que foi aplicado aos problemas de restabelecimento de energia e minimização de perdas. O método é baseado em um algoritmo de árvore geradora mínima para encontrar o caminho de menor impedância. O método foi implantado em FPGA e foi testado em redes com apenas 33 barras. Os detalhes da arquitetura de *hardware* implementada não são apresentados no artigo.

O método de (RAMOS *et al.*, 2005), descrito na Seção 2.1, também utiliza um critério de avaliação baseado em uma heurística de pesos. Na abordagem, após os caminhos alternativos que energizam uma barra serem previamente identificados, constrói-se uma árvore auxiliar por meio de uma busca em largura. Antes de adicionar um nó qualquer nessa árvore realiza-se uma análise da impedância do caminho total com e sem esse nó.

Amasifen, Romero e Mantovani (2005) formularam um algoritmo evolutivo (AE) e operadores genéticos para resolver o problema de reconfiguração de redes sob diferentes condições de carregamento. Os autores utilizaram estratégias de variação dinâmica durante a aplicação dos operadores. Nessa abordagem os autores propõem um procedimento heurístico para obtenção de uma população inicial. Tal procedimento considera os próprios valores das grandezas elétricas como pesos utilizando os algoritmos de árvore geradora mínima de Prim e de Kruskal. Os autores utilizaram as grandezas resistência e reatância individualmente, como pesos, e também utilizaram a soma dos quadrados da resistência e reatância. Segundo os autores a heurística pode produzir boas configurações para sistemas de grande porte, entretanto com valores ainda distantes de valores considerados ótimos ou quase ótimos. Possivelmente, isso ocorre devido à simplicidade da heurística utilizada para obtenção da configuração inicial, sendo necessário a utilização de parâmetros de recombinação e mutação na obtenção de possíveis ótimos globais.

No método de (LLORENS-IBORRA; RIQUELME-SANTOS; ROMERO-RAMOS, 2012), mencionado na Seção 2.1, foi proposto melhorias na abordagem caminho-para-nó apresentada em (RAMOS *et al.*, 2005). A melhoria foi a adição do critério de máxima queda de tensão. A árvore com mínimas perdas de potência ativa é identificada utilizando o algoritmo de caminho-para-nó. Nessa abordagem cada caminho alternativo é associado a uma queda de tensão. Utilizando esse critério verifica-se o conjunto de caminhos candidatos, de uma barra a subestação, que possui menores quedas de tensão. Assim, os caminhos com altas quedas de tensão são descartados do modelo, minimizando o número de caminhos a ser avaliado e

viabilizando o uso em aplicações em SDs de larga-escala.

2.5 Considerações Finais

Neste capítulo foram destacados alguns dos principais trabalhos desenvolvidos para tratamento do problema de redução de perdas em SD, através do processo de reconfiguração de rede. Vale lembrar que se trata de um problema de otimização combinatória não linear envolvendo diversas restrições.

Verificou-se, de uma forma geral, que para possibilitar a aplicação de métodos exatos, para tratamento do problema em pauta, torna-se necessário a utilização de simplificações do problema no modelo matemático, como linearizações e relaxações de restrições. Entretanto, esses procedimentos podem resultar em grandes variações nos valores das funções objetivo e das distâncias para os limites impostos pelas restrições. Eis a razão de terem sido propostos, também, métodos baseados em heurísticas e metaheurísticas, que possibilitam o tratamento sem simplificação ou relaxamento de restrições, obtendo soluções de boa qualidade, porém sem a garantia de otimalidade da solução.

Em termos de eficiência computacional, os métodos baseados em heurísticas e metaheurísticas são mais adequados que os métodos exatos para tratamento do problema de redução de perdas em SDs de larga-escala (com milhares de barras e linhas). Entretanto, dependendo da abordagem utilizada por esses métodos, os mesmos podem não obter a solução em tempo adequado. Nesse contexto, destacam-se as abordagens desenvolvidas em (SANTOS *et al.*, 2010) e (SANCHES *et al.*, 2011), que fazem uso de um AEMO em tabelas e da estrutura de dados RNP e seus operadores, que possibilitam o tratamento do problema em SDs de larga-escala (de até 31 mil barras) obtendo a solução em tempos adequados. Importa destacar que a eficiência computacional dessas abordagens se deve principalmente à utilização da RNP e de seus operadores.

Foram destacadas ainda, neste capítulo, propostas de utilização de técnicas de paralelismo em *software* e em *hardware* como uma espécie de aceleradores, para viabilizar a aplicação de métodos heurísticos e metaheurísticos para solução do problema de redução de perdas em redes de larga-escala. Outro caminho observado para obtenção de métodos mais eficientes computacionalmente foi o desenvolvimento de heurísticas de peso, para possibilitar o tratamento do problema diminuindo a quantidade de execuções de algoritmos para cálculo de fluxo de potência.

Todas as observações resultantes da revisão bibliográfica realizada e sumarizada neste capítulo avalizam a proposta deste trabalho. Ou seja, o desenvolvimento de um método de reconfiguração de rede para tratamento do problema de redução de perdas, aplicável em SDs de grande-porte havendo recursos de hardware suficientes e fazendo uso da estrutura de dados RNP e de seus operadores, de um acelerador implantado em FPGA e de uma heurística de peso para

minimizar o número necessário de execuções de algoritmos para cálculo de fluxo de potência.

RECONFIGURAÇÃO DE REDES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Neste Capítulo apresenta-se, inicialmente, a representação da topologia elétrica de um SD por meio de uma estrutura de grafos, para entendimento de termos equivalentes entre SDs e grafos (Seção 3.1). Em seguida é apresentada a formulação matemática geral do problema de minimização de perdas por reconfiguração de redes em SDs (Seção 3.2). Na Seção 3.3 define-se o problema de fluxo de carga e apresentam-se os métodos de Varredura Direta/Inversa em função de serem os mais utilizados em métodos empregados para reconfiguração de SDs. A Seção 3.5 apresenta o modelo de carga corrente constante com a tensão, usualmente empregado para modelagem de carga para o tratamento de problemas envolvendo o processo de reconfiguração de redes em SDs.

3.1 Representação de um SD através de grafos

A topologia elétrica de um SD pode ser vista como um conjunto de setores (cada setor é composto pela junção de barras e linhas) interconectados por chaves seccionadoras. Assim, ao tratar problemas que envolvem o processo de reconfiguração de redes em SDs estes são geralmente representados computacionalmente por grafos, isto é, um conjunto de nós conectados por arestas.

A Figura 2(a) apresenta um SD com três alimentadores. A Figura 2(b) apresenta o mesmo SD representado por grafos, onde os nós representam os setores e as arestas representam as chaves seccionadoras. As arestas tracejadas representam chaves seccionadoras NAs e as arestas preenchidas representam as chaves NFs.

Na Figura 2(b) os três alimentadores, do SD ilustrado na Figura 2(a), são representados por três árvores de grafos, formados pelas linhas preenchidas e representados por cores diferentes na 2(b). Uma árvore de grafo é definida como um subgrafo conexo (existe unicamente um

caminho entre dois nós quaisquer), acíclico (não possui ciclos ou malhas) e com $n - 1$ arestas (sendo n o número de nós). Os nós SE-1, SE-2 e SE-3 são os nós raízes das árvores 1, 2 e 3, e correspondem às subestações 1, 2 e 3 respectivamente. O conjunto das três árvores de grafo formam uma floresta de grafo, que representa uma configuração radial do SD.

(a) Exemplo de um SD com três alimentadores.

(b) Representação do SD por um grafo.

Figura 2 – SD e sua representação por grafo. Fonte: (ZAN, 2015).

Um SD pode ter sua topologia representada por um grafo acíclico ou um conjunto de árvores que correspondem a uma floresta de grafos, em que, o nó raiz de cada árvore da floresta corresponde a uma subestação e os demais nós são blocos de carga (setores). Cada árvore dessa floresta representa um alimentador, o qual é composto por setores (nós) e linhas (arestas) que interconectam os setores a uma subestação qualquer. Um alimentador é responsável por conduzir energia a partir de uma subestação para pontos consumidores.

A Tabela 1 sintetiza alguns termos equivalentes entre um grafo e os elementos de um SD.

3.2 Formulação Matemática

A seguir será apresentada a formulação matemática para tratar computacionalmente o problema de redução de perdas a partir do processo de reconfiguração de redes. Esta seção foi desenvolvida com base no trabalho apresentado em (SANTOS *et al.*, 2010).

Tabela 1 – Termos equivalente para SDs e grafos.

SD	Grafo
Sistema de distribuição	Floresta
Alimentador	Árvore
Setor	Nó
Barra da subestação	Nó raiz (Provedor de potência)
Chave NF	Aresta —
Chave NA	Aresta - - -

O problema de redução de perdas consiste, basicamente, em encontrar uma configuração radial que minimize as perdas sem violar as restrições operacionais do sistema (limite de queda de tensão, e carregamento de rede e das subestações).

Fazendo uso da estrutura de grafos para representação de um SD (AHUJA R.; ORLIN, 1993), o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes pode ser modelado como apresentado na Equação 3.1:

$$\begin{aligned}
& \min \gamma(G) \\
& \text{s.a :} \\
& A(G)x(G) = c(G) \\
& A(G)Y_x(G)A(G)^t v(G) = C(G) \leq 1 \\
& X(G) \leq 1 \\
& B(G) \leq 1 \\
& X(G) \leq 1 \\
& G \text{ ser uma floresta}
\end{aligned} \tag{3.1}$$

onde G é uma floresta de grafo representando uma configuração radial do SD; $A(G)$ é a matriz incidência arestas-nós de G ; $x(G)$ é o vetor com as correntes complexas nas linhas em G ; $c(G)$ é um vetor contendo é um vetor contendo as correntes complexas nas barras de carga ($b_i < 0$) de passagem ($b_i = 0$) e as injeções de correntes nas barras das subestações ($b_i > 0$); $Y_x(G)$ é a matriz admitância diagonal da rede em G ; $v(G)$ é o vetor de tensões complexas nodais em G ; $X(G)$ é o máximo carregamento da rede em G , dado por $X(G) = \max(x_j/\bar{x}_j)$ sendo $(\bar{x}_j)$ um limitante superior de corrente para cada magnitude de corrente complexa x_j em uma linha j ; $B(G)$ é o máximo carregamento de subestação em G , dado por $B(G) = \max(b_s/\bar{b}_s)$, sendo $(\bar{b}_s)$ um limitante superior para cada magnitude de injeção de corrente b_s provida por uma subestação s ; $V(G)$ é a máxima queda de tensão em G , dada por $V(G) = \max(|v_s - v_k|/\delta)$, sendo v_s a magnitude de tensão na barra de uma subestação s , v_k é a magnitude de tensão em uma barra k da rede e δ é a máxima queda de tensão admissível (neste trabalho 10%, isto é, $\delta = 0,1$).

As duas primeiras restrições representam as leis de Kirchoff; a terceira, quarta e quinta restrições correspondem as restrições operacionais e representam, respectivamente, os limitantes para carregamento de rede, subestação e tensão nodal; e a última restrição representa a necessidade de se manter a radialidade da rede.

A formulação matemática pode ainda ser reescrita por meio das seguintes considerações:

1. utilização da RNP e de seus operadores (DELBEM *et al.*, 2004) que são capazes de armazenar e manipular de forma eficiente florestas de grafo e garantir que todas as modificações produzirão também uma floresta, ou seja, uma configuração factível no contexto do problema em pauta (configuração radial conectando todas as barras do sistema);
2. RNP organiza naturalmente todas as barras de cada configuração gerada G segundo uma relação conhecida como “Modelo Pai-Filho” (MPF) (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005), necessária à execução de fluxo de cargas de varredura direta/inversa. Com isso evita-se o uso de um algoritmo de busca para obter tal modelo. Assim, o fluxo de carga pelo MPF com RNP é mais eficiente que fluxos de carga convencionais para SDs (SANTOS; DELBEM; BRETAS, 2008). Além disso, o uso do MPF garante que as restrições de igualdade ($H(F) = 0$) em 3.1 sejam satisfeitas;

Assim, a formulação matemática para o problema de redução de perdas apresentada na Equação 3.1 pode ser simplificada e reescrita conforme mostrado na Equação 3.2.

$$\begin{aligned}
 &\min \gamma(G) \\
 &\text{s.a :} \\
 &X(G) \leq 1 \\
 &B(G) \leq 1 \\
 &V(G) \leq 1
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Utilizar MPF com RNP para cálculo do Fluxo de carga, em que G é uma floresta gerada pela RNP.

3.3 Cálculo do fluxo de carga

O cálculo do fluxo de carga (ou fluxo de potência) em uma rede de energia elétrica consiste na obtenção das condições operacionais da rede (determinadas basicamente pelas tensões complexas nas barras e pelos fluxos de potência nas linhas e transformadores), em função da topologia da rede e dos seus níveis de demanda e geração de potência.

Existem diversos métodos eficientes para determinar o fluxo de carga em redes de transmissão de energia elétrica, tais como, os métodos de Gauss Seidel e Newton-Raphson (versões Acoplado e Desacoplado Rápido (MONTICELLI, 1983)). Esses métodos podem apresentar um mal desempenho quando aplicados a redes de SDs, principalmente SDs radiais com uma grande quantidade de barras. Isso ocorre, principalmente, devido à baixa relação entre a reatância e a resistência (X/R) das linhas dos alimentadores dos SDs, existência de trechos com impedâncias com valores relativamente altos associados com trechos com impedância com valores baixos e grande número de barras de carga distribuída (AUGUGLIARO *et al.*, 2003; EMINOGLU; HOCAOGLU, 2008). Por esse motivo, ao utilizar esses métodos, as matrizes associadas aos SDs são mal-condicionadas, dificultando o uso de algoritmos de fluxo de carga por métodos que exigem a fatoração de matrizes, uma vez que podem exigir uma grande quantidade de iterações ou, até mesmo, podendo causar a não convergência do processo iterativo.

Nesse contexto, vários métodos para cálculo do fluxo de carga para SDs foram propostos na literatura dos quais destacam-se os métodos de varredura direta/inversa.

3.4 Métodos de Varredura Direta/Inversa

Os métodos de varredura direta/inversa têm sido muito utilizados para calcular o fluxo de potência em SDs radiais ou fracamente malhados, devido a eficiência computacional e a acurácia nas soluções obtidas. Na varredura inversa, com base em uma tensão inicial para todas as barras do SD, calcula-se as correntes ou fluxos de potência partindo de barras terminais (nós terminais) em direção a subestação (nó raiz). Na segunda etapa, nomeada varredura direta, a partir dos resultados de injeção de corrente ou potência da subestação, e do valor conhecido da tensão na barra da subestação e das impedâncias de cada trecho dos alimentadores, as tensões das demais barras são recalculadas e atualizadas utilizando os valores de corrente de linha calculados na etapa anterior (Varredura inversa). A Figura 3 exemplifica os processos de varredura inversa/direta, a barra 0 é a barra raiz (barra da subestação) e os nós (barras) 5, 6, 10 e 13 são as barras terminais.

Figura 3 – Método de Varredura Direta/Inversa

Na literatura existem diversos métodos de Varredura Direta/Inversa para calcular o fluxo

de potência em redes radiais. Entre os mais utilizados estão o soma de correntes e o soma de potências (AUGUGLIARO *et al.*, 2010), que serão apresentados a seguir.

3.4.1 Método de Soma de Correntes

O método de soma de correntes foi inicialmente desenvolvidos para SDs, podendo também ser aplicado em sistemas fracamente malhados. O método de soma de correntes é baseado nas aplicações das leis de Kirchhoff das correntes e das tensões (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988). Basicamente, o método é composto das seguintes etapas (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988):

1. Inicialmente deve-se especificar a tensão do nó raiz e assumir, como estimativa inicial para todas as demais barras do SD (comumente utiliza-se o valor de tensão igual a 1 pu com ângulo 0);
2. **Cálculo das correntes nodais:** nessa etapa calcula-se as injeções de corrente de cada barra na iteração k , utilizando a Equação 3.3:

$$I_i^{(k)} = (S_i/V_i^{(k-1)})^* - Y_i^{sh}V_i^{k-1}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (3.3)$$

onde $V_i^{(k-1)}$ é a tensão calculada na barra i (nó), na iteração $k - 1$; S_i é o valor especificado de injeção de potência para a barra i e Y_i corresponde a soma de todos os elementos *shunt* do nó i .

3. **Varredura Inversa:** nesse passo são calculadas na iteração k as correntes de linha (J_L), iniciando das linhas conectadas as barras terminais em direção a linha conectada a barra raiz. A equação 3.4 é utilizada para calcular as (J_L)

$$J_L^{(k)} = -I_{L2}^{(k)} + \sum (\text{Correntes de linhas que saem do nó } L2), \quad (3.4)$$

em que $I_{L2}^{(k)}$ é a injeção de corrente do nó $L2$.

4. **Varredura Direta:** as tensões das barras são atualizadas iniciando da barra raiz movendo em direção as barras terminais. Para cada barra L , a tensão da barra $L2$ é calculada utilizando os valores atualizados de $L1$ e as correntes de linha calculadas no passo 2.

$$V_{L2}^{(k)} = V_{L1}^{(k)} - Z_L J_L^{(k)}, L = 1, 2, \dots, p, \quad (3.5)$$

onde Z_L é a impedância série da barra L .

5. **Critério de convergência:** o processo iterativo para os passos 2, 3 e 4 são finalizados quando um critério de convergência for alcançado. Em geral, o critério de convergência adotado é baseado no maior erro de potência ativa e reativa nas barras da rede, esse erro (ϵ) deve ser menor que um valor predefinido.

$$V_i^{(k+1)} - V_i^{(k)} \leq \epsilon, \quad (3.6)$$

onde ϵ é a tolerância de tensão.

3.4.2 Método de Soma de Potências

O cálculo do fluxo de carga por meio do método da soma de potência (CESPEDES, 1990) é um processo iterativo composto por quatro passos (BARAN; WU, 1989).

A Figura 4 ilustra um exemplo de alimentador sem ramificações, onde cada linha entre os nós são representadas por impedâncias $z_i = r_i + jx_i$ e as cargas de cada nó são representador por potência complexa constante $P_L + jQ_L$.

Figura 4 – Exemplo de uma representação de um alimentador de um sistema de distribuição. (Adaptada de (BARAN; WU, 1989)).

1. Assumir que as tensões iniciais em todas as barras são iguais à tensão da subestação (nó raiz);
2. Na etapa da varredura inversa, deve-se calcular os fluxos de potência ativa e reativa para cada linha usando as equações 3.7 e 3.8, respectivamente;

$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + P_{Li} \quad (3.7)$$

$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2} + Q_{Li}, \quad (3.8)$$

onde:

- P_i é o fluxo de potência ativa entre os nós i e $i + 1$;
 - Q_i é o fluxo de potência reativa entre os nós i e $i + 1$;
 - P_{Li} é a injeção de potência ativa líquida na barra i ;
 - Q_{Li} é a injeção de potência reativa líquida na barra i ;
 - $P_i' = P_i + P_{Li}$;
 - $Q_i' = Q_i + Q_{Li}$.
3. Na etapa da varredura direta, é utilizada a equação 3.9 para atualizar a magnitude das tensões nas barras. A equação 3.10 atualiza o ângulo das tensões nas barras.

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i'^2 + Q_i'^2}{V_i^2}, \quad (3.9)$$

$$\delta_{i+1} = \delta_i - \tan^{-1}\left(\frac{i_1}{i_2}\right), \quad (3.10)$$

onde,

- V_i é a tensão na barra i ;
 - δ_i é o ângulo na barra i ;
 - r_i é a resistência em série na linha que conecta a barra i ;
 - x_i é a reatância em série na linha que conecta i ;
 - $k_1 = \frac{P_i x_i - Q_i r_i}{V_i}$;
 - $k_2 = V_i - \frac{P_i r_i - Q_i x_i}{V_i}$
4. Com base no **critério de convergência**, a variação das magnitudes de tensões e ângulos de fase são comparados, analisando os valores obtidos na iteração atual com a iteração anterior. Caso a variação de todas as barras sejam menores ou igual ao valor permitido (tolerância máxima), os cálculos são finalizados, caso contrário, deve retornar ao passo 2.

