

PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE CHAVES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Gustavo Pacheco Epifanio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre.

Orientador(a): Laura Silva de Assis

Rio de Janeiro,
Novembro de 2020

**Problema de Alocação de Chaves em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica com Geração Distribuída**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre.

Gustavo Pacheco Epifanio

Banca Examinadora:

Laura Silva de Assis

L. Assis

Presidente, Professora. D.Sc. Laura Silva de Assis (CEFET/RJ)

Diego Barreto Haddad

Professor D.Sc. Diego Barreto Haddad (CEFET/RJ)

José Frederico Vizcaino Gonzalez
Professor D.Sc. José Frederico Vizcaino González (FEG - UNESP)

Christiano Lyra Filho
Professor D.Sc. Christiano Lyra Filho (FEEC - UNICAMP)

Rio de Janeiro,
Novembro de 2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

E64 Epifanio, Gustavo Pacheco
Problema de alocação de chaves em sistemas de distribuição
de energia elétrica com geração distribuída / Gustavo Pacheco
Epifanio – 2020.
75f : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2020.
Bibliografia : f. 69-75
Orientadora: Laura Silva de Assis

1. Energia elétrica – Distribuição. 2. Otimização combinatória.
3. Geração distribuída de energia elétrica. I. Assis, Laura
Silva de (Orient.). II. Título.

CDD 621.3191

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. Agradeço aos professores parceiros pelo tempo utilizado na avaliação deste trabalho.

RESUMO

Problema de Alocação de Chaves em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída

O Problema de alocação de chaves (PAC) em redes de energia elétrica consiste em determinar de forma otimizada os melhores locais, quantidade e tipos de chaves a serem alocados em uma rede de distribuição com o objetivo de minimizar os custos, mantendo um nível estipulado de confiabilidade. A geração distribuída (GD) refere-se a existência de um gerador de eletricidade no usuário final ou próximo a ele, permitindo fazer uso de tal fonte de energia. A expectativa é que tal configuração na rede provoque uma redução de perdas na rede elétrica e também auxilie na atenuação do impacto da falha no sistema. A intenção é que a GD conduza a um impacto positivo na confiabilidade da rede, devido ao seu potencial de fornecer caminhos alternativos de fornecimento de energia, após a ocorrência de uma contingência, por meio da operação do sistema com ilhamento. Este trabalho de pesquisa tem como objetivo investigar o PAC que engloba uma série de tomadas de decisão enfrentadas pelas concessionárias de distribuição, a fim de reduzir custos operacionais e manter níveis predeterminados de confiabilidade em uma rede de distribuição com GD. A solução se baseia em algoritmos genético e memético. Um método de otimização é proposto para escolher um conjunto adequado de valores para os hiperparâmetros. Experimentos computacionais são conduzidos para avaliar a metodologia em redes reais de grande porte. Os resultados mostram a efetividade da abordagem em solucionar o PAC e os benefícios na confiabilidade que podem ser obtidos com o uso da GD.

Palavras-chave: Otimização Combinatória; Problema de Alocação de Chaves; Confiabilidade em redes de distribuição; Geração Distribuída; Algoritmo Memético.

ABSTRACT

Problema de Alocação de Chaves em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída

This research has the objective of investigating the Switch Allocation Problems (SAP), which encompass a series of decision-making faced by power distribution utilities concerning the number, type, and location of switches in a network in order to reduce operational costs while maintaining acceptable levels of reliability. The Distributed Generation (DG) refers to the existence of an electrical generator positioned near the final user, allowing to make use of its energy generation. With this configuration, it's expected to bring loss reduction in the electric network and also help to reduce the impact of system failure. The rationale is that DG may have a positive impact on reliability, given its potential to provide alternative power supply paths after a contingency through islanding operation. This research has the goal to investigate the SAP that encompasses a series of decision-making processes faced by the electrical distribution company to reduce operational costs and maintaining a predefined level of reliability on the distribution system. The solution is based on genetic and memetic algorithms. An optimization method is proposed to choose suitable values set of hyperparameters. Computational experiments are conducted to evaluate the methodology on real-life networks. The results show the effectiveness of the approach to solve the PAC and the benefits in reliability that can be obtained from the use of DG.

Key-words: Combinatorial Optimization; Switch Allocation Problem; Distribution Network Reliability; Distributed Generation; Memetic Algorithm.

Lista de Figuras

3.1	Exemplo de uma estrutura básica do sistema elétrico de potência [University of Idaho, 2019].	12
3.2	Rede de distribuição radial.	13
3.3	Operação das chaves seccionadoras.	14
3.4	Operação das chaves seccionadoras e de manobra.	14
4.1	Exemplo de uma Árvore.	19
4.2	Representação da rede elétrica.	20
4.3	Representação por grafo da rede elétrica apresentada na Figura 4.2.	20
4.4	Representação em setores da rede apresentada na Figura 4.2.	21
4.5	Simulação de uma falha ocorrendo no setor S_1	24
5.1	Solução do PAC (a) \times Representação Cromossômica (b).	28
5.2	População estruturada, com cada nó representando um indivíduo e o valor em cada nó sua aptidão. Todo líder tem aptidão maior que seus subordinados, e cada um dos 12 pares (líder, subordinado) participam do cruzamento.	30
5.3	Diagrama do Algoritmo Memético.	32
6.1	Gráfico de dispersão das execuções do passo 2.	37
6.2	Box plot das execuções do passo 2.	38
6.3	Evolução dos custos por geração das execuções do passo 2.	40
6.4	Box plot das execuções do passo 3.	41
6.5	Evolução dos custos por geração das execuções do passo 3.	42
6.6	Passo a passo realizado na otimização de hiperparâmetros.	43
6.7	Rede R_1 , com localização de geração distribuída ilustrada através dos círculos verdes.	45
6.8	Rede R_2 , com localização de geração distribuída ilustrada através dos círculos verdes.	46
6.9	Rede R_3 , com localização de geração distribuída ilustrada através dos círculos verdes.	47
6.10	Resultados da execução dos algoritmos genético e memético sem GD nas redes.	49
6.11	Evolução dos custos por geração das execuções da rede R_1 sem GD.	50
6.12	Evolução dos custos por geração das execuções da rede R_2 sem GD.	51

6.13	Evolução dos custos por geração das execuções da rede R_3 sem GD.	52
6.14	Evolução dos custos médios por geração das execuções por rede sem GD.	53
6.15	Resultados da execução dos algoritmos genético e memético com GD nas redes. . . .	55
6.16	Evolução dos custo por geração das execuções da rede R_1 com GD.	56
6.17	Evolução dos custo por geração das execuções da rede R_2 com GD.	57
6.18	Evolução dos custo por geração das execuções da rede R_3 com GD.	58
6.19	Evolução dos custos médios por geração das execuções por rede com GD.	59
6.20	Comparação dos resultados do AG com e sem GD, para cada rede.	60
6.21	Comparação dos resultados do AM com e sem GD, para cada rede.	61
6.22	Evolução dos custos médios por geração das execuções por rede comparando o cenário com e sem geração distribuída.	62
6.23	Melhor solução encontrada pelo AM com geração distribuída para a rede R_1	63
6.24	Melhor solução encontrada pelo AM com geração distribuída para a rede R_2	63
6.25	Melhor solução encontrada pelo AM com geração distribuída para a rede R_3	64
6.26	Evolução dos custos médios por geração e custo alvo.	66

Lista de Tabelas

2.1	Lista de artigos da revisão sistemática com informações gerais resumidas.	5
2.2	Classificação dos artigos por tópicos relevantes a esta pesquisa.	8
4.1	Tempo de restauração devido a uma falha no setor S_1	24
6.1	Conjunto de hiperparâmetros a ser otimizado e o espaço de busca considerado. . . .	34
6.2	Resultados de cada execução do passo 1.	36
6.3	5 melhores resultados do teste do passo 1.	37
6.4	Médias ($\mu_{\bar{X}}$) e desvio padrão ($\sigma_{\bar{X}}$) do conjunto dos hiperparâmetros do passo 2. . . .	37
6.5	Resultados dos teste- Z para o passo 2.	38
6.6	Médias ($\mu_{\bar{X}}$) e desvio padrão ($\sigma_{\bar{X}}$) do conjunto dos hiperparâmetros do passo 3. . . .	39
6.7	Resultados dos teste- Z para o passo 3.	39
6.8	Conjunto final de hiperparâmetros.	39
6.9	Características das redes.	44
6.10	Informação de operação do caso base.	44
6.11	Tipos de Chaves.	45
6.12	Parâmetros utilizados nos experimentos para otimização da solução do PAC.	45
6.13	Resumo dos resultados da rede R_1	47
6.14	Resumo dos resultados da rede R_2	47
6.15	Resumo dos resultados da rede R_3	48
6.16	Tempo e número de geração para alcançar o custo alvo para cada cenário.	65

Lista de Abreviações

AG	Algoritmo Genético
AM	Algoritmo Memético
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente De Interrupção Por Unidade Consumidora
END	Energia Não Distribuída
FEC	Frequência Equivalente De Interrupção Por Unidade Consumidora
GD	Geração Distribuída
NSGA-II	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
PAC	Problema De Alocação De Chaves

Sumário

1	Introdução	1
2	Trabalhos Relacionados	4
2.1	Redes de Pequeno Porte	8
2.2	Redes de Médio Porte	10
2.3	Redes de Grande Porte	11
3	Apresentação do Problema	12
3.1	Sistema de Distribuição	12
3.2	Impacto da Falha pelo Posicionamento das Chaves	13
3.3	Avaliação de Confiabilidade	15
3.4	Geração Distribuída	16
3.5	Problema de Alocação de Chave	17
4	Modelo Matemático do PAC	18
4.1	Fundamentos sobre Grafos	18
4.2	Representação	19
4.3	Indicadores de Confiabilidade	21
4.4	Tempo de Restauração	22
4.5	Formulação Matemática	25
5	Metodologia de Solução	27
5.1	Algoritmo Memético	27
5.1.1	Indivíduo	27
5.1.2	Função de Aptidão	29
5.1.3	População	29
5.1.4	Seleção	30
5.1.5	<i>Crossover</i>	30
5.1.6	Mutação	31
5.1.7	Busca Local	31

5.1.8	Conceitos Subjacentes	32
6	Resultados	34
6.1	Otimização de Hiperparâmetros	34
6.1.1	Passo 1	35
6.1.2	Passo 2	35
6.1.3	Passo 3	38
6.2	Estudos de Caso	44
6.2.1	Comparação dos métodos para as redes sem GD	48
6.2.2	Comparação dos métodos para as redes com GD	54
6.2.3	Comparação dos resultados nos cenários com GD \times sem GD	60
6.2.4	Comparação do AG com AM	65
7	Considerações Finais	67
	Referências Bibliográficas	69

Capítulo 1

Introdução

O sistema elétrico pode ser dividido em 3 subsistemas: geração, transmissão e distribuição de energia. A geração ocorre onde uma fonte de energia externa é convertida para energia elétrica. Por questões geográficas e econômicas essas usinas ficam, normalmente, distante dos consumidores finais. Após o processo de geração, o sistema de transmissão é responsável por transportar a energia para os grandes centros de consumidores. Em seguida o sistema de distribuição, dividido entre primária e secundária, recebe essa energia na distribuição primária pelas subestações de distribuição, e percorre a localidade de forma ramificada, em alta tensão, até chegar em pontos de conexão com as cargas [Ceraolo and Poli, 2014]. Nestes pontos, onde se inicia a distribuição secundária, existem transformadores para reduzir a tensão até o nível que será consumida pelos diversos consumidores que estarão conectados. O foco deste trabalho se encontra no sistema de distribuição primária.

Cada subsistema do setor elétrico pode ser operado por empresas diferentes. O sistema como um todo é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que é vinculada ao Ministério de Minas e Energia. Além de outras atribuições, a ANEEL estabelece as tarifas para o consumidor, assim como valores limites para os indicadores de confiabilidade do sistema de distribuição.

Para o consumidor final a confiabilidade está associada à disponibilidade e segurança da rede, independente do cenário. Existem diversos indicadores de confiabilidade estabelecidos que devem ser respeitados, como os de conformidade no nível de tensão e os de continuidade. Dentre as partes que constituem o sistema elétrico, a rede de distribuição é a maior responsável pela falta de energia no consumidor final [Billinton and Allan, 1992]. Por esse motivo existe um grande esforço em desenvolver estudos nessa área, com objetivo de aumentar a confiabilidade da rede, reduzir perdas e otimizar custos.

Se porventura os limites de confiabilidade estabelecidos não forem respeitados, multas são aplicadas às concessionárias pela agência reguladora. Portanto se faz necessário trabalhar com um plano otimizado de suas operações com o intuito de se manterem nos níveis de confiabilidade estipulados. A instalação otimizada de alguns equipamentos no sistema contribuiu para aumentar a

confiabilidade. Como exemplos, podemos citar os religadores, que são disjuntores com fechamento automático após serem abertos; disjuntores, que são equipamentos de proteção para sobrecorrente, chaves seccionadoras, que interrompem o fluxo de potência por proteção, isolando uma parte do sistema de uma falha, chaves de manobra, que atuando juntamente com a anterior ajudam a redirecionar o fluxo de energia para uma região que tenha problema de suprimento de energia devido a ocorrência de falha. Os dois últimos são utilizados neste trabalho. Tais equipamentos possibilitam uma operação mais equilibrada da rede, contribuindo para um melhor compromisso entre confiabilidade e custo.

O modelo de sistema de distribuição em que a geração está concentrada em grandes usinas é chamado de geração centralizada [Gonçalves, 2004]. O modelo denominado Geração Distribuída (GD) contempla situações em que também existem pequenos e médios geradores que podem ser conectados diretamente nas redes de distribuição primária (alta tensão) ou secundária (baixa tensão), assim como serem instalados diretamente no local de consumo [Ceraolo and Poli, 2014].

A GD utiliza principalmente fontes alternativas de energia, como fotovoltaica e eólica, as quais vêm se popularizando principalmente por serem uma opção de energia mais sustentável, menos poluente e por utilizar a terra e seus recursos naturais de forma mais consciente. Esta situação é diferente, por exemplo, de usinas hidrelétricas, as quais alagam uma grande porção de terra. A GD, por sua vez, pode possibilitar a redução de perdas no sistema elétrico por diminuir a energia que precisa ser gerada na fonte principal, conseqüentemente transmitida e distribuída. A combinação desses fatores motiva a popularização dos estudos e na utilização da GD nos últimos anos.

Devido à operação das chaves e aos equipamentos de proteção presentes na rede, é possível que uma parte do sistema fique desconectada, ou seja ilhada do sistema principal. Se essa parte ilhada possuir geradores com capacidade suficiente para alimentar os consumidores dessa região de forma isolada do sistema principal, diz-se que o sistema está operando com ilhamento, formando um sistema de distribuição ativo [Chowdhury et al., 2009]. Nesta pesquisa é considerada a operação com ilhamento se existir uma GD com capacidade de alimentar a carga local da região. Dessa forma, o tempo que os consumidores desta região, que foram afetados por uma falha, ficam sem energia é diretamente reduzido.

No desenvolvimento deste trabalho é considerada uma quantidade de GD constante e o respectivo posicionamento como fixo. O objetivo é resolver o Problema de Alocação de Chaves (PAC) no sistema de distribuição de energia, onde deseja-se determinar de forma otimizada a quantidade, os locais e os tipos de chaves na rede, considerando a presença de GD na mesma. Para isto, é minimizada uma função que descreve o custo da rede, como uma relação entre confiabilidade e custos com equipamentos.

O PAC é um problema de otimização combinatória classificado como NP-difícil [Benavides et al.,

2013]. Sendo assim, resolvê-lo através de técnicas exatas, para instâncias reais e de grande porte, se torna inviável computacionalmente. Porém, soluções sub-ótimas, com um bom compromisso entre a qualidade da solução e o custo computacional, podem ser alcançadas utilizando métodos heurísticos e metaheurísticos.

Para resolver o PAC em estudo nessa dissertação é proposta uma abordagem de solução baseada nos trabalhos desenvolvidos por de Assis et al. [2015] e Assis [2014], que apresentam um algoritmo memético para a solução do PAC sem considerar a existência de GD na rede. No presente trabalho a proposta de solução foi avaliada utilizando 3 redes reais, onde foi verificado o impacto ao ser feito a alocação considerando a presença de GD em tais redes. Além disso, também foram realizadas comparações entre os métodos propostos a fim de entender em quais cenários é mais adequado utilizar cada um. Para uma maior garantia de desempenho, foi desenvolvido um processo de otimização dos hiperparâmetros dos algoritmos, e cada solução foi avaliada utilizando métodos estatísticos para aumentar a confiança dos resultados. Foi verificado que os resultados com GD foram consistentemente melhores quando comparados com o cenário sem GD. O resultado da comparação dos algoritmos aponta que caso a preocupação seja atingir soluções mais próximas do mínimo global é mais indicado o algoritmo memético. Porém, se o custo computacional for um fator muito importante, o algoritmo genético atinge soluções de qualidade em menor tempo computacional.

Além deste capítulo esta pesquisa está organizada em outros seis capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os trabalhos relacionados. O Capítulo 3 discorre sobre o problema em estudo e suas características peculiares. A modelagem matemática para o PAC é apresentada no Capítulo 4. O Capítulo 5 descreve a metodologia de solução proposta. O Capítulo 6 apresenta o processo de otimização de hiperparâmetros do modelo, os estudos de caso e os resultados obtidos aplicando os algoritmos genético e memético, assim como as análises inerentes a estes resultados. Considerações finais, bem como os próximos passos para a continuidade da pesquisa estão descritos no Capítulo 7.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

O Problema de Alocação de Chaves (PAC) abordado nessa pesquisa propõe a alocação de chaves seccionadoras e de manobra, ambas podendo ser automáticas ou manuais com diferentes capacidades, sem quantidade fixa, em redes de distribuição de energia elétrica, considerando a presença de GD na rede. Até onde se conhece, o problema apresentado com tal abrangência ainda não foi abordado na literatura, porém existem diversos estudos que abordam variações mais simplificadas do PAC, cada qual propondo diferentes métodos de solução. Portanto, o estudo para identificação de trabalhos relacionados à presente pesquisa teve como foco buscas por trabalhos que versam sobre o PAC em suas diversas variações já estudadas.

Foi realizada uma revisão sistemática para entendermos o estado atual da pesquisa nessa área. Além disso a técnica de *Snowballing* foi utilizada para abranger estudos correlatos que podem não terem sido identificados na revisão sistemática. Para estes artigos, não foi considerada a restrição que limita os artigos anteriores ao ano de 2015. Alguns trabalhos relacionados são apresentados e discutidos no presente capítulo, considerando tais métodos de busca na literatura.

Para determinar a *string de busca* da revisão sistemática, foi definido que seriam selecionados artigos relacionados ao problema em estudo e relevantes para a dissertação que foram publicados nos últimos 5 anos, de 2015 até Fevereiro de 2020 quando a busca foi encerrada. A versão final da *string* foi obtida após algumas iterações, testes e análises, de forma com que alguns artigos mais conhecidos estivessem presentes no retorno da busca. A seguir é apresentada a versão final da *string* utilizada.

```
( switch W/1 allocation ) AND ( electric OR electric AND system ) AND ( distribution
AND system ) AND ( reliability ) AND ( combinatorial OR optimal ) AND NOT (
transitory OR transient OR dynamic W/1 operation OR frequency ) AND ( heuristic
OR matheuristics ) AND ( switch W/1 allocation ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR ,
2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR
LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2016 ) OR LIMIT-TO
( PUBYEAR , 2015 ) )
```

Inicialmente o retorno foi de 127 resultados. Por meio da leitura dos resumos esse total foi reduzido para 74 artigos, sendo removidos os que não tratavam de redes de distribuição, ou cujo objetivo estava distante da alocação de chaves e/ou outros equipamentos em tal rede. A próxima seleção foi feita lendo a introdução dos artigos. Nesta etapa também foram removidos artigos escritos em outro idioma que não o inglês ou português, e os que tiveram versões muito semelhantes do mesmo autor, neste caso optando-se pelo artigo publicado em revista com maior fator de impacto, finalizando com 40 artigos para leitura completa. O *Snowballing* foi feito a partir desses artigos e foram encontrados e selecionados trabalhos adicionais relevantes, que complementam a revisão sistemática.

Uma dificuldade encontrada na classificação dos artigos foi que muitos não são claros ou não informam alguns dados relevantes. Alguns trabalhos não apresentam o tamanho da rede utilizada no(s) teste(s), ou não foram específicos por apresentar apenas uma imagem da rede, em outros apesar de não deixarem claro no texto, foi possível inferir o tamanho da rede com base nas imagens da rede apresentada. Existem artigos que não informam em detalhes que tipo(s) de equipamento(s) foi(ram) alocado(s). Por exemplo, há trabalhos que mencionam a alocação de chaves seccionadoras mas não especificam qual acionamento (automático ou manual), outros indicam alocar chaves automáticas porém não é explicitado o tipo (seccionadora ou manobra).

A Tabela 2.1 mostra os artigos selecionados pelos dois métodos utilizados, listados com informações resumidas do objetivo, tamanho da rede, método de resolução e se é considerada ou não a presença de GD na rede. Na Tabela 2.2 os artigos estão classificados quanto ao tamanho da rede, presença de GD e se a resolução do PAC em estudo foi feita por algum método derivado de algoritmo genético ou através de outra proposta de solução.

Tabela 2.1: Lista de artigos da revisão sistemática com informações gerais resumidas.

#	Referência	Problema	Rede	GD	Método
1	[Carvalho et al., 2005]	Alocação de chaves automáticas	Real pequena	Não	Decomposição e análise convexa
2	[Borges and Falcão, 2006]	Alocação de geração distribuída	Real 43 barras	Sim	Algoritmo genético
3	[Alencar et al., 2010]	Alocação de chaves seccionadoras e de manobra	Real 809 pontos de carga	Não	Algoritmo genético
4	[Dezaki et al., 2012]	Alocação de chaves	Real 183 barras	Não	Algoritmo genético
5	[Alves, 2015]	Alocação com máximo de chaves seccionadoras e de manobra manuais e automáticas	Real 282 barras	Não	Memético multi populacional
6	[Bernardon et al., 2015]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas e de manobra	Real pequena	Não	Processo analítico hierárquico
7	[de Assis et al., 2015]	Alocação de chaves seccionadoras e de manobras automáticas e manuais	Real 5798 barras	Não	Algoritmo memético
8	[Donalvo et al., 2015]	Alocação de uma GD e equipamentos	Teste 30 barras	Sim	PSO e pareto

#	Referência	Problema	Rede	GD	Método
9	[Ferreira et al., 2015]	Alocação de equipamentos com acionamento automático	Teste 123 barras	Não	Programação Linear Inteira Mista
10	[Heidari et al., 2015]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Teste 51 barras	Sim	Programação Linear Inteira Mista
11	[Pombo et al., 2015]	Alocação de chaves e religadores	Teste 66 barras	Não	Algoritmo memético
12	[Shahsavari et al., 2015]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Teste 38 barras	Não	Colônia de abelhas
13	[Aman et al., 2016]	Alocação de chaves de manobra	Teste 69 barras	Sim	Colônia de abelhas
14	[Chouhan et al., 2016]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Teste 123 barras	Não	Algoritmo iterativo
15	[Izadi et al., 2016]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Teste 38 barras	Não	Programação Linear Inteira Mista
16	[Kun et al., 2016]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas e manuais e GD	Teste 33 barras	Sim	Algoritmo memético
17	[Ray et al., 2016]	Alocação de chaves seccionadoras e de manobra automáticas	Teste 118 barras	Não	Busca diferencial
18	[Vidyasagar et al., 2016]	Alocação de GD	Teste 69 barras	Sim	Algoritmo genético
19	[Xu et al., 2016]	Alocação de chaves seccionadoras e de manobra automáticas	Teste 1069 barras	Não	Algoritmo guloso
20	[Conti et al., 2017]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas e manuais	Teste 66 barras	Não	NSGA II
21	[Galias, 2017]	Alocação de número fixo de chaves seccionadoras automáticas	Teste 99 barras	Não	Novo algoritmo recursivo
22	[Heidari et al., 2017]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Teste 51 barras	Sim	Programação Linear Inteira Mista
23	[López et al., 2017]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Real 39000 barras	Não	Busca tabu
24	[Pombo et al., 2017]	Alocação de chaves	Real 94 barras	Sim	NSGA II
25	[Popović et al., 2017]	Alocação de diferentes equipamentos	Teste 63 barras	Sim	Programação Linear Inteira Mista fuzzy
26	[Almeida et al., 2018]	Alocação de religadores NA e NF	Real 14513 barras	Sim	Algoritmo genético
27	[Junior et al., 2018]	Alocação de chaves seccionadoras manuais	Teste 69 barras	Não	sistema imunológico artificial
28	[Lei et al., 2018]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Teste 123 barras	Não	Programação Linear Inteira Mista
29	[Moskwa et al., 2018]	Alocação de número fixo de chaves automáticas seccionadoras e de manobra	Teste 78 barras	Não	Algoritmo evolutivo multiobjetivo
30	[Pereira et al., 2018]	Alocação de equipamentos de proteção e controle	Real 135 barras	Sim	Algoritmo genético
31	[Ray et al., 2018]	Alocação de chaves seccionadoras e de manobra automáticas	Teste 33 barras	Não	Busca diferencial

#	Referência	Problema	Rede	GD	Método
32	[Samadi Gazijahani and Salehi, 2018]	Alocação de GD e chaves seccionadoras	Teste 69 barras	Sim	Algoritmo de Cuckoo
33	[Sekhavatmanesh and Cherkaoui, 2018]	Alocação de número fixo de GD e chaves de manobra	Teste 34 barras	Sim	<i>second-order cone program</i>
34	[Izadi and Safdarian, 2019]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Teste 69 barras	Não	Programação Linear Inteira Mista multi estágio
35	[Jayasree et al., 2019]	Alocação de GD	Real 301 barras	Sim	Polinização de flores
36	[Leite et al., 2019]	Alocação de chaves seccionadoras manuais	Teste 56 barras	Não	PSO binário com Pareto
37	[Lwin et al., 2019]	Alocação de chaves, equipamentos e uma GD	Teste 10 barras	Sim	Programação Linear Inteira Mista
38	[Nader et al., 2019]	Alocação de chaves automáticas e GD	Teste 123 barras	Sim	Programação Linear Inteira Mista
39	[Pau et al., 2019]	Alocação de número fixo de chaves seccionadoras manuais	Teste 95 barras	Não	Programação Linear Inteira
40	[Pinto et al., 2019]	Alocação de capacitores, Chaves, novos ramos e GD	Teste 90 barras	Sim	NSGA-II
41	[Popovic et al., 2019]	Alocação de diferentes equipamentos	Teste 33 barras	Sim	Programação Linear Inteira Mista fuzzy
42	[Santos et al., 2019]	Substituição de chaves seccionadoras manuais por automáticas	Teste 119 barras	Sim	Programação Linear Inteira Mista estocástico
43	[Sharifian and Mahmoudi, 2019]	Alocação de chaves automáticas de manobra	Teste 15 barras	Sim	Algoritmo genético
44	[Yari et al., 2019a]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas	Real 33 barras	Sim	Algoritmo genético com PSO
45	[Yari et al., 2019b]	Alocação chaves seccionadoras automáticas e outros equipamentos de proteção	Real 36 barras	Não	Híbrido fuzzy e NSGA II
46	[Zeinalzadeh et al., 2019]	Alocação de chaves seccionadoras automáticas e religadores	Teste 85 barras	Não	PSO com algoritmo fuzzy

A partir da leitura dos artigos encontrados observou-se que a maioria dos trabalhos presentes na literatura se concentra em redes de pequeno porte e/ou de teste. A utilização de redes com tais características simplifica a validação de novos modelos de rede e novas metodologias de solução. Este acredita-se ser o motivo do uso de redes menores e mais controladas. Em redes grandes e com características reais, novos desafios são inseridos, como complexidade computacional e outros elementos inseridos na rede. A discussão sobre os artigos foi separada por tamanho da rede em estudo.

Tabela 2.2: Classificação dos artigos por tópicos relevantes a esta pesquisa.

Rede	Com GD		Sem GD	
	Algoritmo Genético	Outros algoritmos	Algoritmo Genético	Outros algoritmos
Pequena	[Kun et al., 2016], [Pinto et al., 2019], [Vidyasagar et al., 2016], [Sharifian and Mahmoudi, 2019], [Borges and Falcão, 2006], [Pombo et al., 2017]	[Heidari et al., 2017], [Heidari et al., 2015], [Lwin et al., 2019], [Aman et al., 2016], [Donalvo et al., 2015], [Yari et al., 2019a], [Sekhavatmanesh and Cherkaoui, 2018], [Samadi Gazijahani and Salehi, 2018], [Popović et al., 2017], [Popovic et al., 2019]	[Yari et al., 2019b], [Conti et al., 2017], [Pombo et al., 2015]	[Carvalho et al., 2005], [Ray et al., 2018], [Shahsavari et al., 2015], [Zeinalzadeh et al., 2019], [Izadi and Safdarian, 2019], [Izadi et al., 2016], [Galias, 2017], [Pau et al., 2019], [Moskwa et al., 2018], [Leite et al., 2019], [Junior et al., 2018], [Bernardon et al., 2015]
Média	[Pereira et al., 2018]	[Nader et al., 2019], [Santos et al., 2019], [Jayasree et al., 2019]	[Alves, 2015], [Dezaki et al., 2012], [Alencar et al., 2010]	[Lei et al., 2018], [Ray et al., 2016], [Ferreira et al., 2015], [Chouhan et al., 2016]
Grande	[Almeida et al., 2018]	-	[de Assis et al., 2015]	[Xu et al., 2016], [López et al., 2017]

2.1 Redes de Pequeno Porte

Foram classificadas como redes de pequeno porte aquelas que possuem até 100 barras. Considerando redes desta dimensão, alguns trabalhos que foram desenvolvidos, como [Kun et al., 2016; Pinto et al., 2019; Vidyasagar et al., 2016; Sharifian and Mahmoudi, 2019; Pombo et al., 2017; Borges and Falcão, 2006] levam em conta a presença de GD na rede.

