



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**IULLE DE MACEDO GUERRA NEVES**

**APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO MONO-OBJETIVO E  
MULTIOBJETIVO PARA RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO**

**TERESINA**

**2019**

IULLE DE MACEDO GUERRA NEVES

APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO MONO-OBJETIVO E MULTI-OBJETIVO  
PARA RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Piauí, como requisito final à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Aldir Silva Sousa.

TERESINA

2019

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Federal do Piauí  
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco  
Serviço de Processamento Técnico

N513a      Neves, Iulle de Macedo Guerra.  
                Aplicação de algoritmo genético mono-objetivo e  
                multiobjetivo para reconfiguração de rede de distribuição / Iulle  
                de Macedo Guerra Neves. – 2019.  
                99 f.

                Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –  
                Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2019.  
                “Orientador: Prof. Dr. Aldir Silva Sousa”.

                1. Algoritmo Genético Multiobjetivo. 2. Confiabilidade.  
                3. Planejamento. 4. Ramificação. 5. Rede de Distribuição.  
                I. Título.

CDD 621.3

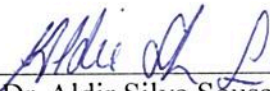
IULLE DE MACEDO GUERRA NEVES

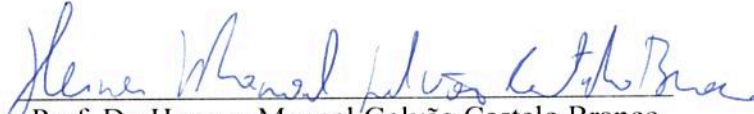
APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO MONO-OBJETIVO E MULTI-OBJETIVO  
PARA RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Piauí, como requisito final à obtenção do título de mestra em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

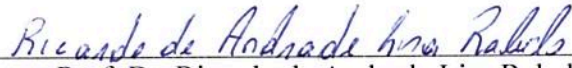
Aprovada em: 27/09/2019.

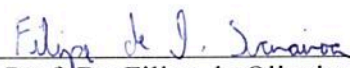
BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Aldir Silva Sousa (Orientador)  
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)

  
Prof. Dr. Hermes Manoel Galvão Castelo Branco  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

  
Prof. Dr. Luís Gustavo Mota Souza  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

  
Prof. Dr. Ricardo de Andrade Lira Rabelo  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

  
Prof. Dr. Filipe de Oliveira Saraiva  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

A Deus.

Aos meus pais, Carlos e Evilene.

Ao meu namorado, Mauro Clark.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, razão de todas as coisas, pela vida, saúde e pelas oportunidades.

Aos meus pais, Carlos Antônio e Maria Evilene, pelo carinho e apoio total.

Ao meu namorado Mauro Clark, pela ajuda, motivação.

À minha querida tia, mas também mãe, Ana Flávia, *in memorian*, pelos ensinamentos e incentivos.

Ao meu querido amigo, Jônatas Macêdo, que novamente se dispôs a me ajudar.

Aos meus colegas de classe que se mostraram solícitos em ajudar, especialmente, Francisco Vitor, Luno Gomes, Heitor, Dhiego, Hertz, Neto.

À CAPES/FAPEPI, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Aldir Silva Sousa, pela paciência e excelente orientação.

Ao Prof. Dr. Marcos Eduardo do Prado Villarroel Zurita, por sua grande e excelente ajuda na apresentação do artigo aceito e publicado no *6<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies*.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Hermes Manoel Galvão Castelo Branco, Prof. Dr. Luis Gustavo Mota Souza, Prof. Dr. Ricardo de Andrade Lira Rabelo e Prof. Dr. Filipe de Oliveira Saraiva, pela disponibilidade para formação desta banca.

Aos estimados professores participantes do processo que me fizeram chegar até aqui.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei;  
não fosse por elas, eu não teria saído do lugar.”

*Chico Xavier*

## RESUMO

A reconfiguração da rede de um sistema de distribuição elétrica consiste em sua alteração topológica de operação, visando objetivos importantes como: redução de perdas, melhoria nos níveis de tensão, qualidade de energia, balanceamento de carga, entre outros. Este trabalho apresenta uma nova abordagem ao problema de reconfiguração de redes de distribuição: é realizado o planejamento de operação, visando obter configurações mais ramificadas para alcançar topologias mais confiáveis. Para fazer o planejamento, o Algoritmo Genético é usado. Para considerar a ramificação, tratou-se a topologia radial como uma árvore (grafo sem ciclos) e convencionou-se que a maior ramificação é aquela com menor distância do nó raiz a todos os nós folhas da rede. Em outras palavras, considerando as definições das teorias dos grafos, a árvore de menor altura. O processo utilizado permite uma melhor redistribuição de ramos, realocando barras pertencentes a grandes corredores, em seções menores. Para verificar a desenvoltura da abordagem aqui proposta, analisaram-se as principais variáveis de qualidade de topologia, tais como: perfil de tensão, perdas ativas e número de consumidores e quantidade de carga (kW) sem eletricidade em caso de falta de energia. O planejamento é realizado preparando a rede tanto para operação, quando é apresentado uma topologia com perfis de tensão adequados e mínimas perdas ativas, como para recomposição, quando a topologia proposta permite, em média, uma rápida recomposição do sistema na ocorrência de uma falta. Além disso, o *Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II* (NSGA-II) foi implementado para encontrar soluções que satisfaçam não apenas a minimização da altura total, mas também a minimização das perdas ativas. O Algoritmo Genético Multiobjetivo foi aplicado também para recompor os sistemas, em caso de falta única, buscando diversas soluções que minimizem as perdas resistivas e número de chaveamentos. Esta aplicação foi realizada para a escolha da melhor configuração de recomposição, analisando os custos envolvidos. Os resultados das simulações, aplicados em sistemas de teste de 16, 33, 84 e 136 barras, mostraram que, ao minimizar o somatório da distância entre o nó fonte e os demais nós da rede, considerando-a como uma árvore, foi possível obter maior confiabilidade no sistema.