3.5 Modelagem da carga corrente constante com a tensão

A forma de construção de um equipamento elétrico qualquer e o seu princípio físico de funcionamento definem o seu comportamento em regime permanente senoidal conforme a variação do nível de tensão de fornecimento, isto é, a potência elétrica absorvida por uma carga depende tanto da natureza (tipo de carga) quanto da tensão aplicada, podendo haver uma variação de tensão. Dessa forma, as cargas podem ser os componentes que oferecem maior dificuldade em sua modelagem, uma vez que as cargas são agregados de consumidores com características distintas (MONTICELLI; GARCIA, 1999).

Usualmente as cargas são representadas por meio de valores constantes de grandezas elétricas tais como, corrente constante com a tensão, potência constante com a tensão e impedância constante com tensão (MONTICELLI; GARCIA, 1999).

Em problemas envolvendo a reconfiguração de redes com uso da RNP é comum o uso do modelo de carga corrente constante com a tensão. Nessa modelagem considera-se que a intensidade de corrente absorvida e o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente são invariantes, isto é, não variam quando o valor da tensão varia em torno do valor nominal. Vale destacar que, para esse modelo, os valores da intensidade de corrente e do ângulo de defasagem são aqueles obtidos para a carga suprida com tensão nominal. Assim, quando aplicado uma tensão nominal $\dot{V}_{Ni} = V_{Ni} \angle \theta_i$ sobre a carga i :

$$\dot{S}_{Ni} = S_{Ni} \angle \alpha_i = P_i + jQ_i$$

Assim, a corrente absorvida por essa carga é:

$$I_{Ni} = \frac{\dot{S}_{Ni}^*}{\dot{V}_{Ni}^*} = \frac{S_{Ni} \angle -\alpha_i}{V_{Ni} \angle -\theta_i} = \frac{S_{Ni}}{V_{Ni}} \angle \theta_i - \alpha_i = I_{Ni} \angle \theta_i - \alpha_i$$

Quando aplicado uma tensão $\dot{V}_{i2} = V_{i2} \angle \theta_{i2}$ qualquer sobre a carga i , o valor da corrente será:

$$\dot{I}_{i2} = I_{Ni} \angle \theta_{i2} - \alpha_i$$

em que, o módulo da corrente I_{Ni} e o ângulo de defasagem α_i permanecem constantes. Com isso, a potência absorvida será:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{i2} &= \dot{V}_{i2} \dot{I}_{i2}^* = V_{i2} \angle \theta_{i2} I_{Ni} \angle -(\theta_{i2} - \alpha_i) \\ \dot{S}_{i2} &= V_{i2} I_{Ni} \angle \alpha_i \end{aligned}$$

isto é, a potência absorvida pela carga varia linearmente com a tensão aplicada.

Realizando o estudo de fluxo de carga assumindo carga modelada por corrente constante com a tensão, o processo de solução torna-se direto, isto é, sem iteração (SANCHES, 2013). Isto ocorre quando se despreza a rotação de fase da tensão, que permite o cálculo da queda de tensão, nos trechos dos alimentadores, através de números reais. Nesse caso é dito que o fluxo de carga foi executado com representação real da rede. O fluxo de carga assumindo-se carga modelada por corrente constante com a tensão será iterativo quando não se despreza a rotação de fase da tensão. Nessa situação, realiza-se o cálculo da queda de tensão, nos trechos dos alimentadores, através de números complexos (representação complexa da rede).

Vale mencionar que estudos demonstram que os resultados obtidos através da solução direta, que se baseia em aproximações, estão muito próximos aos valores exatos.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou definições importantes para compreensão do problema de redução de perdas em SDs através do processo de reconfiguração de rede.

Conforme apresentado, para possibilitar o desenvolvimento de ferramentas computacionais para tratamento do problema, a topologia elétrica dos SDs deve ser representada por grafos. A partir dessa representação é possível formular o problema de redução de perdas, conforme apresentado neste capítulo. Destacou-se, ainda, que fazendo uso da RNP e dos seus operadores, para representar e manipular o grafo respectivamente, a formulação do problema torna-se ainda

mais simples. Essa é uma das razões de a combinação da RNP com AEs ter possibilitado a obtenção de métodos para tratamento do problema de reconfiguração de redes em SDs de grande porte ([SANTOS *et al.*, 2010](#); [SANCHES *et al.*, 2011](#))

O problema de fluxo de carga foi também abordado, com destaque especial para os métodos de Varredura Direta/Inversa e para o modelo de carga corrente constante com a tensão. Isto em razão de esse fluxo de carga com essa modelagem serem os mais utilizados nas ferramentas desenvolvidas para reconfiguração de redes.

O próximo capítulo são descritos a RNP e seus operadores, em razão de o método proposto neste trabalho fazer uso dessa estrutura de dados.

REPRESENTAÇÃO NÓ-PROFUNDIDADE

Conforme apresentado no capítulo anterior, a RNP melhora o desempenho de AEs aplicados ao problema de reconfiguração de redes em SDs em função das suas seguintes propriedades ([SANTOS *et al.*, 2010](#)):

- A RNP e seus operadores produzem exclusivamente configurações factíveis, isto é, configurações radiais capazes de fornecerem energia para todas as partes do sistema possíveis de serem conectadas através de chaves;
- Em comparação com outras estruturas de dados, a RNP permite a geração de um número maior de configurações factíveis, num mesmo período de tempo, tendo em vista que a mesma apresenta uma complexidade computacional média de ordem $O(\sqrt{n_s})$, sendo n_s o número de nós do grafo (ou setores do sistema) (comprovado experimentalmente em ([SANTOS, 2009](#)));
- Cada configuração gerada pela RNP e seus operadores genéticos possui todos os nós (ou barras de carga) ordenados de acordo com o MPF, possibilitando, assim, a execução de um algoritmo de fluxo de carga de varredura direta/inversa de forma mais eficiente ([SANTOS; DELBEM; BRETAS, 2008](#)). Trabalhando com outras estruturas de dados e operadores, antes de aplicar um fluxo de potência de varredura direta/inversa é necessário executar um algoritmo de ordenação, toda vez que uma nova configuração for gerada, para organizar os nós de acordo com o MPF.

Face ao exposto, para desenvolver o método proposto neste trabalho, a topologia elétrica dos SDs será representada computacionalmente através da RNP, que será apresentada detalhadamente neste capítulo juntamente com os seus operadores PAO e CAO. Após a apresentação da RNP, este capítulo apresenta ainda o fluxo de carga de varredura direta/inversa desenvolvido em ([SANTOS, 2009](#)) que faz uso da RNP, bem como um exemplo da sua aplicação.

4.1 Representação Nó-profundidade

A Representação Nó-profundidade (RNP) consiste de uma estrutura de dados baseada nos conceitos de caminho e profundidade do nó em uma árvore de grafos (DELBEM; CARVALHO, 2003). Basicamente a RNP armazena uma lista linear contendo pares de valores (n_x, p_x) , em que n_x é o nó da árvore e p_x é a profundidade desse nó na árvore.

A obtenção de uma nova árvore é realizada por uma busca em profundidade no grafo a partir do nó raiz, formando uma lista de pares (n_x, p_x) em uma sequência adequada.

Um aspecto importante a ser ressaltado na RNP, que inexistente na maioria das outras representações, é a possibilidade de codificar florestas geradoras¹, além das árvores geradoras². Para isso, é utilizado um conjunto de RNPs das árvores, que por sua vez são acessados por meio de um vetor que armazena os ponteiros para cada uma das RNPs das árvores da floresta (DELBEM; CARVALHO, 2003). A RNP foi criada com o objetivo de melhorar o desempenho dos AEs para a resolução de PPRs, buscando gerar soluções factíveis (LIMA, 2009).

Um exemplo de uma floresta de grafos é ilustrada na Figura 5, a floresta é composta de 3 árvores A_1 , A_2 e A_3 , as quais suas raízes são os nós 1, 2 e 3 respectivamente. As linhas contínuas indicam arestas das árvores e as linhas pontilhadas são as arestas não utilizadas por qualquer árvore da floresta. Além disso, são apresentadas as RNPs das 3 árvores.

Figura 5 – Exemplo de uma floresta geradora contendo três árvores A_1 , A_2 , A_3 (a) e Arrays de RNPs das três árvores da floresta geradora (b).

4.2 Operadores da RNP

Com o objetivo de produzir novas florestas geradoras, ou árvores de grafos, de forma eficiente, foram desenvolvidos dois operadores de reprodução, também chamados de operadores de mutação, os quais geram uma nova solução a partir de apenas uma outra solução. Esses

¹Uma floresta geradora é composta pela união de codificações de todas as árvores pertencentes a mesma.

²Árvore é dita geradora quando todos os nós do grafo estão interligados entre si, sem nós isolados

operadores foram chamados de PAO (do inglês, *Preserve Ancestor Operator*) e CAO (do inglês, *Change Ancestor Operator*) (DELBEM *et al.*, 2004).

Ambos operadores produzem uma floresta F' de um grafo G , a partir da manipulação de árvores de uma floresta F de G , em que transfere uma subárvore podada de uma árvore A_{de} (árvore de origem) de F para uma A_{para} (árvore de destino) pertencente a F . Tais operadores são descritos nas subseções 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 Operador PAO

Para manipular árvores por meio do operador PAO são utilizadas como entradas dois nós: o nó de poda p oriundo de A_{de} e o nó adjacente a pertencente a A_{para} , esses nós são previamente determinados. O nó p indica a raiz da nova subárvore que será podada e a é o nó que subárvore podada de A_{de} será inserida.

A RNP é implementada por meio de um *array*, sendo necessário informar os índices de p (i_p) e a (i_a) nos *arrays* de A_{de} e A_{para} . Para o funcionamento do operador PAO deve-se seguir os seguintes passos:

1. Determina-se o intervalo $(i_p, \dots, i_l)$ na árvore A_{de} , correspondente aos nós da subárvore enraizada em p . Como o i_p é previamente conhecido é necessário encontrar o índice do ultimo nó i_l na subárvore podada de A_{de} . Sendo x o conjunto de nós consecutivos a p e i_x o índice de x , o índice do ultimo nó i_l é encontrado percorrendo o *array* a partir de i_p , enquanto $i_x > i_p$ e $p_x > p_p$;
2. Copiam-se os dados do intervalo $(i_p, \dots, i_l)$ de A_{de} para um *array* temporário A_{tmp} , atualizando as novas profundidades de cada nó x em A_{tmp} , a expressão para determinar as novas profundidades é $p_x = p_x - p_p + p_a + 1$, em que p_x , p_p e p_a são as profundidades dos nós x , p e a , respectivamente;
3. Cria-se a matriz A'_{para} e copiam-se as posições de A_{para} de $i = 1$ até i_a para A'_{para} , após isso, a matriz correspondente a árvore A_{tmp} é inserida na posição $i_a + 1$ de A_{para} , gerando a nova árvore A'_{para} , com os valores de profundidades atualizados;
4. A matriz A'_{de} é criada inserindo os nós de A_{de} sem a subárvore podada A_{tmp} ;
5. Copia-se os ponteiros das RNPs de F para F' e atualiza-se os ponteiros de A_{de} e A_{para} para A'_{de} e A'_{para} ;

A Figura 6 ilustra um exemplo de aplicação do PAO para o grafo apresentado na Figura 5. As árvores A_1 e A_3 são as árvores A_{de} e A_{para} respectivamente e considera-se que o nó $p=15$ em A_{de} e o nó $a=11$ em A_{para} .

Figura 6 – Exemplo de aplicação do operador PAO entre duas árvores.

4.2.2 Operador CAO

Diferentemente do Operador PAO, que requer dois nós para manipular uma árvore, com auxílio do CAO são requeridos três nós predefinidos: além dos nós p e a , é necessário o nó r , o qual indica a nova raiz da subárvore podada de A_{de} . Para manipulação de uma árvore por meio desse operador são realizadas algumas alterações nos passos do PAO. A modificação está no passo 2, sendo assim, ambos diferem na criação e armazenamento das subárvores podadas (DELBE *et al.*, 2004).

Para utilizar o operador CAO, o intervalo $(i_p, \dots, i_l)$ utilizado no passo 2 do PAO é substituído por $(i_r, \dots, i_l)$. Além disso, no passo 2 é considerado o intervalo com as posições dos nós r até p na subárvore podada de A_{de} , ou seja $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$, em que $r_0 = r$ e $r_n = p$ são raízes das subárvores podadas. Após isso, as subárvores enraizadas em r_i ($i = 1, \dots, n$) são copiadas sem a subárvore com raiz em r_{i-1} e armazenadas em uma matriz temporária A_{tmp1} com as profundidades atualizadas. Após esse processo, a matriz A'_{para} é criada contendo os nós de A_{para} e na posição $i + a$ de A_{para} é inserida a matriz temporária A_{tmp1} .

A Figura 7 ilustra o exemplo de aplicação do CAO, considerando as mesmas árvores de origem (A_{de}) e de destino (A_{para}) da Figura 6.

Figura 7 – Exemplo de aplicação do operador CAO entre duas árvores.

4.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou, de forma detalhada, a estrutura de dados RNP utilizada neste trabalho para representar a topologia elétrica dos SDs, tanto em *software* quanto em *hardware*.

Apresentar-se-ão, também, os operadores desenvolvidos para manipular, de forma eficiente computacionalmente, grafos armazenados em RNPs. No contexto do problema de reconfiguração de redes, a aplicação desses operadores, nos grafos armazenados em RNPs, representam as operações de chaveamento (abertura e fechamento de chaves seccionadoras), que são responsáveis pelo processo de reconfiguração.

No próximo capítulo serão introduzidos conceitos sobre FPGA e a descrição da arquitetura de hardware utilizada como base para desenvolvimento do método proposto.

ARQUITETURA DE *HARDWARE*

Este capítulo introduz o conceito básico de FPGA e apresenta a arquitetura de *hardware* implementada em FPGA, bem como os detalhes da implementação da paralelização do operador PAO da RNP, a arquitetura foi nomeada *Hardware* paralelizado baseada na Representação nó-profundidade (HP-RNP). Em (GOIS *et al.*, 2014) essa arquitetura de *hardware* implementada em FPGA foi utilizada para tratar o dc-MSFP. Neste trabalho, a HP-RNP foi explorada para o tratamento do problema de redução de perdas em SDs através do processo de reconfiguração de redes.

5.1 FPGA

Nos últimos anos, um novo paradigma para desenvolvimento de *hardware* tem sido muito abordado, denominado computação reconfigurável (BOBDA, 2007). Os sistemas reconfiguráveis possuem alto grau de paralelismo, podendo ser utilizados para diversas aplicações com capacidade de alcançar alto desempenho e flexibilidade. Um dos dispositivos que tem sido utilizado como tecnologia de lógica reconfigurável é o FPGA (do inglês, *Field Programmable Gate Array*), que são dispositivos lógicos reconfiguráveis que permitem que programadores configurem a operação do dispositivo por meio de *software*. FPGAs têm demonstrado que, em termos de velocidade e capacidade de armazenamento, são adequados para implementações que envolvem sistemas computacionalmente complexos de larga-escala (ou seja, com grande quantidade de portas lógicas), além de serem eficientes para aplicações de tempo real (BOBDA, 2007).

Um FPGA é constituído basicamente por três componentes que podem ser configurados:

- Blocos lógicos que podem ser configurados independentemente;
- Blocos de entrada e saída para conexão dos pinos do dispositivo;

- Chaves de interconexão para a conexão entre os blocos.

5.2 Arquitetura de *hardware*

A arquitetura de *hardware* HP-RNP (*Hardware* paralelizado baseada na Representação nó-profundidade) implementada em FPGA é mostrada na Figura 8. A HP-RNP é composta pelos seguintes componentes: um circuito em paralelo para execução do PAO e Seleção, denominado módulo P-PAO-S, e por outros componentes auxiliares utilizados principalmente para armazenamento de dados e controle de comunicação com um computador externo (PC).

O P-PAO-S é o módulo principal e inclui um conjunto de *Workers*, juntamente com outros componentes para o controle externo e avaliação. O P-PAO-S é completamente implementado em *hardware*.

Figura 8 – Visão geral da arquitetura de *hardware* HP-RNP, em que $\sqrt{n}$ Workers são paralelizados em que n é número de nós no grafo.

O sistema utiliza sementes aleatórias a partir de fontes externas para definir o estado inicial do gerador de números pseudo-aleatórios. A HP-RNP utiliza fontes aleatórias do kernel Linux (`/dev/urandom`). Essas sementes são geradas no PC e enviadas ao sistema HP-RNP por meio da interface JTAG. Com base nessas sementes, os números aleatórios para a escolha dos nós p e a utilizados no PAO são gerados por meio do LFSR (*Linear Feedback Shift Register*). Cada *Worker* possui seu próprio LSFR.

O barramento Avalon foi utilizado para a comunicação de memória externa, microprocessador e o controlador de *Workers*. A memória externa armazena uma floresta geradora F do grafo G (armazenada em RNPs), a matriz de peso das arestas do grafo G (CORMEN, 2002) e o código do microprocessador *softcore*, o qual realiza a leitura da memória externa e executa os seguintes comandos:

1. Transferência de um par de árvores da memória externa para os *Workers* do P-PAO-S (por

meio do controlador de *Workers*) e copia o melhor par de árvores encontrado do P-PAO-S para a memória externa;

2. Verifica se as operações dos *Workers* foram concluídas.

O Controlador de *Workers* gerencia a comunicação entre o microprocessador *softcore* e a memória externa para enviar/receber as árvores A_{de} e A_{para} para os *Workers*. Cada *Worker* executa o operador PAO da RNP considerando diferentes nós (p) e (a). O módulo P-PAO-S também contém dois blocos, um bloco para comparar as árvores durante o processo de geração e outro bloco para copiar as melhores soluções para a memória principal do FPGA via o barramento Avalon. A Seção 5.2.1 apresenta em detalhes o módulo P-PAO-S e a Seção 5.3.1 descreve a máquina de estados finitos (MEF) implementada em cada *Worker*.

5.2.1 P-PAO-S

O *software* que executa no microprocessador NIOS II gera uma matriz de peso das arestas do grafo e a armazena na memória externa. Essa matriz é utilizada para avaliar o desempenho da HP-RNP. Uma floresta inicial é gerada no microprocessador NIOS II a partir da matriz de pesos, utilizando o algoritmo modificado de Kruskal (KRUSKAL, 1956). A modificação consiste na inclusão do grau (o grau de um nó é o número de arestas conectados a esse nó) de cada nó à estrutura de dados que armazena a floresta gerada. Note que essa floresta seria a melhor floresta geradora para o grafo se o objetivo fosse determinar a floresta geradora mínima. No entanto, o problema foi considerado como floresta geradora mínima com restrição de grau (tornando o problema NP-difícil) (GAREY; JOHNSON, 1979).

Novas florestas são geradas seguindo as seguintes etapas:

1. Um par de árvores é escolhido aleatoriamente a partir da árvore geradora armazenada na memória externa;
2. Esse par de árvores é então enviado ao Controlador de *Workers* que, por sua vez, replica-o para cada *Worker* que o armazena em um bloco de memória *on-chip* que existe dentro de cada *Worker*;
3. Cada *Worker* processa o par de árvores recebidos, executando sua MEF que implementa o algoritmo do operador PAO, gerando duas novas árvores (A'_{de} e A'_{para}), as quais são enviadas para um multiplexador;
4. O P-PAO-S realiza comparações para encontrar as melhores soluções (menor soma de pesos) entre todos os pares de árvore gerados por $\lceil \sqrt{n} \rceil$ *Workers*;
5. Finalmente, o melhor par de novas árvores A'_{de} e A'_{para} são selecionados, copiados e enviados por meio do controlador P-PAO-S para a memória externa, substituindo as

árvores originais A_{de} e A_{para} e consequentemente alterando a floresta geradora atual. Após 10.000 chamadas de P-PAO-S e as aplicações de PAO nos *Workers*, o microprocessador envia a floresta original e a melhor floresta encontrada para o PC para avaliação da eficiência e eficácia do sistema.

5.3 *Worker*

Um *Worker* é composto por um conjunto de dois blocos de memória, um gerador de números aleatórios LFSR e MEF. Cada ciclo é planejado para usar eficientemente os blocos de memória disponíveis. O tamanho da memória é grande o suficiente para armazenar uma árvore contendo todos os nós do grafo ($32 \text{ bits} \times \text{número de nós}$). A Seção 5.3.1 descreve os detalhes da MEF que implementa o operador PAO.