Um algoritmo memético para alocar chaves seccionadoras manuais e automáticas foi proposto por Kun et al. [2016]. Neste artigo foi considerado o planejamento de expansão de clientes e um aumento no uso da GD. Em Vidyasagar et al. [2016] também é realizado o estudo do planejamento de expansão, englobando GD com capacidade constante, banco de capacitores, chaves, e novos clientes. Os autores resolvem o problema utilizando *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II). Sharifian and Mahmoudi [2019] realizam a alocação de GD definindo tamanho, localização e tipo de geração, a fim de minimizar as perdas mantendo estabilidade do sistema elétrico. O método de solução é baseado em Algoritmo Genético (AG). Pombo et al. [2017] resolvem o problema de alocação de chaves com objetivo de maximizar a confiabilidade, considerando GD na rede em locais fixos, e utilizam o NSGA-II para resolver este problema. Borges and Falcão [2006] apresentam um algoritmo genético para escolher a melhor posição para alocar apenas uma geração distribuída, com geração constante, usam como objetivo a minimização de perdas elétricas.

Existe uma quantidade maior de artigos que consideram GD na rede e utilizam outros métodos de otimização diferente dos baseados nos conceitos de AG. Por se tratarem de redes de pequeno porte alguns trabalhos utilizam com sucesso métodos exatos como os desenvolvidos por Heidari

et al. [2015] e Heidari et al. [2017] que resolvem o problema de alocação de chaves seccionadoras e desenvolvem um modelo que considera o custo associado aos consumidores. Lwin et al. [2019] propõem a alocação de uma chave de manobra e também dispositivos de proteção considerando a presença de apenas uma GD. Sekhavatmanesh and Cherkaoui [2018] resolvem o problema de alocação de chaves de manobra e GD considerando também seus custos. Popović et al. [2017] consideram a alocação de chaves seccionadoras automáticas e religadores. Também realizam a realocação de outros equipamentos considerando custos relacionados a faltas transitórias e índices de confiabilidade.

Alguns trabalhos propõem algum outro tipo de metaheurística como método de solução do problema estudado, assim como o apresentado por Aman et al. [2016], que aborda o problema de alocação de chaves de manobra e posiciona GD com capacidade constante procurando também a maximização da capacidade de carga. Donalvo et al. [2015] alocam fusíveis, religadores e GD comparando dois cenários: *(i)* a alocação individual de um equipamento considerando os demais constante; e *(ii)* a alocação de todos equipamentos ao mesmo tempo. Yari et al. [2019a] consideram a GD presente na rede e alocam chaves automáticas, levando em consideração além de aspectos técnicos e econômicos bem como informações de especialistas. Samadi Gazijahani and Salehi [2018] resolvem o problema de alocação de GD considerando local, tamanho e quantidade. Em seguida resolvem o problema de alocação de chaves seccionadoras.

Nos trabalhos que não consideram a existência de GD na rede foram encontrados dois que utilizam AG, os quais foram avaliados através de experimento utilizando redes de pequeno porte. Tais trabalhos são apresentados por Yari et al. [2019b] e Conti et al. [2017]. Yari et al. [2019b] utilizam informações de especialistas e a função custo para criar um sistema fuzzy resolvido por um NSGA II. Conti et al. [2017] também utilizam o NSGA para otimizar a alocação de chaves seccionadoras automáticas e manuais, em uma rede com 66 barras. Em Pombo et al. [2015] é resolvido, utilizando algoritmo memético, o problema de alocação de chaves e religadores, com objetivo de minimizar os custos e maximizar a confiabilidade da rede.

Ainda em redes de pequeno porte sem GD, existe uma variedade de abordagens de estudos sendo desenvolvidas, com diferentes métodos de solução e considerações distintas nas redes. Izadi et al. [2016] faz uma busca exaustiva para alocar chaves seccionadoras automáticas e Pau et al. [2019] aloca um número fixo de chaves seccionadoras considerando indicadores de continuidade do sistema. Izadi and Safdarian [2019] abordam o problema de alocação de chaves seccionadoras na rede considerando um equilíbrio entre custo e confiabilidade.

Uma grande parte de trabalhos porém, utiliza algum tipo de algoritmo bioinspirado como o proposto por Ray et al. [2018] que faz alocação de chaves automáticas com abordagem multiobjetivo (custo e confiabilidade) e compara dois métodos de solução. Shahsavari et al. [2015] examinam

o problema de alocação de chaves manuais automáticas considerando taxa de falhas em diversos elementos do sistema elétrico. Zeinalzadeh et al. [2019] abordam o problema de alocação de religadores e chaves seccionadoras e utilizam um algoritmo fuzzy para escolher a melhor solução do problema multiobjetivo, considerando a minimização de interrupção de energia e os custos com investimentos. Moskwa et al. [2018] investiga o problema de alocação de um número fixo de chaves e o problema multiobjetivo, minimizando Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) e Energia Não Distribuída (END), apresentando um conjunto de soluções de Pareto. Leite et al. [2019] estudam o problema multiobjetivo de alocação de chaves seccionadoras com intuito de diminuir a quantidade de consumidores afetados por falhas no sistema e custos com as chaves. Junior et al. [2018] propõem a alocação de chaves seccionadoras em uma rede que já possui chaves de manobra alocadas.

Utilizando outros métodos para resolver o problema de alocação em pequenas redes sem considerar GD, pode-se apresentar o trabalho desenvolvido por Bernardon et al. [2015] que abordam a alocação de chaves automáticas propondo uma forma de cálculo do impacto na rede através de índices de confiabilidade, e Galias [2017] que resolve o mesmo problema abordado por Bernardon et al. [2015] porém considera uma quantidade arbitrária de chaves. Carvalho et al. [2005] utiliza técnicas de decomposição e análise convexa para reduzir a quantidade de combinações de soluções, para resolver o problema de alocação de chaves automáticas de forma exata.

2.2 Redes de Médio Porte

Quando observamos estudos que tratam redes de médio porte, a quantidade de trabalhos desenvolvidos é reduzida devido ao aumento da complexidade computacional comparado a estudos com redes de pequeno porte. Neste trabalho considera-se que redes de médio porte possuem tamanho entre 100 e 1000 barras.

Considerando a existência de GD na rede e utilizando AG como abordagem de solução, foi encontrado o trabalho desenvolvido por Pereira et al. [2018] que propõe uma solução para o problema de alocação de equipamentos de proteção e controle. No trabalho é considerada a representação trifásica de uma rede com GD de 135 barras. Dezaki et al. [2012] propõem uma função objetivo baseada na energia restaurada após uma falha ocorrer, para alocar chaves no sistema por meio de algoritmo genético aplicado em uma rede real. Alencar et al. [2010] consideram a alocação de chaves seccionadoras e de manobra, e utilizam um sistema especialista *fuzzy* para gerar a população inicial de um algoritmo genético, com objetivo de alcançar um equilíbrio entre custo e confiabilidade.

Ainda em redes de médio porte com a presença de GD, outros algoritmos foram aplicados para resolver o problema de alocação de equipamentos em redes de distribuição. Nader et al.

[2019] abordam o problema de alocação de chaves automáticas e GD, que é estudado e resolvido através de método exato. Santos et al. [2019] estudam o problema de instalação de uma quantidade reduzida de chaves, substituindo chaves manuais por automáticas. Jayasree et al. [2019] utilizam um algoritmo de polinização de flores para alocar GD e determinar sua capacidade.

O trabalho desenvolvido por Alves [2015] resolve o problema de alocação de chaves seccionadoras e de manobra manuais e automáticas através de AG multi-populacional, sem considerar a presença de GD na rede. A validação da proposta é feita com uma rede de 282 barras. Existem alguns autores que utilizam métodos exatos como método de solução, conforme Lei et al. [2018], que aloca chaves automáticas e considera no modelo a quantidade de consumidores que pode ser restaurada. Ferreira et al. [2015] fazem a alocação de dispositivos com acionamento automático e consideram o problema multiobjetivo (custos das chaves e confiabilidade). Chouhan et al. [2016] propõem uma nova abordagem iterativa para alocar chaves seccionadoras automáticas. Ray et al. [2016] utilizam uma busca diferencial para alocar chaves automáticas, seccionadoras e de manobra.

2.3 Redes de Grande Porte

Esta pesquisa considera que redes de grande porte são aquelas nas quais o número de barras é superior 1000. Como esta dissertação está propondo um método de solução para o PAC baseado nos conceitos de AG considerando a existência de GD na rede e avalia a metodologia proposta com redes reais de grande porte, um trabalho que se aproxima deste escopo é o realizado por Almeida et al. [2018], porém o problema de otimização em estudo é o de alocação de religadores.

Os trabalhos apresentados por Xu et al. [2016] e López et al. [2017] tratam redes de grande porte, porém não consideram a presença de GD na rede. Xu et al. [2016] aloca somente chaves automáticas, e propõem um algoritmo guloso para resolver o problema em estudo, dividindo a rede em diferente zonas para otimização. López et al. [2017] aloca apenas chaves de manobra utilizando como método de solução a Busca Tabu. Além destes, o trabalho a partir do qual esta dissertação se originou foi o desenvolvido por de Assis et al. [2015], o qual resolve o problema de alocação de chaves seccionadora e de manobra, ambas podendo ser manuais ou automáticas. A abordagem de solução proposta é baseada em algoritmo memético, e apresenta experimentos computacionais utilizando redes de grande porte. Entretanto, não considera a existência de GD na rede.

Até onde se conhece, a literatura não apresenta estudo do PAC com a abrangência proposta nesta dissertação, ou seja, a determinação da quantidade, locais e capacidade de chaves seccionadoras e de manobra, manuais e automáticas em redes de distribuição de energia de grande porte considerando a existência de GD na mesma.

Capítulo 3

Apresentação do Problema

Para o bom entendimento do problema de alocação de chaves tratado neste trabalho faz-se necessário abordar os conceitos, termos e informações inerentes ao mesmo. Este capítulo apresenta informações sobre os tópicos correlatos ao problema em estudo, como o sistema de distribuição, equipamentos considerados para alocação em tal sistema, geração distribuída, índices de confiabilidade, falha. Enfim, um pequeno referencial teórico, indispensável para o correto entendimento e condução desta pesquisa.

3.1 Sistema de Distribuição

No sistema de energia elétrica existem 3 grandes subsistemas denominados: *(i)* geração, *(ii)* transmissão, e *(iii)* distribuição de energia. A Figura 3.1 ilustra tal divisão. O sistema de geração é responsável por converter outro tipo de energia em energia elétrica por meio de turbinas rotativas. O sistema de transmissão transporta a energia gerada por grandes distâncias até a subestação de distribuição. Esta é o ponto de partida do sistema de distribuição que entrega a energia para o consumidor final.

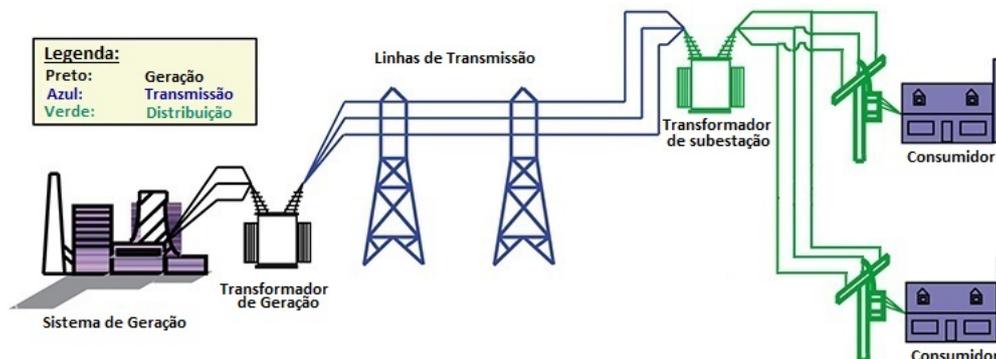


Figura 3.1: Exemplo de uma estrutura básica do sistema elétrico de potência [University of Idaho, 2019].

O fluxo de energia no subsistema de distribuição possui apenas um único caminho, significando que as redes do sistema de distribuição possuem normalmente característica radial. A Figura 3.2 fornece uma visualização da topologia de uma rede de distribuição real, onde pode ser percebida

tal característica.

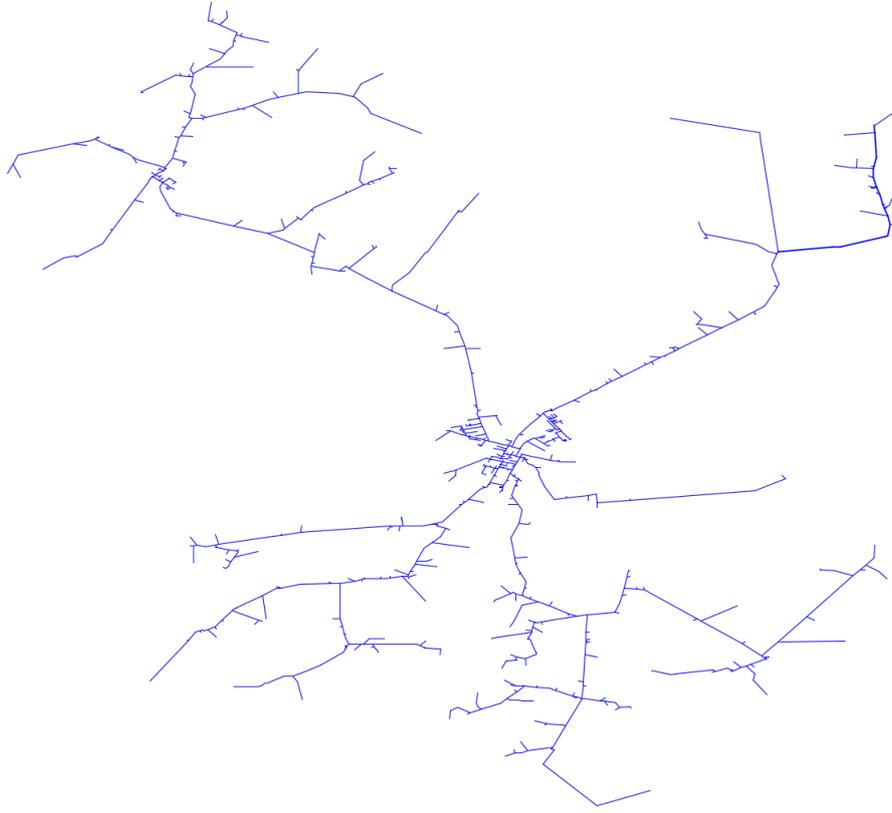


Figura 3.2: Rede de distribuição radial.

3.2 Impacto da Falha pelo Posicionamento das Chaves

O PAC abordado nesta pesquisa compreende a alocação de chaves seccionadoras e chaves de manobra que se diferenciam por suas funcionalidades. Quando o sistema está operando sem falhas, as chaves seccionadoras são equipamentos normalmente fechados que permitem a passagem de fluxo de energia. Porém, na ocorrência de uma falha pode-se realizar a abertura de uma chave seccionadora localizada a montante do local da falha, isolando dessa forma na região a jusante. Tal operação permite manter energizados os consumidores a montante desta chave, enquanto o local da falha espera por reparo.

A Figura 3.3 exemplifica esta operação, a imagem apresentada em 3.3(a) representa a operação normal de uma chave seccionadora, ou seja sem a ocorrência de falha. Caso aconteça uma falha na Carga B, o equipamento, quadrado preto na imagem, de proteção da fonte, atua isolando o sistema. Tudo que estiver a jusante deste equipamento ficará desenergizado. Em seguida a chave SW_1 pode ser aberta com o intuito de isolar as Cargas B e C, reestabelecendo a energia na Carga A, como ilustrado na Fig. 3.3(b).

As chaves de manobra são equipamentos normalmente abertos no sistema, e podem ser acionadas quando localizadas a jusante da falha. Nesse caso a abertura de uma chave seccionadora a

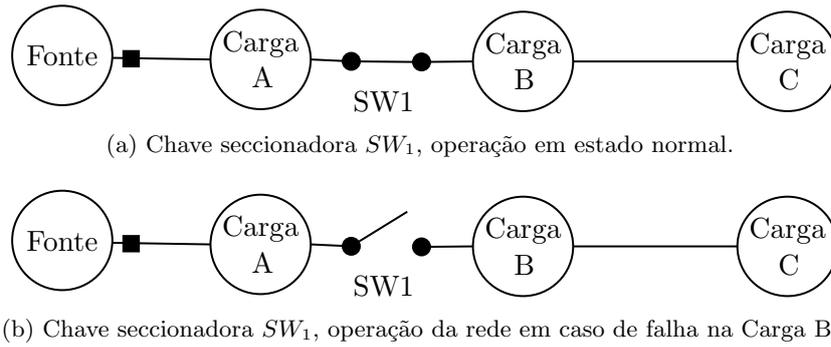


Figura 3.3: Operação das chaves seccionadoras.

jusante da falha a isola, e o fechamento da chave de manobra a jusante desta chave seccionadora permite a realização da transferência de carga dos consumidores localizados entre essas duas chaves.

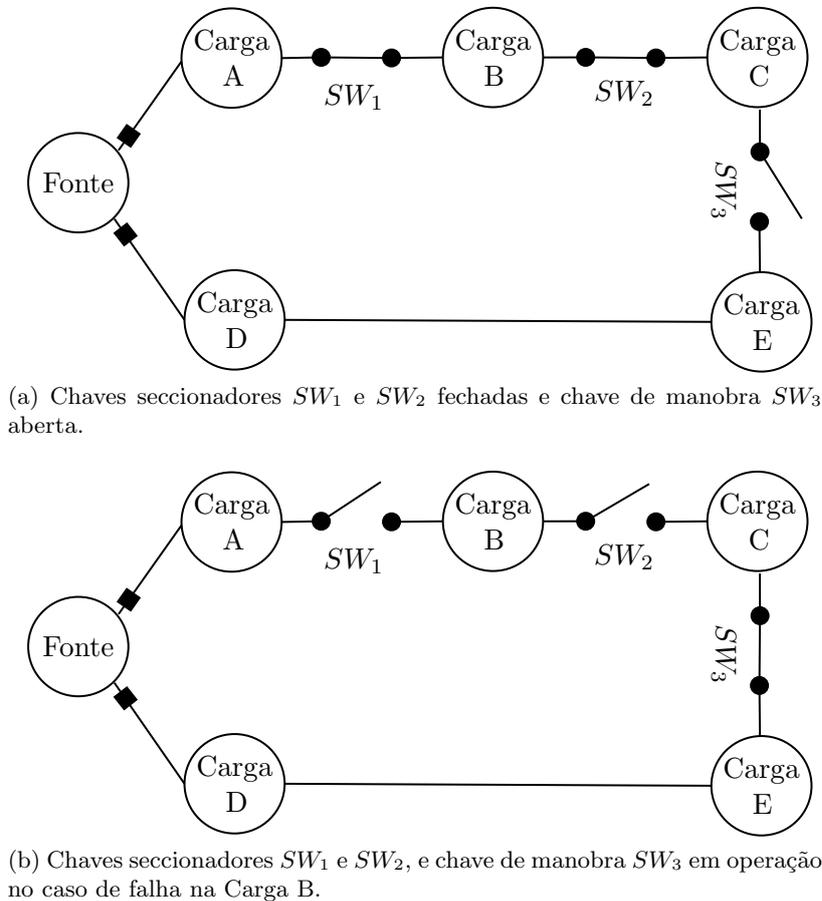


Figura 3.4: Operação das chaves seccionadoras e de manobra.

A Figura 3.4 exemplifica o funcionamento dessa chave. A imagem apresentada em 3.4(a) representa a operação normal da rede. As chaves SW_1 e SW_2 são chaves seccionadoras e a chave SW_3 é uma chave de manobra. Na ocorrência de uma falha na Carga B, ela se propaga para a Carga A e para Carga C, a proteção da fonte abre não permitindo que a falha se propague para a fonte. Assim as Cargas A, B e C ficam sem energia. Em seguida pode-se realizar a abertura da chave seccionadora SW_1 , restabelecendo energia para A, e as cargas B e C permanecem sem

energia. Posteriormente, a chave seccionadora SW_2 é aberta e a chave de manobra SW_3 é fechada, isolando a falha apenas em B e realizando a transferência de energia para C por: Fonte \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow C (Fig. 3.4(b)). Neste exemplo, apenas B precisa esperar que a falha do sistema seja reparada para ter sua energia restabelecida.

As chaves de manobra e seccionadoras consideradas nessa pesquisa podem ser de dois tipos: (i) manuais, ou (ii) automáticas. No caso das chaves operadas de forma manual, um operador tem que ir até o local da chave para operá-la. As chaves automáticas, por sua vez, são remotamente controladas. Sendo assim, o tempo de operação de uma chave manual é mais lento comparado à um chave automática, em contra partida seu custo é menor.

3.3 Avaliação de Confiabilidade

A confiabilidade é definida por Bazovsky [2004] como: “A probabilidade de um dispositivo realizar sua função prevista, para o período de tempo previsto, nas condições operacionais encontradas” em tradução livre. Dentre os indicadores de confiabilidade podemos ressaltar o DEC e FEC, definidos pela ANEEL [ANEEL, 2018]. O DEC é a média anual de quanto tempo os consumidores ficaram sem energia, o qual é indicado na Equação (3.1). O FEC representa quantas vezes, nesse mesmo período de tempo, um consumidor ficou em média sem energia, sendo medido em número de interrupções, como mostrado na Equação (3.2).

$$\text{DEC} = \frac{\sum_{n \in N} U_n}{|N|} \quad (3.1)$$

$$\text{FEC} = \frac{\sum_{n \in N} I_n}{|N|} \quad (3.2)$$

Onde U_n é a quantidade total de tempo de interrupção da unidade consumidora n , N é o conjunto de todas as unidades consumidoras e I_n é a quantidade de interrupções da unidade consumidora n .

Outro indicador de confiabilidade utilizado pelas concessionárias é a END, que significa quanta energia deveria ter sido distribuída em um intervalo de tempo, mas não foi, na sua maioria por motivos de falhas ocorridas no sistema. A END tem a energia como unidade de medida, na maioria das vezes medido em MWh. Esse valor está diretamente relacionado à arrecadação financeira, pois quanto maior o valor desse indicador, menor será a arrecadação. A END está definida na Equação (3.3), onde L_n é a carga média da unidade consumidora n .

$$\text{END} = \sum_{n \in N} U_n L_n \quad (3.3)$$

Para maiores informações e detalhes sobre os diferentes indicadores de confiabilidade em um sistema de distribuição de energia, equipamentos, avaliação do impacto das falhas no sistema, consulte Assis [2014].

3.4 Geração Distribuída

A GD normalmente é uma geração menor alocada nas linhas de energia primária ou secundária. Pode ser instalada localmente para alimentar apenas o consumidor, mas também pode injetar na rede a energia excedente, que poderá ser utilizada para alimentar outros consumidores, tendo um fluxo de energia bidirecional no sistema. Como benefício, os consumidores que geram essa energia excedente recebem um crédito de energia. Outro possível benefício da GD é a redução nas perdas elétricas ao longo das linhas de transmissão e distribuição, porém, a existência da GD traz novos desafios na forma de operação do sistema.

Quando existe uma fonte independente de energia que não está conectada à fonte principal temos uma operação denominada de operação com ilhamento. Em uma geração centralizada o ilhamento não pode ocorrer, todavia com GD na rede tal operação pode acontecer. Essa operação é considerada como uma rede de distribuição ativa [Chowdhury et al., 2009]. Em uma situação de falha, a região do sistema que possui GD pode ter sua energia restaurada, enquanto os consumidores, das áreas impactadas, onde não há a presença de GD devem esperar até a falha ser corrigida. O impacto positivo na confiabilidade considerando a operação com ilhamento é mais bem descrita por Rocha et al. [2017].

Existe uma maior complexidade na operação do sistema com relação ao ilhamento. Normas nacionais preveem utilização de proteção anti-ilhamento, no caso de falha na rede principal, por questões de segurança [ANEEL, 2017]. Existem pesquisas sendo realizadas para viabilizar a operação com ilhamento, sendo que uma das principais dificuldades é a sincronização da GD com a geração principal após esta ser reestabelecida, o que também é uma área de estudo atual [Rocha et al., 2017; Holsbach et al., n.d.; Rocha, 2014]. Em casos específicos, porém, é permitida a operação com ilhamento, como descrito pela agência reguladora ANEEL no item 4.19 da seção 3.0 do módulo 3 (Acesso aos Sistemas de Distribuição) do PRODIST [ANEEL, 2017]:

“As distribuidoras, de comum acordo com as centrais geradoras de energia e o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, quando couber, podem estabelecer a operação ilhada de parte do sistema de distribuição, observando os procedimentos operativos cons-

tantes do Módulo 4 – Procedimentos Operativos.”

O uso da GD tem alguns pontos negativos, como o aumento da severidade de algumas falhas e a dificuldade na regulagem de tensão quando conectada a outro alimentador [Borges and Falcão, 2006]. Além disso a geração, em muitos casos, é intermitente e existe a possibilidade de não ter capacidade suficiente para manter os níveis exigidos de tensão e frequência após acontecer uma falta no local. Entretanto, a GD presente na rede pode diminuir a quantidade de energia que deve ser gerada pelo alimentador principal, diminuindo as perdas na distribuição, e pode ser usada como um gerador independente no caso de falta de energia no alimentador principal, diminuindo o tempo sem energia de algumas cargas, conseqüentemente melhorando a confiabilidade do sistema.

3.5 Problema de Alocação de Chave

A alocação de chaves na rede de distribuição de energia elétrica impacta na confiabilidade e nos custos da operação. Caso uma alocação com um número maior de chaves seja proposta, a confiabilidade do sistema certamente aumentará, porém os custos com investimento em aquisição e manutenção das chaves e o custo com a operação das mesmas também irá aumentar. De forma análoga, caso ocorra uma economia com a quantidade de chaves presente na rede, também haverá um prejuízo devido à energia que não foi distribuída, e a confiabilidade do sistema provavelmente será menor. Por isso, a alocação das chaves deve ser feita de forma otimizada.

O objetivo do PAC em estudo é determinar as melhores quantidades de chaves seccionadoras e de manobra, assim como seus tipos que podem ser manuais ou automáticas, bem como as melhores posições de cada uma delas em redes de distribuição com GDs previamente alocadas. Neste trabalho busca-se minimizar os custos de aquisição e manutenção das chaves e da END, respeitando um conjunto de restrições referentes a topologia da rede, conservação de fluxos, níveis de confiabilidade, capacidades das chaves.

O PAC é um problema de otimização combinatória para o qual, mesmo considerando redes de pequeno porte, existe uma grande quantidade de combinações de soluções possíveis. Exemplificando, para uma rede com m posições passíveis de receber chaves, existem $(q + 1)^m$ possibilidades de alocação, onde q são os tipos de chaves que podem ser alocados. Devido a essa complexidade, métodos exatos não são viáveis para redes de grande porte, para o PAC em estudo nesta dissertação, fazendo necessária a utilização de métodos heurísticos e metaheurísticos. É importante ressaltar que para problemas de alocação de chaves com escopo mais simplificado em relação ao abordado nessa pesquisa e/ou que trata redes de porte menor às consideradas nesta dissertação é possível usar métodos exatos, como discutido no Capítulo 2.

Capítulo 4

Modelo Matemático do PAC

Este capítulo apresenta o modelo matemático, sendo definidas equações que descrevem o comportamento e as condições de contorno do problema. A representação do PAC e seu modelo matemático foram baseados no apresentado por de Assis et al. [2015]. Modificações são apresentadas para incorporar a presença de GD no sistema. Adicionalmente conceitos de teoria de grafo foram utilizados para modelagem e representação das redes.

4.1 Fundamentos sobre Grafos

Um grafo é definido pelo par ordenado $G(V, A)$, em que V é o conjunto dos nós, e A é o conjunto de arestas $(i, j), i \in V$ e $j \in V$ [West, 2000; Tutte et al., 2001]. Os conceitos de grafos mais usados nesse trabalho foram:

- Atributos - Um grafo com atributos possui valores associados a cada um dos nós $i \in V$ do grafo $G(V, A)$.
- Grafo conexo - Um grafo G é dito conexo se e somente se existir um caminho entre todos os pares de nós (i, j) de $G(V, A)$.
- Ciclo - Um ciclo é um caminho no grafo, de comprimento maior ou igual a três, em que o primeiro e o último nó coincidem.
- Árvore - Um grafo é denominado uma árvore quando ele é conexo e não possui ciclos como mostrado na Figura 4.1. Dessa forma, existe apenas um caminho entre cada par de nós, e por consequência uma árvore com n nós possui exatamente $n - 1$ arestas. Uma árvore enraizada possui um nó raiz centralizador. No exemplo da Figura 4.1 podemos dizer que a raiz é o nó 1.