**Palavras-chave:** Algoritmo Genético Multiobjetivo, Confiabilidade, Ramificação, Planejamento, Recomposição, Reconfiguração, Rede de Distribuição, *Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II* (NSGA-II).



## ABSTRACT

The reconfiguration of the network of an electrical distribution system consists of its topological change of operation, aiming at important objectives such as: loss reduction, improvement in voltage levels, power quality, load balancing, among others. This paper presents a new approach to the distribution network reconfiguration problem: operation planning is carried out to obtain more branched configurations to achieve more reliable topologies. To do the planning, the Genetic Algorithm is used. To consider branching, the radial topology was treated as a tree (graph without cycles) and it was agreed that the largest branch is the one with the shortest distance from the root node to all leaf nodes in the network. In other words, considering the definitions of graph theories, the lowest height network. The process used allows a better redistribution of branches, relocating bars belonging to large corridors, in smaller sections. To verify the resourcefulness of the approach proposed here, the main topology quality variables were analyzed, such as: voltage profile, active losses and number of consumers and amount of charge (kW) without electricity in case of power failure. Planning is carried out by preparing the network both for operation, when a topology with adequate voltage profiles and minimal active losses is presented, and for recomposition, when the proposed topology allows, on average, a quick system recomposition in the event of a fault. In addition, the *Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II* (NSGA-II) has been implemented to find solutions that satisfy not only the minimization of the total height, but also the minimization of the active losses. The Multiobjective Genetic Algorithm was also applied to recompose the systems, in case of a single fault, seeking several solutions that minimize resistive losses and number of switching. This application was made to choose the best recomposition configuration, analyzing the costs involved. The results of the simulations, applied in 16, 33, 84 and 136 buses test systems, showed that, by minimizing the sum of the distance between the source node and the other nodes of the network, considering it as a tree, it was possible to obtain higher system reliability.

**Keywords:** Distribution Network, Genetic Algorithm, Planning, Ramification, Reconfiguration, Recomposition, Reliability, *Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II* (NSGA-II).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Exemplo ilustrativo de cruzamento com indivíduos de sete bits .....	26
Figura 2	– Exemplo ilustrativo de mutação em um indivíduo de sete bits .....	27
Figura 3	– Exemplo com possíveis soluções para a compra de notebook .....	29
Figura 4	– Sistema com apenas um ramo .....	33
Figura 5	– Sistema melhor ramificado .....	33
Figura 6	– Sistema com 14 barras .....	34
Figura 7	– Fluxograma do algoritmo genético utilizado .....	35
Figura 8	– Fluxograma do NSGA-II aplicado ao problema .....	39
Figura 9	– Sistema de 16 barras .....	42
Figura 10	– Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 16 barras .....	43
Figura 11	– Histograma de faltas do sistema de 16 barras .....	43
Figura 12	– Histograma de cargas do sistema de 16 barras .....	44
Figura 13	– Sistema de 33 barras .....	45
Figura 14	– Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 33 barras .....	46
Figura 15	– Histograma de faltas do sistema de 33 barras .....	46
Figura 16	– Histograma de cargas do sistema de 33 barras .....	47
Figura 17	– Sistema de 84 barras .....	48
Figura 18	– Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 84 barras.	49
Figura 19	– Histograma de faltas do sistema de 84 barras .....	50
Figura 20	– Histograma de cargas do sistema de 84 barras .....	51
Figura 21	– Sistema de 136 barras .....	52
Figura 22	– Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 136 barras .....	53
Figura 23	– Histograma de faltas do sistema de 136 barras .....	54
Figura 24	– Histograma de cargas do sistema de 136 barras .....	55
Figura 25	– Fronteira Pareto para o sistema de 16 barras: Altura total x perdas .....	56
Figura 26	– Fronteira Pareto para o sistema de 33 barras: Altura total x perdas .....	58
Figura 27	– Fronteira Pareto para o sistema de 84 barras: Altura total x perdas .....	60
Figura 28	– Fronteira Pareto para o sistema de 136 barras: Altura total x perdas .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Parâmetros do AG implementado para minimização da altura total.....	37
Tabela 2	– Comparação de perda de potência– sistemas de 16, 33 e 84 barras.....	40
Tabela 3	– Comparação de perda de potência– sistemas de 136.....	41
Tabela 4	– Parâmetros do AG implementado para minimização de perdas.....	41
Tabela 5	– Resultados encontrados para o sistema de 16 barras .....	42
Tabela 6	– Resultados encontrados para o sistema de 33 barras .....	45
Tabela 7	– Resultados encontrados para o sistema de 84 barras .....	49
Tabela 8	– Resultados encontrados para o sistema de 136 barras .....	53
Tabela 9	– Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 16 barras .....	57
Tabela 10	– Conjunto Pareto para o sistema de 16 barras com configuração inicial padrão .....	57
Tabela 11	– Conjunto Pareto para o sistema de 16 barras com configuração inicial proposta .....	57
Tabela 12	– Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 33 barras .....	58
Tabela 13	– Conjunto Pareto para o sistema de 33 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	59
Tabela 14	– Conjunto Pareto para o sistema de 33 barras com configuração inicial proposta (caso 2) .....	59
Tabela 15	– Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 84 barras .....	60
Tabela 16	– Conjunto Pareto para o sistema de 84 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	61
Tabela 17	– Conjunto Pareto para o sistema de 84 barras com configuração inicial proposta (caso 2) .....	61
Tabela 18	– Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 136 barras (parte 1) .....	62
Tabela 19	– Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 136 barras (parte 2) .....	63
Tabela 20	– Falta na linha 95: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	64
Tabela 21	– Falta na linha 95: conjunto Pareto para o sistema de 84 barras com configuração inicial proposta (caso 2) .....	65
Tabela 22	– Falta na linha 107: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	65