5.3.1 *Máquina de estados de um Worker*

A Figura 9 mostra essa MEF. Em cada iteração de um *Worker* são executados os seguintes passos da MEF.

- Estado 1: inicia MEF do *Worker*;
- Estados 2-3: escolha de dois números aleatoriamente, usados como índices dos nós (p) e (a) em seus vetores RNP correspondentes;
- Estado 4: acessa as informações em relação aos nós p e a e suas correspondentes RNPs, as quais são armazenadas nos blocos de memória dos *Workers*;
- Estado 5: requisita à memória externa o peso da aresta que conecta o nó p e a no grafo original. Além disso, verifica se o grau de a é menor que um limite dado por uma restrição de grau. Se o grau do nó a em A_{para} é maior ou igual ao limite dado pela restrição de grau prossegue para o estado final do MEF; caso contrário, avança para o próximo estado;
- Estado 6: determina a subárvore de poda percorrendo os nós de A_{de} , a partir do nó p ;
- Estado 7: aguarda o retorno do peso requisitado durante o Estado 5. Se o peso é nulo, significa que a aresta não existe no grafo, avança para o Estado final do MEF; senão, prossegue para o próximo estado;
- Estados 8-9 e 10-11: as duas máquinas de estados são executados em paralelo. O Estado 8 desloca para a direita os nós de A_{para} uma quantidade de nós necessária para alocar espaço para copiar a subárvore podada. O Estado 9 copia os nós da subárvore podada de A_{de} para A_{para} , incrementa o grau do nó a e atualiza a profundidade de todos os nós copiados. O Estado 10 procura o nó ancestral de p em A_{de} . O Estado 11 decrementa o grau do nó ancestral p em A_{de} ;

- Estado 12: remove a subárvore podada de A_{de} , deslocando para a esquerda os nós de A_{de} sobre os nós que faziam parte dessa subárvore;
- Estado 13: atualiza os tamanhos das novas árvores A'_{de} e A'_{para} , subtraindo o tamanho da árvore podada do tamanho de A_{de} e adicionando esse tamanho ao de A_{para} ;
- Estado 14: finaliza o MEF.

Figura 9 – Máquina de estados finitos de um Worker.

A paralelização da RNP em *hardware* para tratar dc-MSFP mostrou-se eficiente (GOIS *et al.*, 2014), gerando novas configurações de redes a partir do PAO em tempo limitado por uma constante $O(1)$ desde que haja $\sqrt{n}$ árvores, independente do tamanho da rede (número de nós e arestas do grafo subjacente). Para isso, basta haver recursos de *hardware* (elementos lógicos) suficiente para configurar tal rede no FPGA.

A Figura 10 ilustra, em alto nível de abstração, a aplicação da HP-RNP organizada de modo paralelo para gerar $\lceil \sqrt{n} \rceil$ florestas geradoras. Um par de árvores (A_{de} , A_{para}) de uma floresta F é modificado por meio da estratégia de paralelização da RNP, produzindo $\lceil \sqrt{n} \rceil$ pares de novas árvores (A_{de}^i and A_{para}^i , $i = 1, \dots, \lceil \sqrt{n} \rceil$) correspondendo a $\lceil \sqrt{n} \rceil$ novas florestas (F^i). Considerando que o tempo de computação para gerar novas florestas é $O(\sqrt{n})$ (LIMA, 2009), a HP-RNP pode realizar $O(\sqrt{n})$ modificações ao mesmo tempo a partir de uma mesma floresta geradora. Isso é possível porque cada Worker executa a MEF do PAO completamente independente dos outros Workers, após receber o seu par de árvores (A_{de} e A_{para}).

As novas florestas $F^1, F^2, \dots, F^{\lceil \sqrt{n} \rceil}$ são geradas em paralelo em tempo médio $O(\sqrt{n})$. Dessa forma, o tempo médio de computação para gerar novas $\lceil \sqrt{n} \rceil$ florestas em paralelo é limitado por uma constante positiva ($O(1)$), conforme apresentado na Equação 5.1. É importante

Figura 10 – Estratégia de paralelização em $\lceil \sqrt{n} \rceil$ Workers (Seção 5.3).

ressaltar que é necessário que as florestas possuam $\sqrt{n}$ para encontrar tais soluções em tempo médio limitado por uma constante ($O(1)$).

$$\frac{O(\sqrt{n})}{\lceil \sqrt{n} \rceil} = O(1). \quad (5.1)$$

5.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a arquitetura de *hardware* implementada em FPGA, denominada HP-RNP, bem como os detalhes da implementação da paralelização do operador PAO da RNP, conforme desenvolvido em (GOIS *et al.*, 2014), (GOIS, 2011). Vale lembrar que essa estrutura foi utilizada como base para desenvolvimento do método proposto.

No próximo capítulo será apresentado o método proposto, destacando as alterações realizadas na HP-RNP necessárias para desenvolvimento desta pesquisa.

RECONFIGURAÇÃO DE REDES PELA HP-RNP E MAPEAMENTO DO PROBLEMA

Neste capítulo será apresentado o método proposto que consiste da extensão da arquitetura de *hardware* paralela baseada na RNP denominada HP-RNP, desenvolvida em (GOIS, 2011; GOIS *et al.*, 2014), para ser utilizada como um acelerador no problema de redução de perdas através da reconfiguração de redes. Propõe-se, ainda, o mapeamento do problema de redução de perdas por reconfiguração de redes como um dc-MSFP, a partir de aproximações em que grandezas elétricas e características topológicas dos SDs são transformadas em pesos. Com isso, diminuiu-se a quantidade de análises de fluxo de carga usualmente exigidas para avaliar as configurações de redes obtidas. Por fim, é apresentado como a restrição de grau do dc-MSFP foi considerada no mapeamento do problema.

O problema de redução de perdas por reconfiguração de redes é combinatório, em que se deve determinar a combinação dos estados das chaves aberta ou fechada que resulte em uma configuração de rede radial com perdas reduzidas. O tempo computacional aumenta demasiadamente quando se tratam redes reais. Além disso, para cada combinação de estado de chave, é necessário avaliar as condições de operação da rede através da execução de um método para cálculo do fluxo de carga, aumentando ainda mais o tempo computacional para encontrar uma solução de qualidade. Dessa forma, o mapeamento do problema de redução de perdas em um dc-MSFP possibilita que várias configurações de redes sejam avaliadas (possíveis soluções para o dc-MSFP) sem executar fluxos de carga, aumentando a eficiência do processo de reconfiguração de rede para encontrar soluções com perdas reduzidas. O mapeamento é feito por meio de uma heurística de pesos, a qual foi desenvolvida com base na análise das grandezas elétricas e topológicas que mais podem contribuir para redução de perdas em SDs. A Seção 6.1 apresenta extensões da HP-RNP para ser aplicada ao processo de reconfiguração de redes. As Seções 6.2 a 6.4 descrevem aspectos principais das heurísticas desenvolvidas para o mapeamento proposto.

6.1 Extensão da HP-RNP para o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes

Para possibilitar a HP-RNP proposta em (GOIS, 2011) lidar com o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes, foi necessária a extensão da arquitetura a nível de *hardware*, para isso, foram realizadas modificações no barramento de comunicação para enviar e receber os dados da rede de maneira eficiente.

A HP-RNP proposta em (GOIS, 2011) para o dc-MSFP gerava aleatoriamente uma floresta de grafo representando um configuração de rede inicial (ver Capítulo 5), assim não era necessária a leitura e escrita dos dados. Ao lidar com uma floresta de grafos que representa um SD, deve-se ler a configuração de rede atual, tornando importante considerar a escala do problema, pois o número de nós e arestas do grafo influencia diretamente no tempo de comunicação (tempo de leitura e escrita dos dados na memória) e, dependendo da estrutura, esse tempo pode-se tornar o gargalo para o acelerador em *hardware*. Assim, um módulo de interface *ethernet* (Apêndice D) foi desenvolvido para realizar a comunicação dos dados com maior velocidade possibilitando, assim, tratar na prática o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes por meio da HP-RNP modificada.

A Figura 11 ilustra os tempos de comunicação para a HP-RNP original proposta em (GOIS, 2011) e após a extensão da HP-RNP. A abscissa e a ordenada representam os números de barras e o tempo de comunicação respectivamente. Vale ressaltar, que o tempo de comunicação apresentado é a soma do tempo para leitura e escrita dos dados na memória. A linha azul representa o tempo de comunicação quando utilizada a arquitetura proposta em (GOIS, 2011) e a linha vermelha mostra o tempo de comunicação com a extensão da HP-RNP, a partir da inclusão da interface *ethernet* (Apêndice D). Pode-observar que o tempo de comunicação da HP-RNP modificada é significativamente reduzido em comparação a HP-RNP original, mesmo com o aumento do tamanho da rede. Outras alternativas também podem ser aplicadas para melhorar o desempenho em termos de tempo de transferência dos dados da rede (comunicação), tais como a modificação da estrutura da floresta de grafos escrita e lida e/ou a utilizando FPGA com suporte a interface PCI. Algumas dessas alternativas são citadas no Apêndice D.

Os outros aspectos da extensão da HP-RNP relacionam-se com o mapeamento do problema de redução de perdas via reconfiguração de redes em um dc-MSFP. No mapeamento um SD é tratado como uma floresta de grafos e seus alimentadores como as árvores dessa floresta. Pesos são atribuídos às arestas (trechos de linha do SD associados às chaves) do grafo, os quais são calculados por meio das informações baseadas nas topologia do sistema e das grandezas elétricas usando heurísticas, denominadas aqui de heurísticas de pesos. Algumas das grandezas elétricas utilizadas na construção da heurística de pesos foram: resistência, reatância e corrente. A reconfiguração de redes é realizada através do PAO da RNP (ver Seção 4.2.1), assim, a restrição de radialidade das topologias geradas é sempre garantida. Com isso, uma redução significativa

Figura 11 – Tempo de comunicação para HP-RNP original proposta em (GOIS, 2011) e para a extensão da HP-RNP, desenvolvida para lidar com o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes

de perdas na rede elétrica pode ser obtida de forma rápida pela solução do dc-MSFP do grafo a partir da extensão da HP-RNP.

A extensão da HP-RNP envolve dois módulos, um executado em *software* (PC) e o outro em *hardware* (FPGA). O módulo em *software* executa basicamente as seguintes tarefas: cálculo de pesos para as arestas da rede por meio da heurística de pesos proposta, o que exige uma execução do fluxo de carga baseado na RNP apresentado no Capítulo 4; e, após essa etapa, a avaliação da melhor solução encontrada para o dc-MSFP (usando o módulo em *hardware*) através de uma segunda execução do fluxo de carga.

O módulo em *hardware* é formada pela arquitetura HP-RNP (Capítulo 5), sendo responsável pelas seguintes atividades: processo de reconfiguração de redes através do operador (PAO) da RNP, avaliação das configurações obtidas através da somatória dos pesos dos ramos presentes nos grafos gerados e a seleção de três melhores soluções de acordo com o problema dc-MSFP. De uma forma mais detalhada, apresentam-se a seguir, todas as etapas do método proposto, contemplando-se os módulos executados em *software* e *hardware*, conforme o diagrama geral do método na Figura 12.

1. Primeiramente, em *software*, a combinação de valores que representam as amplitudes das grandezas elétricas é utilizada para o cálculo dos pesos, por intermédio da heurística de pesos desenvolvida (Seções 6.2 a 6.4). O fluxo de carga de varredura direta/inversa baseado na RNP é executado em *software* para a configuração inicial de modo a obter os valores de correntes acumuladas e os valores iniciais das perdas. Destaca-se que as injeções

de correntes são previamente calculadas a partir das demandas de cada barra do sistema (informação de entrada para solução do problema), sendo utilizado o modelo de corrente constante com a tensão para representação do comportamento das cargas (Capítulo 3).

2. Os pesos calculados a partir da heurística, os quais representam os valores da combinação das amplitudes das grandezas elétricas, são normalizados para valores no intervalo de 1 a 255 e associados aos ramos do SD. Essa faixa de valores foi escolhida em função de ser suficiente para representar os pesos para as redes utilizadas para validar o sistema na HP-RNP (Apêndice A). O peso 0 (zero) é usado para identificar conexões que não existem na rede, pois a existência de um ramo entre quaisquer dois nós depende da existência de uma chave entre esses nós. Foram utilizados 8 *bits* de memória para representar os pesos. Esses pesos são armazenados em uma matriz de adjacência $M_{n \times n}$ em que n é o número de nós da floresta. A matriz de adjacência contém todas as possíveis conexões $i-j$ da rede, em que a linha i e a coluna j de M armazena o peso do ramo de uma árvore associado a uma chave NA ou NF. Os pesos são calculados previamente em *software* e enviados para o módulo em *hardware*.
3. A matriz de pesos que corresponde à configuração inicial de um SD é enviada para o microprocessador NIOS II do acelerador em *hardware* (Figura 12). As demais informações, como as RNPs de cada árvore (alimentador), grau de cada nó e o nó raiz de cada árvore são enviadas via um barramento de comunicação do *software* em PC para o módulo em *hardware*. A partir disso, é enviado um par de árvores para a HP-RNP, de forma a realizar o processo de poda e transferência (reconfiguração) de trechos entre as árvores onde estão os *Workers*. Diferentemente da HP-RNP apresentada em (GOIS *et al.*, 2014) em que uma floresta inicial e pesos eram gerados aleatoriamente e implementados na própria HP-RNP por meio de um gerador de números aleatórios. Na atual proposta, o código executado no NIOS II foi modificado para receber as matrizes com os pesos gerados pela heurística proposta. Um SD é tratado por $\lceil \sqrt{n} \rceil$ *Workers* independentes, assim, para um SD que contém 16 barras são utilizados 4 *Workers*. Cada *Worker* recebe um par de árvores da floresta (SD) para aplicar o PAO alterando a estrutura dessas árvores.
4. Novas configurações são geradas pela HP-RNP aplicando a Máquina de Estados Finitos (MEF) que implementa o operador PAO (Capítulo 5), em que são realizadas operações de podas e enxerto entre pares de árvores da floresta. Cada aplicação do PAO gera uma floresta que corresponde a uma configuração de rede.
5. As florestas geradas são avaliadas (Seção 5.2) conforme a soma de pesos total da nova floresta e avaliadas quanto a sua factibilidade pela MEF.
6. Por fim, a partir do *software* no NIOS, as três melhores florestas (SDs, obrigatoriamente diferentes) encontradas a cada aplicação de HP-RNP são avaliadas de acordo com o somatório dos pesos de cada floresta. A melhor floresta gerada após vários ciclos da

aplicação da HP-RNP é copiada do NIOS II para o PC e reavaliada usando o fluxo de carga executado em *software*.

Figura 12 – Diagrama de blocos do método proposto. O método é executado em *software* em que essencialmente se calculam os pesos para a floresta de grafos que representa um SD utilizando uma heurística de pesos. O acelerador em *hardware* possui uma MEF correspondente ao PAO, que realiza a reconfiguração de redes.

O dc-MSFP inclui a restrição de grau em relação ao MSFP, tornando o problema NP-difícil (GAREY; JOHNSON, 1979). Os algoritmos de busca gulosa como os de Prim e Kruskal (CORMEN, 2002) para MSTP podem ser estendidos para MSFP. Esses algoritmos possuem complexidade de tempo $O(m \log n)$, em que m é o número de arestas e n o número de nós. Tais algoritmos também poderiam ser paralelizados e aplicados ao problema de reconfiguração de redes. Apesar de a complexidade de tempo desses algoritmos ser subquadrática, a paralelização pode não ser adequada para o problema de reconfiguração de redes com grandes instâncias ou de larga-escala. Por exemplo, se a complexidade de tempo $O(m \log n)$ (KRUSKAL, 1956) do

Kruskal for dividida por $\lceil \sqrt{n} \rceil$ *Workers*, chega-se a Equação 6.1.

$$O\left(\frac{m \log n}{\lceil \sqrt{n} \rceil}\right) \quad (6.1)$$

Pode-se substituir m na Equação 6.1 por cn , em que c é uma constante positiva ($c > 0$), pois em SDs o número de arestas máximo é proporcional ao número de barras. Assim, a Equação 6.1 pode ser reescrita conforme Equação 6.2:

$$O\left(\frac{cn \log n}{\lceil \sqrt{n} \rceil}\right) = O\left(\frac{\sqrt{n} \cdot \sqrt{n} \log n}{\lceil \sqrt{n} \rceil}\right) = O(\sqrt{n} \log n). \quad (6.2)$$

Com isso, um possível algoritmo de Kruskal paralelizado em $\lceil \sqrt{n} \rceil$ *Workers* possuiria complexidade de tempo superior à da RNP, que já é maior que a complexidade da HP-RNP ($O(1)$) (ver Equação 5.1 no Capítulo 5)

6.2 Mapeamento e heurística de pesos utilizada para o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes

Para viabilizar a HP-RNP para o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes, além da extensão da HP-RNP por meio de modificações no barramento de comunicação, foi necessário o mapeamento do problema no dc-MSFP. Para o mapeamento do problema foram utilizadas algumas grandezas elétricas importantes que influenciam na redução das perdas ôhmicas em SDs, bem como informações topológicas. A partir de tais informações uma heurística de pesos foi desenvolvida.

As perdas ôhmicas em SDs variam com muitos fatores, além de depender da própria configuração do sistema. A formulação das perdas ôhmicas (P_{ativa}) nas linhas estão associadas aos produtos dos quadrados dos fluxos de correntes por resistências das linhas ¹, dada pela Equação 6.3. A perda reativa é dada pela Equação ??.

$$P_{\text{ôhmicas}} = \sum_{i=1}^{n_l} R_{ij} \times I_{ij}^2 \quad (6.3)$$

em que n_l é o número de linhas, R_{ij} e I_{ij} são as resistências das linhas ij e a corrente que flui no ramo, ou linha, ij é o ramo que conecta as barras i e j , respectivamente.

¹Neste texto, uma linha pode também ser chamado de um ramo.

A amplitude $|\bar{I}_{ij}|$ da corrente $\bar{I}_{ij}$ que flui em um determinado ramo ij é dado pela Equação 6.4.

$$|\bar{I}_{ij}| = \left| \frac{|\bar{V}_{ij}|}{\bar{Z}_{ij}} \right| = \left| \frac{\bar{V}_i - \bar{V}_j}{\sqrt{r_i^2 + x_i^2}} \right| \quad (6.4)$$

em que $|\bar{I}_{ij}|$ é a amplitude de corrente $\bar{I}_{ij}$ que flui no ramo ij , V_i é a amplitude da tensão $\bar{V}_i$ ($\bar{V}_j$) na barra i (j) e $\bar{Z}_{ij}$ é a impedância do ramo $i - j$ e ($\bar{Z}_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$).

A partir das equações 6.3 e 6.4 pode-se analisar as grandezas elétricas que mais contribuem para a redução das perdas em um SD. Para exemplificar, a primeira forma de mapear as características elétricas em pesos apresentada nesta Seção considera apenas os valores das resistências das linhas como pesos. A Figura 13 ilustra um exemplo de transformação (mapeamento) de grandezas elétricas em pesos para os ramos da rede. Nesse exemplo, uma árvore que representa um alimentador, tem as resistências das linhas (R_{ij}) transformadas em pesos (W_{ij}) para cada ramo.

Figura 13 – Exemplo simples de mapeamento/heurística, em que resistências (R_{ij}) são transformadas em pesos (W_{ij})

Simulações com diferentes grandezas elétricas foram realizados para verificar quais as características elétricas mais contribuem para a redução das perdas em um SD. Verificou-se que uma das principais características de SD é a alta taxa da divisão de resistência por reatância (R/X) para grande parte das linhas, uma vez que, a resistência dos condutores elétricos das redes é o principal motivo das perdas em SDs, aumentando a queda de tensão, que por outro lado pode ser compensada por reatância relativamente alta. Dessa forma, a relação entre resistência e reatância mostra-se relevante para a composição de uma heurística de pesos.