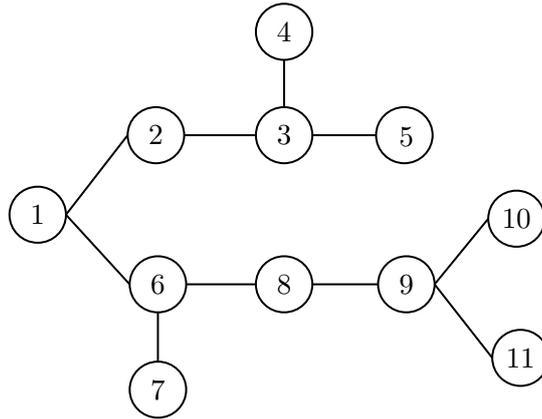


Figura 4.1: Exemplo de uma Árvore.

4.2 Representação

Normalmente uma característica do sistema de distribuição de energia é ser radial, permitindo sua modelagem por uma árvore $T(V, A)$ sendo V o conjunto dos n nós e A o conjunto dos m arcos. Tal estrutura é uma árvore enraizada, onde a raiz é a fonte principal de energia denominada de subestação de distribuição. Cada nó $i \in V$ possui atributos associados como sua carga e número de consumidores. A conexão elétrica entre os nós é representada por um arco $(i, j) \in A$, sendo $i \in V$ e $j \in V$. Cada arco corresponde a um trecho da rede, os quais são locais candidatos para instalação de chaves.

A Figura 4.2 mostra a representação elétrica de uma rede de distribuição com 12 cargas, 2 subestações, 4 chaves seccionadoras e 1 de manobra. Essa mesma rede foi representada como um grafo na Figura 4.3, onde os nós em vermelho são as fontes de energia. Os nós $\{0, 8\}$ são as subestações de distribuição, e no nó 3 existe uma GD alocada. Nas arestas contínuas ocorre o fluxo de energia e são locais candidatos a receber uma chave seccionadora. A aresta pontilhada, aresta $(4, 11)$, é o local onde pode ser alocada uma chave de manobra portanto, em operação normal (sem falha), não existe corrente de energia.

Para facilitar os cálculos relacionados à confiabilidade da rede, nós adjacentes que não são separados por uma chave ou equipamento de proteção, ou seja, que não podem ser eletricamente isolados, são agrupados em setores. A carga e a quantidade de consumidores de um determinado setor é equivalente a soma das cargas e dos consumidores dos nós presentes nesse setor, e a GD do setor é a soma da capacidade das GDs dos seus nós, caso possuam. Na Figura 4.4(a) pode ser observado o agrupamento dos nós da rede em setores, de acordo com a alocação de chaves apresentada na Figura 4.3. A Figura 4.4(b) representa a rede equivalente em setores, como é utilizada no modelo.

A GD foi representada como uma carga negativa adicionada a um nó. Sua geração é sempre suficiente para distribuir energia para o nó em que ela se encontra, e alimenta o setor quando tem

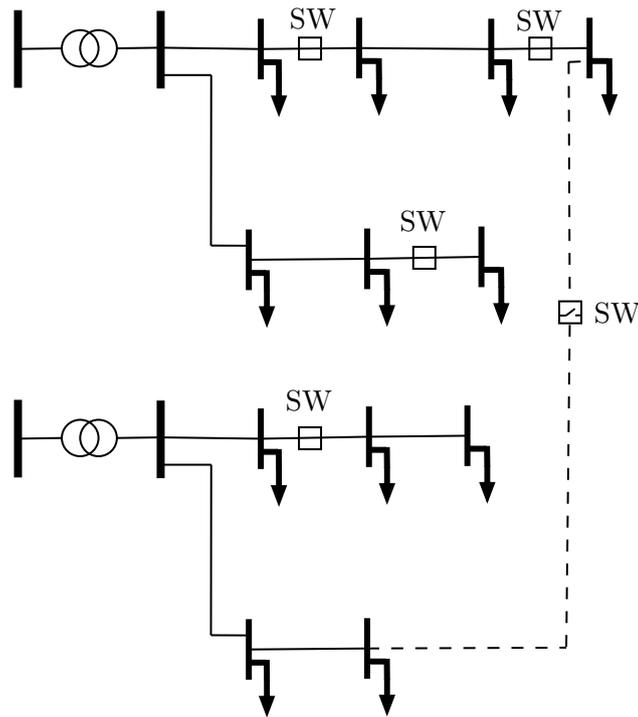


Figura 4.2: Representação da rede elétrica.

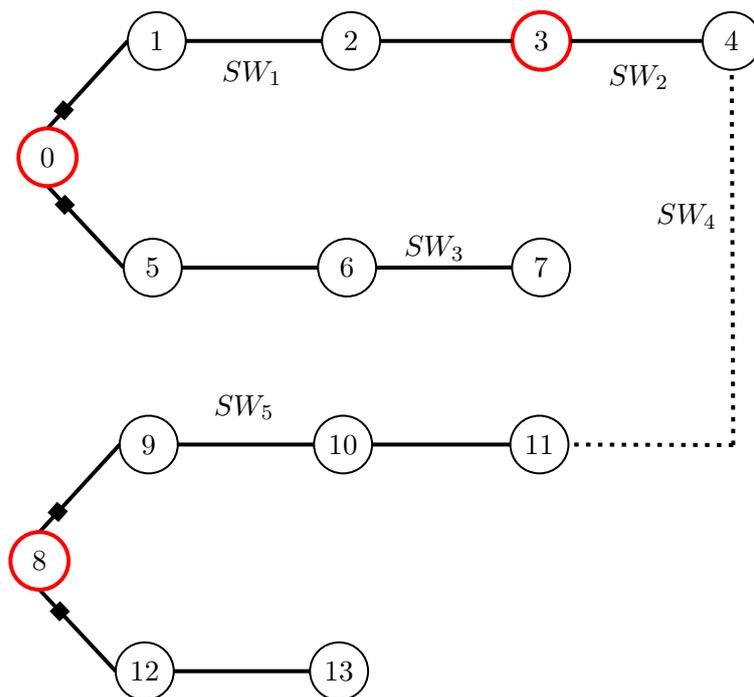


Figura 4.3: Representação por grafo da rede elétrica apresentada na Figura 4.2.

energia suficiente. Foi modelada, da forma apresentada na literatura, como uma carga constante, e tendo geração não intermitente. Na otimização da alocação das chaves é considerada a possibilidade de operação da rede com ilhamento, já que estudos neste campo têm sido desenvolvidos e a agência reguladora atualmente permite essa operação em alguns casos, como citado no Capítulo 2.

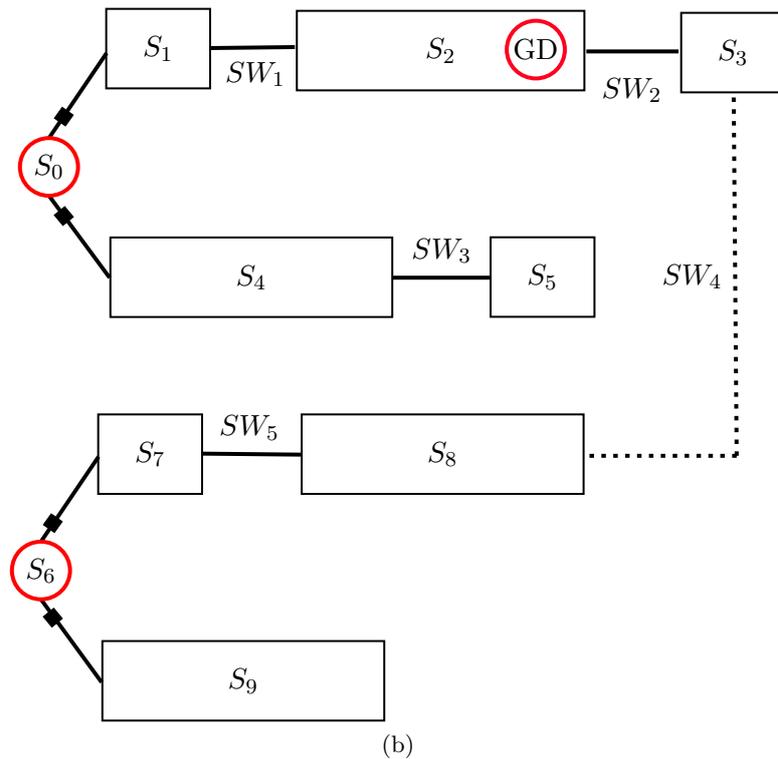
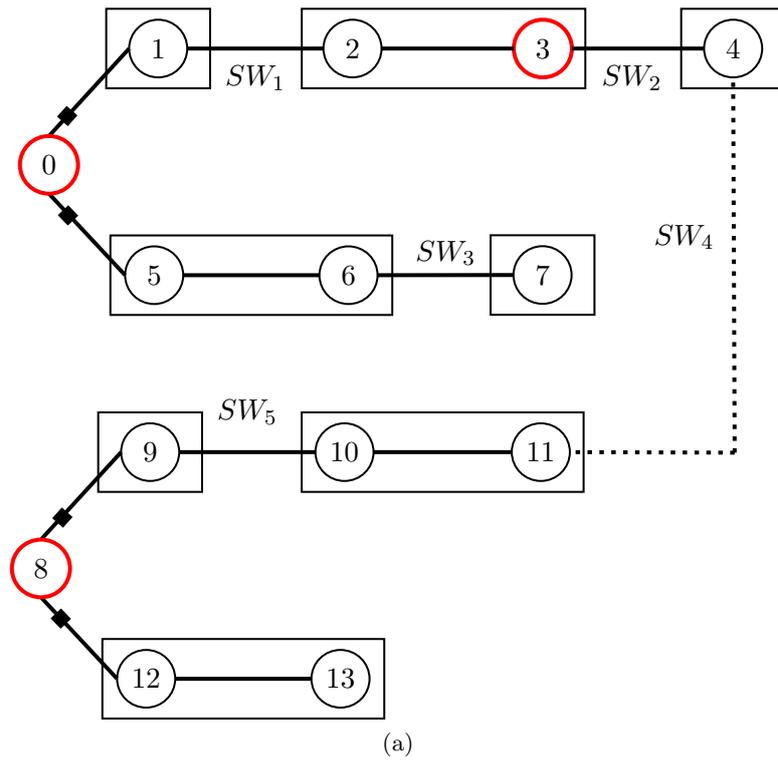


Figura 4.4: Representação em setores da rede apresentada na Figura 4.2.

4.3 Indicadores de Confiabilidade

Os indicadores de confiabilidade são métricas normalmente utilizadas para avaliar o estado de confiabilidade das redes de distribuição, e duas delas amplamente utilizadas são o END (Eq. (3.3))

e o DEC (Eq. (3.1)). Esses índices são expectativas de distribuições de probabilidade [Billinton and Allan, 1996]. Para utilizar a representação por setores esses indicadores foram adaptados, e dessa forma o DEC utilizado é redefinido pela Equação (4.1), e o END pela Equação (4.2).

$$\text{DEC} = \frac{\sum_{k \in S} U_k N_k}{\sum_{k \in S} N_k} \quad (4.1)$$

$$\text{END} = \sum_{k \in S} U_k L_k \quad (4.2)$$

Sendo que $k \in S$ é um setor definido por um subconjunto de nós $V_k \in V$, e S é o conjunto dos setores. N_k é o número de consumidores no setor k , L_k é a carga do setor k , U_k é definido na Equação (4.5) e representa a duração total esperada de interrupção em cada setor k considerando uma falha no setor l e nos demais setores que causam interrupção de energia no setor k .

Na Equação (4.3), é definida a carga de um setor k , onde L_i é a carga do nó i , f_c é o fator de carga, que é a relação entre demanda média e demanda máxima da rede. A Equação (4.4) apresenta o número de consumidores do setor k , sendo N_i a quantidade de consumidores do nó $i \in V_k$. A Equação (4.6) define o cálculo da taxa média de falhas por ano no setor $k \in S$. λ_i é a taxa média de falhas para cada nó $i \in V_k$.

$$L_k = \sum_{i \in V_k} f_c L_i \quad (4.3)$$

$$N_k = \sum_{i \in V_k} N_i \quad (4.4)$$

$$U_k = \sum_{l \in S} \lambda_l t_{kl} \quad (4.5)$$

$$\lambda_k = \sum_{i \in V_k} \lambda_i \quad (4.6)$$

4.4 Tempo de Restauração

Para obter o valor esperado do tempo total de falta de suprimento de energia após a ocorrência de uma falha ($U_k \forall k \in S$), é necessário determinar o tempo total de restauração do fornecimento de energia, apresentado na Equação (4.7), que representa o tempo médio que os consumidores do setor k devem esperar para ter sua energia restabelecida devido a uma falha no setor l . O tempo de restauração é dependente de até três parcelas distintas de tempo:

1. t_l é o tempo médio de localização da falha;
2. t_t é o tempo médio de transferência de carga;
3. t_r é o tempo médio de reparo da falha.

$$t_{kl} = t_l + t_t + t_r \quad (4.7)$$

Assim como apresentado por de Assis et al. [2015] podemos separar o tempo de restauração em 4 casos:

1. $t_{kl} = 0 \rightarrow$ Caso a falha aconteça em um setor l , e existe uma proteção para isolar a falha de um setor a montante k , ou seja a falha ocorrida não interrompe o fornecimento de energia do setor k ;
2. $t_{kl} = t_l \rightarrow$ Caso a falha aconteça em um setor l , e existe uma chave seccionadora que é acionada em um tempo t_l que isola a falha de um setor a montante k , restaurando assim sua energia após o tempo t_l .
3. $t_{kl} = t_l + t_t \rightarrow$ Caso a falha aconteça em um setor l a montante de um setor k . O setor k pode ser isolado da falha por uma chave seccionadora, em seguida existe uma chave de manobra que permite a transferência de carga para outra fonte.
4. $t_{kl} = t_l + t_t + t_r \rightarrow$ Quando $k = l$, ou quando não existe uma forma de restabelecer a energia com a operação de chaves, como ocorre no Caso 2 e 3. Então é necessário aguardar a falha no setor l ser reparada.

Exemplificando, na rede teórica da Figura 4.5 existe uma GD no setor S_2 que pode suprir toda a carga presente no próprio setor, enquanto os setores S_0 e S_6 são as subestações que alimentam a rede. Caso uma falha ocorra no setor S_1 , a proteção localizada entre S_0 e S_1 atua isolando os setores S_1, S_2 e S_3 , os quais ficam sem energia por um tempo t_l , até que as chaves SW_1 e SW_2 são acionadas. Devido à existência de GD no setor S_2 , ele passa a operar ilhado do resto do sistema, ou seja tem sua energia restaurada, caso a GD consiga abastecer toda a carga do setor. Em seguida a chave SW_4 é acionada em um tempo t_t transferindo as cargas do setor S_3 para serem alimentadas pela fonte S_6 . Logo, S_3 tem sua energia restaurada. Em seguida o setor S_1 precisa esperar um tempo adicional t_r até a falha ser reparada. Após o reparo pode-se restabelecer a operação normal do sistema, retornando com as chaves para o estado original de operação e reconectando o setor S_2 ao sistema principal. Um resumo com os tempos de restauração de cada setor devido a uma falha no setor S_1 são apresentados na Tabela 4.1. Através dos valores apresentados, nota-se que uma

falha no setor S_1 não interrompe a energia dos setores S_0 e S_4 a S_9 , somente os setores S_1 , S_2 e S_3 são afetados pela falha, e consequentemente têm sua energia interrompida.

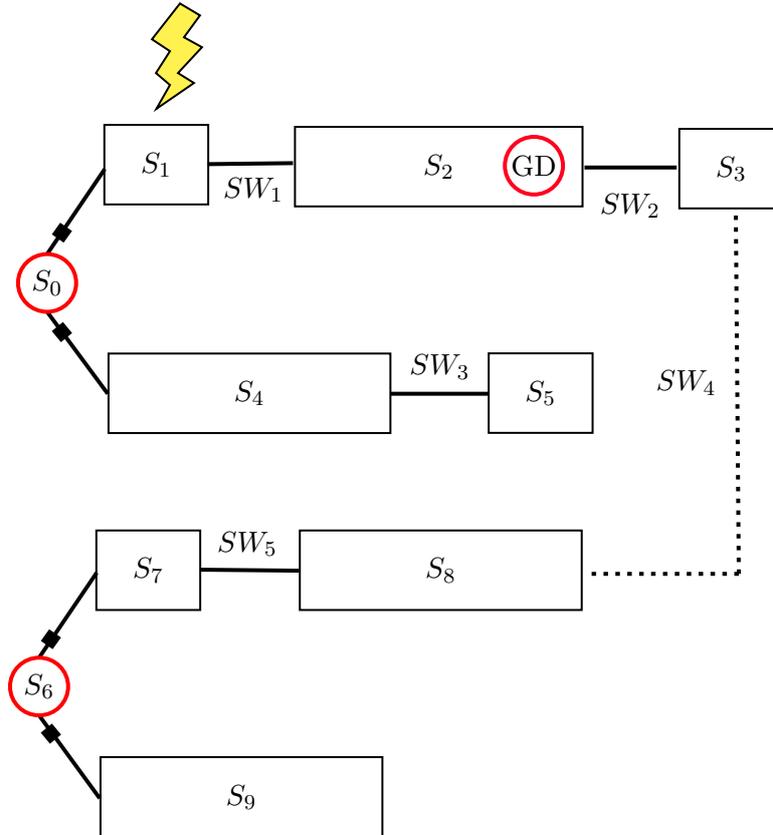


Figura 4.5: Simulação de uma falha ocorrendo no setor S_1 .

Tabela 4.1: Tempo de restauração devido a uma falha no setor S_1 .

Setor	Tempo de Restauração ($t_{k,1}$)
S_0	$t_{0,1} = 0$
S_1	$t_{1,1} = t_l + t_t + t_r$
S_2	$t_{2,1} = t_l$
S_3	$t_{3,1} = t_l + t_t$
S_4	$t_{4,1} = 0$
S_5	$t_{5,1} = 0$
S_6	$t_{6,1} = 0$
S_7	$t_{7,1} = 0$
S_8	$t_{8,1} = 0$
S_9	$t_{9,1} = 0$

Caso não houvesse a geração distribuída no setor S_2 que fosse capaz de atender à carga do próprio setor, então o tempo de restauração nesse setor passaria de t_l para $t_l + t_t$, o que impactaria negativamente no índice de confiabilidade do sistema. Analogamente, se não existissem as chaves SW_1 e SW_2 na posição apresentada, o setor S_2 não poderia operar de forma ilhada. Já a transferência de carga do setor S_3 só foi possível pela existência das chaves SW_2 e SW_4 .

4.5 Formulação Matemática

O modelo matemático utilizado nesse trabalho é baseado no proposto em de Assis et al. [2015]. São definidos 2 conjuntos de variáveis de decisão, X e Y , representando os tipos de chaves: seccionadoras e de manobra, respectivamente. A variável de decisão $x_{ij}^s \in X$ representa os tipos e os lugares das chaves seccionadoras. Se uma chave seccionadora do tipo s for alocada no arco (i, j) então $x_{ij}^s = 1$, e $x_{ij}^s = 0$ caso não seja alocado nenhuma chave seccionadora no arco (i, j) , de forma análoga para as chaves de manobra $y_{ij}^s \in Y$. As variáveis de decisão são definidas a seguir, assim como em de Assis et al. [2015]:

$$x_{ij}^s = \begin{cases} 1, & \text{caso uma chave seccionadora do tipo } s \in SW \text{ for alocada ao trecho } (i, j) \in A; \\ 0, & \text{caso não seja alocada chave.} \end{cases}$$

$$y_{ij}^s = \begin{cases} 1, & \text{caso uma chave de manobra do tipo } s \in SW \text{ for alocada ao trecho } (i, j) \in A; \\ 0, & \text{caso não seja alocada chave.} \end{cases}$$

A função objetivo $J(X, Y)$, definida na Equação (4.8), busca a redução do custo total da rede. Sua primeira parcela é referente ao prejuízo por energia que não foi distribuída considerando a alocação das chaves, e a segunda parcela é referente aos custos de aquisição e manutenção das chaves alocadas na solução proposta. De acordo com as definições apresentadas previamente, o PAC pode ser modelado como se segue:

$$\min J(X, Y) = c_e END(X, Y) + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} c_s (x_{ij}^s + y_{ij}^s) \quad (4.8)$$

s.a.

$$DEC(X, Y) \leq DEC_{lim} \quad (4.9)$$

$$x_{ij}^s + y_{ij}^s \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A, \forall s \in S \quad (4.10)$$

$$f_{ij} x^s + f_{ij} y^s \leq F_s \quad \forall (i, j) \in A, \forall s \in S \quad (4.11)$$

$$x_{ij}^s, y_{ij}^s \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, \forall s \in S \quad (4.12)$$

Onde c_e é o custo com a END (R\$), c_s é o custo da chave do tipo $s \in SW$ (R\$), o qual é anualizado e inclui o custo de aquisição amortizado, instalação e manutenção.

A restrição apresentada em (4.9) garante que o DEC da solução deve respeitar um limite estabelecido. As restrições (4.10) garantem que no máximo uma chave será instalada em cada arco da rede. As restrições de fluxo (4.11) indicam que a capacidade F_s da chave do tipo s que

estiver instalada no arco (i, j) , deve permitir a corrente passante f_{ij} neste arco. A restrição (4.12) indica que as variáveis x_{ij}^s e y_{ij}^s assumem valores 0, 1 apenas. Isso quer dizer que o processo de otimização deve decidir se a chave do tipo s está presente no arco (i, j) , assumindo valor 1, ou está ausente, assumindo valor 0. Caso na rede não existisse GD então é comum acrescentar uma restrição (de acordo com de Assis et al. [2015]), que impossibilita o fluxo negativo de energia. Porém na existência de GD é possível que esse fluxo seja negativo, ou seja, ter sentido inverso. Para a simulação do fluxo de potência na rede foi utilizado o método *backward/forward sweep*, os detalhes podem ser consultados no trabalho desenvolvido por Assis [2014].

Em suma, foi apresentada a modelagem do sistema para alocação otimizada de chaves. A metodologia de otimização proposta é baseada em algoritmo memético e será apresentada no próximo capítulo.

Capítulo 5

Metodologia de Solução

A metodologia proposta para resolver o PAC apresentado é baseada no trabalho desenvolvido por de Assis et al. [2015], a qual se alicerça nos conceitos de algoritmos meméticos. Neste capítulo serão apresentadas as etapas e elementos do método de solução proposto para o PAC em estudo nesta pesquisa.

5.1 Algoritmo Memético

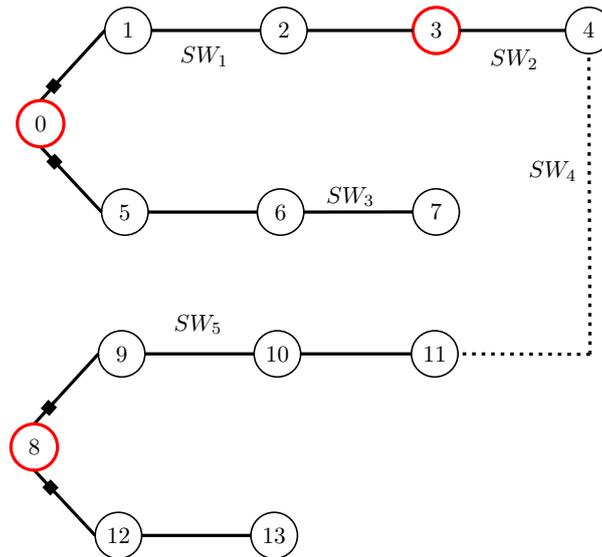
Os AGs [Grefenstette, 1986] são categorizados como heurísticas de pesquisa globais que usam processo iterativo para obter as soluções desejadas. Os AGs geralmente fornecem soluções aproximadas para diversos problemas. São usadas várias técnicas bioinspirada, como herança, seleção, cruzamento ou recombinação, mutação e reprodução [Almufti et al., 2019]. A área de estudo de sistemas evolutivos que incorporam sistemas maiores ou outros métodos ou estruturas de dados desenvolve o conceito de Algoritmo Memético (AM) [Eiben and Smith, 2003]. Ou seja, AG são inspirados em tentar emular a evolução biológica, enquanto AM simulam também a evolução cultural [Moscato, 2000]. Os principais elementos de um algoritmo genético/memético serão apresentados nas seções a seguir:

5.1.1 Indivíduo

AG e AM usam um vocabulário empregado na genética natural. Cada indivíduo presente na população representa uma solução potencial para o problema, o qual contém uma codificação chamada de genótipo, que representa uma determinada solução do espaço de busca, também conhecida como fenótipo.

Outro conceito importante é o do cromossomo do indivíduo, que retrata a codificação de uma solução, novamente conhecido como genótipo, ou seja, como um indivíduo (solução) é representado. A forma de representação pode variar a depender da representação adotada para uma solução do problema abordado. Normalmente utiliza-se um conjunto de valores, como uma cadeia binária de tamanho fixo, de caracteres, ou valores reais. Neste trabalho a codificação de uma solução

para o PAC é representada por dois vetores inteiros, um para determinar o posicionamento, tipo e quantidade de chaves seccionadoras e o outro para o análogo referente às chaves de manobra. A Figura 5.1 exemplifica uma possível solução do PAC para tal rede (5.1(a)) e a representação do cromossomo (5.1(b)) referente a essa solução, onde cada posição representa um local na rede (arco), sendo possível realizar a alocação de uma chave, com o valor assumido por cada posição indicando a ausência de uma chave ou o tipo da chave alocada.



(a) Alocação de chaves em uma rede elétrica.

Arcos Fechados	(0,1)	(1,2)	(2,3)	(3,4)	(0,5)	(5,6)	(6,7)	(8,9)	(9,10)	(10,11)	(8,12)	(12,13)
Valores	0	2	0	1	0	0	1	0	2	0	0	0
Arcos Abertos	(4,11)											
Valores	1											

(b) Cromossomo referente à solução em (a).

Figura 5.1: Solução do PAC (a) × Representação Cromossômica (b).

Um gene é uma posição do cromossomo. Associando o conceito a uma solução do PAC, em nossa codificação, cada gene representa um arco da rede. Um alelo é um valor atribuído a um gene, ou seja, o conteúdo presente em uma posição do cromossomo. Na codificação utilizada, o alelo é o tipo da chave a ser alocada no respectivo arco, podendo assumir valores no intervalo $[0, |SW|]$, sendo que 0 indica que não há chave alocada na posição (i, j) , e os valores entre $[1, |SW|]$ representam o tipo da chave alocada. Como exemplo na Figura 5.1(b), o primeiro gene das chaves seccionadoras é referente à variável $x_{0,1} = 0$ (veja Capítulo 4), ou seja, o arco $(0, 1)$ não possui chave seccionadora alocada. Por sua vez, a variável $x_{1,2} = 2$ indica que o arco $(1, 2)$ da rede recebeu uma chave seccionadora do tipo 2. Informações contidas no tipo da chave indicam se a mesma é manual ou automática e a capacidade de fluxo que suporta (veja Capítulo 6).

5.1.2 Função de Aptidão

Também conhecida como função *fitness*, é uma função que avalia a qualidade de um indivíduo (solução). Quanto melhor a aptidão de um indivíduo, ou seja quanto maior o valor de *fitness*, melhor é a solução que o indivíduo representa. A função de aptidão permite comparar indivíduos distintos e classificá-los. Em algoritmos evolutivos tal função é a base da seleção. Normalmente, em problemas de minimização, a função *fitness* é definida a partir da representação inversa da função objetivo, para representar o fenótipo correspondente [Eiben and Smith, 2003]. Por esse motivo é utilizado o inverso da função objetivo apresentada na Equação (4.8). Sendo assim, a função de aptidão é definida como apresentado na Equação (5.1).

$$\frac{1}{J(X, Y)} = \left(c_e \text{END}(X, Y) + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{s \in S} c_s (x_{ij}^s + y_{ij}^s) \right)^{-1} \quad (5.1)$$

5.1.3 População

A população é um conjunto de indivíduos (conjunto de soluções). Uma heurística construtiva é utilizada para gerar a população inicial, se valendo do benefício individual da alocação de uma chave em uma determinada posição da rede. Então, considerando uma rede sem nenhuma chave, para cada arco é avaliado o benefício de ter uma chave alocada nesta posição. Quanto maior for o benefício, então maior é a probabilidade desse arco ser escolhido pela heurística construtiva proposta para receber uma chave.

De acordo com da Silva [2002] o tamanho da população em algoritmos populacionais evolutivos tipicamente variam entre 30 a 200 indivíduos. Tradicionalmente os algoritmos genéticos são implementados através de uma população de tamanho determinado, onde seus indivíduos não possuem nenhum tipo de organização ou relação entre si. Então um operador de seleção é proposto para escolher pares de indivíduos que participarão do processo de reprodução para geração de uma população intermediária. Nesse tipo de implementação o cruzamento acontece com uma determinada taxa de *crossover* que precisa ser definida. Para problemas de otimização em larga escala uma população grande poderia manter a diversidade e garantir uma melhor exploração do espaço de busca, porém não é viável computacionalmente realizar o cruzamento com todos indivíduos. Decidir a quantidade ideal e quais pares de indivíduos irão participar do *crossover* não é uma tarefa trivial e com certeza influencia na busca pela solução ótima.