Tabela 23	– Falta na linha 107: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2) .....	66
Tabela A.1	– Média das estatísticas de ocorrência de falta para o sistema de 33 barras ....	75
Tabela A.2	– Média de desenergizados total no ano para o sistema de 33 barras.....	76
Tabela B.1	– Falta na linha 54: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	77
Tabela B.2	– Falta na linha 54: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2) .....	77
Tabela B.3	– Falta na linha 83: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	78
Tabela B.4	– Falta na linha 83: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2) .....	78
Tabela B.5	– Falta na linha 106: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	79
Tabela B.6	– Falta na linha 106: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2) .....	79
Tabela B.7	– Falta na linha 149: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	80
Tabela B.8	– Falta na linha 149: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2) .....	80
Tabela B.9	– Falta na linha 84: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1) .....	81
Tabela B.10	– Falta na linha 84: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2) .....	81
Tabela B.11	– Falta na linha 53: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão .....	82
Tabela B.12	– Falta na linha 53: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2) .....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético
CD	<i>Crowding Distance</i>
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FNS	<i>Fast Nondominated Sorting</i>
MOGA	<i>Multiobjective Optimization Genetic Algorithm</i>
NPGA	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>
NSGA-II	<i>Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II</i>
OCC	<i>Operator Crowded Comparison</i>
PAES	<i>Pareto-Archived Evolution Strategy</i>
PAES-II	<i>Pareto-Archived Evolution Strategy-II</i>
SPEA	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
SPEA-II	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm-II</i>
VEJA	<i>Vector Evaluated Genetic Algorithm</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_k$	Módulo da tensão na barra $k$ ;
$\theta_k$	Ângulo da tensão na barra $k$ ;
$P_k$	Potência ativa líquida injetada na barra $k$ ;
$Q_k$	Potência reativa líquida injetada na barra $k$ ;
$\Omega_{Bk}$	Conjunto de barras conectadas à barra $k$ ;
$P_{km}$	Fluxo de potência ativa no ramo $k - m$ ;
$\theta_m$	Ângulo de fase das tensões complexas na barra $m$ ;
$Q_k^{sh}$	Potência reativa injetado pelo shunt conectado na barra $k$ ;
$Q_{km}$	Fluxo de potência reativa no ramo $k - m$ ;
$V_m$	Magnitude de tensão complexa na barra $m$ ;
$g_{km}$	Condutância entre as barras $k$ e $m$ ;
$b_{km}$	Susceptência entre as barras $k$ e $m$ ;
$b_{km}^{sh}$	Susceptência shunt entre as barras $k$ e $m$ ;
$P_i^{esp}$	Injeção de potência ativa especificada;
$Q_i^{esp}$	Injeção de potência reativa especificada;
$P_i^{cal}$	Injeção de potência ativa calculada;
$Q_i^{cal}$	Injeção de potência reativa calculada;
$J$	Matriz Jacobiana;
$A_t$	Altura total do sistema;
$Ab_i$	Altura da barra $i$ ;
$n$	Número de barras do sistema;
$Ps_i$	Potência ativa fornecida pela subestação à barra $i$ ;
$Pd_i$	Potência ativa demandada pela barra $i$ ;
$x_{ij}$	Estado da chave entre as barras $i$ e $j$ ;
$\Omega_{Bi}$	Conjunto de barras conectadas à barra $i$ ;
$P_{ij}$	Potência ativa dissipada;
$Qs_i$	Potência reativa fornecida pela subestação à barra $i$ ;
$Qd_i$	Potência reativa demandada pela barra $i$ ;
$Q_{ij}$	Potência reativa dissipada;
$V_i$	Tensão na barra $i$ ;
$V_{i,\min}$	Tensão mínima na barra $i$ ;
$V_{i,\max}$	Tensão máxima na barra $i$ ;

$\Omega_L$	Conjuntos de linhas;
$PT$	Perdas técnicas;
$X$	Configuração do sistema;
$G_{ij}$	Condutância entre as barras $i$ e $j$ ;
$\theta_{ij}$	Diferença dos ângulos de tensão nas barras $i$ e $j$ ;
$y$	Configuração inicial;
$f_b(x)$	Valor de adaptação;
$x$	Vetor de variáveis de decisão de tamanho $N_v$ ;
$N$	Quantidade de objetivos;
$g_i$	Função de restrição de desigualdade;
$R_{des}$	Quantidade de restrições de desigualdade;
$R_{igual}$	Quantidade de restrições de igualdade;
$h_i$	Função de restrição de igualdade;
$x_w^{\text{inf}}$	Limite inferior da variável de decisão $x_w$ ;
$x_w^{\text{sup}}$	Limite superior da variável de decisão $x_w$ ;
$n_p$	Número de elementos que dominam $p$ ;
$S_p$	Conjunto de elementos que $p$ domina;
%	Porcentagem
®	Marca Registrada

## LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Pseudocódigo do AG .....	25
Algoritmo 2 – Pseudocódigo do FNS.....	31
Algoritmo 3 – Pseudocódigo do CD .....	32
Algoritmo 4 – Pseudocódigo do NSGA-II .....	33
Algoritmo 5 – Pseudocódigo do procedimento de factibilização .....	37



# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	14
<b>1.1 Objetivos</b>	15
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	15
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	15
<b>1.2 Contribuições técnicas</b>	16
<b>1.3 Contribuições científicas</b>	16
<b>1.4 Estrutura da dissertação</b>	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	18
<b>2.1 Revisão da literatura</b>	18
<b>2.2 Características do problema de reconfiguração</b>	20
2.2.1 <i>Modelagem matemática utilizada neste trabalho</i>	21
2.2.2 <i>Fluxo de potência</i>	21
2.2.2.1 <i>Método de Newton</i>	22
2.2.3 <i>Perdas de potência</i>	23
2.2.4 <i>Número de chaveamentos</i>	25
<b>2.3 Algoritmo Genético</b>	25
2.3.1 <i>Conceitos Básicos – AG</i>	25
2.3.2 <i>Geração da população</i>	25
2.3.3 <i>Avaliação dos indivíduos</i>	26
2.3.4 <i>Seleção</i>	26
2.3.5 <i>Cruzamento</i>	26
2.3.6 <i>Mutação</i>	27
2.3.7 <i>Elitismo</i>	27
2.3.8 <i>Critério de parada</i>	28
<b>2.4 Algoritmo genético multiobjetivo</b>	28
2.4.1 <i>Conceitos Básicos – NSGA-II</i>	29
2.4.2 <i>NSGA-II</i>	31
<b>3 MÉTODOS PROPOSTOS</b>	34
<b>3.1 Ramificação</b>	34
<b>3.2 Algoritmo Genético aplicado ao problema de reconfiguração de redes de distribuição</b>	36
3.2.1 <i>Geração da população:</i>	36
3.2.2 <i>Factibilizador:</i>	37
3.2.3 <i>Fitness:</i>	38
3.2.4 <i>Seleção:</i>	38
3.2.5 <i>Cruzamento:</i>	38
3.2.6 <i>Mutação:</i>	38
3.2.7 <i>Critério de parada:</i>	38
3.2.8 <i>Elitismo:</i>	39
<b>3.3 Aplicação do NSGA-II ao problema de reconfiguração de redes de distribuição</b>	39
<b>4 TESTES E RESULTADOS</b>	41
<b>4.1 Resultados – AG</b>	41
4.1.1 <i>Sistema de 16 barras</i>	42
4.1.2 <i>Sistema de 33 barras</i>	46
4.1.3 <i>Sistema de 84 barras</i>	49
4.1.4 <i>Sistema de 136 barras</i>	54
<b>4.2 Resultados – NSGA-II</b>	58

4.2.1 Sistema de 16 barras: Altura total x Perdas .....	58
4.2.2 Sistema de 16 barras: Perdas x Número de chaveamentos .....	59
4.2.3 Sistema de 33 barras: Altura total x Perdas .....	60
4.2.4 Sistema de 33 barras: Perdas x Número de chaveamentos .....	61
4.2.5 Sistema de 84 barras: Altura total x Perdas .....	62
4.2.6 Sistema de 84 barras: Perdas x Número de chaveamentos .....	63
4.2.7 Sistema de 136 barras: Altura total x Perdas .....	64
4.2.8 Sistema de 136 barras: Perdas x Número de chaveamentos.....	66
4.3 Análise dos resultados .....	68
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	70
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	72
<b>APÊNDICE A – ESTUDO SOBRE RECONFIGURAÇÃO DE ESTATÍSTICAS DE OCORRÊNCIA FALTAS</b> .....	78
<b>APÊNDICE B – OUTRAS SITUAÇÕES DE FALTA</b> .....	80
<b>ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTES</b> .....	86
<b>A.1 Sistema de 16 Barras</b> .....	86
<b>A.2 Sistema de 33 Barras</b> .....	87
<b>A.3 Sistema de 84 Barras</b> .....	88
<b>A.4 Sistema de 136 Barras</b> .....	90

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tornou-se indispensável para a qualidade de vida das pessoas e para diversos setores importantes para a sociedade, como: industriais, institucionais e de saúde. Devido a sua importância, é requerida uma atenção especial ao setor energético, principalmente à parte de distribuição, na qual ocorre uma quantidade importante de perdas (SOUSA *et al.* 2012). O planejamento de redes de distribuição pode ser realizado para minimizar custos de investimentos, operacionais, aumentar a qualidade do serviço, confiabilidade e robustez dos sistemas (SOUSA, 2013).

Os sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica que possuem configuração radial têm baixa confiabilidade quanto à continuidade do fornecimento de energia. Isso é devido ao fato de existir apenas um caminho entre a subestação e cada barra (SCHMIDT, 2005).

Falta de energia traz transtornos aos consumidores e prejuízos financeiros às concessionárias, devido às multas relacionadas aos índices: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) (ANEEL, 2016). Contingências ocorrem esporadicamente em sistemas de energia e não podem ser evitadas, pois em sua maioria são causadas por intempéries climáticas ou eletromagnéticas (GARCIA, 2005). Uma maneira de amenizar o impacto causado pelo problema é diminuir o número de consumidores desenergizados ou garantir que cargas prioritárias sejam supridas (ANEEL, 2016).

É essencial que a rede esteja preparada para eventuais contingências. A maneira proposta neste trabalho para melhorar a confiabilidade, obter melhorias no sistema e uma maior capacidade para enfrentar faltas de energia, inevitáveis a uma rede elétrica, é planejar a operação do sistema, a fim de obter a maior ramificação da rede. A maior ramificação possível, conforme propõe-se neste trabalho, ocorre com a minimização da altura da rede.

Na ocorrência de uma falta, a recomposição de sistemas de distribuição de energia elétrica é necessária. O restabelecimento de energia é realizado através de chaveamentos para transferência do maior número possível de cargas desligadas, possibilitando melhorias para os consumidores e empresas distribuidoras. Realizar o planejamento da operação da rede com a finalidade de redistribuir melhor as barras, pode ser uma maneira de evitar que muitas barras fiquem desconectadas em caso de contingência. Além disso, recompor o sistema com o menor custo e menos chaveamentos é de grande interesse.