Importa destacar que (AMASIFEN; ROMERO; MANTOVANI, 2005) também propuseram o uso de grandezas elétricas como pesos, para tratamento do problema de reconfiguração de redes. Como forma de obter soluções iniciais, eles aplicaram ambos os algoritmos de árvore geradora mínima de Kruskal e Prim (CORMEN *et al.*, 2001). Os autores consideraram os valores das resistências e reatâncias individualmente, além da soma dos quadrados das duas grandezas como peso. Segundo os autores, a partir do uso desses valores como custo, obtiveram-se configu-

rações iniciais que melhoraram o desempenho de técnicas de otimização secundárias, que foram investigadas no trabalho.

A partir dessa heurística de pesos inicial, no presente trabalho, foram realizados testes utilizando várias grandezas elétricas, como, por exemplo, as resistências dos ramos e magnitude das impedâncias. Algumas grandezas elétricas, como as correntes nas linhas, variam com a mudança na topologia no processo de reconfiguração de redes, sendo necessário assim, execuções do algoritmo de fluxo de carga para recalculas essas grandezas a cada alteração da topologia. Esse processo é uma das principais desvantagens dos métodos de reconfiguração de redes, visto que, a aplicação de algoritmos de fluxo de carga a cada nova mudança da topologia pode aumentar significativamente o tempo computacional para obtenção de soluções.

Nesse sentido, inicialmente, foram utilizadas grandezas elétricas que não são modificadas com a alteração da topologia, podendo assim, reduzir o tempo na obtenção de novas soluções. Tais grandezas elétricas são listadas a seguir:

- As resistências das linhas (R_{ij});
- As reatâncias das linhas (X_{ij});
- As correntes de carga nas barras (I_i).

Para validar os resultados obtidos por meio da HP-RNP, foram realizadas comparações com as soluções obtidas em *software* pelo algoritmo da árvore geradora mínima de Kruskal, que encontra a árvore ótima, dado um conjunto de pesos em tempo $O(m \log n)$. Para isso, um nó raiz adicional é conectado às raízes das árvores da floresta, transformando a floresta em uma única árvore. O peso de cada uma das arestas conectando o nó adicional aos nós raízes é 1, o qual corresponde a um valor mais baixo na matriz de pesos discretizada, evitando gerar uma configuração com apenas um nó raiz. Para os testes por meio da HP-RNP não é necessário adicionar este nó adicional, uma vez que a HP-RNP lida diretamente com florestas.

A Figura 14 ilustra um exemplo considerando as resistências como pesos para as arestas em um sistema de 16 barras apresentado em (CIVANLAR *et al.*, 1988). Os dados desse sistema estão disponíveis no Apêndice A. A Figura 14 mostra a configuração de operação inicial, com perda inicial de 511,5 kW; e a configuração obtida pelo algoritmo de árvore geradora mínima de Kruskal (pesos iguais às resistências). Essa configuração possui perdas de 682,2 kW.

Observa-se, que ao utilizar apenas a resistência de ramos como pesos foi encontrada uma configuração, concentrando muitas cargas no Alimentador 1. Por outro lado, várias cargas foram desconectadas do Alimentador 3, que ficou isolado sem alimentar nenhuma carga. Esse tipo de configuração pode gerar um aumento significativo das perdas no sistema, uma vez que, alimentadores muito longos (com uma grande distância da subestação às barras terminais) podem comprometer não apenas algumas das restrições operacionais do problema (queda de

(a) Configuração de operação inicial com perdas de 511,5 kW.

(b) Configuração final obtida após aplicar o algoritmo de árvore geradora mínima de Kruskal. A configuração encontrada possui perdas de 682,2 kW.

Figura 14 – Configurações inicial (a) e final (b) obtida pelo algoritmo de árvore geradora mínima de Kruskal.

tensão e carregamento de rede), mas também aumentar as perdas no sistema. Com base nessas características, verificou-se que um importante aspecto a ser considerado para encontrar um peso que contribua para a redução das perdas é a profundidade máxima das árvores (comprimento dos alimentadores). Assim, um termo baseado na profundidade dos nós foi adicionado à formulação da heurística de pesos para os ramos.

Para isso, dois conceitos foram definidos: o nível de nó N_{vi} e o nível de ramo N_{ij} . Nível de um nó qualquer N_{vi} é calculado segundo a Equação 6.5.

$$N_{vi} = d_m - d_i + 1, \quad (6.5)$$

em que d_m é a profundidade máxima da floresta inicial e d_i é a profundidade do nó i na floresta inicial (que representa a configuração inicial do SD em análise).

Com base nesse nível, calcula-se o nível N_{ij} de um ramo qualquer conectando os nós $i - j$ (supondo i à montante, mais próximo da raiz que o nó j) da seguinte forma: para as chaves normalmente fechadas, $N_{ij} = N_{v_i}$, ou seja, sempre será o nível a montante, consequentemente $N_{v_i} > N_{v_j}$. Caso contrário, $N_{ij} = N_j$. Os níveis são utilizados de forma a distribuir as cargas de acordo com suas profundidades ao longo dos alimentadores, para evitar a produção de alimentadores demasiadamente longos. Para calcular os níveis para os ramos representando chaves abertas, basta considerá-las fechadas e determinar o nó de maior nível conectado por esse ramo.

A Figura 15 exemplifica o cálculo do nível de cada ramo da rede para uma floresta com duas árvores e a profundidade de cada nó em cada árvore da floresta. Os ramos $i - j$ são apresentados na figura com os seus respectivos níveis. Destaca-se que os níveis crescem inversamente em relação à profundidade da árvore. Assim, ramos com altos níveis estão concentrados próximos ao nó raiz (subestação). Observa-se que o ramo 3-11 representa uma chave NA. Neste caso, dois possíveis níveis podem ser considerados: o nível do nó 3 ou o nível do nó 11, neste caso o nível escolhido será 3 (nível do nó 3), pois é o nó que corresponde a menor profundidade. A escolha entre esses níveis é realizada seguindo outros critérios propostos na Seção 6.3.

Figura 15 – Exemplo de cálculo do Nível de ramo, usado na utilização da formulação da heurística de pesos.

Buscando elaborar um valor de peso mais representativo para o problema de perdas em SDs, a informação do N_{ij} foi adicionado a formulação dos pesos, em que as resistências das

linhas (R_{ij}) é normalizada por $Nível_{ij}$, conforme a Equação 6.6.

$$W_{ij} = \frac{R_{ij}}{N_{ij}} \quad (6.6)$$

em que W_{ij} e R_{ij} correspondem ao peso e a resistência do ramo $i - j$, respectivamente.

A Figura 16 ilustra a configuração resultante da aplicação da Equação 6.6. Nesta configuração, as cargas ficam mais distribuídas entre os alimentadores, com as profundidades máximas iguais às da configuração inicial. Importa destacar que essa solução corresponde a melhor configuração encontrada na literatura, com perdas de 468,2 kW.

Figura 16 – Configuração obtida com base na Equação 6.6.

A normalização dos pesos pelo valor dos níveis (Equação 6.6) foi essencial para a obtenção da melhor solução encontrada na literatura para o sistema de 16 barras. De uma forma geral, essa normalização é mais adequada para regiões da rede com muitos ramos, principalmente em regiões com várias chaves NA.

Entretanto, em alguns casos apenas a informação do nível não é suficiente para representar as principais características do SD como um todo. Nesse sentido, a localização das cargas mais altas (com maiores amplitudes de corrente) é uma importante informação à ser analisada, principalmente se tais cargas estiverem localizadas em níveis mais baixos (próximas a nós terminais). Nesses casos, a queda de tensão tende a ser maior aumentando significativamente as perdas do SD. A Figura 17 exemplifica como uma carga relativamente alta pode influenciar no aumento das perdas em um SD. A Figura 17 mostra um SD com dois alimentadores (um em cada subestação), em que os nós 0 e 1 correspondem às barras da subestação e a linha tracejada representa uma chave NA entre os barras 3 e 11. Considerando que a barra 11 (barra terminal do Alimentador iniciado pelo nó 1) possua uma carga muito alta, essa carga pode influenciar

nas perdas para todos os nós a montante de 11, aumentando as perdas para o SD como um todo. Porém, se está carga injetada na barra 11 for desconectada da barra 10 por meio da abertura da chave 10-11 e conectada na barra 3 as perdas podem ser reduzidas. Observe que esta carga estará em um nível maior (profundidade mais baixa), mais próxima da subestação, interferindo em um número menor de linhas. Portanto, em geral, nós com uma grande quantidade de carga não devem possuir profundidades altas (ou níveis baixos), pois podem resultar em altas perdas.

Nesse sentido, foram investigados pesos que refletissem essas características relativas às localidades da rede com maior concentração de trechos (nós com grau alto) e/ou com cargas relativamente altas. As heurísticas foram então organizadas de acordo com as características globais e locais da rede.

As Seções 6.3 e 6.4 apresentam as heurísticas de pesos baseada nas características globais e locais de um SD, respectivamente.

6.3 Heurística de pesos baseada em características globais

Como mencionado anteriormente, a alta relação R/X é um aspecto importante para grande parte das linhas em SDs, pois pode resultar em uma significativa queda de tensão e, conseqüentemente, em aumento de perdas nos alimentadores de distribuição (HUNG; MITHULANANTHAN; BANSAL, 2010). Além disso, as grandezas elétricas de resistência e reatância das linhas são mantidas com a alteração da topologia no processo de reconfiguração da rede.

Figura 17 – Exemplo de como uma carga alta pode influenciar no aumento das perdas em um SD

Assim, uma combinação dessas é uma alternativa importante na composição dos pesos.

A heurística de pesos global é sintetizada na Equação 6.7, em que a relação R_{ij}/X_{ij} em conjunto com a informação dos níveis (N_{ij}) mapeiam bem, em geral, a grande parte dos trechos da rede, como os envolvendo: as regiões próximas da subestação (baixa profundidade) e regiões com os nós com profundidade significativa e conectados por uma chave aberta (NA).

$$W_{ij} = \frac{R_{ij}/X_{ij}}{N_{ij}}, \quad (6.7)$$

em que, R_{ij} , X_{ij} e N_{ij} são a resistência, reatância e nível do ramo $i - j$, respectivamente.

A Figura 18 mostra o fluxograma com o funcionamento da heurística de pesos baseada nas características globais da rede. De uma forma geral, o funcionamento da heurística divide-se nos seguintes passos. Verifica-se, para cada ramo (aresta) C_{ij} , se ele está associado a uma chave normalmente fechada (NF) ². Caso afirmativo, o peso da aresta é calculado conforme a

Figura 18 – Heurística de pesos baseada nas características globais.

²Ressalta-se que nesta configuração toda o ramo C_{ij} está associado a uma chave NF ou NA, caso os

Equação 6.7. Entretanto, o nível escolhido para compor o peso será o nível a montante do nó em análise, ou seja, $N_{ij} = N_{v_i}$. Caso o ramo C_{ij} não corresponda a uma chave NF, é verificado se o nível do vértice i (v_i) é maior que do vértice de j (v_j) e se a corrente de carga de v_i (I_{v_i}) é maior que a corrente de carga de v_j (I_{v_j}) ($I_{v_i} > I_{v_j}$), dependendo da condição satisfeita será escolhido o nível N_{v_i} ou N_{v_j} para cálculo do peso da aresta. A escolha dos níveis baseadas nas correntes de cargas é importante para cálculo dos pesos dessas arestas, uma vez que, a corrente de carga alta é ideal que estejam situadas em níveis mais altos para obter um peso que mais contribua para a redução de perdas.

Além dos aspectos globais, considerados na heurística de pesos global, existem algumas características locais que influenciam nas perdas. Como, por exemplo, a existência de muitas chaves NA e/ou a presença de nós conectados por chaves NA em níveis iguais, bem como, nós com acúmulo de carga concentrados em extremidades da árvore (nós-folha). Nesses casos, outros aspectos devem ser considerados, de forma a representar essas características locais, sem comprometer aspectos globais de um SD. A Seção 6.4 propõe a heurística local e os principais aspectos locais considerados para o cálculo do pesos.

6.4 Heurística de pesos local

Alguns trechos da rede possuem características peculiares como, por exemplo, múltiplas chaves abertas conectadas por nós-folha e o acúmulo de cargas em um nó com grau alto. Além disso, as cargas altas podem estar conectadas por múltiplas chaves e em um mesmo nível (profundidade). Para esses casos, é necessário uma análise de vizinhança, incorporando informações locais a alguns pesos situados em região de chave NA, buscando, não comprometer os aspectos globais.

Nesse sentido, os módulos das correntes de cargas foram incorporados na heurística de peso por meio da adição de um termo em relação à Equação 6.7. Esse termo foi nomeado de I_{LNN} (do inglês, *Load Current in a Neighbourhood Normalized*). Esse termo pode ser calculado de duas formas, dependendo da localização das cargas. Caso as cargas não estejam situadas em nós terminais, o I_{LNN} dado pela Equação 6.8; caso contrário, é calculado conforme a Equação 6.9.

$$I_{LNN} = \frac{I_j + \sum_{x \in \Omega_j} I_{v_x}}{1 + |\Omega_j|} \quad (6.8)$$

em que Ω_j é o conjunto dos nós adjacentes a j , I_j é a carga do nó vizinho de v_i e I_{v_x} é o somatório das correntes de cargas de todos os nós adjacentes pertencentes a Ω_j .

$$I_{LNN} = \frac{I_{v_i} + I_{v_j}}{2} \quad (6.9)$$

ramos não possuam chaves NF ou NA, não serão considerados na análise, uma vez que, não se pode reconfigurá-los.

em que I_{vi} e I_{vj} são as correntes de cargas de v_i e v_j respectivamente.

O somatório das cargas é calculado para todos os nós adjacentes de v_i e v_j (aresta $i - j$) na Equação 6.8. O I_{LNN} é o valor que representa a média das correntes de carga das vizinhança de um nó, ou dos nós adjacentes. Dessa forma, a formulação final para cálculo dos pesos pode ser reescrita pela Equação 6.10, na qual se adiciona o termo I_{LNN} . O $ILNN$ será considerado ou não, baseado em alguns critérios analisados localmente, de modo a somente modificar os valores dos pesos globais se houver características locais relevantes. Em outras palavras, o $ILNN$ ajusta os valores em que outras grandezas são mais expressivas para o aumento das perdas.

$$W_{ij} = (R_{ij}/X_{ij})/N_{ij} + I_{LNN}, \quad (6.10)$$

em que I_{LNN} é a corrente média da vizinhança de uma barra.

A Figura 19 ilustra o funcionamento da heurística de pesos local que possui os passos descritos a seguir. Inicialmente, é verificado se C_{ij} é NA e se as profundidade de v_i e profundidade de v_j sejam maiores que 2, a condição da profundidade é verificada para evitar modificações nos pesos de nós próximos da subestação, preservando as características globais da rede. Assim, a análise local ocorre somente em regiões que não possuam profundidades baixas. Em seguida são verificados os graus de v_i e v_j .

Caso o grau de um dos vértices (v_i ou v_j) seja maior que 3, é verificado as correntes de carga a montante (denominada de corrente acumulada I_{AC}) do vértice em análise. Essa condição é importante para verificar se existem muitas cargas conectadas em um único nó, por meio da análise das cargas a montante, ou seja, as cargas do pai v_i e v_j . O I_{AC} é calculado conforme a Equação 6.11, considerando as cargas a montante do vértice v_i . Dessa forma, o I_{LNN} é calculado baseado na escolha dessas cargas na Equação 6.8.

$$I_{ACvi} = I_{vi} + \sum I_{vx}, x \in j_{vi}, \quad (6.11)$$

em que I_{vi} é a corrente de carga de v_i , I_{vx} a corrente de carga a montante de v_i , x é o nó a montante de v_i pertencente ao conjunto j_{vi} .

Caso o grau de um dos nós seja menor que 3 (não possuem muitas cargas conectadas), será verificado o módulo das diferenças dos níveis N_{vi} e N_{vj} , se os nós v_i e v_j são folhas, o termo I_{LNN} é calculado de acordo com a Equação 6.9. Nesse caso, apenas os nós folha conectados pela chave NA são considerados para o cálculo do I_{LNN} . Caso um nó seja folha e o outro não, o I_{LNN} será calculado de conforme a Equação 6.8, em que o pai do vértice com maior corrente de carga é considerado.

Figura 19 – Fluxograma da heurística de pesos local.

6.5 Restrição de grau para o dc-MSFP aplicada ao mapeamento do problema de redução de perdas

Um estudo foi realizado baseado no grau que cada configuração de redes possuía antes e após a reconfiguração de redes. Nesse estudo, foram analisadas as configurações iniciais e melhores em termos de perdas encontradas na literatura. Verificou-se que tanto os pesos quanto a restrição de grau podem ser importante informações para encontrar soluções de boa qualidade, visto que o grau está diretamente relacionado com a quantidade de carga conectada em um único

nó. Além disso, observou-se que para as redes utilizadas nos testes da proposta deste trabalho, o grau da solução inicial era igual ao da solução melhor encontrada na literatura, conforme é mostrado na Tabela 2. Assim, em todos esses testes a restrição de grau do dc-MSFP não foi determinante na escolha da solução para o problema a partir da extensão do HP-RNP. As redes analisadas foram as seguintes: 16 barras, 70 barras, 94 barras, 143 barras, 470 barras e 940 barras. Na Tabela 2 são sintetizadas o grau máximo encontrado na configuração inicial (antes do processo de reconfiguração de redes) e da configuração melhor encontrada na literatura (após o processo de reconfiguração de redes). Pode-se verificar que os graus inicial e melhor encontrada são os mesmos e sempre restringido à 3 ou 4.

Tabela 2 – Grau máximo das soluções iniciais e da solução melhor encontrada

Sistema (n de barras)	Grau máximo	
	Configuração inicial	Melhor encontrada
16 barras	3	3
70 barras	3	3
94 barras	3	3
143 barras	4	4
470 barras	4	4
940 barras	4	4

A partir dessa análise foi verificado que a modificação mais expressiva foi na profundidade dos nós que possuíam grau alto. Nesse sentido, a restrição de grau foi mantida ao grau da solução inicial. A análise completa quanto o grau e também as profundidades máximas e mínimas para os sistemas-teste utilizados são apresentados no Apêndice B.

6.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a heurística de pesos baseada nas informações globais e locais para lidar com o problema de redução de perdas em SDs mapeado em um dc-MSFP via HP-RNP. O mapeamento do problema em um dc-MSFP utilizando como pesos as informações mais relevantes da rede possibilitou a composição de uma heurística de peso representativa para grande parte dos trechos da rede. A heurística de pesos mostrou ser capaz de tratar as características da rede como um todo. O uso de heurística de peso pode reduzir significativamente o tempo para obtenção de uma configuração de rede com baixa perda em relação a melhor configuração encontrada na literatura (próximas do ótimo global ou a ótima). Além disso, as configurações obtidas pela extensão da HP-RNP baseado nos pesos desta heurística dispensam a aplicação de algoritmos de fluxo de carga para cada configuração de rede gerada. Os resultados obtidos a partir da heurística proposta são descritos no próximo capítulo.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste Capítulo, os experimentos e os resultados desta tese são apresentados. Alguns dos sistemas-teste existentes na literatura foram utilizados para a validação da heurística de peso proposta. Além disso, realizou-se uma análise da extensão da HP-RNP para o processo de reconfiguração de redes para a redução de perdas. O desempenho é dado em termos de tempo computacional da HP-RNP. O algoritmo de Kruskal em *software* no PC com a heurística de pesos foi implementando para comparar e validar as duas abordagens (*software* e *hardware*). As configurações iniciais e obtidas por meio da HP-RNP são reavaliadas por um fluxo de carga implementando em *software*, utilizando o modelo de carga potência constante para determinar a redução de perdas. Ressalta-se que os trabalhos comparados com o método proposto também utilizaram o mesmo modelo de carga. Os testes foram realizados para seis sistemas-teste, os quais são: sistema de 16 barras (CIVANLAR *et al.*, 1988), 70 barras (DAS, 2006), 94 barras (CHIOU; CHANG; SU, 2005), 143 barras (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000), 470 barras (JABR; SINGH; PAL, 2012) e 940 barras (JABR; SINGH; PAL, 2012). A extensão da HP-RNP e o mapeamento do problema de redução de perdas em um dc-MSFP a partir da heurística de pesos proposta, apresentada no Capítulo 6, possibilitou a obtenção de configurações próximas do ótimo e em tempo computacional significativamente menor quando comparado aos métodos existentes na literatura. Uma análise comparativa em termos de perdas das soluções obtidas e tempo computacional para cada sistema-teste é apresentado nas seções a seguir.