Baseado na população proposta por Mendes et al. [2005] foi utilizada uma população hierarquicamente estruturada com 13 indivíduos, os quais são organizados em uma árvore ternária com três níveis, conforme ilustrado na Figura 5.2. Nesta estrutura cada nó representa um indivíduo da população, ou seja, armazena uma solução. Neste modelo de árvore existem 4 subárvores cha-

madras de *clusters*, na qual os indivíduos líderes de cada *cluster* possui aptidão maior do que seus indivíduos subordinados. A taxa de cruzamento é dispensável, já que o operador de seleção é determinístico, pois todos os pares (líder-subordinado) participam do cruzamento. Caso o filho gerado possua aptidão maior que seu progenitor de menor aptidão (subordinado), este é substituído. Ao final de cada geração a população é reorganizada de acordo com o *fitness* de cada indivíduo para manter sua hierarquia.

Utilizando esse método, de acordo com Mendes et al. [2005], a quantidade de indivíduos pode ser reduzida comparada a uma população não estruturada e ainda assim continuar alcançando resultados com a mesma qualidade. Para o PAC abordado nessa pesquisa e considerando a dimensão das redes tratadas, utilizar uma população hierarquicamente estruturada é de extrema importância no intuito de se diminuir o esforço computacional e manter a eficácia da abordagem, consequentemente a qualidade das soluções alcançadas.

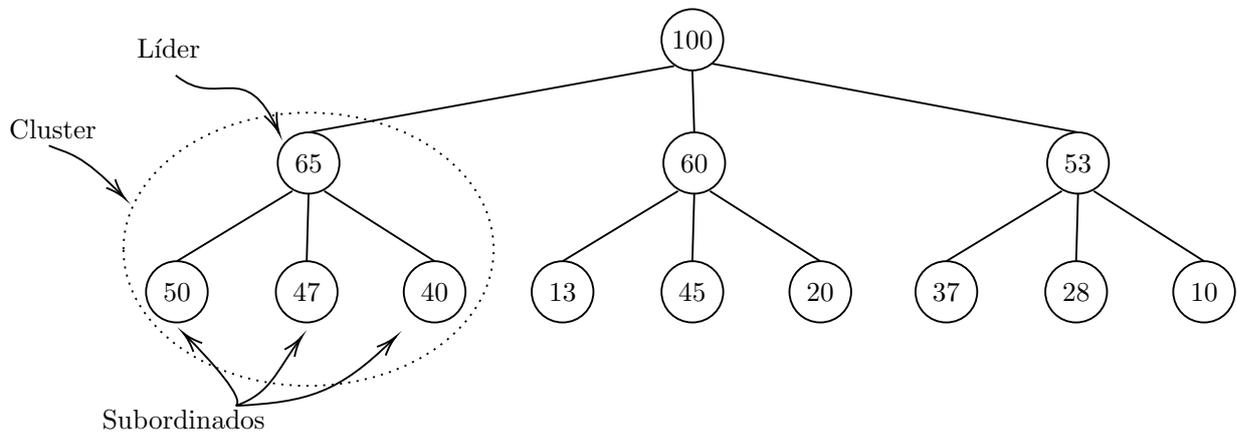


Figura 5.2: População estruturada, com cada nó representando um indivíduo e o valor em cada nó sua aptidão. Todo líder tem aptidão maior que seus subordinados, e cada um dos 12 pares (líder, subordinado) participam do cruzamento.

5.1.4 Seleção

Devido à utilização de uma população hierarquicamente estruturada, e consequentemente de tamanho reduzido, todos os pares de indivíduos (líder e subordinados) são selecionados para o cruzamento.

5.1.5 Crossover

O *Crossover* é um operador genético binário que permite o processo reprodutivo dos indivíduos da população, através do qual um novo indivíduo é gerado a partir de dois indivíduos da população atual. Esse novo indivíduo pode ou não fazer parte da população da próxima geração. Neste trabalho foi utilizado o *one-point crossover*, em que um ponto p_c dos cromossomos dos indivíduos

pais é aleatoriamente escolhido. O cromossomo do descendente recebe os genes do progenitor 1 (líder) da primeira posição até a posição p_c , a segunda parte do descendente recebe os genes do progenitor 2 (subordinado) da posição $p_c + 1$ até o final.

5.1.6 Mutação

O operador de mutação representa uma anomalia inserida no cromossomo do indivíduo, com objetivo de aumentar a diversidade da população. É definida uma taxa de mutação m_r entre $[0, 1]$ constante para todo o algoritmo, que representa a probabilidade do indivíduo sofrer mutação. Para cada gene é sorteado um valor aleatório também entre $[0, 1]$. Caso o valor sorteado seja menor que m_r , então este gene irá sofrer mutação. A mutação foi implementada considerando três possibilidades de execução, a escolha entre cada possibilidade é referente ao valor do gene:

1. *Caso não tenha chave* alocada nessa posição, *então* com uma probabilidade p_{mr} uma chave manual é alocada.
2. *Caso tenha uma chave automática* alocada nessa posição, *então* substitua por uma chave manual.
3. *Caso tenha uma chave manual* alocada nessa posição, *então* com iguais probabilidades, remova *ou* substitua por uma chave automática.

Após este processo, é calculado e verificado o *fitness* do indivíduo gerado, caso este seja uma solução melhor do que o progenitor de menor *fitness* este progenitor é substituído pelo indivíduo que foi gerado, descartando o pior. Dessa forma mantendo a mesma quantidade de indivíduos na população da próxima geração.

5.1.7 Busca Local

O algoritmo memético tem como base o AG, porém além da evolução do código genético também incorpora a ideia de uma “evolução cultural”, onde a aptidão de um indivíduo pode ser alterada durante sua existência dentro da população e pode se autopropagar. No caso do AM é inserido elementos do ambiente na forma de uma busca local. Neste trabalho a busca local é realizada após o *crossover* e mutação, são selecionados 2 indivíduos, o melhor da população e um outro escolhido aleatoriamente, são selecionado apenas 2 devido a complexidade computacional da busca local, bem como do cálculo do *fitness*. A Figura 5.3 apresenta o diagrama do algoritmo memético implementado.

A busca local procura uma solução de melhor qualidade na vizinhança da solução representada por um determinado indivíduo, o tamanho da vizinhança N_s é um parâmetro do algoritmo. A

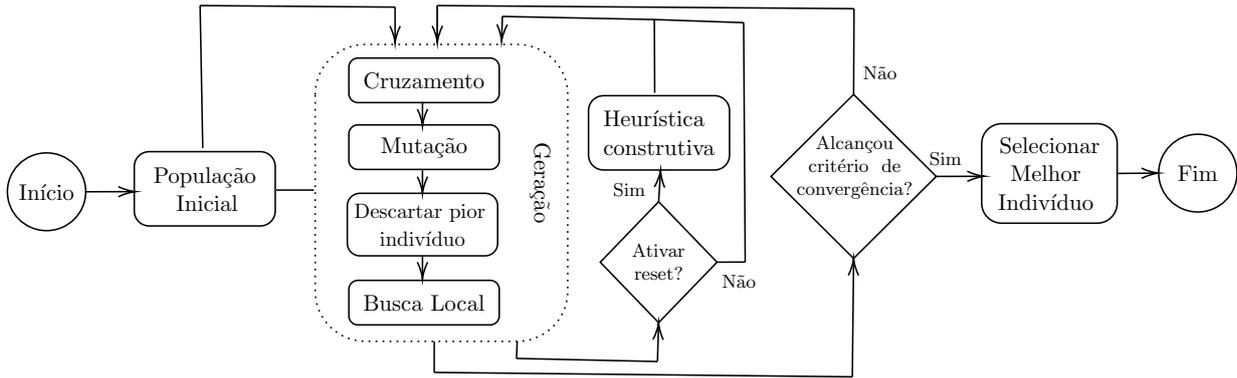


Figura 5.3: Diagrama do Algoritmo Memético.

vizinhança é a quantidade de posições em que pode ser navegado a partir de um gene à esquerda ou à direita do cromossomo. Todo movimento de busca realizado só é aceito quando se encontra uma solução melhor que a representada atualmente pelo indivíduo. A busca termina quando encontra uma solução melhor ou quando atinge a quantidade máxima de movimentos. Foram definidos 3 movimentos para a busca. Os quais são executados na ordem apresentada a seguir:

1. **Troca** - Troca a posição de uma chave para outro arco possível na vizinhança.
2. **Inserção** - Aloca uma chave em uma posição que possa receber.
3. **Remoção** - Remove uma chave existente.

5.1.8 Conceitos Subjacentes

Uma geração em um algoritmo evolutivo é um ciclo de evolução, ou seja uma população que passou pelo processo de seleção, *crossover*, mutação e no caso do AM a busca local. No final de uma geração a população é reordenada para manter a estrutura hierárquica da população, então todo o processo é repetido até atingir a condição de parada. O critério de parada utilizado neste trabalho é um número máximo G_t de gerações.

Por ser um algoritmo de otimização não exato, existe uma preocupação de evitar mínimos locais. A inserção de diversidade ajuda a mitigar esse problema. Os elementos do AG que trazem diversificação são a quantidade de indivíduos na população, e a taxa em que são feitos cruzamentos e mutações.

Um mecanismo de reinício (*reset*) foi desenvolvido para evitar que o algoritmo fique preso em um mínimo local. Caso a população não melhore seu indivíduo mais apto por uma determinada quantidade de gerações G_r , então o melhor indivíduo é mantido e todos os demais são removidos da população atual e uma nova população é gerada através da heurística construtiva. O pseudocódigo do algoritmo memético é apresentado no Algoritmo 1. No algoritmo a função *gerarPopInicial()* na linha 4 gera a população inicial pela heurística construtiva, na linha 6 a função *reordenaPop(P)*

estrutura a população na hierarquia proposta. No *loop* da linha 10 até a linha 20 temos o *loop* principal do algoritmo em que acontece o processo evolutivo, ocorrendo as operações genéticas, um novo descendente é gerado na linha 11 passando pelo processo de *crossover*, e com uma certa probabilidade m_r sofre mutação (linha 14), na linha 17 é decidido se esse indivíduo gerado é mantido na população atual ou descartado. A busca local nos 2 indivíduos é realizada na linha 21, o mecanismo de *reset* é implementado na linha 25 pela função *naoMelhorou*(P).

Algoritmo 1 Algoritmo Memético

```

1:  $gen \leftarrow 0$ 
2:  $melhorInd \leftarrow \emptyset$ 
3: while  $gen < G_t$  do
4:    $P \leftarrow gerarPopInicial()$ 
5:    $calculaFitness(P)$ 
6:    $reordenaPop(P)$ 
7:    $melhorInd \leftarrow P_0$ 
8:    $reset \leftarrow false$ 
9:   while not  $reset$  do
10:    for cada par (lider, subordinado)  $\in P$  do
11:       $descendente \leftarrow crossover(lider, subordinado)$ 
12:       $r \leftarrow Random(0, 1)$ 
13:      if  $r \leq m_r$  then
14:         $descendente \leftarrow Mutate(descendente)$ 
15:      end if
16:       $calculaFitness(descendente)$ 
17:      if  $fitness(descendente) > fitness(subordinado)$  then
18:         $subordinado \leftarrow descendente$ 
19:      end if
20:    end for
21:     $buscaLocal(P)$ 
22:     $calculaFitness(P)$ 
23:     $reordenaPop(P)$ 
24:     $melhorInd \leftarrow P_0$ 
25:    if  $naoMelhorou(P)$  por  $G_r$  gerações or  $gen == G_t$  then
26:       $reset \leftarrow true$ 
27:    end if
28:     $gen ++$ 
29:  end while
30: end while
31: return  $melhorInd = 0$ 

```

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos estudos realizados para validar a metodologia proposta. Como os algoritmos dependem da definição de valores de diversos hiperparâmetros, na primeira seção deste capítulo é mostrado como foi feita tal escolha, a qual se baseou em testes estatísticos para maior confiabilidade. Estes testes são relevantes não só para a otimização dos hiperparâmetros mas também para a seção seguinte deste capítulo, que mostra os resultados da aplicação do algoritmo para solução do PAC em redes reais de grande porte.

6.1 Otimização de Hiperparâmetros

O método proposto faz uso de alguns hiperparâmetros que foram introduzidos no Capítulo 5. O algoritmo é sensível aos valores assumidos por tais hiperparâmetros, assim é apresentada a estratégia usada para explorar o espaço de busca e encontrar um bom conjunto de valores para os hiperparâmetros. Para definir o espaço de busca foram levados em consideração os valores utilizados por Assis [2014], e o conjunto de valores foi definido usando valores próximos. O conjunto de valores candidatos podem ser observados na Tabela 6.1, bem como uma breve descrição de cada hiperparâmetro. Para o processo de otimização dos hiperparâmetros, foi utilizada uma rede real com 4 alimentadores e 1887 nós e, para evitar o viés, tal rede foi utilizada *apenas* neste estudo.

Tabela 6.1: Conjunto de hiperparâmetros a ser otimizado e o espaço de busca considerado.

Hiperparâmetro	Descrição	Espaço de busca
m_r	Taxa de mutação	{0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3}
pm_r	Taxa de alocação de chaves manuais após seleção para mutação	{0,01; 0,05; 0,1; 0,2}
N_s	Tamanho da vizinhança	{1; 2; 3}
M_{max}	Quantidade máximo de movimentos	{5; 15; 25}
G_r	Quantidade máxima de gerações sem melhora para <i>reset</i>	{10; 15; 20; 25; 30; 35; 40}
G_t	Quantidade total de gerações	{100}

Serão avaliadas todas as combinações de possibilidades utilizando como comparação os custos calculados pela função objetivo da Equação (4.8), tendo um espaço de busca total no tamanho de $5 \times 4 \times 3 \times 3 \times 7 \times 1 = 1260$. O parâmetro G_t tem o valor fixado em 100 pois um dos objetivos é comparar o desempenho dos algoritmos de forma justa, então será utilizada a mesma

quantidade de gerações em todos os casos. Por se tratar de um método não exato estocástico, apenas executar uma única vez não confere confiabilidade aos resultados. Para mitigar esta questão cada combinação pode ser executada múltiplas vezes. Neste trabalho foram realizadas 30 execuções para cada combinação de valores, para alcançar maior confiança estatística. As execuções múltiplas aumentam a quantidade total de execuções do algoritmo para $1260 \times 30 = 37800$, o qual é um valor inviável computacionalmente devido ao fato de cada execução demorar 1h em média para a rede utilizada. Por esse motivo o processo de otimização de hiperparâmetros foi dividido em 3 passos de forma a simplificá-lo sem prejudicar a qualidade dos resultados.

6.1.1 Passo 1

Para a primeira simplificação não foi considerado o G_r , pois este é um hiperparâmetro que controla o reinício (mecanismo de *reset*) dos algoritmos, e não está presente em suas definições originais. Além disso, nesta etapa o algoritmo foi executado apenas uma vez para cada combinação, perfazendo um total de 180 execuções. O resultado de cada execução pode ser observado na Tabela 6.2. Tais resultados estão ordenados pelo custo.

6.1.2 Passo 2

Para maior confiabilidade dos resultados e redução das incertezas, as 5 melhores combinações do passo 1 (Tabela 6.3) foram selecionadas para serem executadas 30 vezes cada uma. A Figura 6.1 mostra, em um gráfico de dispersão, o resultado final de cada execução para cada uma das 5 combinações. Este gráfico proporciona uma visão geral de todos os resultados obtidos, entretanto ainda não é possível identificar uma tendência de qual combinação de valores fornece soluções melhores. A Figura 6.2 mostra um box plot de cada combinação apresentada na Tabela 6.3, sendo possível verificar a existência de apenas um *outlier* e as distribuições de custos, no geral, parecem semelhantes entre as combinações. A Figura 6.3 mostra a evolução no custo (Eixo das ordenadas) de cada uma das 30 execuções (Eixo das abscissas), onde cada cor representa um conjunto de hiperparâmetros, e cada subgráfico mostra o resultado de uma determinada geração.

Para verificar de forma mais criteriosa qual dos conjuntos de hiperparâmetros é o melhor, é necessário comparar suas populações. Para isso, temos que identificar se a distribuição de custo dessas populações são diferentes para em seguida poder afirmar que uma média é melhor que a outra. A Tabela 6.4 apresenta a média ($\mu_{\bar{X}}$) e o desvio padrão ($\sigma_{\bar{X}}$) do custo das soluções obtidas considerando as 30 execuções para as 5 melhores combinações do passo 1. Para esta comparação foi verificado se as populações seguem uma distribuição normal e se têm mesma variância. Para o primeiro, usamos o teste de *Shapiro-Wilk* [Shapiro and Wilk, 1965] e para o segundo usamos o teste de *Levene* [Brown and Forsythe, 1974]. Realizando estes testes podemos afirmar que as

#	m_r	pm_r	N_s	M_{max}	Custo (R\$)	#	m_r	pm_r	N_s	M_{max}	Custo (R\$)	#	m_r	pm_r	N_s	M_{max}	Custo (R\$)
1	0,05	0,20	2	15	46507,48	61	0,10	0,05	1	25	51016,19	121	0,20	0,01	3	15	54640,53
2	0,05	0,20	3	15	48036,35	62	0,10	0,05	1	15	51016,19	122	0,20	0,01	3	25	54640,53
3	0,10	0,01	1	25	48150,89	63	0,01	0,20	3	5	51064,26	123	0,20	0,10	3	5	54748,26
4	0,10	0,01	1	15	48150,89	64	0,20	0,01	1	15	51119,76	124	0,01	0,01	3	15	54786,27
5	0,05	0,05	2	25	48305,10	65	0,20	0,01	1	25	51119,76	125	0,01	0,01	3	25	54786,27
6	0,05	0,01	3	25	48330,84	66	0,01	0,10	3	5	51154,78	126	0,01	0,20	1	15	54789,79
7	0,05	0,05	1	5	48373,15	67	0,10	0,05	3	5	51165,23	127	0,20	0,20	2	5	54931,02
8	0,05	0,10	3	5	48377,90	68	0,05	0,10	1	5	51239,10	128	0,30	0,05	2	5	54936,41
9	0,05	0,01	3	5	48671,61	69	0,10	0,05	3	15	51423,36	129	0,01	0,10	2	5	54949,86
10	0,05	0,10	2	5	48738,14	70	0,10	0,05	3	25	51423,36	130	0,20	0,20	3	5	55000,24
11	0,05	0,05	3	5	48754,66	71	0,10	0,10	1	5	51524,80	131	0,01	0,05	3	5	55292,54
12	0,05	0,20	2	5	48832,58	72	0,10	0,20	3	15	51692,02	132	0,30	0,10	1	5	55308,82
13	0,05	0,20	3	25	48845,96	73	0,20	0,01	1	5	51726,62	133	0,01	0,05	1	5	55358,95
14	0,05	0,20	3	5	48881,87	74	0,10	0,10	2	5	51768,99	134	0,30	0,20	3	5	55389,35
15	0,10	0,01	3	5	48886,18	75	0,10	0,20	2	5	51945,70	135	0,01	0,20	1	25	55416,50
16	0,10	0,10	3	5	49053,67	76	0,01	0,01	1	5	52423,15	136	0,20	0,05	1	25	55626,42
17	0,05	0,01	2	5	49110,45	77	0,01	0,10	3	25	52425,58	137	0,20	0,05	1	15	55626,42
18	0,05	0,01	1	5	49231,24	78	0,01	0,10	3	15	52425,58	138	0,20	0,20	2	15	55652,40
19	0,10	0,20	2	15	49479,99	79	0,10	0,05	2	5	52518,74	139	0,20	0,20	2	25	55652,40
20	0,05	0,01	3	15	49495,44	80	0,10	0,10	2	25	52561,28	140	0,01	0,05	3	25	55711,20
21	0,05	0,01	2	25	49510,95	81	0,10	0,10	2	15	52561,28	141	0,01	0,05	3	15	55711,20
22	0,05	0,01	2	15	49510,95	82	0,20	0,05	1	5	52614,06	142	0,20	0,20	1	5	55747,06
23	0,05	0,01	1	25	49513,82	83	0,10	0,20	3	5	52670,36	143	0,30	0,20	2	15	55976,82
24	0,05	0,01	1	15	49513,82	84	0,20	0,05	3	15	52680,03	144	0,30	0,20	2	25	55976,82
25	0,05	0,10	1	25	49599,65	85	0,20	0,05	3	25	52680,03	145	0,30	0,01	3	15	56240,84
26	0,05	0,10	1	15	49599,65	86	0,20	0,05	3	5	52723,76	146	0,30	0,05	2	25	56293,76
27	0,10	0,01	3	25	49602,43	87	0,01	0,01	3	5	52784,62	147	0,30	0,05	2	15	56293,76
28	0,10	0,01	3	15	49602,43	88	0,01	0,20	1	5	52820,58	148	0,20	0,01	2	25	56333,00
29	0,05	0,20	1	15	49750,03	89	0,01	0,20	2	25	52855,31	149	0,20	0,01	2	15	56333,00
30	0,05	0,20	1	25	49750,03	90	0,01	0,20	2	15	52855,31	150	0,30	0,01	1	15	56361,63
31	0,10	0,20	3	25	49752,86	91	0,20	0,10	2	15	52892,37	151	0,30	0,01	1	25	56361,63
32	0,01	0,01	2	5	49806,82	92	0,20	0,10	2	25	52892,37	152	0,30	0,10	3	5	56508,07
33	0,10	0,10	3	25	49845,78	93	0,01	0,01	2	15	53050,52	153	0,30	0,01	3	25	56757,02
34	0,10	0,10	3	15	49845,78	94	0,01	0,01	2	25	53050,52	154	0,30	0,10	2	5	56837,10
35	0,05	0,05	2	5	49895,53	95	0,20	0,10	2	5	53282,42	155	0,30	0,05	3	15	56865,76
36	0,05	0,10	3	25	49955,82	96	0,10	0,20	1	25	53285,49	156	0,30	0,05	3	25	56865,76
37	0,05	0,10	3	15	49955,82	97	0,10	0,20	1	15	53285,49	157	0,30	0,05	1	5	57105,90
38	0,05	0,05	1	25	50054,65	98	0,30	0,01	1	5	53338,65	158	0,20	0,10	1	5	57188,70
39	0,05	0,05	1	15	50054,65	99	0,20	0,05	2	15	53342,99	159	0,30	0,05	3	5	57688,24
40	0,01	0,20	2	5	50119,28	100	0,20	0,05	2	25	53342,99	160	0,30	0,05	1	15	57803,28
41	0,05	0,20	2	25	50224,90	101	0,01	0,10	1	5	53365,13	161	0,30	0,05	1	25	57803,28
42	0,10	0,20	1	5	50250,24	102	0,01	0,05	2	15	53632,42	162	0,30	0,20	2	5	57971,32
43	0,05	0,10	2	25	50264,42	103	0,01	0,05	2	25	53632,42	163	0,30	0,10	3	15	58101,21
44	0,05	0,10	2	15	50264,42	104	0,20	0,01	3	5	53766,76	164	0,30	0,10	3	25	58101,21
45	0,05	0,05	2	15	50345,10	105	0,01	0,10	2	15	53978,98	165	0,20	0,20	1	15	58249,02
46	0,05	0,20	1	5	50359,15	106	0,01	0,10	2	25	53978,98	166	0,20	0,20	1	25	58249,02
47	0,05	0,05	3	25	50384,55	107	0,20	0,05	2	5	54043,00	167	0,30	0,01	2	25	58264,20
48	0,05	0,05	3	15	50384,55	108	0,30	0,01	2	5	54107,62	168	0,30	0,01	2	15	58264,20
49	0,10	0,01	2	5	50403,61	109	0,20	0,01	2	5	54393,75	169	0,30	0,20	3	15	58622,08
50	0,10	0,01	1	5	50416,55	110	0,20	0,10	1	25	54422,99	170	0,30	0,20	3	25	58622,08
51	0,10	0,10	1	25	50452,08	111	0,20	0,10	1	15	54422,99	171	0,30	0,10	2	15	58744,87
52	0,10	0,10	1	15	50452,08	112	0,20	0,10	3	25	54484,74	172	0,30	0,10	2	25	58744,87
53	0,10	0,20	2	25	50614,96	113	0,20	0,10	3	15	54484,74	173	0,30	0,01	3	5	58862,75
54	0,10	0,05	1	5	50663,49	114	0,01	0,10	1	15	54557,14	174	0,30	0,20	1	5	59134,84
55	0,01	0,20	3	15	50672,43	115	0,01	0,10	1	25	54557,14	175	0,01	0,05	1	25	59605,35
56	0,01	0,20	3	25	50672,43	116	0,20	0,20	3	25	54565,60	176	0,01	0,05	1	15	59605,35
57	0,10	0,05	2	25	50828,93	117	0,20	0,20	3	15	54565,60	177	0,30	0,10	1	15	60277,83
58	0,10	0,05	2	15	50828,93	118	0,01	0,05	2	5	54596,88	178	0,30	0,10	1	25	60277,83
59	0,10	0,01	2	25	50869,72	119	0,01	0,01	1	15	54602,40	179	0,30	0,20	1	25	61285,94
60	0,10	0,01	2	15	50869,72	120	0,01	0,01	1	25	54602,40	180	0,30	0,20	1	15	61285,94

Tabela 6.2: Resultados de cada execução do passo 1.

distribuições seguem uma distribuição normal e tem variâncias próximas o suficiente.

Com estes resultados pôde-se fazer o teste de hipótese, foi utilizado o teste-Z [Pearson, 1938] já que temos 30 execuções em cada amostra. O intervalo de confiança desse teste foi definido como 95%. Caso o resultado do teste apresente uma confiança menor que esse valor não poderemos

Tabela 6.3: 5 melhores resultados do teste do passo 1.

Combinação	m_r	pm_r	N_s	M_{max}	$Custo (R\$)$
#1	0,05	0,20	2	15	46507,48
#2	0,05	0,20	3	15	48036,35
#3	0,10	0,01	1	15	48150,89
#4	0,05	0,05	2	25	48305,10
#5	0,05	0,01	3	25	48330,84

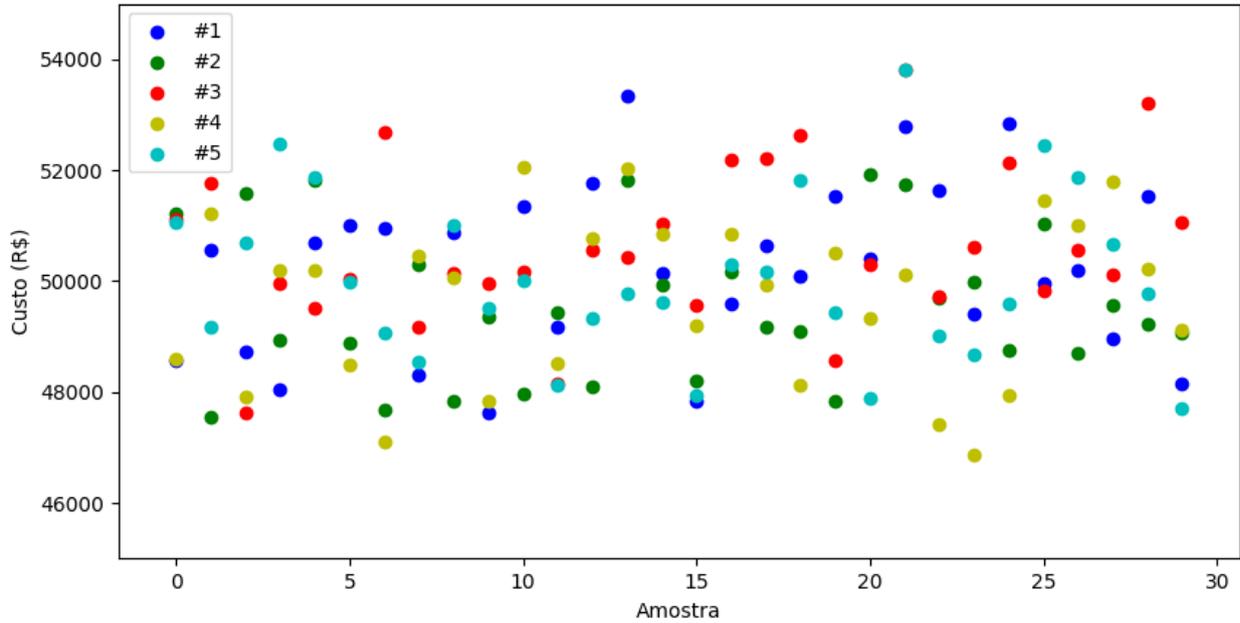


Figura 6.1: Gráfico de dispersão das execuções do passo 2.

Tabela 6.4: Médias ($\mu_{\bar{X}}$) e desvio padrão ($\sigma_{\bar{X}}$) do conjunto dos hiperparâmetros do passo 2.

Combinação	#1	#2	#3	#4	#5
$\mu_{\bar{X}}$	50222,57	49554,56	50629,89	49673,41	50045,61
$\sigma_{\bar{X}}$	1536,20	1363,05	1454,43	1499,92	1499,36

afirmar que as amostras possuem médias estatisticamente diferentes. Por outro lado se for maior, podemos afirmar que as médias são diferentes. Como o teste de hipótese funciona comparando 2 amostras a Tabela 6.5 apresenta os resultados do teste entre todas as combinações. Podemos verificar, em vermelho, as comparações em que a hipótese foi rejeitada, logo, que suas médias não podem ser diferenciadas. Verificamos que a maioria dos resultados não podem ser diferenciados, apenas podemos afirmar que as combinações #2 e #4 são melhores que a combinação #3, porém, como não podemos diferenciar entre as combinações #2 e #4 foi escolhida a #2 por ter uma quantidade de movimentos da busca local (M_{max}) menor, o que reduz o tempo computacional.