Outro fator que representa custo considerável para as empresas distribuidoras é o excesso de perdas resistivas na rede elétrica. As perdas ativas podem ser classificadas de acordo com suas origens: técnicas e não técnicas. As técnicas são intrínsecas aos processos de geração, transmissão e distribuição, devido principalmente ao efeito *Joule* nos condutores. A diminuição desses tipos de perdas pode ser possível através da substituição de linhas e equipamentos, uso de banco capacitores ou reconfiguração, sendo esta a opção mais barata, pois não requer o uso de novos equipamentos. As perdas não técnicas são causadas por erros de medição, furtos de energia etc. Pode ser utilizada a conscientização das pessoas, fiscalização e campanhas educativas para evitar esse tipo de perdas (PEREIRA, 2014).

A reconfiguração de sistemas é feita através da alteração do estado das chaves impondo os estados de abertas (impedindo o fluxo pelo corredor associado) ou fechadas

(permitindo). A reconfiguração do sistema pode ser utilizada visando:

- Minimizar as perdas ativas do sistema;
- Melhorar os níveis de tensão;
- Manter a confiabilidade do sistema;
- Eliminar e/ou isolar faltas para restaurar o fornecimento de energia;
- Balanceamento de carga;

Em face do exposto, neste trabalho são realizadas duas abordagens da reconfiguração de redes de distribuição: planejamento e recomposição. O planejamento de operação dos sistemas elétricos é utilizado para obter: inicialmente, sistemas mais ramificados, ou seja, sistemas com ramos melhor distribuídos preparando a rede para casos de recomposição; e encontrar um conjunto de soluções que se adequem aos problemas de mínima altura total e mínima perda resistiva. A partir das configurações obtidas na fase de planejamento, é feito o estudo de restabelecimento de energia, quanto ao número de comutações de chaves em caso de falta. Em seguida, são analisados os custos das perdas e quantidade de manobras envolvidos nas soluções encontradas para o sistema de maior porte, 136 barras, possibilitando encontrar a configuração mais adequada para os casos de falta considerados.

Para a otimização mono-objetiva foi utilizado o Algoritmo Genético (AG) e para as otimizações multiobjetivas foi implementado o *Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II* (NSGA-II).

## 1.1 Objetivos

Os objetivos da dissertação foram divididos em geral e específicos, descritos a seguir:

### 1.1.1 Objetivo geral

- O objetivo principal deste projeto é realizar o planejamento de operação através do processo de reconfiguração, obtendo uma rede de distribuição mais ramificada, visando diminuir o impacto causado por uma contingência. Além disso, examinar consequências advindas dessa metodologia.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo de otimização da reconfiguração, objetivando o atendimento da demanda mesmo após a saída de operação de uma linha existente do sistema.
- Analisar o número de chaveamentos necessários para recuperação de falta.
- Examinar, se após a ramificação, o número de nós desconectados diminui em caso de contingência.
- Apresentar e analisar a técnica para a solução do problema proposto.

- Avaliar as perdas de potência e os níveis de tensão.
- Realizar o estudo dos custos e de número de chaveamentos envolvidos na recomposição.
- Encontrar soluções que minimizem a altura total e as perdas resistivas dos sistemas, concomitantemente.

## 1.2 Contribuições técnicas

Neste trabalho foram feitos histogramas mostrando o número de consumidores e a quantidade de carga, em kW que ficam sem fornecimento de energia com a contingência de cada linha. Com estes histogramas foi possível distinguir uma outra forma de ramificar os sistemas de distribuição: analisando as estatísticas de ocorrência de falta. Também é executável, através dessa investigação realizada, realizar a reconfiguração de redes de distribuição com prioridade de carga.

Outras contribuições: uma nova abordagem nomeada de ramificação, que permite atenuar a quantidade de barras desenergizadas em caso de falta, modelo de otimização para restabelecimento de energia, em caso de contingências.

## 1.3 Contribuições científicas

A seguinte publicação é decorrente do desenvolvimento desta pesquisa:

**NEVES, Iulle de Macêdo Guerra; CLARK, Mauro Antonio Guimaraes; SOUSA, Aldir Silva; ZURITA, Marcos Eduardo do Prado Villarroel.** Application of Evolutionary Algorithm for Reconfiguration of the Distribution Network, Envisaging a Larger Branching of the System. In: **6<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies**, Paris-França, 2019.

Através da colaboração em trabalhos de terceiros, a seguinte publicação também foi obtida durante o período de desenvolvimento desta pesquisa:

**CLARK, Mauro Antonio Guimaraes; NEVES, Iulle de Macêdo Guerra; SOUSA, Aldir Silva; ZURITA, Marcos Eduardo do Prado Villarroel.** Reconfiguration of Distribution Systems Aiming for Accumulated Impedance Balancing among Feeders Through Genetic Algorithm. In: **6<sup>th</sup> International Conference on Control, Decision and Information Technologies**, Paris-França, 2019.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Além desta introdução, este trabalho é composto pelos seguintes capítulos:

**Capítulo 1:** O presente capítulo apresentou uma breve explicação dos problemas tratados nessa dissertação: reconfiguração de redes de distribuição com redução de perdas e da altura geral da rede, além dos objetivos gerais e específicos.

**Capítulo 2:** É apresentada a revisão bibliográfica, fazendo alguns comentários sobre trabalhos atuais na área. A formulação matemática do problema, fluxo de potência características importantes das técnicas de otimização utilizadas são explanadas.

**Capítulo 3:** O processo de ramificação é explicado. A metaheurística Algoritmo Genético e o NSGA-II são explicadas quanto as suas aplicações para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica.

**Capítulo 4:** Os sistemas testes e os resultados correspondentes a utilização do Algoritmo Genético e do NSGA-II para o problema de reconfiguração são apresentados e comentados.

**Capítulo 5:** São feitas as considerações finais e sugeridos trabalhos futuros.

**APÊNDICE A:** É realizado um estudo de reconfiguração para o sistema de 33 barras, considerando estatísticas de ocorrência de faltas.