7.1 Resultados para o sistema de 16 barras

O sistema de 16 barras contém 3 alimentadores, 13 chaves NF e 3 chaves NA. A tensão da subestação é de 23 kV e potência base 100 MVA, os dados completos são reportados no Apêndice A. A Figura 20 ilustra a topologia da configuração inicial, em que a aresta representada por uma reta contínua corresponde à uma linha e uma chave NF; enquanto que a aresta representada por uma reta tracejada corresponde à uma linha associada à uma chave NA. A perda da

configuração inicial é de 511,5 kW.

Os resultados obtidos foram comparados com alguns métodos mais relevantes da literatura, entre os quais estão (TOMOIAGĂ *et al.*, 2013) e (BAYAT, 2013). A comparação é realizada por meio da análise da qualidade da solução (perdas) e o tempo para a obtenção da solução de cada método. Para comparar a qualidade da solução com outros métodos, foi utilizado o algoritmo de fluxo de carga considerando a modelagem da carga potência constante, que é a mesma utilizada pelos autores dos métodos comparados. Para isso, o fluxo de carga foi executado antes e depois da reconfiguração de redes possibilitando a análise das perdas das configurações.

Figura 20 – Sistema-teste de 16 barras com 3 alimentadores, 13 chaves NF e 3 chaves NA. A configuração inicial possui perdas de 511,5 kW (a) e a configuração final possui perdas de 468,2 kW.

Para o teste com o sistema teste de 16 barras foram utilizados 4 *Workers* ($\sqrt{16}$) em paralelo. O par de alimentadores escolhido é replicado para os *Workers*, os quais implementam a MEF do PAO em paralelo. Foram realizadas 10 aplicações de PAO para a HP-RNP e 10 em *software* no NIOS II. Assim, para cada aplicação no NIOS II, são realizadas 10 aplicações por *Worker* na HP-RNP, totalizando-se 100 aplicações de poda de transferência entre alimentadores por *Worker*.

A partir da heurística de pesos, foi possível obter a melhor configuração encontrada na literatura com perdas de 468,2 kW ¹. O tempo para realizar o processo de reconfiguração de redes nos *Workers* foi de 0,0265 ms.

O algoritmo de Kruskal implementando em *software* obteve a solução ótima (árvore geradora mínima) em 0,04 ms. A solução ótima foi obtida com a abertura das chaves 7, 8 e 16 ².

¹A configuração obtida corresponde a melhor solução encontrada na literatura.

²As chaves correspondem ao número do ramo no Apêndice A

Tanto a heurística de pesos implementada para a HP-RNP quanto em *software* no PC possui o tempo significativamente menor quando comparado as abordagens de (BAYAT, 2013) que encontrou a mesma solução em 40 ms. A Tabela 3 apresenta a comparação entre o método proposto e os dois métodos da literatura. As configurações obtidas para os métodos são as mesmas encontrada em (TOMOIAGĂ *et al.*, 2013), (BAYAT, 2013), validando os resultados obtidos para esse sistema-teste.

Tabela 3 – Resultados para sistema de 16 barras e comparação entre diferentes métodos.

Sistema-teste de 16 barras (Perdas da configuração inicial = 511,5 kW)					
Método	Chaves abertas	Perdas finais (kW)	Tempo PC (ms)	Tempo Workers + Com. (ms) ¹	Hardware
(TOMOIAGĂ <i>et al.</i> , 2013)	7, 8, 16	468,2	212	—	Core Duo 3GHz 4GB (RAM)
(BAYAT, 2013)	7, 8, 16	468,2	40	—	Core 2 Duo 2,8 GHz 4GB (RAM)
Proposto	7, 8, 16	468,2	0,04	0,0265	CoreI5-3210 2,5 GHz 6GB (RAM)

7.2 Resultados para o sistema de 70 barras

O sistema de 70 barras contém 4 alimentadores, 78 ramos e 11 chaves NA. A tensão da subestação é de 11 kV. A perda inicial para esse sistema-teste é de 227,53 kW. Uma característica desse sistema é que a maioria das chaves NA concentram-se nos nós folhas da rede (barras da extremidade). A Figura 21 ilustra a configuração inicial e seus dados de interesse são apresentados em (DAS, 2006).

Para a configuração de 70 barras foram utilizados $\lceil \sqrt{70} \rceil$ Workers em paralelo, isto é, 9 Workers. Cada Worker recebe 1 par de alimentadores e após 100 aplicações de podas e transferências de trechos entre alimentadores, a melhor configuração gerada pelo acelerador HP-RNP é apresentada na Figura 22. A Tabela 4 reporta as perdas finais da configuração obtida e uma comparação com os métodos existentes na literatura. As perdas da configuração obtida foram de 202,25 kW. A configuração obtida foi encontrada em 0,968 ms em *software* enquanto a HP-RNP encontrou a mesma configuração em 0,1369 ms. Em relação a qualidade da solução, a configuração obtida não corresponde à melhor encontrada na literatura. Em (MENA; GARCÍA, 2012) foi encontrada uma configuração com perdas de 201,412 kW. Todavia, os autores não reportaram o tempo para obtenção da solução.

Figura 21 – Sistema-teste 70 barras que contém 4 alimentadores, 78 ramos, das quais 11 são chaves NA. A perda inicial dessa configuração é de 227,53 kW.

A configuração encontrada por meio da HP-RNP é melhor em termos de perdas que as configurações obtidas em (AHMADI; MARTÍ, 2015) e (TOMOIAGĂ *et al.*, 2013). Tais abordagens reportam soluções com perdas de 203,675 kW e 203,6 kW respectivamente. Na Tabela 4 são sintetizadas as perdas das configurações obtidas para cada método com seus respectivos tempos de computacional.

7.3 Resultados para o sistema de 94 barras

O sistema de 94 barras possui 11 alimentadores, 13 chaves NA, tensão de 11,4 kV e potência base de 100 MVA. A perda inicial desse sistema é de 531,99 kW. A Figura 23 ilustra o sistema de 94 barras. Os dados deste sistema são reportados no Apêndice A.

No processo de reconfiguração do sistema de 94 barras foram utilizados $\lceil \sqrt{94} \rceil$ *Workers* em paralelo, isto é, 10 *Workers*. A melhor configuração gerada pela HP-RNP utilizando a heurística de pesos após 100 aplicações de poda e transferências de trechos de alimentadores, é ilustrada na Figura 24. A Tabela 5 apresenta uma análise comparativa da melhor solução obtida pelo método proposto com as soluções geradas por outros métodos. As perdas finais da configuração obtida pelo método proposto foi de 470,056 kW em 1,011 ms em *software* e por meio do acelerador HP-RNP encontrou a mesma configuração em 0,4658 ms. Ressalta-se que esse tempo corresponde ao tempo de comunicação mais o tempo dos *Workers* da HP-RNP. A perda da configuração obtida é próxima da melhor encontrada na literatura, sendo 469,88 kW. Entretanto, o resultado obtido possui perdas mais baixas que a solução encontrada

Figura 22 – Configuração gerada a partir da heurística de pesos em *software* e HP-RNP para o sistema de 70 barras. As perdas da configuração final foram de 202,25 kW.

Tabela 4 – Resultados para sistema de 70 barras e comparação entre diferentes métodos

Sistema-teste de 70 barras (Perdas da configuração inicial = 227,53 kW)					
Método	Chaves abertas	Perdas finais (kW)	Tempo PC (ms)	Tempo Workers + Com. (ms)	Hardware
(TOMOIAGĂ <i>et al.</i> , 2013)	13, 28, 45, 51, 67, 70, 73, 75-79	203,675	4.639	—	Core Duo 3GHz 4GB (RAM)
(MENA; GARCÍA, 2012)	13, 30, 45, 51, 66, 70, 75-79	201,412	ND	—	ND ³
(AHMADI; MARTÍ, 2015)	14, 30, 39, 45, 51, 66,	203,6	106	—	I7-2600 3400 MHz (8 GB RAM)
Proposto	30, 46, 51, 66, 70-71, 75-79	202,25	0,968	0,1369	Core I5-3210, 2,5GHz- 6 GB RAM

em (AHMADI; MARTÍ, 2015), o qual obteve uma diferente configuração com perdas de 470,08 kW. A Tabela 5 reporta uma análise comparativa de alguns métodos existentes na literatura da área com o método proposto, observa-se que dentre os trabalhos citados, (ABABEI; KAVASSERI, 2011) obtiveram uma solução em 1,03 ms e reporta os valores de perdas apenas

Figura 23 – Sistema de 94 barras com 11 alimentadores, 13 chaves NA, tensão de 11,4 kV e com perda inicial de 531,99 kW.

em percentual, sendo de 12,36 % e (AHMADI; MARTÍ, 2015) encontrou soluções próximas da ótima, com perda final de 470,08 kW em 174 ms.

Figura 24 – Configuração gerada a partir da heurística de pesos em *software* e HP-RNP. A perda da configuração é de 470,05 kW.

Tabela 5 – Resultados para sistema de 94 barras e comparação entre diferentes métodos.

Sistema-teste de 94 barras (Perdas da configuração inicial = 531,99 kW)						
Método	Chaves abertas	Perdas finais (kW)	Tempo PC (ms)	Tempo Workers + Com. (ms)	Hardware	
(TOMOIAGÁ <i>et al.</i> , 2013)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90, 92	469,88	7.809	—	Core Duo 3GHz- 4GB RAM	
(ABABEI; KAVASSERI, 2011)	ND	ND 12,36% ¹	1,03	—	Quad Core 2,8 GHz 2GB RAM	
(AHMADI; MARTÍ, 2015)	7, 34, 39, 42, 63, 72, 83, 84, 86, 89, 90, 92	470,08	174	—	Core I7-2600 3400 MHz 8 GB (RAM)	
Proposto	7,13,34,39, 42,55,63,72,83, 86,89,90,92	470,056	1,011	0,4658	Core I5-3210, 2,5GHz- 6GB RAM	

7.4 Resultados para o sistema de 143 barras

O sistema de 143 barras possui 8 alimentadores e 21 chaves NA, tensão de 13,8 kV e potência base de 100 MVA. Os dados do sistema são apresentados no Apêndice A. Para os testes na HP-RNP utilizando as heurística de pesos foram utilizados 12 *Workers*. O Figura 25 ilustra a configuração inicial de 143 barras.

Figura 25 – Sistema de 143 barras com 8 alimentadores, 21 chaves NA e com perda inicial de 320,3 kW.

A Tabela 6 reporta a comparação entre alguns métodos relevantes da literatura. A melhor solução encontrada por meio da HP-RNP possui perda de 299,75 kW obtida em 0,5157 ms após o processo de reconfiguração nos *Workers*, considerando os tempos de comunicação mais *Workers*. A melhor solução reportada na literatura possui perdas de 280,1 kW e foi obtida em 400 ms em (CARRENO; ROMERO; PADILHA-FELTRIN, 2008) enquanto que (JABR; SINGH;

PAL, 2012) encontrou a mesma solução em 18.000 ms. (AHMADI; MARTÍ, 2015) obteve uma solução com perda de 286,4 kW em 577 ms.

A Figura 26 ilustra a configuração gerada por meio da HP-RNP, a perda da configuração encontrada é de 299,75 kW. Ressalta-se que mesmo que o método proposto não tenha gerado a melhor configuração encontrada na literatura, o baixo tempo de processamento em *hardware* e em *software* para a obtenção desta solução viabiliza a utilização como solução inicial (ponto de partida) para aplicação de outros métodos de otimização, reduzindo significativamente o tempo computacional no processo de reconfiguração de redes.

Figura 26 – Configuração gerada por meio da heurística de pesos pela HP-RNP e *software*. A perda da configuração é de 299,75 kW.

Tabela 6 – Resultados para sistema de 143 barras e comparação entre diferentes métodos.

Sistema-teste de 143 barras (Perdas da configuração inicial = 320,3 kW)					
Método	Chaves abertas	Perdas finais (kW)	Tempo PC (ms)	Tempo Workers + Com. (ms)	Hardware
(CARRENO; ROMERO; PADILHA-FELTRIN, 2008)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137-138, 141-142, 144-148 150-151, 155	280,1 280,1	400	—	Pentium M 1.60 GHz
(JABR; SINGH; PAL, 2012)	7,35,51,90, 96,106,118,126, 135,137-138,141-142, 144-148,150-151, 155	280,1	18.000	—	Core I7 1,73 GHz 6 GB RAM
(AHMADI; MARTÍ, 2015)	9, 35, 51, 54, 90, 96, 106,126, 135- 136, 138, 141, 143-148, 150-151, 155	286,4	577	—	Core I7-2600 3400 MHz 8 GB (RAM)
Proposto	38, 51, 73, 89, 96, 106,126,128, 137, 138, 141-148, 150-151, 156	299,75	2,398	0,5157	Core I5-3210, 2,5 GHz- 6GB RAM RAM

7.5 Resultados para o sistema de 470 barras e 940 barras

Os sistemas de 470 e 940 barras são compostos por 5 e 10 replicações do sistema de 94 barras e possuem 55 e 110 alimentadores, respectivamente. Os dados das chaves que conectam os sistemas estão disponíveis no Apêndice A e foram extraídos de (JABR; SINGH; PAL, 2012). A Figura 27 mostra o esquema das replicações do sistema de 94 barras para gerar os sistemas de 470 e 940 barras. Ressalta-se que os pesos para o sistema de 94 barras são replicados, sendo necessário gerar apenas os pesos das chaves abertas que interconectam os sistemas. Os dados das configurações geradas são reportados no Apêndice C.

Para os sistemas de 470 e 940 barras foram utilizados 22 e 31 *Workers* em paralelo. A melhor solução encontrada pelo algoritmo de Kruskal em software utilizando a heurística de pesos para o sistema de 470 barras possui perdas de 2350,003 kW e foi obtida em 24,814 ms e utilizando o acelerador HP-RNP foi encontrada a mesma solução em 2,83 ms.

A Tabela 7 sintetiza a comparação de alguns métodos da literatura que utilizaram o sistema de 470 barras. A melhor solução para esse sistema é reportada em (BAYAT, 2013), em que os autores encontraram uma configuração com perdas 2349,38 kW em 19.04 ms. (AHMADI; MARTÍ, 2015) obtiveram uma configuração com perdas de 2355,3 kW. Tais autores, não reportaram o tempo para a obtenção da solução. A partir do mapeamento do problema de redução de perdas em um dc-MSFP possibilitou obter uma configuração com perdas de 2.350,003 kW, correspondendo a uma solução próxima da melhor encontrada na literatura.

A melhor configuração encontrada por meio do algoritmo de Kruskal em *software* possui perdas de 4700,562 kW. Essa configuração foi encontrada em 109,090 ms. O acelerador em *hardware* obteve a mesma configuração obtida em *software*, porém com o tempo reduzido quando comparado as abordagens em *software*. A HP-RNP obteve a configuração em 5,65 ms (corresponde ao tempo de comunicação e gerar a configuração por meio dos *Workers*). A Tabela 8 sintetiza uma análise comparativa entre os dois métodos que utilizaram esse sistema-teste com o método proposto. Dentre os métodos existentes que utilizaram esse sistema, a melhor configuração foi encontrada em (BAYAT, 2013) com perdas de 4698,77 kW em tempo de execução de 96.400 ms, enquanto que em (JABR; SINGH; PAL, 2012) obtiveram a solução com 2350,74 kW em 18.000 ms.

Tabela 7 – Resultados para sistema de 470 barras e comparação entre diferentes métodos

Sistema-teste de 470 barras (Perdas da configuração inicial = 2659,97 kW)						
Método	Chaves abertas	Perdas finais (kW)	Tempo PC (ms)	Tempo Workers + Com. (ms)	Hardware	
(JABR; SINGH; PAL, 2012)	ND	2350,74	18.000	—	Core I7 1,73 GHz 6GB RAM	
(AHMADI; MARTÍ, 2015)	Apêndice C	2355,3	ND	—	Core I7-2600 3400 MHz 8 GB (RAM)	
(BAYAT, 2013)	Apêndice C	2349,38	19.040	—	Core 2 Duo 2,8 GHz 4 GB RAM	
Proposto	Apêndice C	2350,003	24,814	2,83	Core I5-3210, 2,5 GHz- 6GB RAM	

Tabela 8 – Resultados para sistema de 940 barras e comparação entre diferentes métodos

Sistema-teste de 940 barras (Perdas da configuração inicial = 5319,94 kW)						
Método	Chaves abertas	Perdas finais (kW)	Tempo PC (ms)	Tempo Workers + Com. (ms)	Hardware	
(JABR; SINGH; PAL, 2012)	ND	4701,94	18.000	—	Core I7 1,73 GHz 6GB RAM	
(BAYAT, 2013)	Apêndice C	4698,77	96.400	—	Core 2 Duo 2,8 GHz 4 GB RAM	
Proposto	Apêndice C	4700,562	109.09	5,65	CoreI5-3210, 2,5 GHz- 6GB RAM

Figura 27 – Configurações iniciais dos sistemas-teste de 470 e 940 barras.

7.6 Análise de tempos utilizando a HP-RNP e em *software*

Nesta seção é apresentado o desempenho em termos de tempo para obtenção das soluções utilizando o método proposto para os sistemas-teste, utilizando a HP-RNP e o algoritmo de árvore geradora mínima de Kruskal.

7.6.1 Resultados para a HP-RNP

O Figura 28 ilustra o tempo médio computacional requerido para a HP-RNP gerar novas configurações para redes de diferentes tamanhos. O tempo médio de processamento da HP-RNP é limitado por uma função constante havendo $\sqrt{n}$ ou mais de árvores, em que n é o número de nós. A Tabela 11 reporta as quantidades de *Workers* e alimentadores para cada sistema. Ressalta-se que usualmente a quantidade de alimentadores crescem de acordo com o tamanho do sistema, porém, alguns SDs possuem um grande número de barras e poucos alimentadores, alimentadores mais longos, tal característica não favorece para a redução de perdas. Assim, existe um limitante no número de barras de cada alimentador, uma vez que não crescem proporcionalmente. Neste

trabalho, a maioria dos SDs não possuem a quantidade $\sqrt{n}$ alimentadores (árvores), nesse sentido o gráfico apresentado mostra que o tempo médio de processamento dos *Workers* é menor para sistemas de 470 e 940 barras e maior para sistemas menores, isso está diretamente relacionado a quantidade de alimentadores nos SDs. Por exemplo, os sistemas de 143, 470, e 940 barras possuem 8, 55, 110 árvores respectivamente. Além disso, os sistemas maiores possuem maior quantidade de *Workers* em paralelo executando o algoritmo do operador PAO em paralelo, por essa razão houve a redução do tempo para sistemas maiores. Entretanto, o tempo médio será limitado por uma constante.

A comunicação entre o PC e o FPGA é realizado via um barramento de comunicação *ethernet*. A partir do barramento de comunicação os dados de entrada necessários são enviados para execução dos *Workers* na HP-RNP. A Tabela 9 sintetiza o tempos de comunicação dividido em tempo de escrita e tempo de leitura. Os tempos dos *Workers* também são reportados, destaca-se que o tempo dos *Workers* representa o tempo para o processo de reconfiguração de redes.

Tabela 9 – Tempo dos Workers e tempo de comunicação para cada sistema-teste.

Sistemas	Workers (s)	Escrita (s)	Leitura (s)	Comunicação (s)	Workers + Com. (s)
16	4,080E-06	3,261E-06	1,918E-05	2,244E-05	2,652E-05
70	8,350E-06	1,867E-05	1,098E-04	1,285E-04	1,369E-04
94	5,940E-06	6,681E-05	3,931E-04	4,599E-04	4,658E-04
143	8,740E-06	7,365E-05	4,333E-04	5,070E-04	5,157E-04
470	6,280E-06	5,275E-05	2,772E-03	2,825E-03	2,831E-03
940	7,379E-06	1,055E-04	5,545E-03	5,650E-03	5,658E-03

Figura 28 – Tempo médio por *Worker* da HP-RNP Figura 29 – Tempo total dos *Workers* da HP-RNP

7.7 Avaliação da qualidade das soluções

A Tabela 10 apresenta uma análise relativa a distância do valor ótimo (GAP) entre o método proposto e outros métodos. Os valores apresentados na Tabela 10 mostram a diferença entre a heurística de pesos proposta e as melhores configurações encontradas e as configurações obtidas por uma heurística de pesos baseada em resistência. A resistência foi escolhida, pois é uma das grandezas que tem maior influência sobre as perdas. Em geral, o uso exclusivo da resistência como peso produz soluções com perdas mais altas que a solução inicial, uma vez que, os valores das resistências podem ser altos próximos à subestação, gerando um peso alto em regiões de altos níveis. Dessa forma, os nós em altos níveis podem ser desconectados, isolando uma subestação.