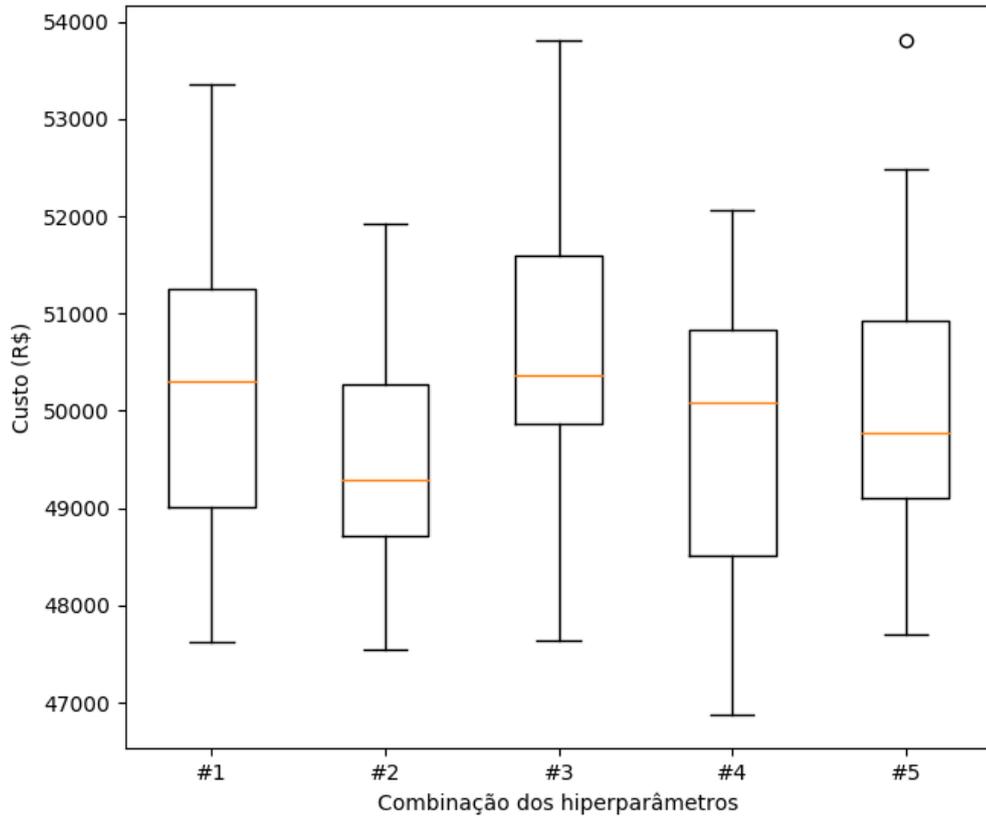


Figura 6.2: Box plot das execuções do passo 2.

Tabela 6.5: Resultados dos teste-Z para o passo 2.

Combinação	#1	#2	#3	#4	#5
#1	-	92,52%	70,84%	83,88%	34,86%
#2	-	-	99,69%	25,19%	81,56%
#3	-	-	-	98,78%	87,45%
#4	-	-	-	-	66,36%
#5	-	-	-	-	-

6.1.3 Passo 3

Por fim, resta escolher o melhor valor para G_r . Para isso, serão feitos testes semelhantes aos que foram feitos até o momento, porém agora considerando a variação apenas desse parâmetro e utilizando os valores da combinação #2 definida nos passos anteriores. Os valores de G_r considerados nesse passo são $G_r = \{10; 15; 20; 25; 30; 35; 40\}$. Para cada valor considerado, o algoritmo foi executado 30 vezes assim como feito anteriormente, as médias e distribuições são comparados para determinar qual é o melhor valor para G_r .

Os resultados obtidos para cada um dos valores de G_r podem ser observados através da Figura 6.4 a qual mostra uma queda nos valores a medida que o valor de G_r aumenta. Na Figura 6.5 observamos a redução de cada combinação ao longo das gerações, nas primeiras imagens com valores mais próximos, e nas seguintes aumentando um pouco a diferença. Os mesmos testes estatísticos

realizados no passo 2 foram executados nesse passo. Todos os conjuntos de solução de cada cenário possuem distribuição normal, porém os valores de $G_r = \{10, 40\}$ possuem a mesma variância de poucos outros valores considerados no teste, então por isso esses dois valores foram descartados da análise. A média e o desvio padrão dos valores que permaneceram no estudo são mostradas na Tabela 6.6. Para determinar se são diferentes foi aplicado o teste de hipótese para cada par do valor do hiperparâmetro G_r .

Tabela 6.6: Médias ($\mu_{\bar{X}}$) e desvio padrão ($\sigma_{\bar{X}}$) do conjunto dos hiperparâmetros do passo 3.

G_r	15	20	25	30	35
$\mu_{\bar{X}}$	52051,13	50736,51	50034,87	49729,81	49632,65
$\sigma_{\bar{X}}$	1837,61	1944,55	2123,97	1892,38	1916,53

O resultado dessa comparação pode ser visualizado na Tabela 6.7. Através dos valores obtidos é possível observar que (em vermelho), alguns valores não podem ser diferenciados estatisticamente e outros sim. Os valores $\{30; 35\}$ são melhores que os demais, porém não podem ser diferenciados entre si pelo critério de confiança de 95% definido. Por esse motivo foi escolhido o valor final de $G_r = 35$, pois quanto menor a quantidade de reinícios menor o custo computacional. Assim, o conjunto de hiperparâmetros foi otimizado e os valores finais são apresentados na Tabela 6.8. Um resumo dos procedimentos utilizados para a otimização dos hiperparâmetros pode ser visualizado no diagrama apresentado pela Figura 6.6. Finalmente, o algoritmo foi executado 540 vezes em contra partida aos 37800 da estimativa inicial, totalizando aproximadamente 540 horas de processamento.

Tabela 6.7: Resultados dos teste-Z para o passo 3.

G_r	15	20	25	30	35
15	-	99,69%	99,99%	100,00%	100,00%
20	-	-	81,80%	95,79%	97,32%
25	-	-	-	44,31%	55,81%
30	-	-	-	-	15,66%
35	-	-	-	-	-

Tabela 6.8: Conjunto final de hiperparâmetros.

Parâmetro	Valor
G_t	100
M_{max}	15
m_r	0,05
N_s	3
pm_r	0,20
G_r	35

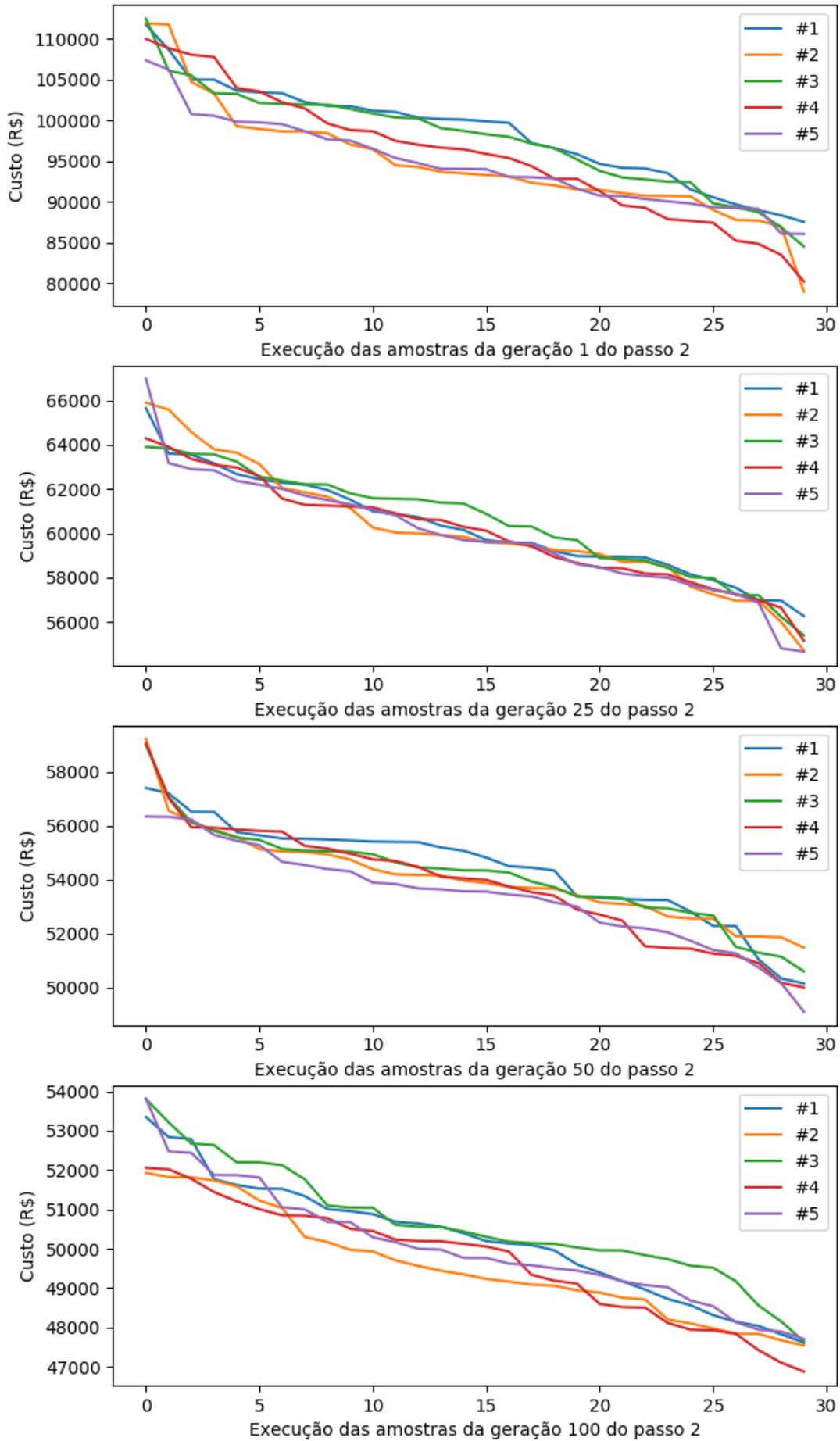


Figura 6.3: Evolução dos custos por geração das execuções do passo 2.

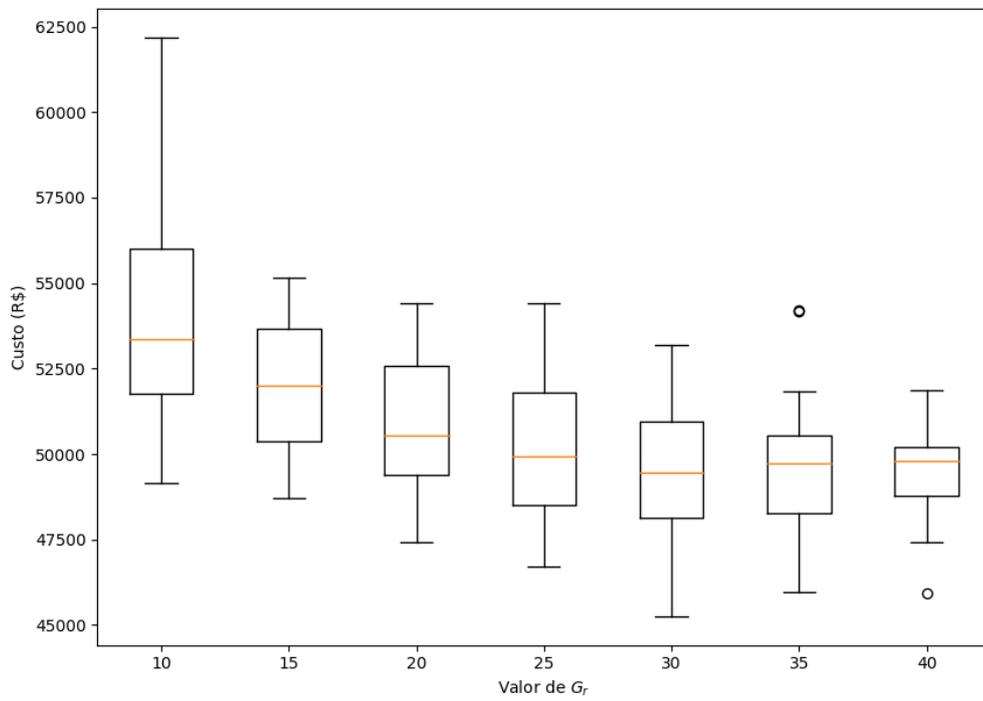


Figura 6.4: Box plot das execuções do passo 3.

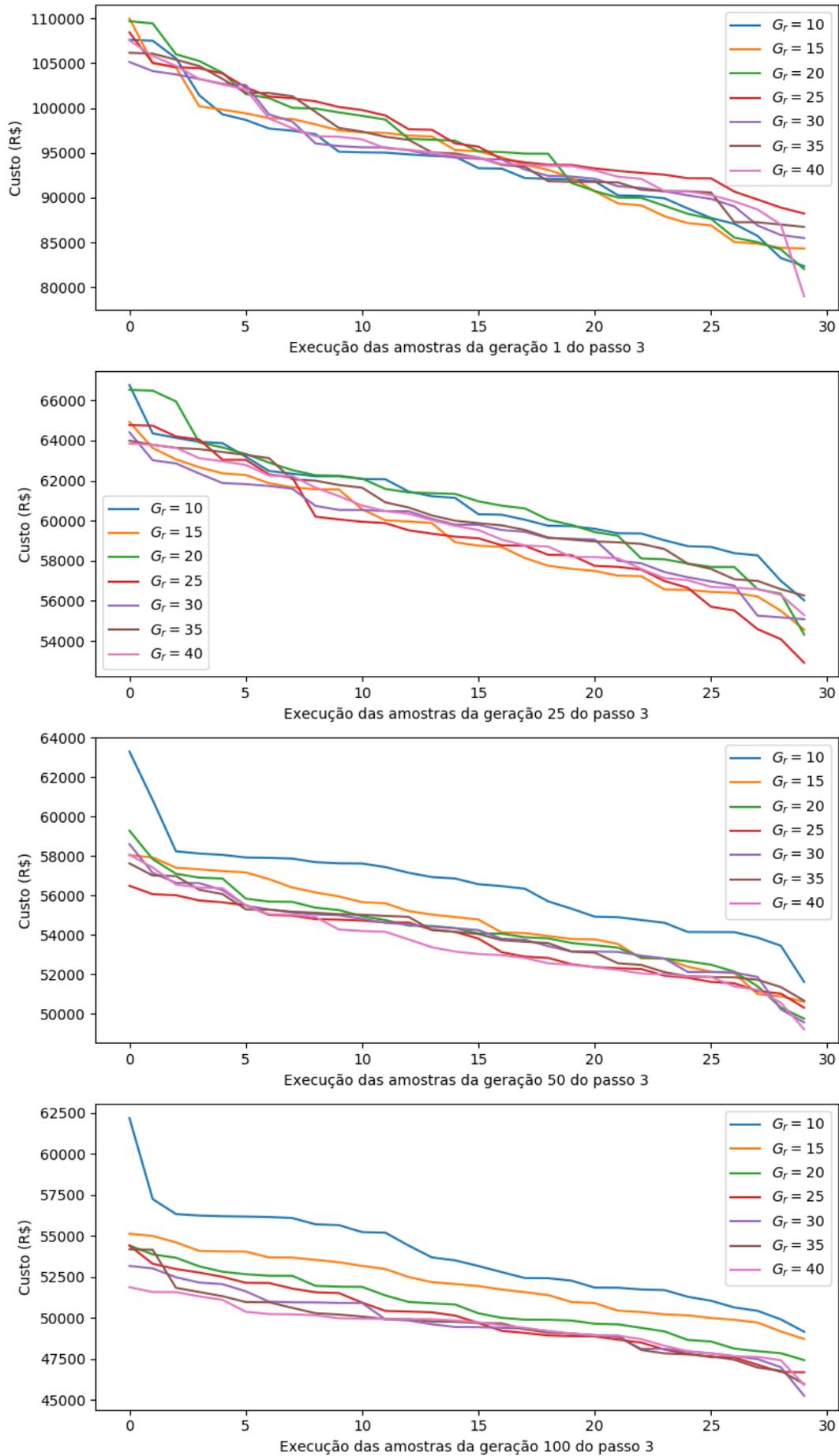


Figura 6.5: Evolução dos custos por geração das execuções do passo 3.

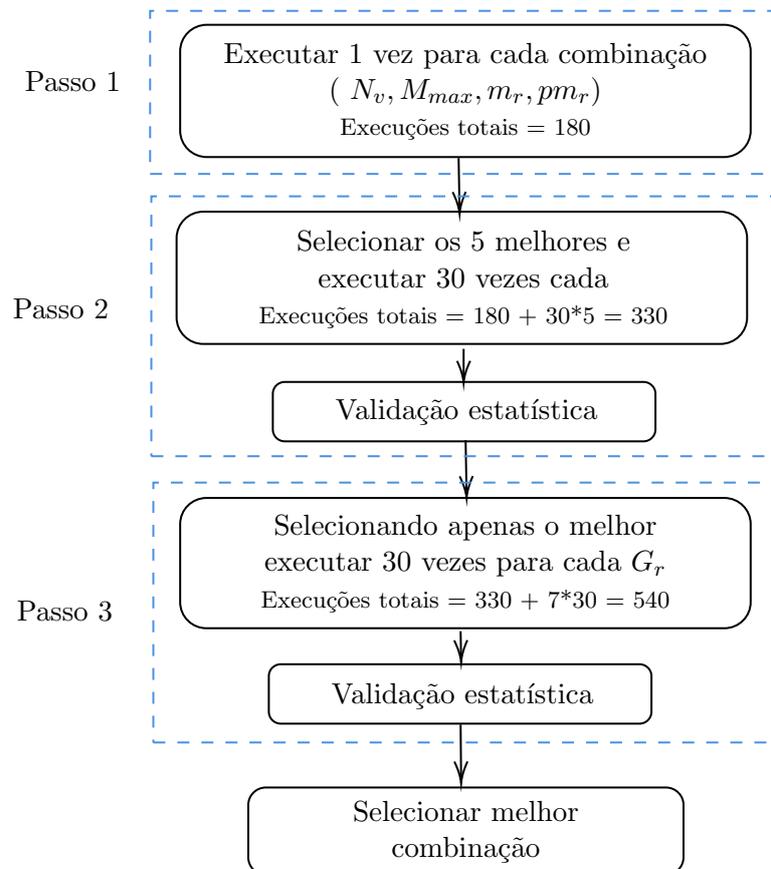


Figura 6.6: Passo a passo realizado na otimização de hiperparâmetros.

6.2 Estudos de Caso

Neste trabalho aplicamos os algoritmos para solução do PAC em 3 redes reais de grande porte localizadas no estado de São Paulo. A geração distribuída foi alocada em diversos pontos do sistema, com capacidade de geração variando entre 1 kW e 10 kW até atingir uma capacidade total em torno de 0,5% da carga total do sistema. A escolha do valor da capacidade de geração das GDs alocadas nas redes utilizadas nos estudos de caso foi baseada na proporção de GD no Brasil [ANEEL, 2019a,b]. As características das redes em estudo são apresentadas na Tabela 6.9. A menor das redes possui 2895 nós, e a maior 5523. A topologia de cada rede é mostrada nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9, com as respectivas localizações de GD.

Para efeito de avaliação do desempenho dos algoritmos foi considerado o caso base que é utilizado na operação das redes pela concessionária responsável. As características de cada rede, para esse caso, estão apresentadas na Tabela 6.10. Além dos hiperparâmetros calculados (Tabela 6.8), também devemos ter a lista de chaves disponível para serem alocadas (Tabela 6.11), foram consideradas 4 capacidades de chaves manuais, e 2 capacidades para chaves automáticas. Os 6 tipos são utilizados para chaves seccionadoras e de manobra. Para determinar o custo total das chaves, foi considerado o preço de aquisição amortizado, somado ao custo de operação. Na Tabela 6.12 são apresentados os parâmetros referentes ao PAC que foram utilizados nos experimentos computacionais realizados. O caso base possui um DEC de operação, este valor foi utilizado como DEC limite nos estudos de caso (restrição de confiabilidade do modelo matemático, Equação (4.9)).

Tabela 6.9: Características das redes.

Rede	Alimentadores	Carga (MW)	Capacidade da GD (MW)	Comprimento (Km)	Nós	Arcos	Consumidores
R_1	2	5,995	0,032 (0,53%)	351,31	2895	2894	7967
R_2	7	28,088	0,149 (0,53%)	391,63	5523	5522	17054
R_3	2	7,982	0,070 (0,88%)	570,84	4976	4975	88665

Tabela 6.10: Informação de operação do caso base.

Rede	DEC	Custo Total	Custo END	Custo Chaves
R_1	12,51	R\$ 45953,60	R\$ 8000,00	R\$ 37953,60
R_2	6,92	R\$ 138963,19	R\$ 21116,93	R\$ 117846,26
R_3	26,53	R\$ 77868,92	R\$ 20289,32	R\$ 57579,60

Para cada rede foram executados os algoritmos propostos (AG e AM) para otimização da alocação de chaves considerando 4 cenários. Em todos os cenários as redes estão sem chaves, ou seja a alocação é feita exclusivamente pelos algoritmos propostos. Cada cenário está descrito nos seguintes itens:

- **AG sem GD** - Executando o algoritmo genético para resolver o PAC sem a presença de GD nas redes.

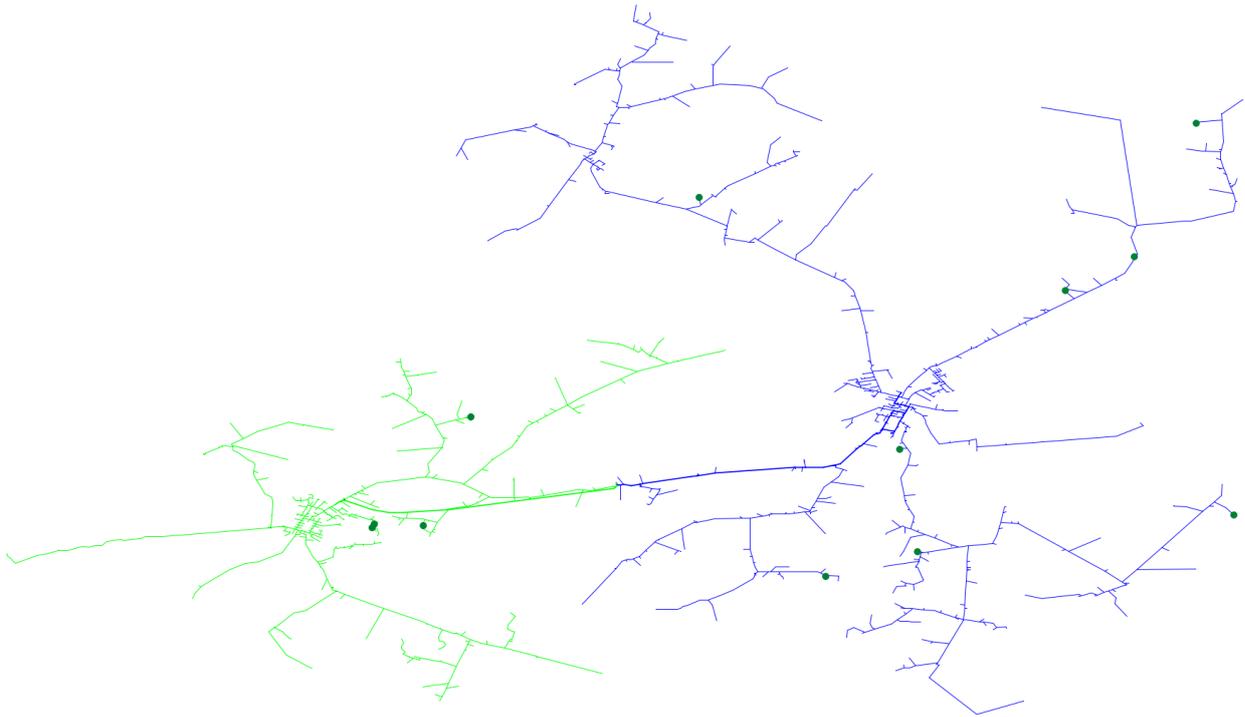


Figura 6.7: Rede R_1 , com localização de geração distribuída ilustrada através dos círculos verdes.

Tabela 6.11: Tipos de Chaves.

Tipo	ID da Chave	Capacidade (A)	Acionamento	Custo de aquisição (R\$)
1	C100	100	Manual	2817,00
2	C200	200	Manual	3817,00
3	C400	400	Manual	5017,00
4	C600	600	Manual	6185,00
5	A400	400	Automática	25000,00
6	A600	600	Automática	35000,00

Tabela 6.12: Parâmetros utilizados nos experimentos para otimização da solução do PAC.

Parâmetro	Valor
Custo da energia	100,00 (R\$/MWh)
Fator de carga (f_c)	0,6
Taxa média de falha (λ_l)	0,18 (falhas/km)
Juros anual	10%
Período de amortização	15 anos
Tempo de localização (t_l)	0,91 horas
Tempo de transferência (t_t)	0,91 horas
Tempo de reparo (t_r)	2,28 horas

- **AG com GD** - Executando o algoritmo genético para resolver o PAC considerando a presença de GD nas redes (Figs. 6.7 – 6.9).
- **AM sem GD** - Executando o algoritmo memético para resolver o PAC sem a presença de GD nas redes.
- **AM com GD** - Executando o algoritmo memético para resolver o PAC considerando a

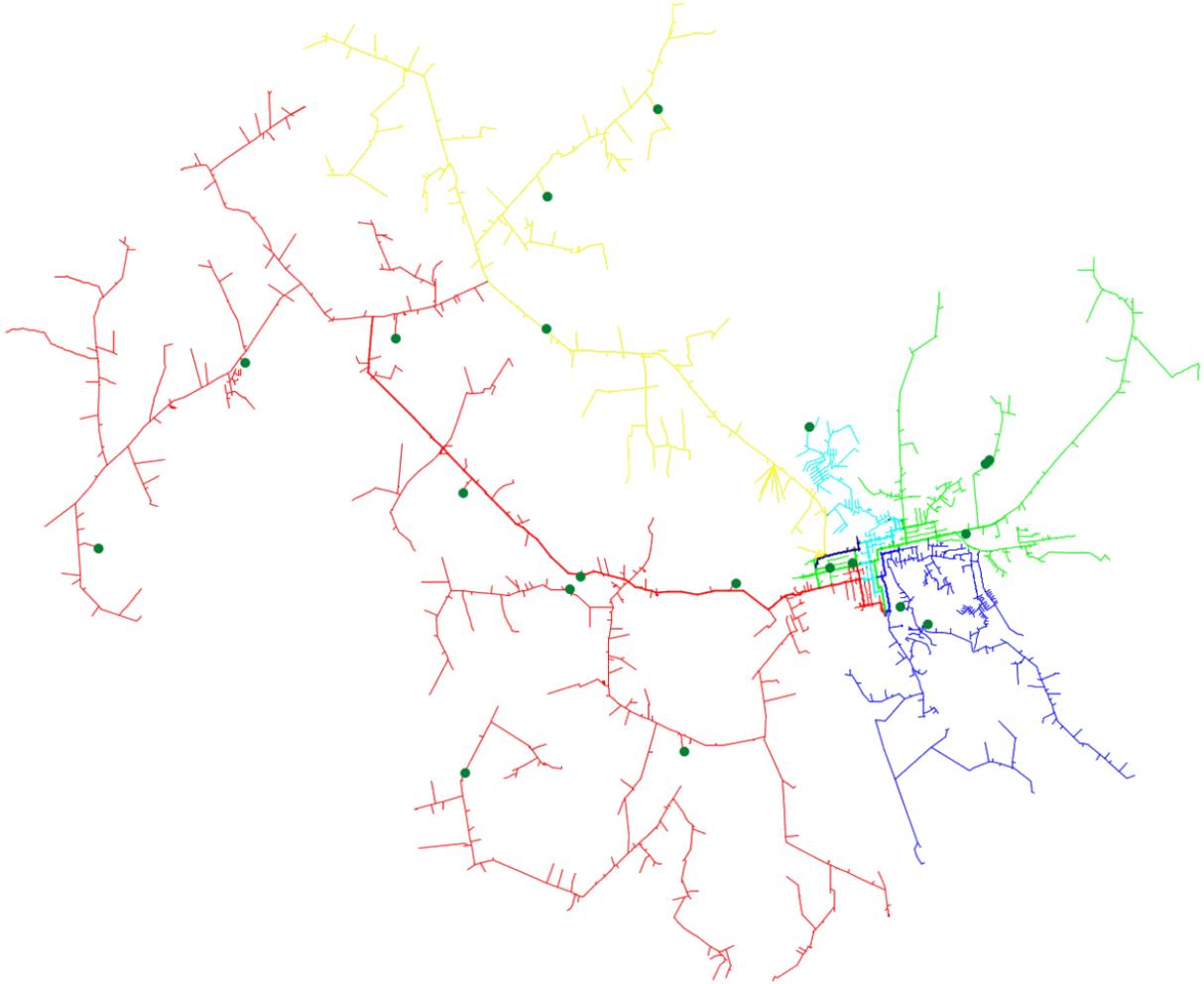


Figura 6.8: Rede R_2 , com localização de geração distribuída ilustrada através dos círculos verdes.

presença de GD nas redes (Figs. 6.7 – 6.9).