**APÊNDICE B:** Outras situações de falta para o sistema de 136 barras são mostradas.

**Anexo A:** São exibidos os dados dos sistemas testes utilizados.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo apresentam-se um breve resumo das técnicas de otimização utilizadas para a reconfiguração de sistemas de distribuição; comentários sobre alguns trabalhos atuais da literatura especializada e detalhamento do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. Além disso, as funções objetivo deste trabalho são explicadas em maiores detalhes, e apresentar-se-ão as principais características da metaheurística Algoritmo Genético e comentários dos conceitos importantes dos Algoritmos Genéticos multiobjetivos, dos mecanismos utilizados no NSGA-II e do algoritmo principal.

### 2.1 Revisão da literatura

O processo de reconfiguração de sistemas trata-se de um problema combinatório, pois o espaço de busca das soluções aumenta de forma exponencial com a quantidade de variáveis envolvidas (BATISTA et al., 2016). Técnicas de otimização são aplicadas para obter o melhor resultado para este problema. Essas técnicas podem ser agrupadas em duas categorias: métodos matemáticos exatos e aproximados (heurísticas e metaheurísticas).

Os métodos exatos ou clássicos possuem convergência para a solução ótima global, porém não apresenta eficiência para soluções com múltiplos ótimos locais. Alguns exemplos de métodos clássicos são: *branch-and-bound* e Decomposição de *Benders*.

Os métodos heurísticos são baseados na experiência. Não garantem a otimalidade da solução, mas conseguem encontrar respostas aproximadas da ideal em tempo computacional aceitável. Para sistemas de grande porte, podem ser necessárias técnicas de paralelização em *software* e *hardware* para acelerar o processamento (GOIS, 2017). Alguns exemplos de métodos heurísticos são: *branch-exchange*, Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC).

As metaheurísticas utilizam conceitos de heurísticas tradicionais para resolver problemas de diferentes tipos (OLIVEIRA, 2011). Alguns exemplos de métodos metaheurísticos são: *tabu search*, *particle swarm*, algoritmos evolutivos, *simulated annealing*. A seguir serão apresentados exemplos de trabalhos que empregaram alguns desses métodos.

Ferreira (2017) aplicou a técnica decomposição de *Benders* para a reconfiguração de sistemas de distribuição objetivando minimizar as perdas de potência ativa do sistema, considerando a incerteza da carga demandada nas barras. Esta técnica divide o problema em dois subproblemas: um mestre e um escravo. Estes subproblemas se comunicam através de restrições até que um critério de convergência seja alcançado.

Koutsoukis *et al.*, (2017) utilizaram o algoritmo *branch and bound* para solucionar a reconfiguração de redes de distribuição *online* na presença de geração distribuída. Esta técnica realiza a enumeração das soluções candidatas, de forma inteligente, até encontrar a solução ótima do problema, dividindo o problema raiz em subproblemas.

Ferreira *et al.*, (2017) aplicaram a técnica de decomposição de *Benders* para a reconfiguração visando o melhor balanceamento entre alimentadores, a metodologia é aplicada no sistema de 16 barras (CINVALAR et al., 1988).

Da Silva *et al.*, (2015) resolveram o problema de reconfiguração de rede através da técnica *branch-exchange*, para minimização de perdas e queda de tensão, redução do desequilíbrio de tensão e minimização das distorções harmônicas. Nesta técnica, uma chave é fechada, formando um laço e logo a seguir, outra é aberta, mantendo assim a radialidade.

Rosseti (2015) utilizou um Algoritmo Heurístico Construtivo para maximizar o restabelecimento de consumidores em sistemas de distribuição após uma ou múltiplas faltas. Nesse algoritmo são utilizados dois procedimentos: inicialmente uma chave é fechada, formando um laço; efetua-se a abertura de outra chave para que seja mantida a radialidade do sistema e com menor perda que a topologia anterior. A chave que deverá ser aberta é escolhida de acordo com um índice de sensibilidade.

Dimitrijevic e Rajakovic (2015) propuseram uma heurística baseada no algoritmo gerador de árvore mínima Prim para minimizar cargas desenergizadas e custos de operação de chaves durante a restauração de serviço. Adotaram um coeficiente de custo de operação para cada chave, de acordo com o estado fechado ou aberto.

Pereira (2014) aplicou o algoritmo de evolução diferencial para minimizar perdas através do processo de reconfiguração. Nesse algoritmo, diferente dos algoritmos genéticos, a seleção é realizada comparando os *fitness* da população anterior com os da gerada. Os indivíduos de melhor *fitness* irão compor a nova população.

Possagnolo (2015) apresentou metodologias baseadas no algoritmo de busca em vizinhança variável para realizar a reconfiguração de redes objetivando minimizar os custos de perdas de energia, considerando vários níveis de demanda.

Oliveira *et al.*, (2016) utilizaram a técnica *particle swarm* para o restabelecimento após a ocorrência de faltas. Esse algoritmo é baseado no comportamento social dos pássaros, no qual cada indivíduo se move no espaço de busca de acordo com a velocidade determinada pela experiência do próprio indivíduo e dos outros indivíduos. O problema é tratado como multiobjetivo, focado em maximizar a carga atendida, melhorar a regulação de tensão, minimizar perdas e número de chaveamentos.

Abubakar *et al.*, (2019) utilizaram o algoritmo genético aprimorado para encontrar a solução de reconfiguração de sistemas que minimize as perdas ativas e o desvio de tensão total. Nesse algoritmo, o indivíduo, resultado de mutação e cruzamento, só é adicionado à nova população caso passe no teste de substituição, ou seja, uma configuração radial.

Yang *et al.*, (2018) realizaram a reconfiguração do sistema de 16 barras (CINVALAR *et al.*, 1988), considerando o impacto da comutação de chaves. O GRASP (*Greedy Random Adaptive Search*) é utilizado para encontrar a solução sem instabilidade de tensão e desconexão de usuários.