Assim, o ganho relativo heurística de pesos baseada em resistência em relação a heurística de pesos baseada em informações de níveis e cargas possibilitam a obtenção de soluções melhores (mais próximas de soluções ótimas), todavia não garantem obter a configuração ótima. Na Tabela 10 são apresentados os valores das perdas para as seguintes configurações, obtida por meio da HP-RNP, algoritmo de Kruskal em *software*, a melhor configuração da literatura e a configuração encontrada considerando os valores de resistência como pesos.

Tabela 10 – Análise relativa ao *gap* entre as perdas das configurações obtidas através do método proposto, melhor configuração encontrada e heurística de peso baseada na resistência (R).

Sistema	<i>gap</i> (kW)	<i>gap</i> (%)	<i>gap</i> (kW)	<i>gap</i> (kW)	Ganho relativo (kW)
	(H. Prop.) – (Melhor)	(H. Prop.) – (Melhor)	(H. R) – (Melhor)	(H. R) – (H. Prop.)	$\frac{(gap \text{ H. R})}{(gap \text{ H. Prop.)}}$
16	0	0%	213,9	213,9	∞
70	0,838	0,42%	1852,368	1851,53	2210,463
94	0,176	0,04%	920,37	920,194	5229,375
143	19,65	7,02%	1644,53	1624,88	83,691
470	0,623	0,03%	4604,92	4604,297	7391,525
940	1,792	0,04%	9203,87	9202,078	5136,088

Tabela 11 – Número de barras no sistema-teste por número de *Workers* e alimentadores.

NDoutora de barras (sistema)	Alimentadores (nDoutora de árvores)	Workers
16	3	4
70	4	9
94	11	10
143	8	12
470	55	22
940	110	31

7.8 Considerações Finais

Neste Capítulo foram apresentados os resultados obtidos a partir da extensão da HP-RNP com as modificações do barramento de comunicação *ethernet* e o mapeamento do problema de perdas em um dc-MSFP por meio de uma heurística de pesos baseada em grandezas elétricas. A partir do método proposto foram obtidas soluções próximas ao ótimo. Os níveis dos nós e a localização de cargas altas em um alimentador foram determinantes para a obtenção de soluções de boa qualidade. Além disso, o tempo para a obtenção da solução deve-se ao acelerador em *hardware*, que a partir da extensão da HP-RNP e o mapeamento foram encontradas soluções em tempo limitado por uma constante.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho foi proposta a extensão da HP-RNP desenvolvida em (GOIS, 2011) a partir de modificações do barramento de comunicação para a transferência dos dados de forma eficiente, assim, viabilizando lidar com o problema de minimização de perdas via reconfiguração de redes, utilizando a HP-RNP como acelerador em *hardware*. Além disso, foi proposto o mapeamento do problema de minimização de perdas via reconfiguração de redes de distribuição de energia em um dc-MSFP utilizando a arquitetura HP-RNP como um acelerador do processo de reconfiguração de redes por meio de uma heurística de pesos baseada em grandezas elétricas.

Dessa forma, com o estudo das principais características elétricas e topológicas de um SD, foi possível construir uma heurística de pesos que possibilita a obtenção de soluções próximas da melhor encontrada na literatura em tempo médio limitado por uma constante utilizando a HP-RNP como acelerador do processo de reconfiguração de redes. Ressalta-se, que a solução obtida a partir da heurística de pesos, ainda que algumas vezes não seja a melhor encontrada na literatura, ela pode ser utilizada como ponto de partida (solução inicial) para outros métodos de otimização, como por exemplo algoritmos evolutivos, possibilitando aumentar o desempenho desses métodos em termos de tempo computacional, principalmente para sistemas de larga-escala. Além disso, a utilização da solução obtida por meio da HP-RNP, como solução inicial para outros métodos, pode reduzir significativamente o número de mudança dos estados das chaves para a obtenção de melhores soluções.

A principal vantagem da HP-RNP utilizando o dc-MSFP em relação ao algoritmo de Kruskal é a possibilidade de se obter soluções com qualidades similares, porém, em tempo médio limitado por uma constante $O(1)$. Em contrapartida, o algoritmo de Kruskal paralelizado em *hardware* possui complexidade de tempo $O(\sqrt{n} \log n)$, em que n é o número de nós.

A partir da análise das configurações de rede obtidas pela heurística de pesos, observou-se que o grau é um indicador importante para a redução de perdas, uma vez que o mesmo representa um acúmulo de cargas em um único nó e a localização desses nós pode influenciar

significativamente no aumento das perdas em um SD. Entretanto, para os sistemas testados, foi observado que o grau máximo dos nós das configuração iniciais e das configurações obtidas eram mantidos. Uma vez que, o grau máximo dos nós da configuração inicial é relativamente baixo. Por outro lado, verificou-se que a variação ocorreu na quantidade de nós que possuem o grau alto, o número de nós com grau alto foi reduzido. Além disso, as profundidades desses nós com grau alto também foram significativamente reduzidas. Assim, uma maneira de melhorar o desempenho da HP-RNP para a obtenção de melhores soluções seria o uso de restrições que envolvem tanto a informação de número de nós com grau alto bem como suas profundidades.

Este trabalho contribui positivamente para literatura da área, uma vez que não se tem muitas abordagens com implementação híbrida de *software* e *hardware* para o problema de reconfiguração de redes, utilizando técnicas de paralelização em FPGAs e heurística de pesos em *software*. Embora o foco deste trabalho seja o problema de reconfiguração de redes para redução de perdas, as soluções obtidas a partir do método proposto neste projeto podem auxiliar na busca por soluções para o problema de restabelecimento de energia.

Os resultados mostraram que a partir da heurística de pesos aplicada em HP-RNP foi possível encontrar soluções de qualidade (perdas), por exemplo, para o sistema de 940 barras (maior testado) a HP-RNP encontrou solução próxima do ótimo de 5,65 ms enquanto que em (BAYAT, 2013) encontrou uma solução melhor em 96,4 s. É importante ressaltar que a proposição deste trabalho, para lidar com a reconfiguração de redes para redução de perdas, é a primeira abordagem na literatura da área, sendo uma das contribuições deste trabalho.

8.1 Perspectivas futuras

A partir deste trabalho, pode-se sugerir algumas melhorias para a continuidade desta pesquisa, algumas das melhorias são listadas a seguir:

1. Utilizar as soluções obtidas por meio da heurística de pesos como soluções iniciais para serem reavaliadas no algoritmo proposto no grupo de pesquisa do Laboratório de Análise Computacional em Sistemas Elétricos de Potência (LACo-SEP), como por exemplo, o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo com subpopulações de Tabelas (AEMT) de modo a preservar a diversidade das soluções, enviando mais de uma solução para o AEMT e reavaliando de modo a obter soluções ótimas ou próximas da ótima.
2. Implementar uma variação do dc-MSFP, a partir de uma heurística de grau-profundidade (número de nós com grau máximo combinado as suas profundidades).
3. Implementar um algoritmo de busca exaustiva em FPGA, expandindo a aplicação para lidar com o problema multiobjetivo, como por exemplo, planejamento, balanceamento de carga e restabelecimento de energia.

4. Testar a heurística de pesos para sistemas de distribuição reais e maiores, como por exemplo, os sistemas de São Carlos e Londrina.
5. Investigar a extensão para a HP-RNP paralelizada em um *cluster* de FPGAs, e/ou a migração para novas plataformas aceleradoras, como por exemplo, a nova H Xeon+FPGA, o que melhoraria significativamente os tempos de comunicação.

8.2 Artigos publicados

Os artigos científicos relacionados com este trabalho de doutorado que foram publicados até o momento são listados a seguir.

- **A parallel hardware architecture based on node-depth encoding to solve network design problems.** International Journal of Natural Computing Research, 2014.
- **Implementation of an Evolutionary Algorithm Using the Node-Depth-Degree Encoding in a Nios II processor in FPGA..** In: International Conference on Artificial Intelligence, 2014, Las Vegas. Proceedings of ICAI'14, 2014.
- **Representation of Evolutionary Algorithms in FPGA Cluster for Project of Large-Scale Networks.** In: Escola Regional de Alto Desempenho de São Paulo, 2014, São Paulo. Anais do ERAD-SP 2014.
- **Multi-objective Evolutionary Algorithm with Node-Depth Encoding and Strength Pareto for Service Restoration in Large-scale Distribution Systems.** In: 7th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 2013, Sheffield. Lecture Notes in Computer Science, 2013. v. 7811. p. 771-786.
- **Multi-objective Evolutionary Algorithm with non-dominated solutions and Strength Pareto subpopulation tables for Service Restoration in Distribution Systems.** In: 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2013, Vancouver.

Apêndices

DADOS DOS SISTEMAS-TESTE

Neste apêndice são apresentados os dados dos sistemas-teste (redes) encontrados na literatura. Tais sistemas foram utilizados para validar o método proposto descrito no Capítulo 6. Os sistemas utilizados foram os de 16 barras (CIVANLAR *et al.*, 1988), 70 barras (DAS, 2006), 94 barras (CHIOU; CHANG; SU, 2005), 143 barras (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000), 470 barras (JABR; SINGH; PAL, 2012) e 940 barras (JABR; SINGH; PAL, 2012).

A.1 Sistema 16 barras

O sistema de 16 barras contém 3 alimentadores, 13 chaves NF e 3 chaves NA. A tensão da subestação é de 23 kV e potência base 100 MVA.

A.2 Sistema de 70 barras

O sistema de 70 barras contém 4 alimentadores, 78 ramos, das quais 11 são chaves NA. A tensão da subestação é de 11 kV.

Tabela 13 – Sistema de 70 barras

Ramo	De i	Para j	R_{ij} (kohm)	X_{ij} (kohm)	P_j (kW)	Q_j (kVAr)
1	0	2	0,001097	0,001074	100	90
2	2	3	0,001463	0,001432	60	40
3	3	4	0,000731	0,000716	150	130
4	4	5	0,000366	0,000358	75	50
5	5	6	0,001828	0,00179	15	9
6	6	7	0,001097	0,001074	18	14
7	7	8	0,000731	0,000716	13	10
8	8	9	0,000731	0,000716	16	11

9	4	10	0,00108	0,000734	20	10
10	10	11	0,00162	0,001101	16	9
11	11	12	0,00108	0,000734	50	40
12	12	13	0,00135	0,000917	105	90
13	13	14	0,00081	0,00055	25	15
14	14	15	0,001944	0,001321	40	25
15	7	68	0,00108	0,000734	100	60
16	68	69	0,00162	0,001101	40	30
17	1	16	0,001097	0,001074	60	30
18	16	17	0,000366	0,000358	40	25
19	17	18	0,001463	0,001432	15	9
20	18	19	0,000914	0,000895	13	7
21	19	20	0,000804	0,000787	30	20
22	20	21	0,001133	0,00111	90	50
23	21	22	0,000475	0,000465	50	30
24	17	23	0,002214	0,001505	60	40
25	23	24	0,00162	0,00111	100	80
26	24	25	0,00108	0,000734	80	65
27	25	26	0,00054	0,000367	100	60
28	26	27	0,00054	0,000367	100	55
29	27	28	0,00108	0,000734	120	70
30	28	29	0,00108	0,000734	105	70
31	70	30	0,000366	0,000358	80	50
32	30	31	0,000731	0,000716	60	40
33	31	32	0,000731	0,000716	13	8
34	32	33	0,000804	0,000787	16	9
35	33	34	0,00117	0,001145	50	30
36	34	35	0,000768	0,000752	40	28
37	35	36	0,000731	0,000716	60	40
38	36	37	0,001097	0,001074	40	30
39	37	38	0,001463	0,001432	30	25
40	32	39	0,00108	0,000734	150	100
41	39	40	0,00054	0,000367	60	35
42	40	41	0,00108	0,000734	120	70
43	41	42	0,001836	0,001248	90	60
44	42	43	0,001296	0,000881	18	10
45	40	44	0,001188	0,000807	16	10
46	44	45	0,00054	0,000367	100	50
47	42	46	0,00108	0,000734	60	40

48	35	47	0,00054	0,000367	90	70
49	47	48	0,00108	0,000734	85	55
50	48	49	0,00108	0,000734	100	70
51	49	50	0,00108	0,000734	140	90
52	71	51	0,000366	0,000358	60	40
53	51	52	0,001463	0,001432	20	11
54	52	53	0,001463	0,001432	40	30
55	53	54	0,000914	0,000895	36	24
56	54	55	0,001097	0,001074	30	20
57	55	56	0,001097	0,001074	43	30
58	52	57	0,00027	0,000183	80	50
59	57	58	0,00027	0,000183	240	120
60	58	59	0,00081	0,00055	125	110
61	59	60	0,001296	0,000881	25	10
62	55	61	0,001188	0,000807	10	5
63	61	62	0,001188	0,000807	150	130
64	62	63	0,00081	0,00055	50	30
65	63	64	0,00162	0,001101	30	20
66	62	65	0,00108	0,000734	130	120
67	65	66	0,00054	0,000367	150	130
68	66	67	0,00108	0,000734	25	15

Chaves abertas

69	9	50	0,000908	0,000726	—	—
70	9	38	0,000381	0,000244	—	—
71	15	46	0,000681	0,000544	—	—
72	22	67	0,000254	0,000203	—	—
73	29	64	0,000254	0,000203	—	—
74	45	60	0,000254	0,000203	—	—
75	43	38	0,000454	0,000363	—	—
76	39	59	0,000454	0,000363	—	—
77	21	27	0,000454	0,000363	—	—
78	15	9	0,000681	0,000544	—	—
79	67	15	0,000454	0,000363	—	—

A.3 Sistema de 94 barras

Esse sistema possui 94 barras, 13 chaves de interconexão, tensão de 11,4kV e potência base de 100MVA.

Tabela 12 – Sistema de 16 barras

Ramo	De i	Para j	R_{ij} (P.U.)	X_{ij} (P.U.)	P_j (MW)	Q_j (MVar)	C_j (MVar)
1	1	4	0,075	0,1	2	1,6	
2	4	5	0,08	0,11	3	1,5	1,1
3	4	6	0,09	0,18	2	0,8	1,2
4	6	7	0,04	0,04	1,5	1,2	
5	2	8	0,11	0,11	4	2,7	
6	8	9	0,08	0,11	5	3	1,2
7	8	10	0,11	0,11	1	0,9	
8	9	11	0,11	0,11	0,6	0,1	0,6
9	9	12	0,08	0,11	4,5	2	3,7
10	3	13	0,11	0,11	1	0,9	
11	13	14	0,09	0,12	1	0,7	1,8
12	13	15	0,08	0,11	1	0,9	
13	15	16	0,04	0,04	2,1	1	1,8
Chaves abertas							
14	5	11	0,04	0,04	—	—	—
15	10	14	0,04	0,04	—	—	—
16	7	16	0,09	0,12	—	—	—

Tabela 14 – Sistema de 94 barras

Ramo	De i	Para j	R_{ij} (kohm)	X_{ij} (kohm)	P_j (kW)	Q_j (kVar)
1	0	11	0,000194	0,000662	0	0
2	11	12	0,00021	0,00043	100	50
3	12	13	0,000236	0,000484	300	200
4	13	14	9,17E-05	0,000188	350	250
5	14	15	0,00021	0,00043	220	100
6	15	16	3,93E-05	8,07E-05	1100	800
7	16	17	4,05E-05	0,000138	400	320
8	17	18	0,000105	0,000215	300	200
9	17	19	0,000236	0,000484	300	230
10	17	20	0,000105	0,000215	300	260
11	1	21	7,86E-05	0,000161	0	0
12	21	22	0,000341	0,000694	1200	800
13	22	23	2,62E-05	5,38E-05	800	600
14	22	24	7,86E-05	0,000161	700	500
15	2	25	0,000113	0,000386	0	0
16	25	26	5,24E-05	0,000108	300	150
17	26	27	5,24E-05	0,000108	500	350
18	27	28	0,000157	0,000323	700	400
19	28	29	3,93E-05	8,07E-05	1200	1000

20	29	30	0,00017	0,00035	300	300
21	30	31	0,000236	0,000484	400	350
22	31	32	0,000157	0,000323	50	20
23	31	33	0,000197	0,000404	50	20
24	33	34	0,000131	0,000269	50	10
25	3	35	5,67E-05	0,000193	50	30
26	35	36	0,000105	0,000215	100	60
27	36	37	0,000249	0,000511	100	70
28	37	38	4,86E-05	0,000166	1800	1300
29	38	39	0,000131	0,000269	200	120
30	4	40	0,000197	0,000396	0	0
31	40	41	0,000131	0,000269	1800	1600
32	41	42	0,000131	0,000269	200	150
33	42	43	2,62E-05	5,38E-05	200	100
34	43	44	0,00017	0,00035	800	600
35	44	45	5,24E-05	0,000108	100	60
36	45	46	0,000498	0,001022	100	60
37	46	47	3,93E-05	8,07E-05	20	10
38	47	48	3,93E-05	8,07E-05	20	10
39	48	49	7,86E-05	0,000161	20	10
40	49	50	0,00021	0,00043	20	10
41	48	51	0,000197	0,000404	200	160
42	51	52	0,00021	0,00043	50	30
43	5	53	4,86E-05	0,000166	0	0
44	53	54	3,93E-05	8,07E-05	30	20
45	54	55	0,000131	0,000269	800	700
46	55	56	0,000236	0,000484	200	150
47	6	57	0,000243	0,000828	0	0
48	57	58	6,55E-05	0,000135	0	0
49	58	59	6,55E-05	0,000135	0	0
50	59	60	3,93E-05	8,07E-05	200	160
51	60	61	7,86E-05	0,000161	800	600
52	61	62	3,93E-05	8,07E-05	500	300
53	62	63	7,86E-05	0,000161	500	350
54	63	64	5,24E-05	0,000108	500	300
55	64	65	0,000131	0,000269	200	80
56	7	66	0,000227	0,000773	0	0
57	66	67	0,000537	0,001103	30	20
58	67	68	5,24E-05	0,000108	600	420

59	68	69	4,05E-05	0,000138	0	0
60	69	70	3,93E-05	8,07E-05	20	10
61	70	71	2,62E-05	5,38E-05	20	10
62	71	72	0,000105	0,000215	200	130
63	72	73	0,000236	0,000484	300	240
64	73	74	2,43E-05	8,28E-05	300	200
65	8	75	4,86E-05	0,000166	0	0
66	75	76	0,00017	0,00035	50	30
67	76	77	0,000122	0,000414	0	0
68	77	78	0,000219	0,000745	400	360
69	78	79	4,86E-05	0,000166	0	0
70	79	80	7,29E-05	0,000248	0	0
71	80	81	5,67E-05	0,000193	2000	1500
72	81	82	2,62E-05	5,28E-05	200	150
73	9	83	0,000324	0,001104	0	0
74	83	84	3,24E-05	0,00011	0	0
75	84	85	5,67E-05	0,000193	1200	950
76	85	86	4,86E-05	0,000166	300	180
77	10	87	0,000251	0,000856	0	0
78	87	88	0,00013	0,000442	400	360
79	88	89	4,86E-05	0,000166	2000	1300
80	89	90	0,000131	0,000264	200	140
81	90	91	0,000131	0,000264	500	360
82	91	92	9,17E-05	0,000188	100	30
83	92	93	0,000314	0,000646	400	360
Chaves abertas						
84	15	65	0,000131	0,000269	—	—
85	17	70	0,000131	0,000269	—	—
86	21	53	0,000131	0,000269	—	—
87	22	82	0,000341	0,000699	—	—
88	23	86	0,000459	0,000942	—	—
89	24	28	0,000537	0,001082	—	—
90	26	36	9,17E-05	0,000188	—	—
91	30	93	7,86E-05	0,000161	—	—
92	38	42	5,24E-05	0,000108	—	—
93	39	49	7,86E-05	0,000161	—	—
94	44	56	2,62E-05	5,38E-05	—	—
95	50	52	0,000197	0,000404	—	—
96	63	74	3,93E-05	8,07E-05	—	—