A mesma validação estatística utilizada na otimização dos hiperparâmetros foi realizada para cada cenário, sendo necessária a execução de 30 vezes cada cenário para cada rede, a fim de poder afirmar com maior confiança estatística qual resultado se sobressai em comparação aos demais. Por conta disso o problema demandou um alto custo computacional, tornando inviável a utilização de uma máquina pessoal. As simulações foram executadas na nuvem da Microsoft Azure utilizando a máquina virtual F32s v2, que tem disponível 32 núcleos virtuais que utilizam o processador Intel Xeon® Platinum 8168 (Skylake) com 64 Gb de memória. Cada núcleo pode rodar uma instância do problema. Dessa forma cada cenário teve a execução das 30 rodadas feitas simultaneamente. Para orquestrar a execução paralela do código em C++, foi implementado um *script* em Python. Dessa forma o tempo total de simulação foi reduzido de aproximadamente 25 dias se fosse utilizado uma máquina pessoal, para 30 horas.

Um resumo com o resultado médio de cada cenário para cada rede pode ser visto nas Tabelas de 6.13 à 6.15. As soluções encontradas apresentam apenas uma variação marginal no DEC médio



Figura 6.9: Rede R_3 , com localização de geração distribuída ilustrada através dos círculos verdes.

em relação ao DEC limite, pois os algoritmos evoluem buscando minimizar os custos enquanto respeitam essa restrição. É esperado que o resultado com GD seja melhor do que o cenário sem GD, assim como o AM é esperado que tenha resultados melhores que o AG. Analisando os valores apresentados nestas tabelas é possível confirmar tais resultados, porém uma análise mais detalhada, bem como a comparação estatística serão feitas nas próximas subseções.

Tabela 6.13: Resumo dos resultados da rede R_1 .

	Algoritmo Genético		Algoritmo Memético	
	Sem GD	Com GD	Sem GD	Com GD
Custo médio da END (R\$)	8202,65	8185,43	8201,12	8182,67
Custo médio das chaves (R\$)	12527,66	11822,17	12123,36	11403,98
Custo médio anual total (R\$)	20730,31	20007,60	20324,48	19586,65
DEC médio	12,48	12,48	12,49	12,49
Tempo médio por execução	0,66h	0,65h	2,07h	2,01h

Tabela 6.14: Resumo dos resultados da rede R_2 .

	Algoritmo Genético		Algoritmo Memético	
	Sem GD	Com GD	Sem GD	Com GD
Custo END (R\$)	21085,36	21095,38	20799,44	20753,97
Custo das chaves (R\$)	31379,91	29984,75	29570,39	27841,63
Custo anual total (R\$)	51856,50	50618,32	49919,43	48135,60
DEC médio	6,90	6,90	6,91	6,90
Tempo médio de execução	0,55h	0,53h	3,08h	2,98h

Tabela 6.15: Resumo dos resultados da rede R_3 .

	Algoritmo Genético		Algoritmo Memético	
	Sem GD	Com GD	Sem GD	Com GD
Custo END (R\$)	20555,00	20602,08	20367,28	20376,77
Custo das chaves (R\$)	10591,57	10159,48	10075,77	9894,02
Custo anual total (R\$)	31146,57	30761,56	30443,05	30270,79
DEC médio	24,02	24,02	24,01	24,01
Tempo médio de execução	1,88h	1,88h	5,61h	5,59h

6.2.1 Comparação dos métodos para as redes sem GD

Nesta seção é apresentada uma análise dos resultados obtidos com o AG e AM para as redes sem utilização da GD. O box plot com os resultados de todas as execuções para cada rede e cada algoritmo neste cenário se encontra na Figura 6.10. Nas Figuras 6.11 à 6.13 podemos ver a evolução dos custos total para cada uma das 30 execuções dos algoritmos, onde os sub-gráficos representam uma geração específica. Existe uma redução gradativa nos custos, o algoritmo memético começa com um custo menor e o genético tem uma redução mais acelerada.

Os testes estatísticos mostram que para todas as 3 redes o algoritmo memético alcança um custo menor que o algoritmo genético após as 100 gerações. Podemos verificar os comportamentos citados de forma mais clara utilizando a média das execuções para cada geração como indicado na Figura 6.14. Nesse gráfico podemos verificar que o algoritmo memético em média atinge valores de menor custo, e tem soluções iniciais melhores logo no fim da primeira geração. Temos uma redução de 1,96%, 3,74%, 2,26% no custo médio do AG quando comparado ao custo médio do AM, para as redes R_1 , R_2 e R_3 respectivamente.

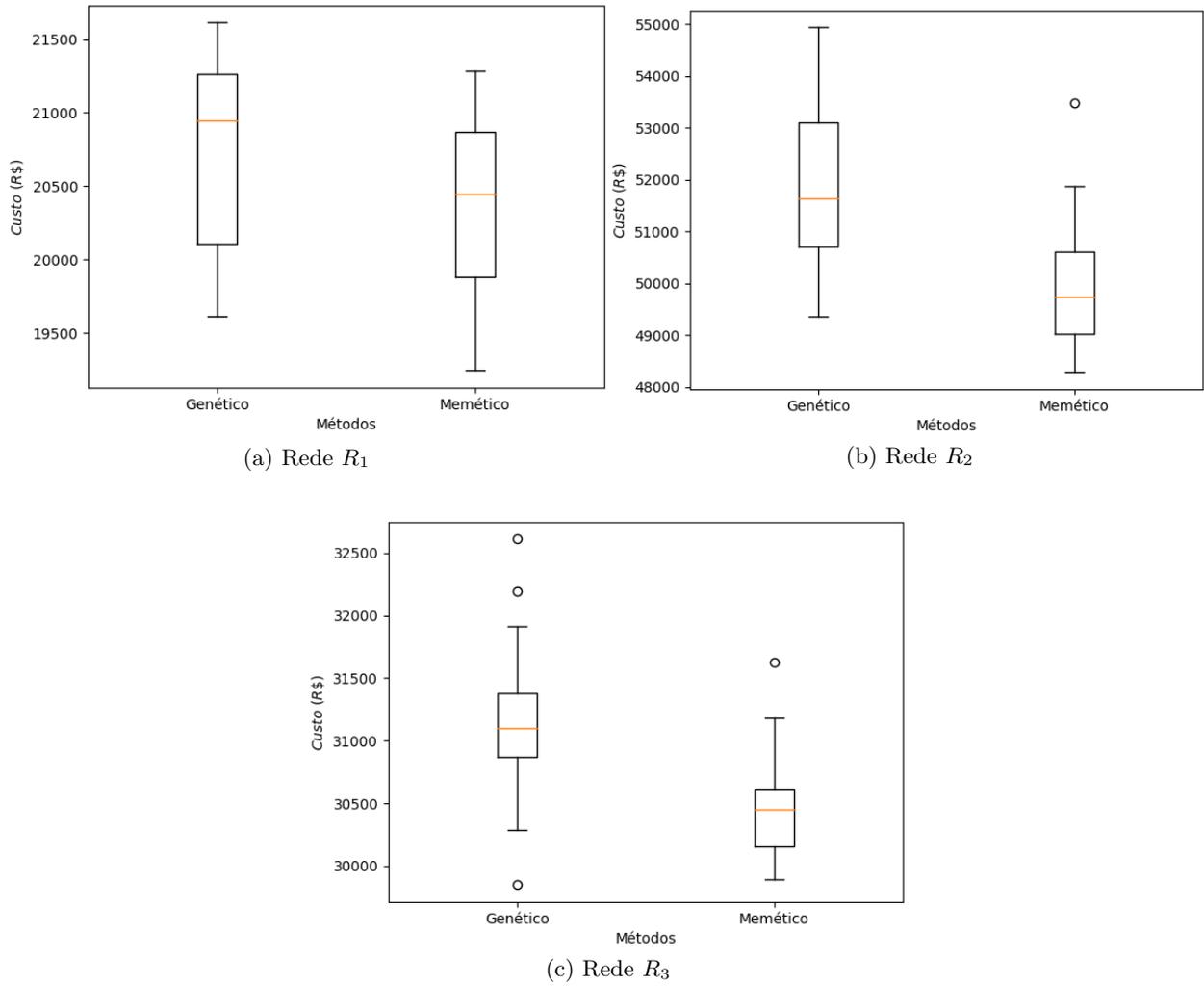


Figura 6.10: Resultados da execução dos algoritmos genético e memético sem GD nas redes.

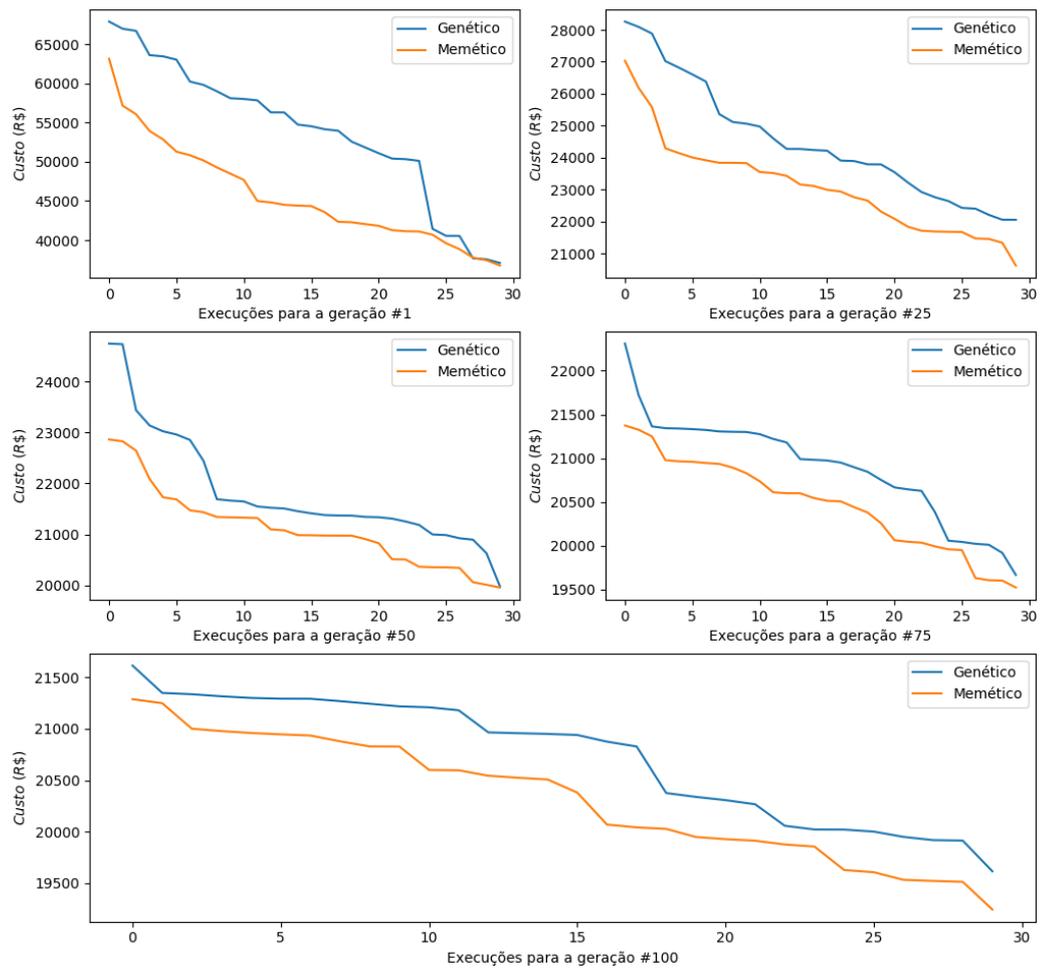


Figura 6.11: Evolução dos custos por geração das execuções da rede R_1 sem GD.

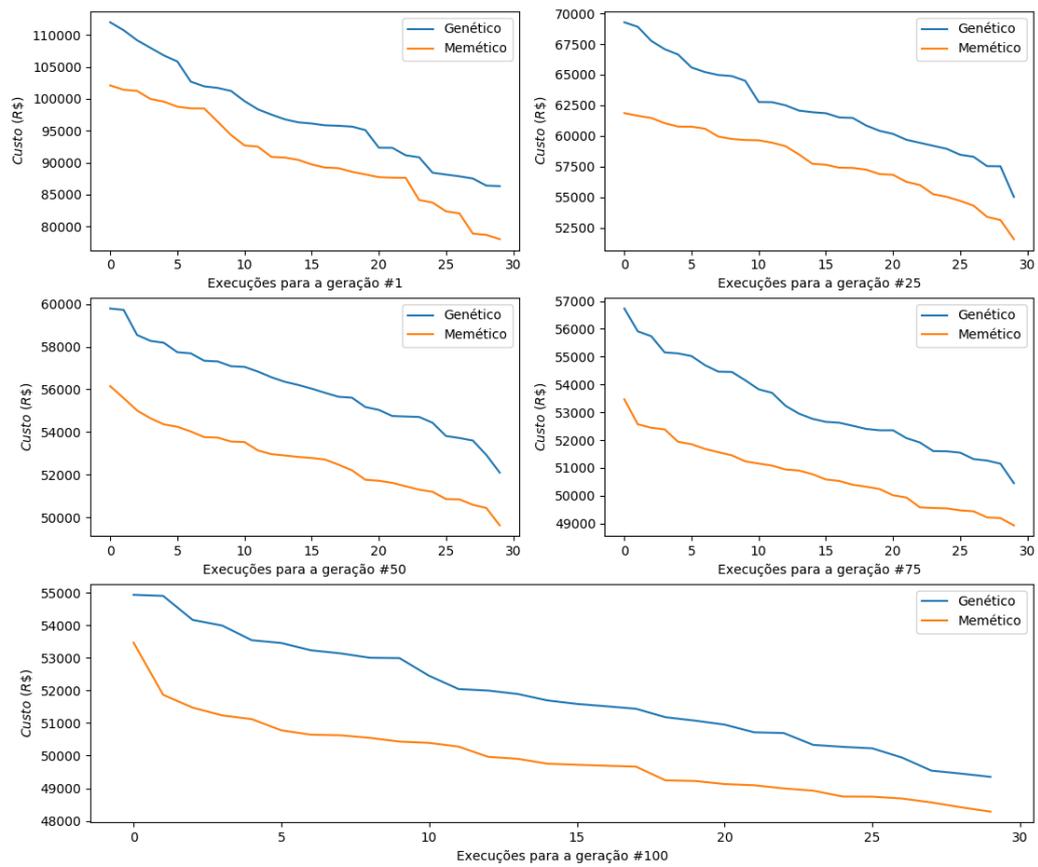


Figura 6.12: Evolução dos custos por geração das execuções da rede R_2 sem GD.

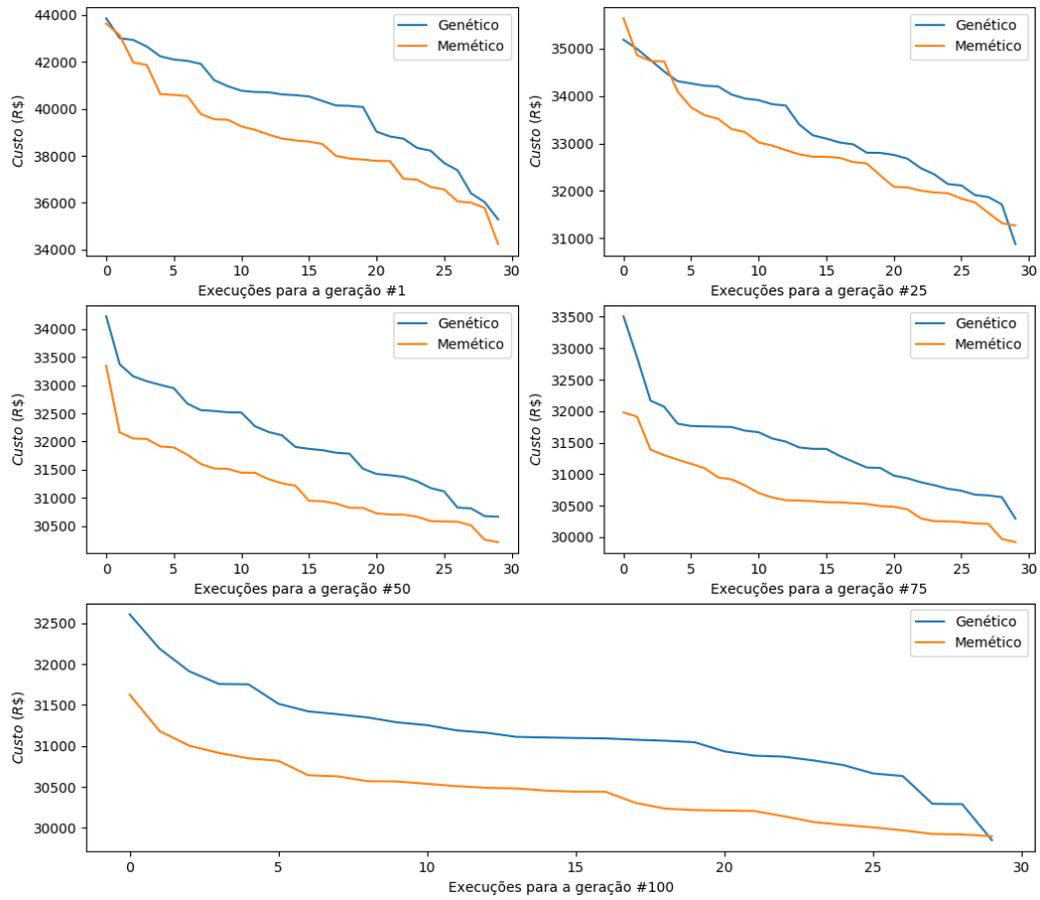


Figura 6.13: Evolução dos custos por geração das execuções da rede R_3 sem GD.

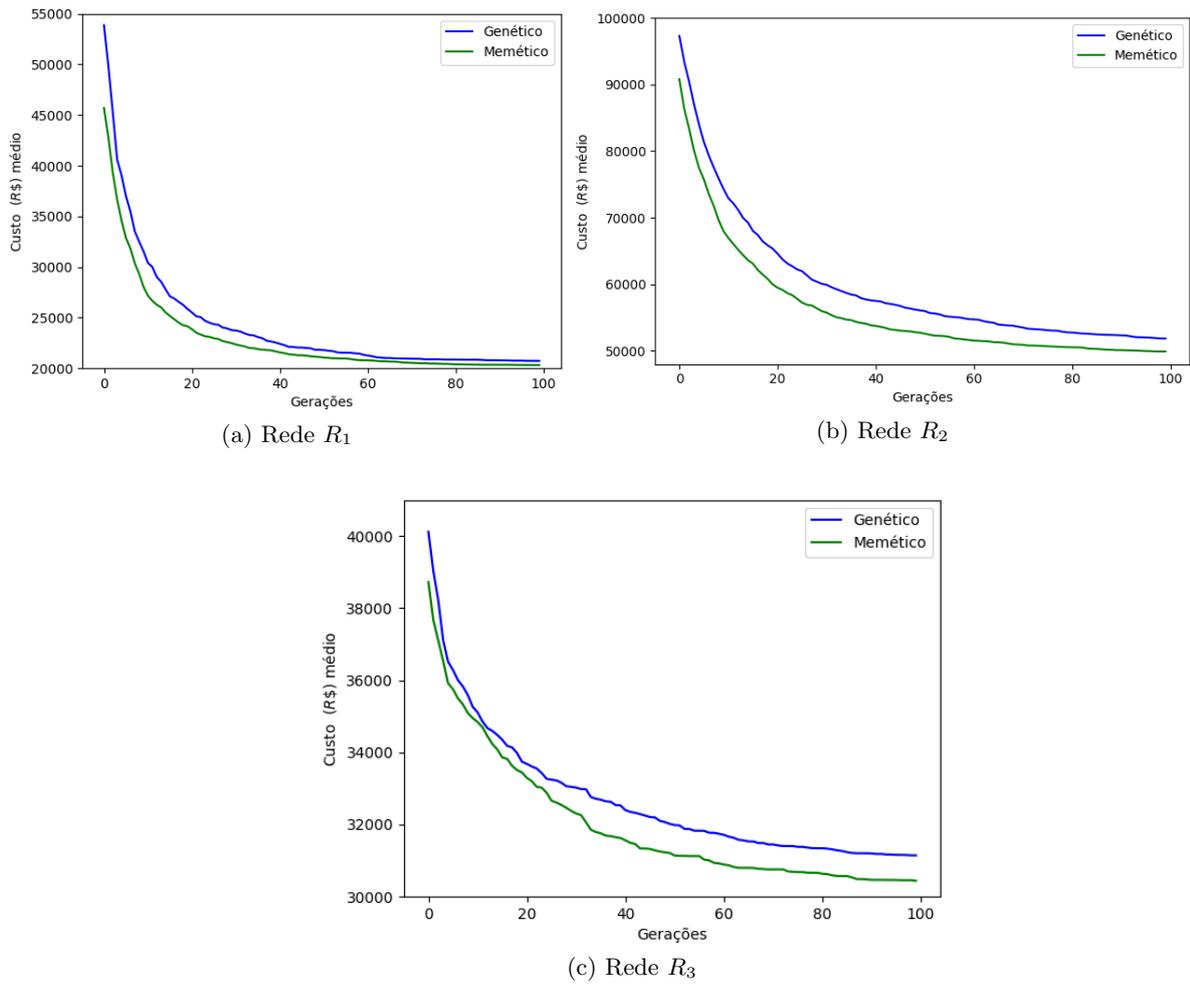


Figura 6.14: Evolução dos custos médios por geração das execuções por rede sem GD.

6.2.2 Comparação dos métodos para as redes com GD

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelo AG e AM para as redes em estudo considerando a presença de geração distribuída nas mesmas. Para cada uma das redes foi incluído GD de forma esparsa nos locais mostrados nas Figuras 6.7 à 6.9. Tais locais foram fixados e a geração é considerada constante. Para ter maior confiabilidade estatística na qualidade dos resultados, novamente cada rede foi executada 30 vezes para cada algoritmo. A distribuição dos resultados obtidos pode ser visualizada no box plot da Figura 6.15. Observa-se novamente que a tendência é uma distribuição com valores menores para os resultados do algoritmo memético. Existem alguns *outliers*, principalmente no memético para a rede R_1 e no genético para a rede R_3 , mas de forma geral a distribuição está concentrada.

Nas Figuras 6.16 à 6.18 pode-se observar, de forma mais detalhada, que geralmente ocorre uma aproximação da curva do genético com o memético, similar ao ocorrido no cenário sem GD. A Figura 6.19 apresenta as curvas, para cada algoritmo, contendo a evolução considerando o custo médio por geração de cada amostra. Novamente pode-se verificar que o algoritmo memético começa com valor inicial melhor e termina também com um custo menor. Executando 100 gerações é possível notar que ambos os métodos chegaram bem próximos de convergirem. Pelos testes estatísticos podemos afirmar que o algoritmo memético sempre atinge soluções melhores que o genético quando a otimização é feita considerando a presença de GD na rede. Os resultados mostram uma redução de 2,10%, 4,90%, 1,60% no custo médio do AM em relação ao AG, para as redes R_1 , R_2 e R_3 , respectivamente.

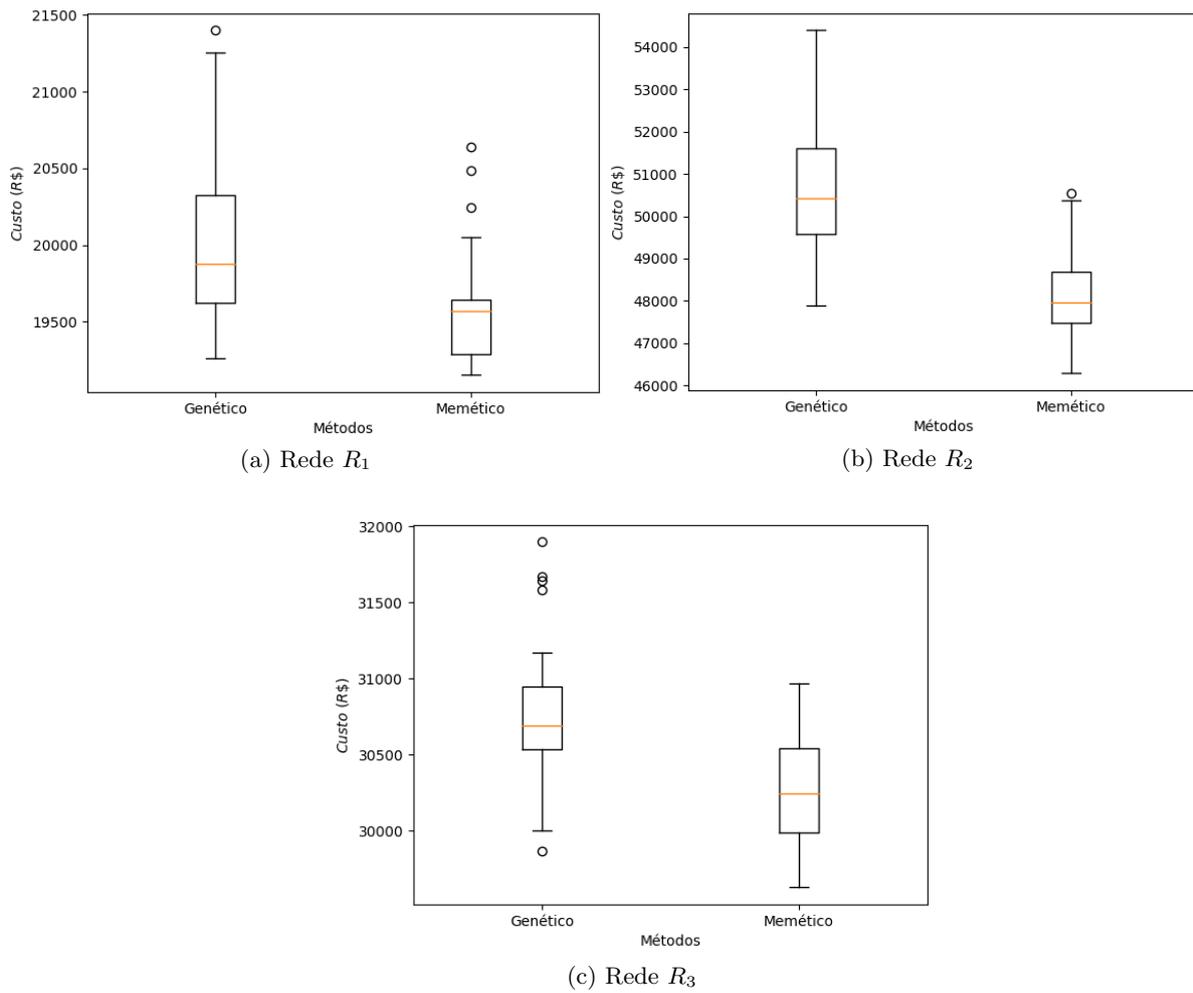


Figura 6.15: Resultados da execução dos algoritmos genético e memético com GD nas redes.

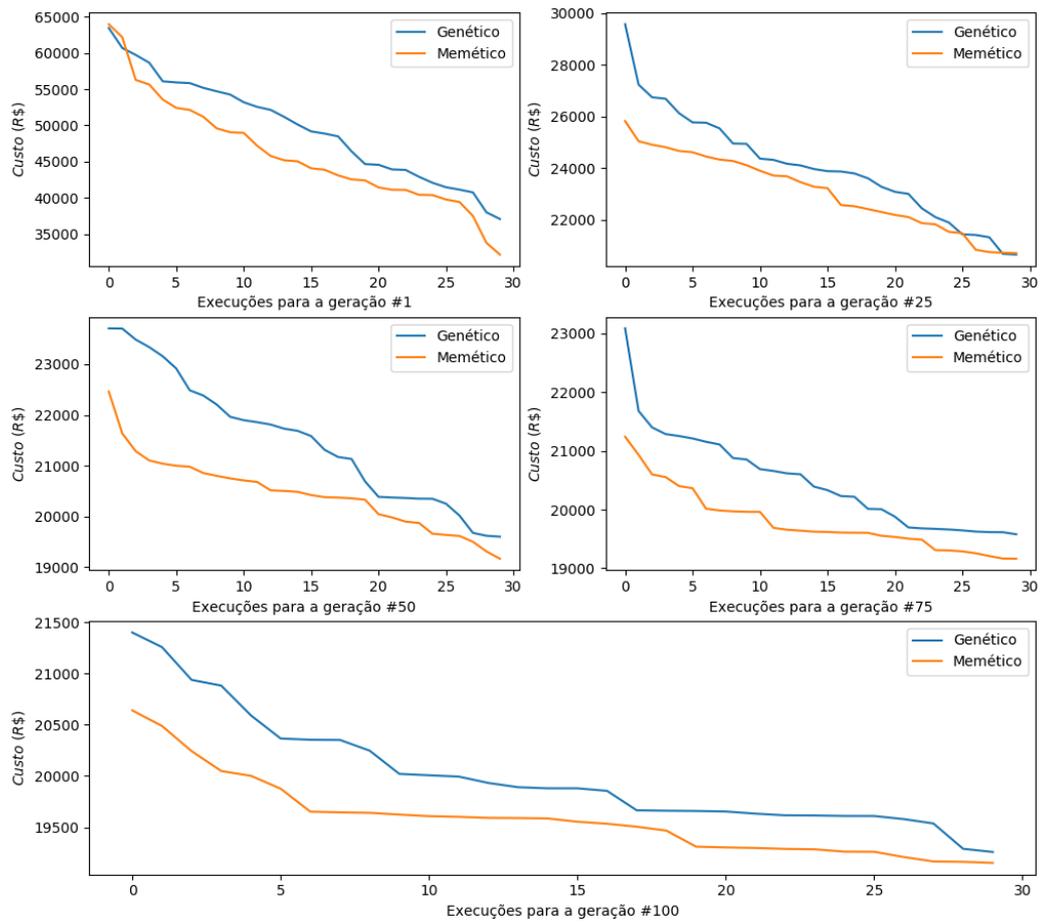


Figura 6.16: Evolução dos custo por geração das execuções da rede R_1 com GD.