Neto (2014) utiliza a associação das metaheurísticas *Ant Colony* e *tabu search* para resolver o problema de reconfiguração. A metodologia aplicada explora somente topologias radiais e, além disso, apresenta menor esforço computacional em relação aos outros algoritmos testados no trabalho.

Soares (2018) propõe o emprego do algoritmo de Evolução Diferencial para redução de perdas de potência ativa e posicionamento de geração distribuída através da reconfiguração. A rede é representada através da estrutura de dados Representação Nó-Profundidade e para o fluxo de carga é utilizado o método de varredura direta e inversa. Simulações foram feitas nos sistemas de 33 e 69 barras. Quando comparados os resultados



obtidos com os da busca exaustiva, o algoritmo empregado obteve menor esforço computacional.

Ferreira *et al.* (2015) consideraram a maximização da estabilidade de tensão, através da reconfiguração, é considerada como objetivo. A solução é encontrada utilizando a metaheurística Sistema Imunológico Artificial, cujo desempenho apresentou robustez.

Peralta (2015) utiliza a metaheurística *tabu search* para restaurar redes de distribuição com geração distribuída, considerando como principais objetivos: minimizar o número de chaveamentos e de consumidores sem fornecimento de energia. Testes foram realizados nos sistemas de 136 e 7052 barras.

Da Silva (2014) realizou a restauração de sistemas de distribuição elétricos, com os objetivos: redução de cargas desconectadas e número de manobras. Para isso, utilizou o *Strength Pareto Evolutionary Algorithm-II* (SPEA-II). Com esse estudo, é possível encontrar a resposta que recupera a maior quantidade de carga.

Marques (2016) propôs a união da Busca Exaustiva com o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em tabelas de subpopulação e características do NSGA-II para o restabelecimento de energia considerando o atendimento prioritário de consumidores e máxima reconexão de consumidores desligados saudáveis com menor o número de manobras. O método se mostrou capaz de lidar com sistemas de grande porte e com baixo tempo computacional.

Já Cardozo (2015) utiliza a heurística baseada nos Sistemas Imunológico Artificiais para a procura da configuração ótima que minimize as perdas resistivas e maximize o equilíbrio da demanda dos alimentadores de uma subestação e índices de desempenho. A ferramenta utilizada é baseada nos mecanismos do sistema imunológico biológico. Para os sistemas testados, encontrou-se topologia melhor do que a inicial.

Souza *et al.* (2015) utilizaram dois algoritmos baseados no funcionamento do sistema imunológico, para resolver o problema de minimização de perdas Copt-aiNet (*Artificial Immune Network for Combinatorial Optimization*) e Opt-aiNet (*Artificial Immune Network for Optimization*). Foram testados os sistemas de 33, 70, 84, 136, e 417 barras e comparados os resultados com os da literatura, encontrando bons resultados.

Marquez (2014) utilizou o Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo em Tabelas para obter, em tempo real, soluções de restabelecimento de energia em sistemas de grande porte, priorizando a utilização de chaves seccionadoras automáticas. Esta priorização possibilita o rápido restabelecimento.

## 2.2 Características do problema de reconfiguração

Neste trabalho, inicialmente, considera-se como objetivo a ramificação de sistemas, tratada matematicamente como a minimização da altura total do sistema e resolvido com o Algoritmo Genético. Em seguida, são considerados dois objetivos na primeira parte da otimização multiobjetiva: minimização da altura total do sistema e das perdas ativas do sistema, e na segunda parte: minimização do número de manobras e perdas resistivas em caso de contingência.

### 2.2.1 Modelagem matemática utilizada neste trabalho

O problema de reconfiguração é um problema de otimização não linear inteiro misto, pois envolve variáveis inteiras e contínuas, restrições lineares e não lineares. Os candidatos a solucionar o problema de reconfiguração devem respeitar a dois tipos de restrições: operacionais e físicas (GOMES, 2005).

- Restrições operacionais: estão relacionadas com a satisfação às duas leis de Kirchhoff, operação radial, limite do valor de tensão, etc.
- Restrições físicas: relacionadas às capacidades do sistema, como: limite de fluxo nas linhas, limite de geração de potência ativa e reativa, etc.

### 2.2.2 Fluxo de potência

O cálculo de fluxo de potência é utilizado para obter as condições de operação dos sistemas, ou seja, tensões e ângulos nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas. A modelagem da rede é feita em regime permanente, pois a variação ocorre lentamente com o tempo, podendo assim ignorar os efeitos transitórios. As barras de uma rede podem ser caracterizadas pelos seguintes elementos:

- $V_k$  : Módulo da tensão na barra  $k$ ;
- $\theta_k$  : Ângulo da tensão na barra  $k$ ;
- $P_k$  : Potência ativa líquida injetada na barra  $k$ ;
- $Q_k$  : Potência reativa líquida injetada na barra  $k$ ;

Para cada barra há duas equações:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2)$$

Em que  $k$  vai de 1 até o número de barras da rede;

- $\Omega_{Bk}$  é o conjunto de barras conectadas à barra  $k$ ;
- $V_k$  e  $V_m$  são as magnitudes das tensões complexas nas barras  $k$  e  $m$ ;
- $\theta_k$  e  $\theta_m$  são os ângulos de fase das tensões complexas nas barras  $k$  e  $m$ ;
- $P_{km}$  é o fluxo de potência ativa no ramo  $k - m$ ;
- $Q_{km}$  é o fluxo de potência reativa no ramo  $k - m$ ;
- $Q_k^{sh}$  é a potência reativa injetado pelo shunt conectado na barra  $k$ ;

As Equações (1) e (2) indicam que as potências líquidas são compostas pelo somatório dos fluxos de potência que fluem pelas barras. Os fluxos de potência ativa e reativa são dadas por Equações (3) e (4):