A.4 Sistema de 143 barras

O sistema de 143 barras contém 8 alimentadores e 21 chaves normalmente abertas (MAN-TOVANI; CASARI; ROMERO, 2000), tensão de 13,8 kV e potência base de 100 MVA. Os dados do sistema são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Sistema de 143 barras

Ramo	De i	Para j	R_{ij} (kohm)	X_{ij} (kohm)	P_j (kW)	Q_j (kVAr)
0	0	1	0,00033205	0,00076653	0	0
1	1	2	0,00000188	0,00000433	47,78	19,009
2	2	3	0,0002234	0,00051535	42,551	16,929
3	3	4	0,00009943	0,00022953	87,022	34,622
4	4	5	0,00015571	0,00035945	311,31	123,855
5	5	6	0,00016321	0,00037677	148,869	59,228
6	6	7	0,00011444	0,00026417	238,672	94,956
7	6	8	0,00005675	0,00005666	62,299	24,786
8	8	9	0,00052124	0,00027418	124,598	49,571
9	8	10	0,00010877	0,0001086	140,175	55,768
10	10	11	0,00039803	0,00020937	116,813	46,474
11	10	12	0,00091744	0,00031469	249,203	99,145
12	10	13	0,00011823	0,00011805	291,447	115,592
13	13	14	0,00050228	0,00026421	303,72	120,835
14	13	15	0,00005675	0,00005666	215,396	85,695
15	15	16	0,00029379	0,00015454	198,586	79,007
16	136	17	0,00033205	0,00076653	0	0
17	17	18	0,00000188	0,00000433	0	0
18	18	19	0,00022324	0,00051535	0	0
19	19	20	0,00010881	0,00025118	30,127	14,729
20	20	21	0,00071078	0,00037388	230,972	112,92
21	20	22	0,00018197	0,00042008	60,256	29,459
22	22	23	0,00030326	0,00015952	230,972	112,92
23	22	24	0,00002439	0,0000563	120,507	58,915
24	24	25	0,00004502	0,00010394	0	0
25	25	26	0,00001876	0,00004331	56,981	27,857
26	26	27	0,00011823	0,0001123	364,665	178,281
27	27	28	0,00002365	0,00002361	0	0
28	28	29	0,00018954	0,0000997	124,647	60,939
29	29	30	0,00039803	0,00020937	56,981	27,857
30	28	31	0,00005675	0,00005666	0	0
31	31	32	0,00009477	0,00004985	85,473	41,787

32	32	33	0,00041699	0,00021934	0	0
33	33	34	0,00011372	0,00005982	396,735	193,96
34	31	35	0,00007566	0,00007555	0	0
35	35	36	0,0003696	0,00019442	181,152	88,563
36	36	37	0,00026536	0,00013958	242,172	118,395
37	35	38	0,00005675	0,0000566	75,316	36,821
38	137	39	0,00033205	0,00076653	0	0
39	39	40	0,00011819	0,00027283	1,254	0,531
40	40	41	0,00296288	0,00101628	6,274	2,66
41	40	42	0,00000188	0,00000433	0	0
42	42	43	0,00006941	0,00016024	117,88	49,971
43	43	44	0,00081502	0,00042872	62,668	25,566
44	43	45	0,00006378	0,00014724	172,285	73,034
45	45	46	0,00013132	0,00030315	458,556	194,388
46	46	47	0,00006191	0,00014291	262,962	111,473
47	47	48	0,00011444	0,00026417	235,761	99,942
48	48	49	0,00028374	0,00028331	0	0
49	49	50	0,00028374	0,00028321	109,215	46,298
50	48	51	0,00004502	0,00010394	0	0
51	51	52	0,00002626	0,00006063	72,809	30,865
52	52	53	0,00006003	0,00013858	258,473	109,57
53	53	54	0,00003002	0,00006929	69,169	29,322
54	54	55	0,00002064	0,00004764	21,843	9,26
55	52	56	0,00010881	0,00025118	0	0
56	56	57	0,00025588	0,0001346	20,527	8,702
57	57	58	0,00041699	0,00021934	150,548	63,819
58	58	59	0,00050228	0,00026421	220,687	93,552
59	59	60	0,0003317	0,00017448	92,384	39,163
60	60	61	0,00020849	0,00010967	0	0
61	47	62	0,00013882	0,00032047	226,693	96,098
62	138	63	0,0000075	0,00001732	0	0
63	63	64	0,00027014	0,00062362	294,016	116,974
64	64	65	0,0003827	0,00088346	83,015	33,028
65	65	66	0,00033018	0,0007622	83,015	33,028
66	66	67	0,0003283	0,00075787	103,77	41,285
67	67	68	0,00017072	0,00039409	176,408	70,184
68	68	69	0,00055914	0,00029412	83,015	33,028
69	68	70	0,00005816	0,00013425	217,917	86,698
70	70	71	0,0007013	0,0003689	23,294	9,267

71	71	72	0,00102352	0,00053839	5,075	2,019
72	70	73	0,00006754	0,00015591	72,638	28,899
73	73	74	0,00132352	0,00045397	405,99	161,523
74	139	75	0,00001126	0,00002598	0	0
75	75	76	0,00072976	0,00168464	100,182	42,468
76	76	77	0,00022512	0,00051968	142,523	60,417
77	77	78	0,00020824	0,00048071	96,042	40,713
78	78	79	0,0000469	0,00010827	300,454	127,366
79	79	80	0,0006195	0,00061857	141,238	59,873
80	80	81	0,00034049	0,00033998	279,847	118,631
81	81	82	0,00056862	0,00029911	87,312	37,013
82	81	83	0,00010877	0,0001086	243,849	103,371
83	83	84	0,00056862	0,00029911	247,75	105,025
84	140	85	0,00001126	0,00002598	0	0
85	85	86	0,00041835	0,00096575	89,878	38,101
86	86	87	0,00010499	0,00013641	1137,28	482,108
87	86	88	0,00043898	0,00101338	458,339	194,296
88	88	89	0,0000752	0,00002579	385,197	163,29
89	89	90	0,00007692	0,00017756	0	0
90	90	91	0,00033205	0,00076653	79,608	33,747
91	91	92	0,00008442	0,00019488	87,312	37,013
92	92	93	0,0001332	0,00030748	0	0
93	93	94	0,0002932	0,00029276	74,001	31,37
94	94	95	0,00021753	0,00021721	232,05	98,369
95	95	96	0,00026482	0,00026443	141,819	60,119
96	93	97	0,00010318	0,00023819	0	0
97	97	98	0,00013507	0,00031181	76,449	32,408
98	141	99	0,00000938	0,00002165	0	0
99	99	100	0,00016884	0,00038976	51,322	21,756
100	100	101	0,00011819	0,00027283	59,874	25,381
101	101	102	0,00228608	0,00078414	9,065	3,843
102	101	103	0,00045587	0,00105236	2,092	0,887
103	103	104	0,000696	0,00160669	16,735	7,094
104	104	105	0,00045774	0,00105669	1506,522	638,634
105	105	106	0,00020298	0,00026373	313,023	132,694
106	106	107	0,00021348	0,00027737	79,831	33,842
107	107	108	0,00054967	0,00028914	51,322	21,756
108	108	109	0,00054019	0,00028415	0	0
109	107	110	0,0000455	0,00005911	202,435	85,815

110	110	111	0,00047385	0,00024926	60,823	25,874
111	111	112	0,00086241	0,00045364	45,618	19,338
112	112	113	0,00056862	0,00029911	0	0
113	108	114	0,00077711	0,00040878	157,07	66,584
114	114	115	0,00108038	0,0005683	0	0
115	109	116	0,00106633	0,00057827	250,148	106,041
116	116	117	0,00047385	0,00024926	0	0
117	104	118	0,00032267	0,00074488	68,809	28,593
118	118	119	0,00014633	0,00033779	32,072	13,596
119	119	120	0,00012382	0,00028583	61,084	25,894
120	142	121	0,00001126	0,00002598	0	0
121	121	122	0,0006491	0,00149842	94,622	46,26
122	122	123	0,00004502	0,00010394	49,858	24,375
123	123	124	0,0005264	0,00018056	123,164	60,214
124	123	125	0,00002064	0,00004764	78,35	38,304
125	125	126	0,00053071	0,00027917	145,475	71,121
126	125	127	0,00009755	0,0002252	21,369	10,447
127	127	128	0,00011819	0,00027283	74,789	36,564
128	127	129	0,00013882	0,00032047	227,926	111,431
129	129	130	0,00004315	0,00009961	35,614	17,411
130	130	131	0,00009192	0,0002122	249,295	121,877
131	131	132	0,00016134	0,00037244	316,722	154,842
132	132	133	0,00037832	0,00037775	333,817	163,199
133	133	134	0,00039724	0,00039664	249,295	121,877
134	134	135	0,0002932	0,00029276	0	0

Chaves abertas

135	7	73	0,00013132	0,00030315
136	9	24	0,00026536	0,00013958
137	15	83	0,00014187	0,00014166
138	38	135	0,00008512	0,00008499
139	25	51	0,00004502	0,00010394
140	50	96	0,00014187	0,00014166
141	55	98	0,00014187	0,00014166
142	62	120	0,0000394	0,00009094
143	66	79	0,00012944	0,00029882
144	79	131	0,00001688	0,00003898
145	84	135	0,0003317	0,00017448
146	91	104	0,00014187	0,00017166
147	90	129	0,00007692	0,00017756

148	90	103	0,00007692	0,00017756
149	92	104	0,00007692	0,00017756
150	92	132	0,00007692	0,00017756
151	96	120	0,00026482	0,00026443
152	110	47	0,00049696	0,00064567
153	126	76	0,00017059	0,00008973
154	128	77	0,00005253	0,00012126
155	135	98	0,0002932	0,00029276

A.5 Sistema de 470 barras

O sistema de 470 barras é composto pelo sistema de 94 barras replicado 5 vezes, os dados das chaves adicionais de interligação entres os sistemas são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Chaves abertas adicionais para interconexão dos 5 sistemas de 94 barras.

Chaves abertas adicionais			
De i	Para j	R_{ij} (kohm)	X_{ij} (kohm)
18	112	0,000131	0,000269
32	126	0,000131	0,000269
113	207	0,000131	0,000269
127	221	0,000131	0,000269
208	302	0,000131	0,000269
222	316	0,000131	0,000269
345	439	0,000131	0,000269
352	446	0,000131	0,000269

A.6 Sistema de 940 barras

O sistema de 940 barras é composto pelo sistema de 94 barras replicado 10 vezes, os dados das chaves adicionais de interligação entres os sistemas são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Chaves abertas adicionais para interconexão dos 10 sistemas de 94 barras.

Chaves abertas adicionais			
De i	Para j	R_{ij} (kohm)	X_{ij} (kohm)
18	112	0,000131	0,000269
32	126	0,000131	0,000269
113	207	0,000131	0,000269
127	221	0,000131	0,000269
208	302	0,000131	0,000269
222	316	0,000131	0,000269
345	439	0,000131	0,000269
352	446	0,000131	0,000269
440	534	0,000131	0,000269
447	541	0,000131	0,000269
535	629	0,000131	0,000269
542	636	0,000131	0,000269
637	731	0,000131	0,000269
608	702	0,000131	0,000269
732	826	0,000131	0,000269
706	800	0,000131	0,000269
834	928	0,000131	0,000269
838	932	0,000131	0,000269

ANÁLISE DA IMPORTÂNCIA DO GRAU E DAS PROFUNDIDADES DAS CONFIGURAÇÕES ANTES E DEPOIS DA RECONFIGURAÇÃO DE REDES

Um estudo foi realizado com base no quanto algumas características como as profundidades (comprimento de alimentadores) e o grau (que pode ser visto como a quantidade de carga conectada em um único ponto) podem ser utilizados para redução de perdas. Nesse sentido, alguns sistemas-teste existentes na literatura foram analisados, quanto suas profundidades máximas e graus máximos das respectivas configurações iniciais (antes da reconfiguração) e das melhores configurações finais encontradas na literatura (depois da reconfiguração para redução de perdas). Esse estudo é descrito na seção a seguir.

B.1 Análise da importância do grau e da profundidade para a redução de perdas

Esse estudo foi realizado para verificar o quanto o grau e a profundidade de um nó é importante para a redução de perdas em um SD. Nessa análise foram considerados, os graus e as profundidades máximas das configurações iniciais e melhor encontrada na literatura. Além disso, verificou-se a região que possui os graus mais altos: próximo a subestação (profundidade baixa) e a partir do meio do alimentador para a extremidade (profundidades mais altas).

A partir disso, verificou-se que usualmente, o grau máximo dos nós das configurações iniciais e melhores encontradas é mantido, no entanto, o número de nós com grau máximo é reduzido. Outro ponto importante, é que em alguns casos o número de nós com grau alto tem suas profundidades reduzidas.

Por exemplo, os dados destacados na Tabela 18 para o sistema teste de 143 barras, na configuração inicial possui 16 nós com grau 3 e profundidades entre 6 a 12, após o processo de reconfiguração a melhor configuração passou a ter 14 nós com grau 3 e profundidades entre 6 e 10. Para este caso, foram reduzidos o número de nós com grau alto e também suas profundidades.

Ressalta-se que para alguns casos as configurações obtidas possuem um maior número de nós com grau alto, porém, com suas profundidades reduzidas. Baseado nisso, pode-se concluir que tanto o grau quanto a profundidades de um nó são importantes para a redução das perdas em um SD. A Figura 30 ilustra uma análise para as configurações inicial e melhor encontrada na literatura, em que o número de nós com o grau máximo e a profundidade máxima dessas configurações são analisadas. Para essa análise, foram somados os números de nós que possuem o primeiro e segundo maior valor de profundidade, e o mesmo é realizado para o número de nós com grau alto. A partir da análise do gráfico, pode-se verificar que da configuração inicial para a melhor encontrada, tanto o número de nós com profundidades altas quanto o número de nós com graus altos são reduzidos. Dessa forma, comprovando a importância do uso dessas informações para definição da heurística de pesos para lidar com a redução de perdas.

A Figura 31 apresenta um gráfico que distingue o número de nós com grau máximo por região. Em geral, a região que concentra a maior redução de nós com grau alto está localizada nas extremidades, nesse sentido, e para alguns casos as profundidades também são reduzidas.

Figura 30 – Comparação entre as configurações inicial e melhor encontrada na literatura, verificando o número de nós que possuem profundidades máximas e o número de nós que possuem o grau máximo.

A Tabela 18 sintetiza uma análise em relação ao grau para as configurações iniciais, melhores encontradas na literatura e obtidas pelo método proposto. Na tabela são reportados os graus máximos e profundidades máximas para a configuração inicial e final.

Figura 31 – Análise do número de nós com grau máximo por região, sendo a primeira metade mais próxima da subestação e a segunda metade mais distante.

Sist.	Configuração inicial			Configuração melhor encontrada			Configuração obtida		
	G. máx. (nº nós)	Nº nós (Região)	Prof. (nº nós)	G. máx. (nº nós)	Nº nós (Região)	Prof. (nº nós)	G. máx. (nº nós)	Nº nós (Região)	Prof. (nº nós)
16	3 (4 nós)	3 nós (prof.1) Próx. a raiz	3 (4 nós)	3 (2 nós)	2 nós (prof.1) Próx. a raiz	3 (4 nós)	3 (2 nós)	2 nós (prof.1) Próx. a raiz	3 (4 nós)
		1 nó (prof.2) Meio p/ folha ¹							
70	3 (10 nós)	4 nós (prof.2 e 3) Próx. a raiz	10 (2 nós)	3 (8 nós)	4 nós (prof.2,3) Próx. a raiz	10 (3 nós)	3 (9 nós)	4 nós (prof.2 e 3) Próx. a raiz	10 (1 nó)
		6 nós prof.(5, 6, 7) Meio p/ folha	9 (6 nós)		4 nós (prof.5,6,7) Meio p/ folha	9 (6 nós)		5 nós (prof.5,6,7) Meio p/ folha	9 (3 nós)
94	4 (1 nó)	1 Nó (Prof.7) Meio p/ folha ¹	11 (2 nós) 10 (2 nós)	4 (1 nó)	1 Nó (Prof. 6) Meio p/ folha ¹	10 (2 nós) 9 (3 nós)	4 (1 nó)	1 Nó (Prof.6) Meio p/ folha ¹	10 (1 nó) 9 (3 nós)
	3 (3 nós)	1 nó (prof.2) Próx. a raiz	9 (4 nós)	3 (6 nós)	1 nó (prof.2) Próx. a raiz		3 (6 nós)	1 nó (prof.2) Próx. a raiz	
143		2 nós (prof.7 e 9) Meio p/ folha			5 nós (prof.5,6 e 7) Meio p/ folha			5 nós (prof.5,6 e 7) Meio p/ folha	
	4 (1 nó)	1 nó (prof.8) Meio p/ folha	16 (1 nó)	4 (1 nó)	1 nó (prof.8) Meio p/ folha	15 (2 nós)	4 (2 nós)	2 nó (prof. 7 e 8) Meio p/ folha	15 (1 nós)
	3 (25 nós)	9 nós (prof.2-5) Próx. a raiz	15 (1 nó)	3 (24 nós)	10 nós (prof.2-5) Próx. a raiz	14 (3 nós)	3 (26 nós)	11 nós (prof.2-5) Próx. a raiz	14 (3 nós)
		16 nós (prof. 6-12) Meio p/ folha	14 (3 nós) 13 (5 nós)		14 nós (prof.6-10) Meio p/ folha	13 (4 nós)		15 nós (prof. 6-12) Meio p/ folha	13 (5 nós)
Continuação na próxima página									

470	4 (5 nós)	5 Nós (Prof.7) Meio p/ folha ¹	11 (10 nós) 10 (10 nós)	4 (5 nós)	5 Nós (Prof. 6) Meio p/ folha ¹	10 (10 nós) 9 (15 nós)	4 (5 nós)	5 nós (Prof.6) Meio p/ folha ¹	10 (5 nós) 9 (15 nós)
	3 (15 nós)	5 nós (Prof.2) Próx. a raiz	9 (20 nós)	3 (30 nós)	5 nós (Prof.2) Próx. a raiz		3 (30 nós)	5 nós (Prof.2) Próx. a raiz	
		10 nós (Prof.7 e 9) Meio p/ folha			25 nós (Prof.5,6 e 7) Meio p/ folha			25 nós (Prof.5,6 e 7) Meio p/ folha	
	4 (10 nós)	10 Nós (Prof.7) Meio p/ folha ¹	11 (20 nós) 10 (20 nós)	4 (10 nós)	10 Nós (Prof. 6) Meio p/ folha ¹	10 (20 nós) 9 (30 nós)	4 (10 nós)	10 nós (Prof.6) Meio p/ folha ¹	10 (10 nós) 9 (30 nós)
940	3 (30 nós)	10 nós (Prof.2) Próx. a raiz	9 (40 nós)	3 (60 nós)	10 nós (Prof.2) Próx. a raiz		3 (60 nós)	10 nós (Prof.2) Próx. a raiz	
		20 nós (Prof.7 e 9) Meio p/ folha			50 nós (Prof.5,6 e 7) Meio p/ folha			50 nós (Prof.5,6 e 7) Meio p/ folha	

¹ Sem chaves abertas

DADOS DOS SISTEMAS DE 470 E 940 BARRAS

Neste apêndice os resultados das configurações geradas para os sistemas de 470 barras e 940 barras e as comparações entre as configurações são apresentadas.