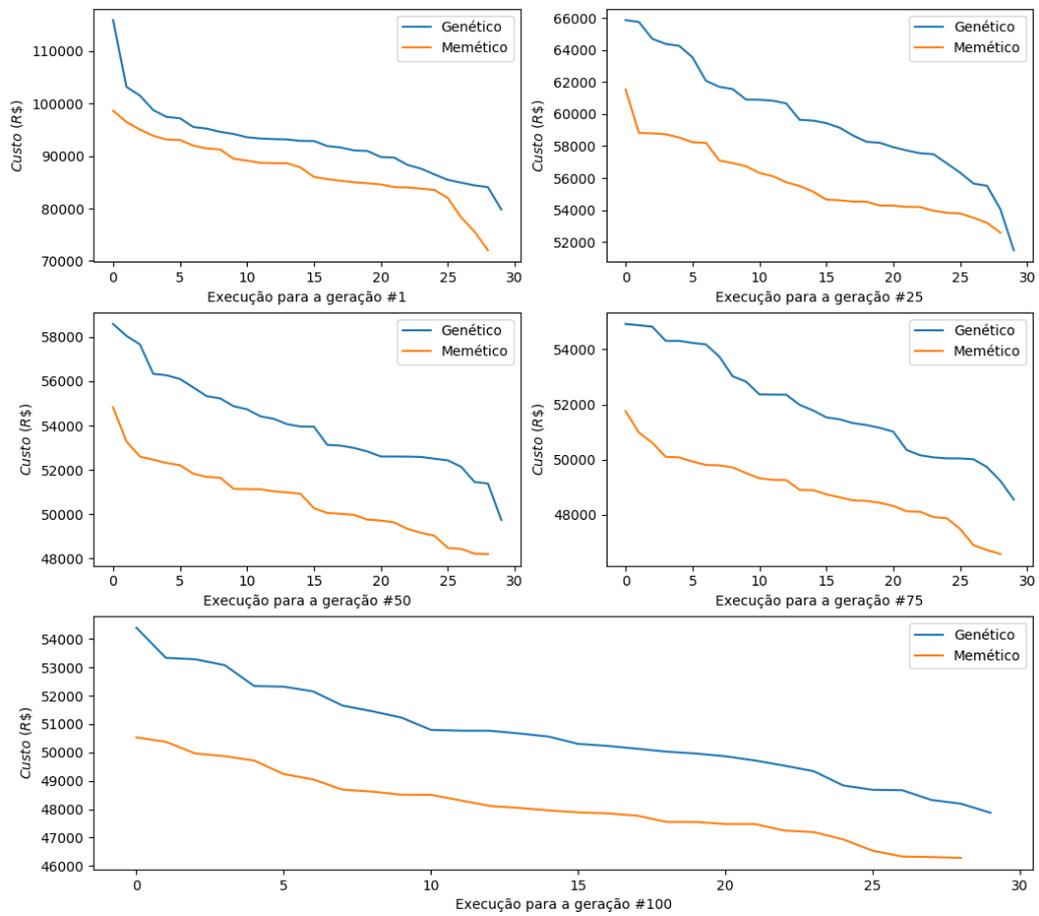


Figura 6.17: Evolução dos custo por geração das execuções da rede R_2 com GD.

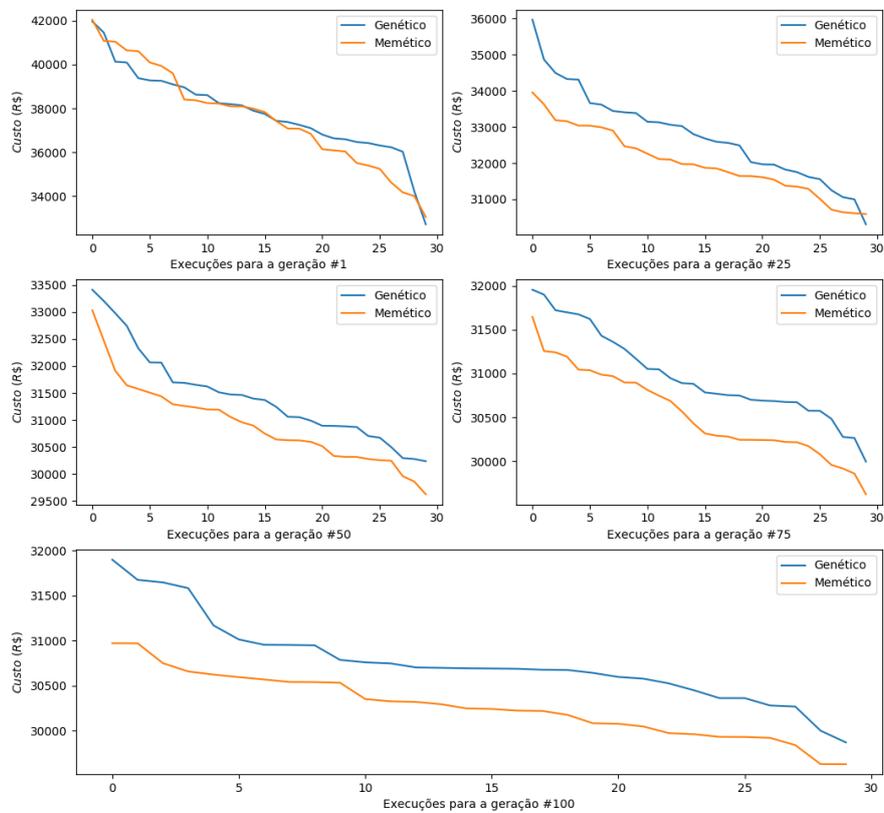


Figura 6.18: Evolução dos custo por geração das execuções da rede R_3 com GD.

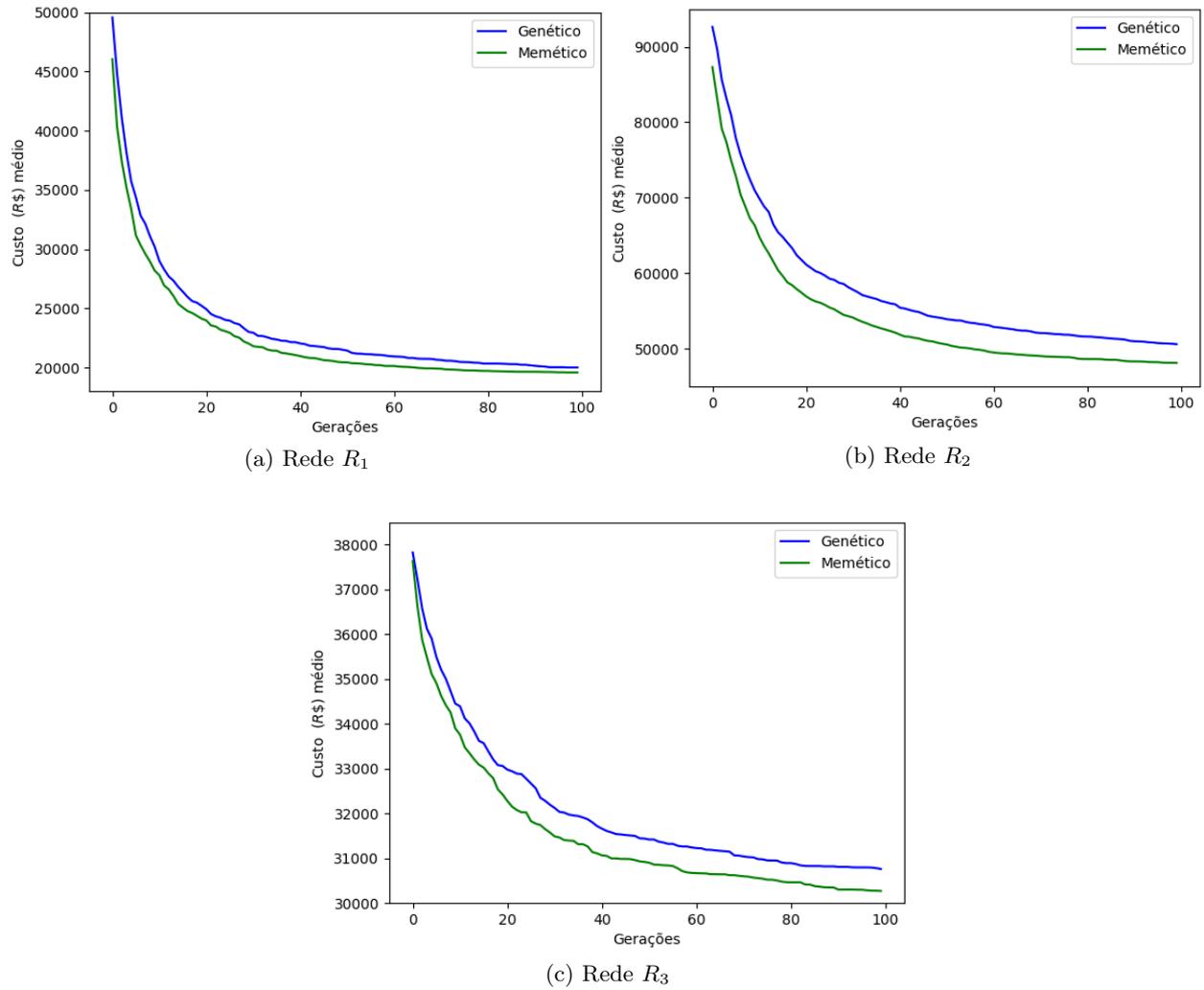


Figura 6.19: Evolução dos custos médios por geração das execuções por rede com GD.

6.2.3 Comparação dos resultados nos cenários com GD × sem GD

Para entender o impacto da geração distribuída nas redes para cada método de otimização, foram comparados os resultados obtidos com GD e sem GD. A Figura 6.20 mostra os resultados obtidos, através de box plot, com a execução do AG nos dois cenários para as três redes em estudo, e a Figura 6.21 apresenta os resultados para o AM. Nas redes R_1 e R_2 houve uma melhora nos resultados com GD em relação ao sem GD, para ambos os métodos. Porém, realizando o teste- Z nas redes, apenas para a R_3 , em ambos os métodos, não pode ser confirmado que a GD trouxe melhorias, por isso essa rede não foi utilizado na comparação. Os resultados com a média das execuções são exibidos nos gráficos da Figura 6.22. Tais resultados permitem realizar a comparação gráfica dos cenários com GD e sem GD para cada rede em estudo. O uso da GD, nos testes realizados, sempre apresenta soluções com melhor custo médio comparado ao cenário sem GD. Obteve-se uma redução de 3,49% e 2,39%, no custo médio do AG com GD para as redes R_1 e R_2 respectivamente. Para o AM houve uma redução no custo médio de 3,63% e 3,57% quando há GD para as redes R_1 e R_2 , nesta ordem.

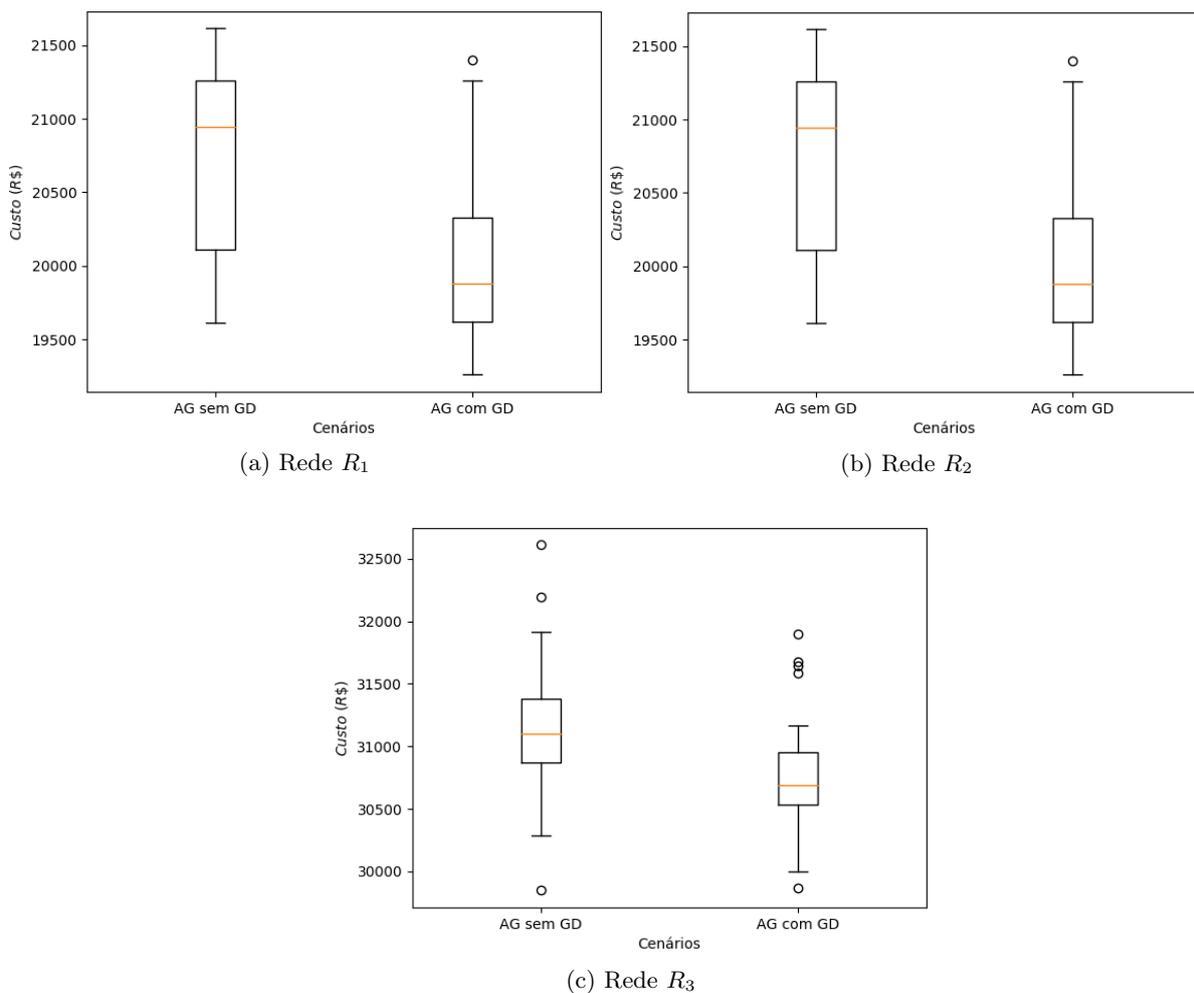


Figura 6.20: Comparação dos resultados do AG com e sem GD, para cada rede.

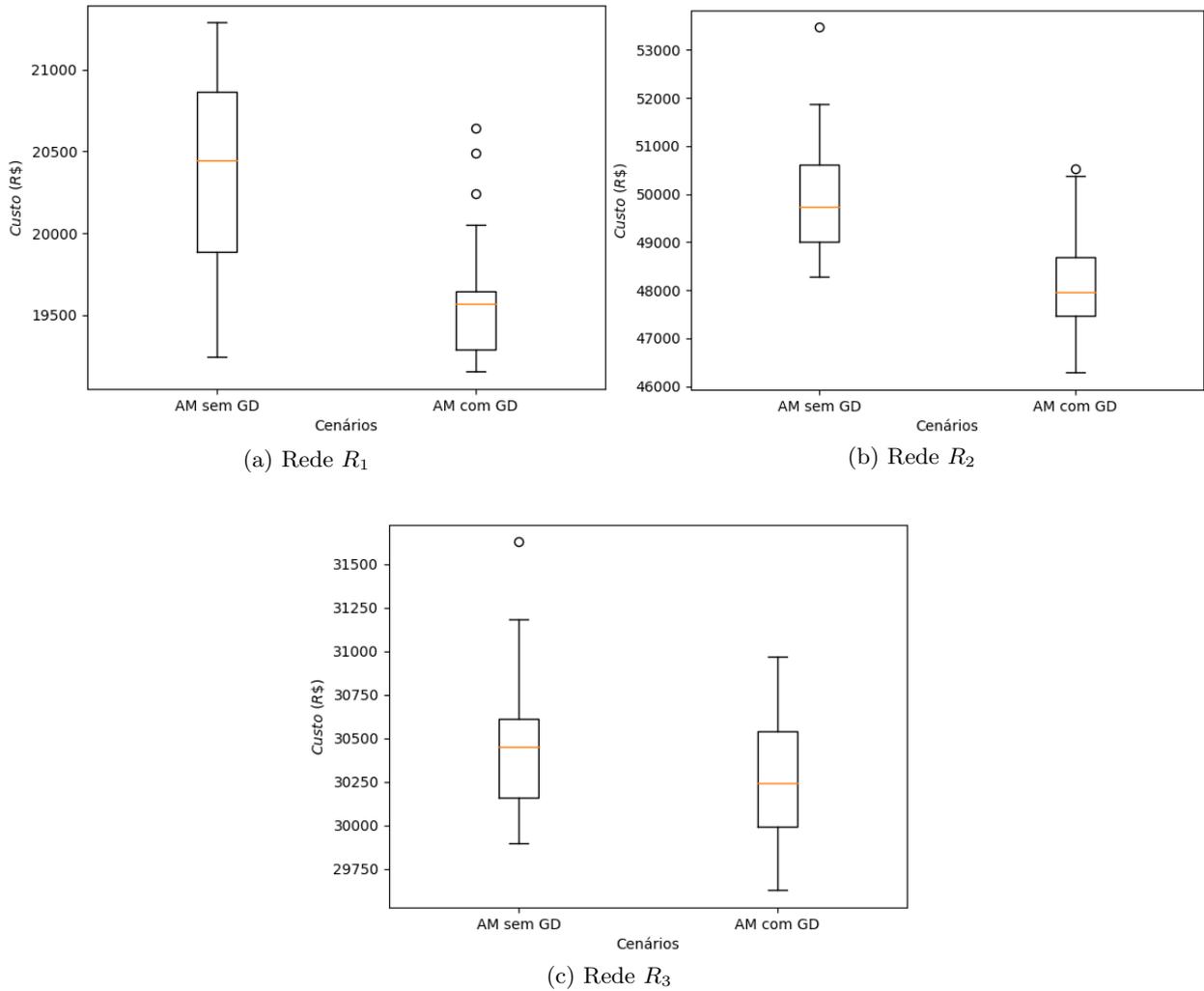


Figura 6.21: Comparação dos resultados do AM com e sem GD, para cada rede.

Analisando apenas o melhor resultado obtido dentre as execuções do AM com GD, para a rede R_1 (Figura 6.23) foram alocadas um total de 22 chaves, sendo 21 chaves manuais, das quais 19 são seccionadoras e 2 são de manobra. Foi alocada também 1 chave seccionadora automática. Para a rede R_2 (Figura 6.24) foram alocadas um total de 71 chaves, sendo 3 chaves de manobra manuais e 68 chaves seccionadoras manuais. Para a rede R_3 (Figura 6.25) foram alocadas 42 chaves no total, sendo 32 chaves seccionadoras manuais e 10 seccionadoras automáticas. Apesar de ser apenas um único resultado é possível identificar que existe uma concentração maior de chaves onde existe uma maior concentração de ramos no sistema, consequentemente um grande número de clientes, isso era esperado, dado que o posicionamento de uma chave impacta mais consumidores, tendo uma redução maior no custo.

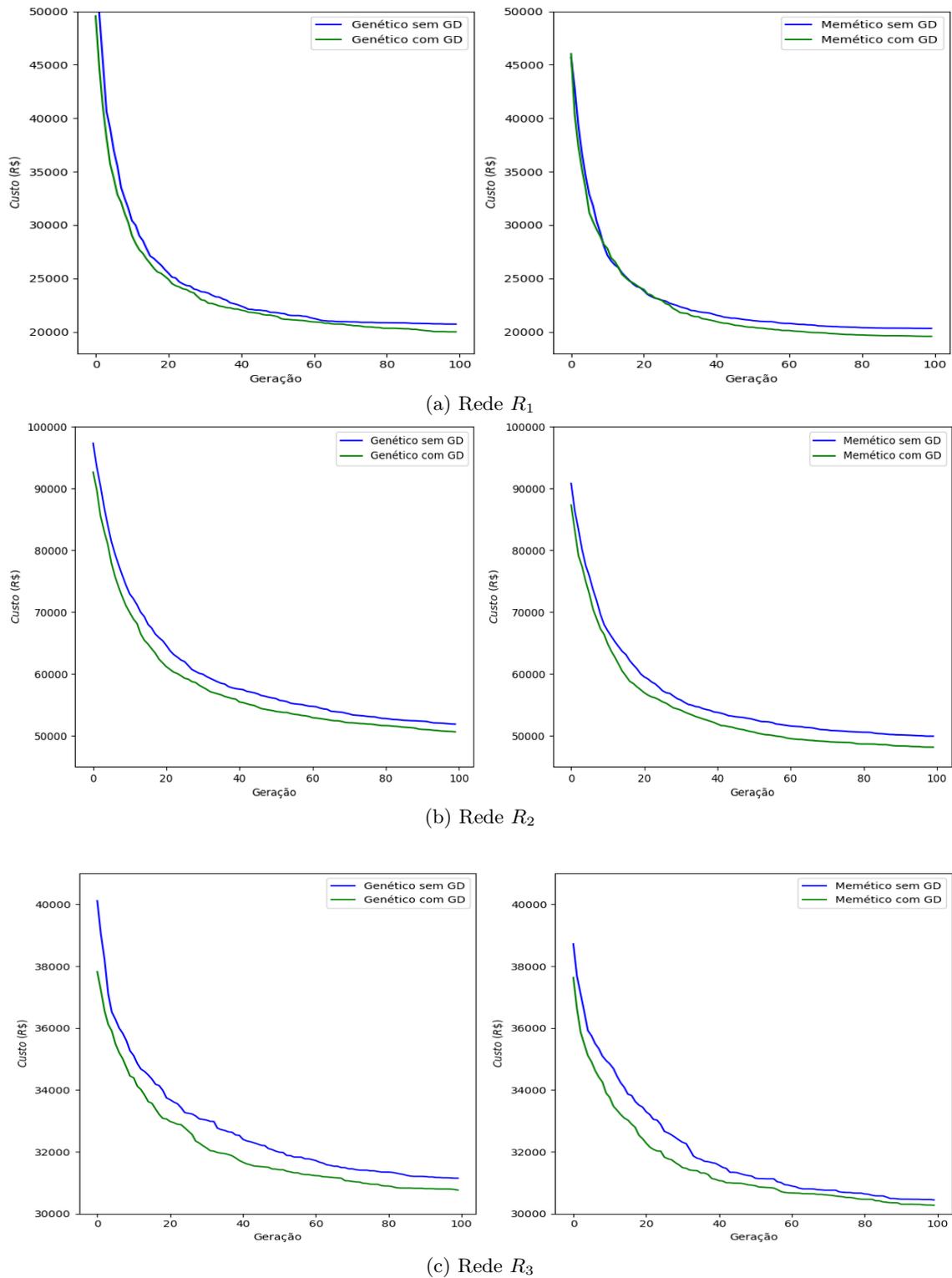


Figura 6.22: Evolução dos custos médios por geração das execuções por rede comparando o cenário com e sem geração distribuída.

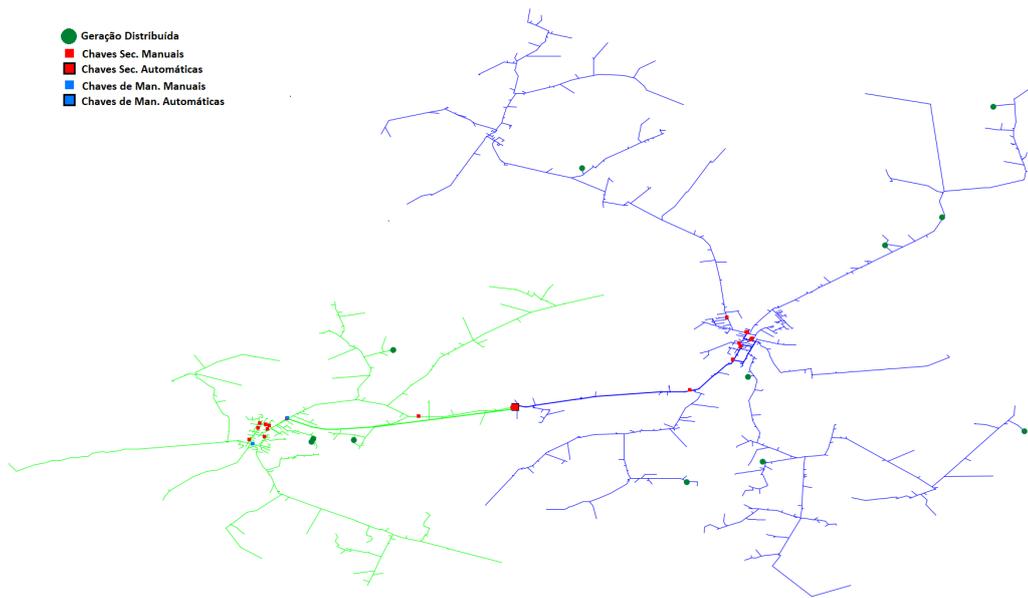


Figura 6.23: Melhor solução encontrada pelo AM com geração distribuída para a rede R_1 .

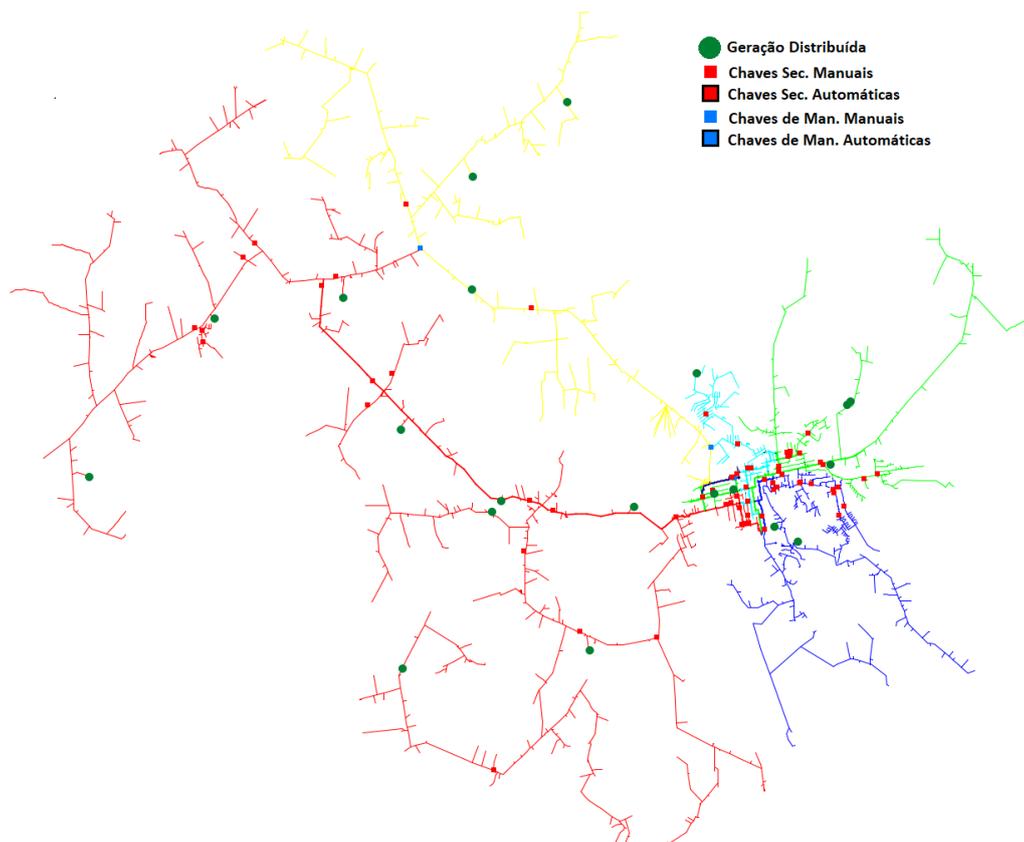


Figura 6.24: Melhor solução encontrada pelo AM com geração distribuída para a rede R_2 .