Tabela 19 – Resultados e comparação para o sistema de 470 barras

Sistema de 470 barras	
Método	Chaves abertas
(BAYAT, 2013)	7,13,34,39,42,55,62,72,83,90,96,117, 122,125, 138,145,155,166,173,179 200,205,208,221,228,238,249,256,262,283, 288,291,304,311,321,332,339,345,366,371 374,387,394,404,415,418,421,422,424, 431,434,435,437,444,447,448,450,457, 460,461, 448,450,457,460,461,463,470,473,474,476, 481,482,483,484,485,486,487,488
(AHMADI; MARTÍ, 2015)	7, 13, 34, 39, 42, 63, 72, 83, 84, 86, 89, 90, 92, 103, 109, 130, 135, 138, 159, 168, 179, 180, 182, 185, 186, 188, 199, 225, 231, 234, 255, 264, 274, 276, 278, 280, 281, 282, 284, 295, 321, 327, 330, 351, 360, 370, 372, 374, 376, 377, 378, 380, 391, 417, 423, 426, 447, 456, 466, 468, 470, 472, 473, 474, 476, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488
Proposto	7, 13, 34, 39, 42, 55, 63, 72, 83, 86, 89, 90, 92, 103, 109, 130, 135, 138, 151, 159, 168, 179, 182, 185, 186, 188, 199, 205, 226, 231, 234, 247, 255, 264, 275, 278, 281, 282, 284, 295, 301, 322, 327, 330, 343, 351, 360, 371, 374, 377, 378, 380, 391, 397, 418, 423, 426, 439, 447, 456, 467, 470, 473, 474, 476, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488

Tabela 20 – Resultados e comparação para o sistema de 940 barras

Sistema de 940 barras	
Método	Chaves abertas
(BAYAT, 2013)	7,13,34,39,42,55,62,72,83,90,96,117,122,125,138,145,155,166,173,179, 200,205,208,221, 228,238,249,256,262,283,288,291,304,311,321,332,339,345,366,371 374,387,394,404,415,422,428,449,454,457,470,477,487,498,505,511,532,537,540,553 560,570,581,588,594,615,620,623,636,643,653,664,671,677,698,703,706,719,726,736 747,754,760,781,786,789,802,809,819,830,833,836,837,839,846,849,850,852,859,862 863,865,872,875,876,878,885,888,889,891,896,897,898,899,900,901,902,903,906,909 910,912,919,922,923,925,932,935,936,938,945,948,949,951,958,961,962,964,969,970 971,972,973,974,975,976
Proposto	7,13,34,39,42,55,63,72,83,86,89,90,92,103,109,130,135,138,151,159, 168,179,182,185,186,188,199,205,226,231,234,247,255,264,275,278,281,282,284,295,301,322, 327,330,343,351,360,371,374,377,378,380,391,397,418,423,426,439,447,456,467,470,473,474, 476,481,482,483,484,485,486,487,488,495,501,522,527,530,543,551,560,571,574,577,578, 580,591,597,618,623,626,639,647,656,667,670,673,674,676,687,693,714,719,722,735, 743,752,763,766,769,770,772,783,789,810,815,818,831,839,848,859,862,865,866,868, 879,885,906,911,914,927, 935,944,955,958,961,962,964,969,970,971,972,973,974,975,976,977,978

EXTENSÃO DA HP-RNP PARA O PROBLEMA DE REDUÇÃO DE PERDAS VIA RECONFIGURAÇÃO DE REDES

Neste apêndice é mostrada a estrutura de escrita e leitura implementada a utilização do interface *ethernet*. Ressalta-se que além da biblioteca para utilização da interface *ethernet*, algumas adaptações na estrutura de dados para envio dos dados dos SDs foram necessárias para a redução do tempo de comunicação e viabilizar o uso da HP-RNP para o processo de reconfiguração de redes.

Para a estrutura implementada para escrita dos dados e leitura dos dados algumas modificações foram necessárias para tornar compatível os módulos HP-RNP e o *software* executado no NIOS. Uma vez que o NIOS é um sistema de 32 bits e o HP-RNP é um módulo de 64 bits.

A estrutura implementada em (GOIS, 2011) é ilustrada na Figura 32 e a estrutura modificada para tratar o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes é mostrada na Figura 33. Os tamanhos de cada variável são calculados de acordo com $(\text{Número de árvores} \times \text{Número de nós na configuração}) \times 8 \text{ bytes} + (\text{Número de árvores} \times 4) + (\text{Número de árvores} \times 4)$.

1. Definição dos tamanhos de cada variável e tamanhos do preenchimento em *bytes*.
2. O preenchimento (*Padding*) sempre será múltiplo de 8, pois é utilizado para compatibilizar NIOS e módulo PC; O NIOS é um sistema de 32 bits e o módulo PC possui 64 bits. Para que haja compatibilidade entre os dois sistemas, o preenchimento entre cada variável é definido de modo que as variáveis são sempre localizadas em um endereço múltiplo de 8 bytes na memória. A quantidade de bits a ser lido é dado pelo número de chamadas de *Workers* $\times 2$ (nós p e a) $\times 8 \text{ Bytes}$.

Observa-se que com a modificação da estrutura a quantidade dados (quantidade em bits) a serem escritos e lidos foi significativamente reduzida, com isso, também foi reduzido o tempo para escrita e leitura dos dados mesmo para redes maiores.

PC – 64 bits
Matriz de adjacências (tipo char)
(n x n) bytes
PAD (compatibilidade entre 64 bits (PC) e 32 bits (NIOS))
ADJ_PAD_SZ ((N * N) % 8)
Forest (tipo long int)
NUM_TREES * N * 8 bytes
Tree sizes (tipo int)
(NUM_TREES * 4) bytes
PAD_Tree sizes
((NUM_TREES * 4) % 8) bytes
Origens (Tipo int)
(NUM_TREES * 4) bytes
PAD_origens
((NUM_TREES * 4) % 8) bytes

Figura 32 – Estrutura original implementada em (GOIS, 2011).

Os termos utilizados na ilustração com seus significados são listados a seguir:

- Num_{trees} é o numero de árvores na floresta (forest).
- $Tree_{sizes}$ é o número de nós nas árvores da floresta.
- $ADJ_{PADSIZE}$ é uma variável para compatibilizar o módulo NIOS que é em 32 bits e o módulo HP-RNP de 64 bits.

Figura 33 – Estrutura modificada para viabilizar a HP-RNP para o problema de redução de perdas via reconfiguração de redes.

REFERÊNCIAS

ABABEI, C.; KAVASSERI, R. Efficient network reconfiguration using minimum cost maximum flow-based branch exchanges and random walks-based loss estimations. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 26, n. 1, p. 30–37, Feb 2011. ISSN 0885-8950. Citado 5 vezes nas páginas 21, 27, 32, 83 e 86.

AHMADI, H.; MARTÍ, J. R. Minimum-loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 1, p. 1 – 9, 2015. ISSN 2352-4677. Citado 10 vezes nas páginas 35, 82, 83, 84, 86, 88, 89, 90, 91 e 124.

AHUJA R., M. T.; ORLIN, J. **Network Flows: Theory, Algorithms and Applications**. [S.l.]: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993. Citado na página 41.

AMASIFEN, J. C. C.; ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. Algoritmos evolutivos dedicados à reconfiguração de redes radiais de distribuição sob demandas fixas e variáveis: estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 16, n. 3, p. 303–317, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 67.

AUGUGLIARO, A.; DUSONCHET, L.; FAVUZZA, S.; IPPOLITO, M.; SANSEVERINO, E. R. A backward sweep method for power flow solution in distribution networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 32, n. 4, p. 271 – 280, 2010. ISSN 0142-0615. Citado na página 44.

AUGUGLIARO, A.; DUSONCHET, L.; IPPOLITO, M.; MANGIONE, S.; SANSEVERINO, E. A modified backward/forward method for fast solving radial distribution networks. In: **Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 7 pp. Vol.2–. Citado na página 43.

BARAN, M.; WU, F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 1, p. 735–743, Jan 1989. ISSN 0885-8977. Citado 3 vezes nas páginas 11, 32 e 45.

BARBOSA, C. H. N. de R. **Reconfiguração e Restauração ótima de Sistemas de Distribuição Primárias de Energia Elétrica**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Dezembro 2012. Citado na página 31.

BAYAT, A. Uniform voltage distribution based constructive algorithm for optimal reconfiguration of electric distribution networks. **Electric Power Systems Research**, v. 104, n. 0, p. 146 – 155, 2013. ISSN 0378-7796. Citado 8 vezes nas páginas 80, 81, 90, 91, 92, 100, 124 e 125.

BENAYOUN J. DE MONTGOLFIER, J. T. R.; LARITCHEV, O. Linear programming with multiple objective functions: Step method (stem). **Journal Mathematical Programming**, v. 1, n. 1, p. 366–375, Dec. 1973. ISSN 0025-5610. Citado na página 33.

BENEDICT, E.; COLLINS, T.; GOTHAM, D.; HOFFMAN, S.; KARIPIDES, D.; PEKAREK, S.; RAMABHADHAN, R. **Losses in Electric Power Systems, ECE Technical Reports, Paper 266**. [S.l.], 1992. Citado na página 19.

BOBDA, C. **Introduction to Reconfigurable Computing: Architectures, Algorithms, and Applications**. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2007. ISBN 1402060882, 9781402060885. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 55.

BRAZ, H. de M.; SOUZA, B. de. Distribution network reconfiguration using genetic algorithms with sequential encoding: Subtractive and additive approaches. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 26, n. 2, p. 582–593, May 2011. ISSN 0885-8950. Citado na página 31.

CARRENO, E.; ROMERO, R.; PADILHA-FELTRIN, A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 4, p. 1542–1551, Nov 2008. ISSN 0885-8950. Citado 5 vezes nas páginas 21, 27, 30, 87 e 89.

CESPEDES, R. New method for the analysis of distribution networks. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 5, n. 1, p. 391–396, Jan 1990. ISSN 0885-8977. Citado na página 45.

CHIOU, J.-P.; CHANG, C.-F.; SU, C.-T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 20, n. 2, p. 668–674, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 105.

CHU, P.; BEASLEY, J. A genetic algorithm for the generalised assignment problem. **Computers & Operations Research**, v. 24, n. 1, p. 17 – 23, 1997. ISSN 0305-0548. Citado na página 30.

CIVANLAR, S.; GRAINGER, J.; YIN, H.; LEE, S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 3, p. 1217 –1223, jul 1988. ISSN 0885-8977. Citado 4 vezes nas páginas 30, 68, 79 e 105.

CORMEN, T. H. **Algoritmos: Teoria e Prática**. [S.l.]: Campus, 2002. Citado 5 vezes nas páginas 23, 24, 33, 56 e 65.

CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms, Second Edition**. [S.l.]: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2001. Hardcover. ISBN 0070131511. Citado na página 67.

DAS, D. A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 1, p. 202–209, Jan 2006. Citado 3 vezes nas páginas 79, 81 e 105.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. New York: Wiley, 2001. Citado na página 33.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. de. A forest representation for evolutionary algorithms applied to network design. In: **GECCO**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 634–635. Citado na página 50.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. de; POLICASTRO, C. A.; PINTO, A. K. O.; HONDA, K.; GARCIA, A. C. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design. In: **GECCO (1)**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 678–687. Citado 4 vezes nas páginas 22, 42, 51 e 52.

DOYLE, P.; SNELL, J. **Random walks and electric networks**. [S.l.]: Mathematical Association of America, 1984. (Carus mathematical monographs). ISBN 9780883850244. Citado na página [32](#).

EMINOGLU, U.; HOCAOGLU, M. H. Distribution systems forward/backward sweep-based power flow algorithms: A review and comparison study. **Electric Power Components and Systems**, v. 37, n. 1, p. 91–110, 2008. Citado na página [43](#).

GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness (Series of Books in the Mathematical Sciences)**. [S.l.]: W. H. Freeman, 1979. Paperback. ISBN 0716710455. Citado 2 vezes nas páginas [57](#) e [65](#).

GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. V. A new heuristic optimization algorithm: Harmony search. **Simulation**, v. 76, n. 2, p. 60–68, fev. 2001. Citado na página [31](#).

GOIS, M. M. **Representação Nó-profundidade em FPGA para algoritmos evolutivos aplicados ao projeto de redes de larga-escala**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação-USP, 2011. Citado 13 vezes nas páginas [7](#), [9](#), [11](#), [12](#), [22](#), [23](#), [60](#), [61](#), [62](#), [63](#), [99](#), [127](#) e [128](#).

GOIS, M. M.; MATIAS, P.; PERINA, A. B.; BONATO, V.; DELBEM, A. C. B. A parallel hardware architecture based on node-depth encoding to solve network design problems. **International Journal of Natural Computing Research**, 2014. Citado 6 vezes nas páginas [23](#), [55](#), [59](#), [60](#), [61](#) e [64](#).

GOMES, F.; CARNEIRO S., J.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M.; GARCIA, P.; ARAUJO, L. R. de. A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 4, p. 1616–1623, Nov 2006. ISSN 0885-8950. Citado 2 vezes nas páginas [30](#) e [31](#).

HUNG, D. Q.; MITHULANANTHAN, N.; BANSAL, R. C. Analytical expressions for dg allocation in primary distribution networks. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 25, n. 3, p. 814–820, Sept 2010. ISSN 0885-8969. Citado na página [72](#).

JABR, R. Radial distribution load flow using conic programming. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 3, p. 1458–1459, Aug 2006. ISSN 0885-8950. Citado na página [29](#).

JABR, R.; SINGH, R.; PAL, B. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 27, n. 2, p. 1106–1115, May 2012. ISSN 0885-8950. Citado 8 vezes nas páginas [29](#), [79](#), [88](#), [89](#), [90](#), [91](#), [92](#) e [105](#).

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. [S.l.]: Edgard Blücher, 2005. Citado na página [42](#).

KRISHNASWAMY, R.; ALIJANI, G. S.; SU, S.-C. On constructing binary space partitioning trees. In: **Proceedings of the 1990 ACM Annual Conference on Cooperation**. New York, NY, USA: ACM, 1990. (CSC '90), p. 230–235. ISBN 0-89791-348-5. Citado na página [33](#).

KRUSKAL, J. B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. **Proceedings of the American Mathematical Society**, American Mathematical Society, v. 7, n. 1, p. 48–50, February 1956. Citado 2 vezes nas páginas [57](#) e [65](#).

- LIMA, T. W. **Estruturas de Dados Eficientes para Algoritmos Evolutivos Aplicados ao Projeto de Redes**. Tese (Doutorado) — Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação -ICMC, USP, 2009. Citado 3 vezes nas páginas [22](#), [50](#) e [59](#).
- LLORENS-IBORRA, F.; RIQUELME-SANTOS, J.; ROMERO-RAMOS, E. Mixed-integer linear programming model for solving reconfiguration problems in large-scale distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 88, n. 0, p. 137 – 145, 2012. ISSN 0378-7796. Citado 2 vezes nas páginas [28](#) e [35](#).
- LO, C.-H.; ANSARI, N. The progressive smart grid system from both power and communications aspects. **Communications Surveys Tutorials, IEEE**, v. 14, n. 3, p. 799–821, Third 2012. ISSN 1553-877X. Citado na página [22](#).
- MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **SBA Controle e Automação**, v. 11, p. 150–159, 2000. Citado 3 vezes nas páginas [79](#), [105](#) e [111](#).
- MENA, A. J. G.; GARCÍA, J. A. M. An efficient heuristic algorithm for reconfiguration based on branch power flows direction. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 41, n. 1, p. 71 – 75, 2012. ISSN 0142-0615. Citado 2 vezes nas páginas [81](#) e [83](#).
- MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. **Proc. 5th Power System Computation Conference**, p. 1–18, 1975. Citado 2 vezes nas páginas [21](#) e [29](#).
- MOHANRAM, S.; SUDHAKAR, T. Power system restoration using reverse delete algorithm implemented in fpga. In: **Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011), International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 373–378. Citado 2 vezes nas páginas [22](#) e [35](#).
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. Citado na página [43](#).
- MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica**. [S.l.]: Ed Unicamp, 1999. Citado na página [46](#).
- NAGVAJARA, P.; NWANKPA, C.; JOHNSON, J. Reconfigurable hardware accelerators for power transmission system computation. In: KHAITAN, S. K.; GUPTA, A. (Ed.). **High Performance Computing in Power and Energy Systems**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013, (Power Systems). p. 211–228. ISBN 978-3-642-32682-0. Citado na página [22](#).
- NARA, K.; SHIOSE, A.; KITAGAWA, M.; ISHIHARA, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 7, n. 3, p. 1044 –1051, aug 1992. ISSN 0885-8950. Citado 3 vezes nas páginas [30](#), [31](#) e [32](#).
- RAMOS, E.; EXPOSITO, A.; SANTOS, J.; IBORRA, F. Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 556–564, May 2005. ISSN 0885-8950. Citado 4 vezes nas páginas [28](#), [29](#), [30](#) e [35](#).

RAO, R. S.; NARASIMHAM, S. V. L.; RAJU, M. R.; RAO, A. S. Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 26, n. 3, p. 1080–1088, Aug 2011. ISSN 0885-8950. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

SANCHES, D.; MANSOUR, M.; LONDON, J.; DELBEM, A.; SANTOS, A. Integrating relevant aspects of moeas to solve loss reduction problem in large-scale distribution systems. In: **PowerTech, 2011 IEEE Trondheim**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 22, 33, 36 e 48.

SANCHES, D. S. **Algoritmos evolutivos multi-objetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 47.

SANTOS, A.; DELBEM, A.; BRETAS, N. Energy restoration for large-scale distribution system using ea and a new data structure. **Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE**, p. 1–8, July 2008. ISSN 1932-5517. Citado na página 33.

SANTOS, A.; DELBEM, A.; LONDON, J.; BRETAS, N. Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 3, p. 1254–1265, aug. 2010. ISSN 0885-8950. Citado 6 vezes nas páginas 22, 33, 36, 40, 48 e 49.

SANTOS, A. C.; NANNI, M.; MANSOUR, M. R.; DELBEM, A. C. B.; LONDON, J. B. A.; BRETAS, N. G. A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems. **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES**, p. 1–6, Aug. 2008. Citado na página 24.

SANTOS, A. C. d.; DELBEM, A. C. B.; BRETAS, N. G. A multiobjective evolutionary algorithm with node-depth encoding for energy restoration. **Natural Computation, 2008. ICNC '08. Fourth International Conference on**, v. 6, p. 417–422, Oct. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 49.

SANTOS, A. C. dos. **Algoritmo Evolutivo Computacionalmente Eficiente para Reconfiguração de Sistemas de Distribuição**. Tese (Doutorado) — EESC/USP, 2009. Citado na página 49.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, Apr 1989. ISSN 0885-8977. Citado na página 29.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H.; SEMLYEN, A.; LUO, G. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 3, n. 2, p. 753–762, May 1988. ISSN 1558-0679. Citado na página 44.

TOMOIAGĂ, B.; CHINDRIȘ, M.; SUMPER, A.; VILLAFILA-ROBLES, R.; SUDRIA-ANDREU, A. Distribution system reconfiguration using genetic algorithm based on connected graphs. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 104, p. 216–225, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 32, 80, 81, 82, 83 e 86.

WANG, C.; CHENG, H. Z. Optimization of network configuration in large distribution systems using plant growth simulation algorithm. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 1, p. 119–126, Feb 2008. ISSN 0885-8950. Citado na página [21](#).

WANG, C.; GAO, Y. Determination of power distribution network configuration using non-revisiting genetic algorithm. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 28, n. 4, p. 3638–3648, Nov 2013. ISSN 0885-8950. Citado na página [33](#).

WANG, X.; ZIAVRAS, S. G.; NWANKPA, C.; JOHNSON, J.; NAGVAJARA, P. Parallel solution of newton's power flow equations on configurable chips. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 29, n. 5, p. 422 – 431, 2007. ISSN 0142-0615. Citado na página [22](#).

WEN, J.; TAN, Y.; JIANG, L. A reconfiguration strategy of distribution networks considering node importance. **PloS one**, Public Library of Science, v. 11, n. 12, p. e0168350, 2016. Citado na página [34](#).

YUEN, S.-Y.; CHOW, C. K. A genetic algorithm that adaptively mutates and never revisits. **Evolutionary Computation, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 2, p. 454–472, April 2009. ISSN 1089-778X. Citado na página [33](#).

ZAN, J. C. **Metodologia para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando reguladores de tensão bancos de capacitores e as características operacionais de vários tipos de chaves seccionadoras**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015. Citado 2 vezes nas páginas [11](#) e [40](#).

ZHANG, D.; FU, Z.; ZHANG, L. An improved ts algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 77, p. 685 – 694, 2007. ISSN 0378-7796. Citado na página [32](#).

ZHU, J. Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm. **Electric Power Systems Research**, v. 62, n. 1, p. 37–42, 2002. ISSN 0378-7796. Citado 2 vezes nas páginas [31](#) e [32](#).