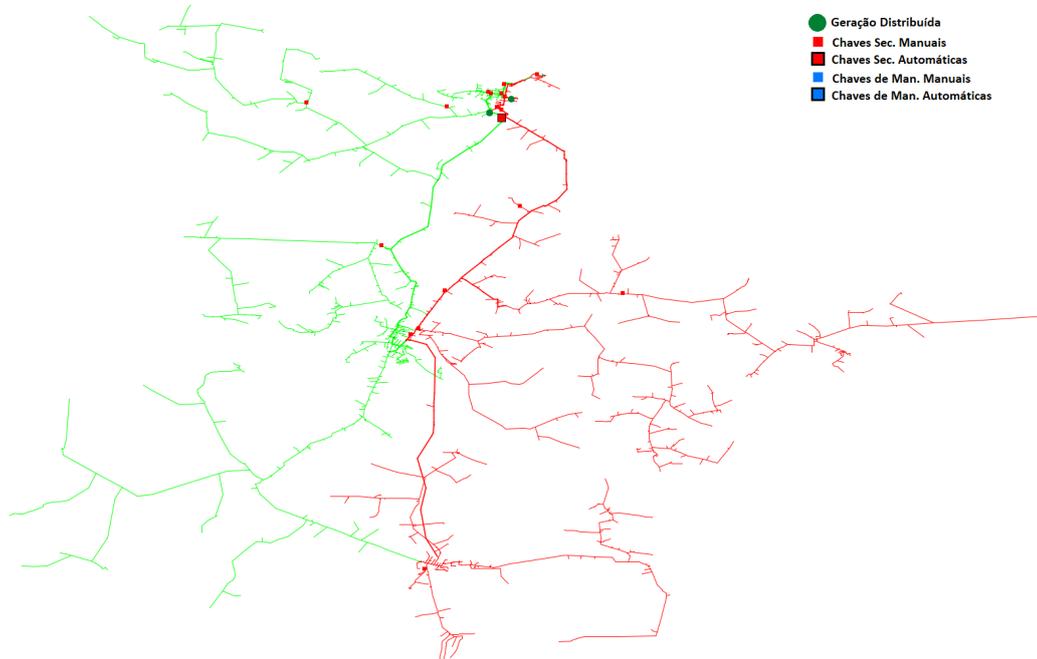


Figura 6.25: Melhor solução encontrada pelo AM com geração distribuída para a rede R_3 .

6.2.4 Comparação do AG com AM

Observando os resultados obtidos, foi identificado que na maioria dos casos é possível alcançar um melhor resultado com o AM, considerando a execução de 100 gerações. Porém, não foi levado em conta nesta análise o tempo de processamento. Para o problema abordado e as redes em estudo, o tempo médio de execução do AM é entre 2,97 e 5,67 vezes mais demorado que o AG. Uma outra abordagem de comparação entre os métodos consiste na medição da quantidade de gerações e o tempo de execução que cada algoritmo gasta para alcançar uma solução com um determinado valor de custo definido. Esta análise foi realizada utilizando o custo médio. Foi estabelecido um custo alvo de 90% da diferença entre o maior e o menor custo considerando as 100 gerações. O cálculo desse custo é definido na Equação (6.1), onde J_{alvo} é o custo alvo, J_{AG} e J_{AM} são os conjuntos dos custos médios de cada geração para um determinado cenário.

$$J_{alvo} = \max(J_{AG}, J_{AM}) - 90\% \times (\max(J_{AG}, J_{AM}) - \min(J_{AG}, J_{AM})) \quad (6.1)$$

Na Figura 6.26 podemos observar, para cada cenário apresentado na Seção 6.2, o custo alvo traçado pela linha vermelha. A Tabela 6.16 mostra o tempo em minutos e o número de gerações que o AG e o AM levaram para encontrar uma solução com o custo alvo determinado. É possível observar através dos resultados apresentados (Figura 6.26 e Tabela 6.16) que em todos os cenários o AM, comparado ao AG, encontra uma solução, com custo alvo definido, em um número menor de gerações. Entretanto, o AG gasta um tempo computacional menor para alcançar uma solução com tal qualidade. Este resultado é esperado dado que a busca local presente no AM cumpre seu papel de encontrar soluções melhores na vizinhança de uma determinada solução, dessa forma evoluindo em menos gerações, porém o custo computacional desta busca acaba sendo alto. Por esse motivo, o AG consegue alcançar uma solução com a mesma qualidade em um tempo menor, embora em um número maior de gerações.

Tabela 6.16: Tempo e número de geração para alcançar o custo alvo para cada cenário.

Rede	GD	Algoritmo Genético		Algoritmo Memético	
		Num. Gerações	Tempo (min)	Num. Gerações	Tempo (min)
R_1	Sem GD	32	12,60	22	17,28
	Com GD	34	13,25	28	33,78
R_2	Sem GD	63	20,65	36	66,44
	Com GD	66	21,18	38	68,06
R_3	Sem GD	73	82,53	44	148,21
	Com GD	73	82,20	43	144,24

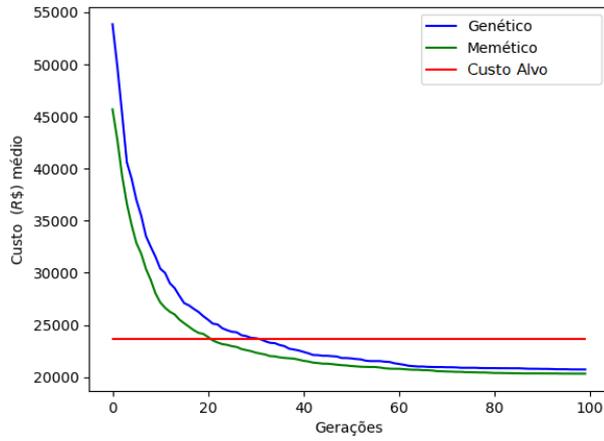
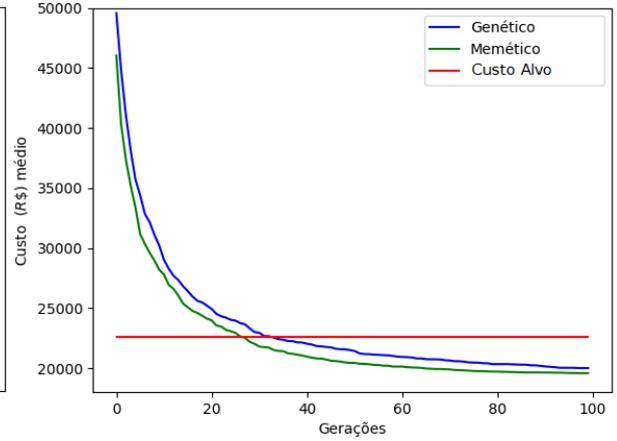
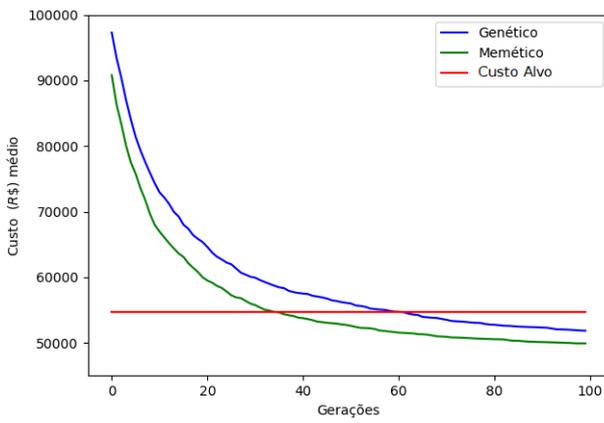
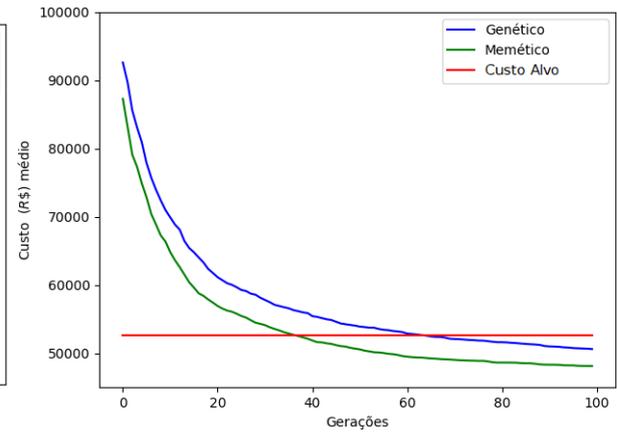
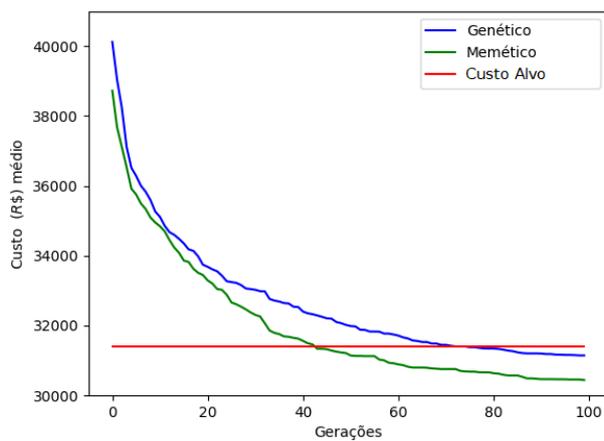
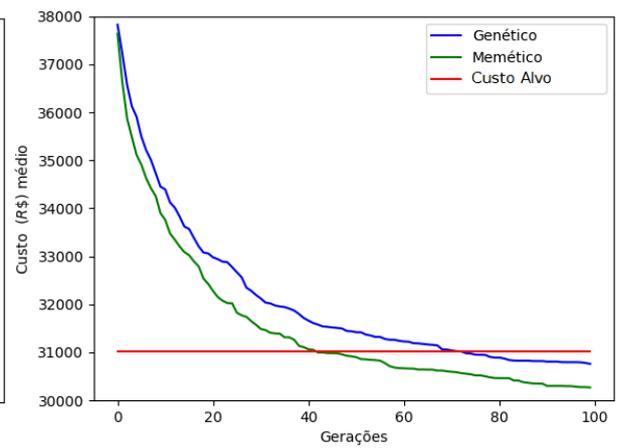
(a) Rede R_1 sem GD(b) Rede R_1 com GD(c) Rede R_2 sem GD(d) Rede R_2 com GD(e) Rede R_3 sem GD(f) Rede R_3 com GD

Figura 6.26: Evolução dos custos médios por geração e custo alvo.

Capítulo 7

Considerações Finais

Este trabalho apresenta um estudo sobre a alocação de chaves seccionadoras e de manobra, automáticas e manuais com diferentes capacidades em redes de distribuição de energia. Em síntese, o objetivo é encontrar soluções que apresentem um ponto de equilíbrio entre confiabilidade e custo de operação das redes. Para avaliar a metodologia proposta foram utilizadas 3 redes reais de grande porte do sistema elétrico brasileiro.

Os estudos realizados, para solução do problema abordado, consideraram a presença de geração distribuída nas redes. A GD vem se popularizando por ser uma energia mais sustentável para o meio ambiente. O uso de GD causa impacto na forma de operação do sistema. Para que a GD tenha influência na confiabilidade do sistema, assim como proporcione uma minimização de custos de operação e manutenção das redes, faz-se necessário permitir a operação da rede com ilhamento, na qual cargas podem ser alimentadas pela GD mesmo quando isoladas do sistema de alimentação principal. A operação com ilhamento foi considerada neste trabalho.

Para resolver o problema de alocação de chaves em estudo foram utilizados duas metaheurísticas: (i) Algoritmo Genético e (ii) Algoritmo Memético. Experimentos foram conduzidos no intuito de comparar a qualidade e o desempenho de ambas. As metaheurísticas utilizadas possuem um certo grau de aleatoriedade, por esse motivo foi considerado relevante utilizar um processo de otimização de hiperparâmetros com objetivo de encontrar um bom conjunto de valores que proporcionasse segurança na qualidade dos resultados alcançados. Para determinar esse conjunto foi efetuada uma busca com diversos valores para cada parâmetro dos algoritmos. Alguns passos de redução na combinatória dos valores considerados foram necessários, devido a complexidade do problema abordado e o tamanho das redes consideradas. Após definir os valores dos hiperparâmetros foi possível realizar os estudos de caso para comparar os algoritmos e avaliar o impacto da GD no sistema.

Para validação dos resultados foram utilizados testes estatísticos para comparar os múltiplos resultados obtidos para cada cenário proposto. Os cenários consideram variação (i) na rede, (ii) no algoritmo utilizado, e (iii) na existência de GD. Em linhas gerais os resultados mostram que um custo menor é alcançado ao utilizar o AM, com redução de até 4,90% quando comparado com os

resultados obtidos pelo AG, e de até 65% quando comparado ao cenário original. Ao comparar o tempo de execução, o AG se mostrou uma alternativa mais promissora para alcançar soluções de qualidade em tempos computacionais menores. O AM por explorar mais o espaço de busca pode encontrar soluções mais próximas do mínimo local/global, em detrimento de esforço computacional.

Experimentos também foram realizados com o intuito de avaliar o impacto da GD nas redes. A otimização das chaves considerando GD na rede, trouxe uma redução no custo total, de até 3,63%, quando comparado ao mesmo cenário sem GD, mesmo utilizando pequena quantidade de GD na rede. Tal resultado fornece um benefício real para as empresas que operam o sistema de distribuição. Quando os resultados são comparados com a solução chamada de caso base obteve-se uma redução entre 55% e 65%, sendo que praticamente toda redução foi devido à diminuição na quantidade de chaves alocadas no sistema ou na substituição de chaves automáticas por manuais, isso porque os algoritmos fazem a determinação dos locais e tipos de forma otimizada.

Como contribuição principal deste trabalho pode ser apontado o entendimento sobre o impacto da utilização da GD nas rede de distribuição em relação ao PAC. Através dos estudos realizados e resultados encontrados foi possível mostrar o retorno financeiro para as empresas que operam o sistema de distribuição, assim como o impacto na confiabilidade das redes. Além disso, foi utilizada uma abordagem estatística pouco comum em trabalhos presentes na literatura referentes ao PAC, habilitando a comparação com maior confiança de algoritmos diferentes na resolução do mesmo problema e fornecendo uma maior segurança na qualidade dos resultados alcançados.

Como proposta de continuação do trabalho pretende-se realizar experimentos para uma quantidade maior de redes, por se utilizar redes reais podem haver algumas características únicas em cada uma delas e tais experimentos podem permitir outras análises. Considerar, além da solução do problema de alocação de chaves, também a alocação de GD. Este é um desdobramento do PAC estudado nesta dissertação, ainda de maior complexidade que o apresentado. A alocação de GD é um campo de estudo que vem sendo explorado e é um desenvolvimento subsequente ao que foi desenvolvido nesta pesquisa. Uma análise interessante a se fazer é utilizar o resultado da otimização da alocação de chaves na rede sem GD e posteriormente realizar a alocação de GD de forma otimizada. Esse cenário é equivalente aos consumidores da rede aumentarem a utilização da GD em uma rede já existente. A depender do resultado os consumidores poderiam ser estimulados a geração de energia de forma sustentável. O que foi abordado neste trabalho é mais próximo de um cenário de expansão ou reestruturação de rede.

Referências Bibliográficas

- Alencar, T., Rodrigues, A. and Silva, M. [2010]. Alocação de chaves em redes de distribuição de energia elétrica via algoritmos genéticos baseados em sistemas especialistas fuzzy, *XVIII Congresso Brasileiro de Automática-CBA* . 5, 8, 10
- Almeida, C., Quiroga, G., Kagan, H. and Kagan, N. [2018]. *Optimal allocation of automatic reclosers*, number 9789811070. 6, 8, 11
- Almufti, S., Zebari, A. and Omer, H. [2019]. A comparative study of particle swarm optimization and genetic algorithm, **8**: 40–45. 27
- Alves, H. [2015]. A Multi-population Hybrid Algorithm to Solve Multi-objective Remote Switches Placement Problem in Distribution Networks, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* **26**(5): 545–555. 5, 8, 11
- Aman, M. M., Jasmon, G. B., Mokhlis, H. and Bakar, A. H. A. [2016]. Optimum tie switches allocation and dg placement based on maximisation of system loadability using discrete artificial bee colony algorithm, *IET Generation, Transmission Distribution* **10**(10): 2277–2284. 6, 8, 9
- ANEEL [2017]. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist módulo 3 – acesso ao sistema de distribuição, *Agência Nacional De Energia Elétrica* . 16
- ANEEL [2018]. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – prodist módulo 8 – qualidade da energia elétrica, *Agência Nacional De Energia Elétrica* . 15
- ANEEL [2019a]. Capacidade instalada por estado, *Agência Nacional De Energia Elétrica* . Acessado em 2019-05-04.
URL: www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/ResumoEstadual.cfm 44
- ANEEL [2019b]. Geração distribuída, *Agência Nacional De Energia Elétrica* . Acessado em 2019-05-04.
URL: http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp 44
- Assis, L. S. [2014]. *Otimização de Alocação de Chaves em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*

- , PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas. 3, 16, 26, 34
- Bazovsky, I. [2004]. *Reliability Theory and Practise*, Dover Publications Inc. 15
- Benavides, A. J., Ritt, M., Buriol, L. S. and França, P. M. [2013]. An iterated sample construction with path relinking method: Application to switch allocation in electrical distribution networks, *Computers Operations Research* **40**(1): 24 – 32. 2
- Bernardon, D., Abaide, A., Canha, L., Sperandio, M., Garcia, V., Neto, N. and Pressi, R. [2015]. Allocation of remotely controlled switches for reliability assessment in distribution networks, *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, Vol. 2015-Novem. 5, 8, 10
- Billinton, R. and Allan, R. N. [1992]. *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, 2nd edn, Springer, Berlin, Germany. 1
- Billinton, R. and Allan, R. N. [1996]. *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd edn, Plenum Press, New York, NY. 22
- Borges, C. L. and Falcão, D. M. [2006]. Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement, *International Journal of Electrical Power Energy Systems* **28**(6): 413 – 420. 5, 8, 17
- Brown, M. B. and Forsythe, A. B. [1974]. Robust tests for the equality of variances, *Journal of the American Statistical Association* **69**(346): 364–367.
URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1974.10482955> 35
- Carvalho, P. M. S., Ferreira, L. A. F. M. and da Silva, A. J. C. [2005]. A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **20**(2): 1031–1036. 5, 8, 10
- Ceraolo, M. and Poli, D. [2014]. *Large Power Systems: Structure and Operation*, IEEE. 1, 2
- Chouhan, S., Inan, H. and Feliachi, A. [2016]. Optimal number and placement of automated sectionalizing switches for smart grid Distribution Automation, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Vol. 2016-Novem. 6, 8, 11
- Chowdhury, S., Chowdhury, S. P. and Crossley, P. [2009]. “*Microgrids and Active Distribution Networks*”, The Institute of Engineering and Technology, London, United Kingdom. 2, 16
- Conti, S., Rizzo, S. and Zeineldin, H. [2017]. Optimal switch placement considering costs and annual reliability improvement during the regulatory period, *International Transactions on Electrical Energy Systems* **27**(5). 6, 8, 9

- da Silva, A. P. A. [2002]. Tutorial on genetic algorithms, *Learning And Nonlinear Models, SBRN, Brasil* **1**: 43–58. 29
- de Assis, L. S., González, J. F. V., Usberti, F. L., Lyra, C., Cavellucci, C. and Zuben, F. J. V. [2015]. Switch allocation problems in power distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **30**(1): 246–253. 3, 5, 8, 11, 18, 23, 25, 26, 27
- Dezaki, H., Abyaneh, H., Agheli, A. and Mazlumi, K. [2012]. Optimized switch allocation to improve the restoration energy in distribution systems, *Journal of Electrical Engineering* **63**(1): 47 – 52. 5, 8, 10
- Donalvo, M., Tio, A. and Tarnate, W. [2015]. Maximizing reliability by optimal siting of distributed generation and protective devices, *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC 2015 - Conference Proceedings*, pp. 455–460. 5, 8, 9
- Eiben, A. and Smith, J. [2003]. *Introduction To Evolutionary Computing*, Vol. 45. 27, 29
- Ferreira, G., Gazzana, D., Bretas, A., Bettiol, A., Carniato, A., Passos, L., Homma, R. and Molina, F. [2015]. Multiobjective MILP model for optimal allocation of automated switching devices in electric power distribution systems, *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*. 6, 8, 11
- Galias, Z. [2017]. On optimum placement of sectionalizing switches in radial distribution networks, *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 6, 8, 10
- Gonçalves, L. F. [2004]. “*Contribuições para o estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída*”, Master’s thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. 2
- Grefenstette, J. J. [1986]. Optimization of control parameters for genetic algorithms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **16**(1): 122–128. 27
- Heidari, A., Agelidis, V. and Kia, M. [2015]. Considerations of sectionalizing switches in distribution networks with distributed generation, *IEEE Transactions on Power Delivery* **30**(3): 1401–1409. 6, 8
- Heidari, A., Agelidis, V., Kia, M., Pou, J., Aghaei, J., Shafie-Khah, M. and Catalao, J. [2017]. Reliability Optimization of Automated Distribution Networks with Probability Customer Interruption Cost Model in the Presence of DG Units, *IEEE Transactions on Smart Grid* **8**(1): 305–315. 6, 8, 9

- Holsbach, I., Ruaro, R., Lima, D., Cabral, N., Falleiros, J., Melo, M., Silva, M., Shinzato, P., Maurício, W., Oliveira, Y. et al. [n.d.]. Impacto da geração distribuída no sistema elétrico de distribuição da RGE, *Universidade Presbiteriana Mackenzie, CITENEL* . 16
- Izadi, M., Farajollahi, M., Safdarian, A. and Fotuhi-Firuzabad, M. [2016]. A multistage MILP-based model for integration of remote control switch into distribution networks, *2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2016 - Proceedings*. 6, 8, 9
- Izadi, M. and Safdarian, A. [2019]. A MIP Model for Risk Constrained Switch Placement in Distribution Networks, *IEEE Transactions on Smart Grid* **10**(4): 4543–4553. 7, 8, 9
- Jayasree, M., Sreejaya, P. and Bindu, G. [2019]. Multi-Objective Metaheuristic Algorithm for Optimal Distributed Generator Placement and Profit Analysis, *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* **4**(1). 7, 8, 11
- Junior, A., De Oliveira, L., Dias, B., De Oliveira, E., Gomes, P., Coelho, M. and Saraiva, J. [2018]. Optimal allocation of maneuver devices in distribution networks for reliability improvement, *20th Power Systems Computation Conference, PSCC 2018*. 6, 8, 10
- Kun, Y., Xinyi, Z., Chen, X. and Lijie, W. [2016]. Study on the dynamic optimal allocation of distribution network switches considering the uncertainty of source-network-load, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, Vol. 2016-Decem, pp. 2153–2157. 6, 8
- Lei, S., Wang, J. and Hou, Y. [2018]. Remote-Controlled Switch Allocation Enabling Prompt Restoration of Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Systems* **33**(3): 3129–3142. 6, 8, 11
- Leite, F., Gomes, A., Melo, L., Sampaio, R., Leão, R., Barroso, G. and Bezerra, J. [2019]. Efficient Switch Placement for Power Distribution Systems using Pareto Optimality Multiobjective Function, *2019 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Latin America 2019*. 7, 8, 10
- Lwin, M., Guo, J., Dimitrov, N. and Santoso, S. [2019]. Protective Device and Switch Allocation for Reliability Optimization With Distributed Generators, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* **10**(1): 449–458. 7, 8, 9
- López, J. C., Rider, M. J., Garcia, A. V., Cavalcante, P. L., Miranda, L. F. and Martins, L. L. [2017]. Optimization approach for the allocation of remote-controlled switches in real-scale electrical distribution systems, *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, pp. 1–6. 6, 8, 11

- Mendes, A., Franca, P. M., Lyra, C., Pissarra, C. and Cavellucci, C. [2005]. Capacitor placement in large-sized radial distribution networks, *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution* **152**(4): 496–502. 29, 30
- Moscato, P. [2000]. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts - towards memetic algorithms, *Caltech Concurrent Computation Program* . 27
- Moskwa, S., Koziel, S., Siluszyk, M. and Galias, Z. [2018]. Multiobjective Optimization for Switch Allocation in Radial Power Distribution Grids, *2018 International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES 2018 - Proceedings*, pp. 157–160. 6, 8, 10
- Nader, A., Ruben, C., Dhulipala, S., Bretas, A. and Da Silva, R. [2019]. MILP Model for Reliability Optimization in Active Distribution Networks, *2018 North American Power Symposium, NAPS 2018*. 7, 8, 10
- Pau, M., Ponci, F. and Monti, A. [2019]. Optimal placement of sectionalizing switches for radial distribution grids, *SyNERGY MED 2019 - 1st International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area*. 7, 8, 9
- Pearson, E. S. [1938]. The probability integral transformation for testing goodness of fit and combining independent tests of significance, *Biometrika* **30**(1-2): 134–148.
URL: <https://doi.org/10.1093/biomet/30.1-2.134> 36
- Pereira, K., Pereira, B., Contreras, J. and Mantovani, J. [2018]. A multiobjective optimization technique to develop protection systems of distribution networks with distributed generation, *IEEE Transactions on Power Systems* **33**(6): 7064–7075. 6, 8, 10
- Pinto, R., Unsihuay-Vila, C. and Fernandes, T. [2019]. Multi-objective and multi-period distribution expansion planning considering reliability, distributed generation and self-healing, *IET Generation, Transmission and Distribution* **13**(2): 219–228. 7, 8
- Pombo, A. V., Murta-Pina, J. and Pires, V. F. [2015]. Multiobjective planning of distribution networks incorporating switches and protective devices using a memetic optimization, *Reliability Engineering System Safety* **136**: 101 – 108. 6, 8, 9
- Pombo, A. V., Murta-Pina, J. and Pires, V. F. [2017]. Distributed energy resources network connection considering reliability optimization using a nsga-ii algorithm, *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pp. 28–33. 6, 8

- Popović, Ž., Brbaklić, B. and Knežević, S. [2017]. A mixed integer linear programming based approach for optimal placement of different types of automation devices in distribution networks, *Electric Power Systems Research* **148**: 136–146. 6, 8, 9
- Popovic, Z., Knezevic, S. and Popović, D. [2019]. Risk-Based Allocation of Automation Devices in Distribution Networks With Performance-Based Regulation of Continuity of Supply, *IEEE Transactions on Power Systems* **34**(1): 171–181. 7, 8
- Ray, S., Bhattacharjee, S. and Bhattacharya, A. [2018]. Optimal allocation of remote control switches in radial distribution network for reliability improvement, *Ain Shams Engineering Journal* **9**(3): 403 – 414. 6, 8, 9
- Ray, S., Bhattacharya, A. and Bhattacharjee, S. [2016]. Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **76**: 53–68. 6, 8, 11
- Rocha, L. F. [2014]. “*Avaliação Probabilística da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição Incluindo Aspectos da Dinâmica do Ilhamento*”, PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. 16
- Rocha, L. F., Borges, C. L. T. and Taranto, G. N. [2017]. Reliability evaluation of active distribution networks including islanding dynamics, *IEEE Transactions on Power Systems* **32**(2): 1545–1552. 16
- Samadi Gazijahani, F. and Salehi, J. [2018]. Optimal Bilevel Model for Stochastic Risk-Based Planning of Microgrids under Uncertainty, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* **14**(7): 3054–3064. 7, 8, 9
- Santos, S., Fitiwi, D., Cruz, M., Santos, C. and Catalao, J. [2019]. Analysis of Switch Automation Based on Active Reconfiguration Considering Reliability, Energy Storage Systems, and Variable Renewables, *IEEE Transactions on Industry Applications* **55**(6): 6355–6367. 7, 8, 11
- Sekhvatmanesh, H. and Cherkaoui, R. [2018]. Optimal infrastructure planning of active distribution networks complying with service restoration requirements, *IEEE Transactions on Smart Grid* **9**(6): 6566–6577. 7, 8, 9
- Shahsavari, A., Fereidunian, A. and Mazhari, S. [2015]. A joint automatic and manual switch placement within distribution systems considering operational probabilities of control sequences, *International Transactions on Electrical Energy Systems* **25**(11): 2745–2768. 6, 8, 9
- Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. [1965]. An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika* **52**(3/4): 591–611. 35

- Sharifian, H. and Mahmoudi, J. [2019]. Reliability Improvement Considering Automatic Switching via DG units, *24th Electrical Power Distribution Conference, EPDC 2019*, pp. 66–71. 7, 8
- Tutte, W., Tutte, W. and Nash-Williams, C. [2001]. *Graph Theory*, Cambridge Mathematical Library, Cambridge University Press.
URL: <https://books.google.com.br/books?id=uTGhooU37h4C> 18
- University of Idaho [2019]. Energy sustainability.
URL: <https://www.webpages.uidaho.edu/sustainability/chapters/ch06/ch06-p3a.asp> , 12
- Vidyasagar, S., Sattianadan, D., Vijayakumar, K. and Selvakumar, K. [2016]. Enhancement of distribution system loadability DG under reconfigured environment, *Indian Journal of Science and Technology* **9**(42). 6, 8
- West, D. B. [2000]. *Introduction to graph theory*, 2nd edn, Pearson. 18
- Xu, Y., Liu, C.-C., Schneider, K. and Ton, D. [2016]. Placement of Remote-Controlled Switches to Enhance Distribution System Restoration Capability, *IEEE Transactions on Power Systems* **31**(2): 1139–1150. 6, 8, 11
- Yari, A., Shakarami, M., Namdari, F. and Moradi CheshmehBeigi, H. [2019a]. A New Practical Approach to Optimal Switch Placement in the Presence of Distributed Generation, *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering* . 7, 8, 9
- Yari, A., Shakarami, M., Namdari, F. and Moradi CheshmehBeigi, H. [2019b]. A novel practical method for simultaneous placement of switching and protective devices considering load uncertainty, *International Transactions on Electrical Energy Systems* **29**(6). 7, 8, 9
- Zeinalzadeh, A., Estebarsari, A. and Bahmanyar, A. [2019]. Multi-Objective Optimal Placement of Recloser and Sectionalizer in Electricity Distribution Feeders, *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2019*. 7, 8, 10