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m (b_{km} \cos \theta_{km} - g_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4)$$

- $g_{km}$  é a condutância entre as barras k e m;
- $b_{km}$  é a susceptância entre as barras k e m;
- $b_{km}^{sh}$  é a susceptância shunt entre as barras k e m;

As barras são classificadas de acordo com suas incógnitas, em três tipos:  $PQ$ ,  $PV$  e  $V\theta$ . No tipo  $PQ$ , os dados  $P_k$  e  $Q_k$  são conhecidos e  $V_k$  e  $\theta_k$  são informações a serem descobertas e representam barras de carga. Para o tipo de barra  $PV$ ,  $P_k$  e  $V_k$  são dados fornecidos e  $\theta_k$  e  $Q_k$  precisam ser calculados e são barras de geração. Já no tipo de barra  $V\theta$ ,  $P_k$  e  $Q_k$  devem ser calculados e  $V_k$  e  $\theta_k$  são dados conhecidos. Esse tipo de barra fornece a referência angular do sistema.

### 2.2.2.1 Método de Newton

O método de Newton é utilizado para resolver problemas com equações do tipo  $\mathbf{f}(\mathbf{x})=0$ . Este método aproxima um conjunto de equações não-lineares simultâneas, linearizando o problema de fluxo de potência por meio da expansão por série de Taylor (SCHÄFER, 2018). O método é iniciado com a estimação dos módulos ( $V$ ) e ângulos ( $\theta$ ) de tensões para as barras sem estes valores. Calculam-se os resíduos  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  para cada barra  $i$ , como nas Equações (5) e (6).

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i^{cal} \quad (5)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i^{cal} \quad (6)$$

Nas Equações (5) e (6),  $P_i^{esp}$  e  $Q_i^{esp}$  são injeções de potência ativa e reativa especificadas e  $P_i^{cal}$  e  $Q_i^{cal}$  são injeções de potência ativa e reativa calculadas para cada barra, conforme Equações (7) e (8).

$$P_i^{cal} = \sum_{i=1}^N |V_i| |V_K| \quad (7)$$

$$Q_i^{cal} = \sum_{i=1}^N |V_i| |V_K| \quad (8)$$

O próximo passo é calcular os valores da matriz Jacobiana, para resolver o problema linear dado na Equação (10). A matriz Jacobiana é definida pelas derivadas parciais de P e Q em relação às variáveis (tensões e ângulos) do sistema, como demonstrado na Equação (9). Inverte-se o Jacobiano e descobre-se  $\Delta \theta_i$  e  $\Delta V_i$  através da equação

representada na Equação (10). Todo o processo é repetido, utilizando os valores de módulos e ângulos atualizados, até que  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  sejam menores que uma tolerância  $\varepsilon$  (GRAINGER, 1994).

$$J = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (10)$$

O método de Newton-Raphson tem como algumas de suas vantagens: não é sensível à escolha da barra de referência; é confiável e rápido para a grande maioria das aplicações, por utilizar estimativas iniciais muito próximas da solução exata; e independe do número de equações do sistema em relação a quantidade de iterações necessárias para sua convergência. Por outro lado, o número de aproximações necessárias se torna maior com o aumento do sistema (SAADAT, 1999).

### 2.2.3 Perdas de potência

A operação dos sistemas com mínimas perdas aumenta a eficácia e diminui as despesas operacionais. Algumas vantagens de operar neste estado: a vida útil dos equipamentos presentes na rede e a capacidade de fornecimento aumenta; o perfil de tensão nos circuitos de alimentação é melhorado; ocorre o adiamento de reforços de condutores na rede e redução da necessidade de uso de combustíveis fósseis para geração de energia (JARDIM, 2011), (POSSAGNOLO, 2015).

Os primeiros autores a abordarem o problema de redução de perdas de sistemas de distribuição através da reconfiguração foram Merlin e Back (1975). Eles propuseram duas metodologias de resolução. A primeira consiste na abertura sequencial de chaves, de um sistema inicialmente todo malhado, através do fluxo de carga até obter um sistema radial. Posteriormente, Shirmohammadi e Hong (1989) fizeram melhorias nessa técnica, com modelagem mais adequada. A metodologia de resolução utiliza a técnica com abordagem clássica, *branch-and-bound*.

Cinvalar et al., (1988) utilizaram uma técnica baseada na permutação de ramos, *branch-exchange*, na qual as chaves eram manobradas em pares para obter um sistema radial e com menos perdas.

Baran e Wu (1989) propuseram modificações na técnica proposta por Cinvalar et al., (1988) com o emprego de duas aproximações propostas pelos autores para o cálculo do fluxo de carga utilizados para sistemas de distribuição radiais.

Nara et al. (1992) apresentaram a primeira aplicação do AG para resolver o problema de reconfiguração de sistemas, com minimização de perdas. Naquele trabalho, os cromossomos (representação do estado das chaves) foram codificados binariamente. A metodologia foi testada em dois sistemas com sucesso.

Devido a sua relevância, a minimização das Perdas Técnicas (PT) também foi considerada como função objetivo, aliado à minimização da altura total, utilizando o Algoritmo Genético Multiobjetivo NSGA-II. Esta função pode ser expressa matematicamente pela Equação (11) (LAVORATO et al., 2012):

$$\min(PT(X)) = \sum_{ij \in \Omega} x_{ij} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

s.a:

$$Ps_i - Pd_i - \sum_{j \in \Omega_{Bi}} x_{ij} P_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_{Bi} \quad (12)$$

$$Qs_i - Qd_i - \sum_{j \in \Omega_{Bi}} x_{ij} Q_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_{Bi} \quad (13)$$

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad \forall i \in \Omega_{Bi} \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_L \quad (15)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_L} x_{ij} = n - 1 \quad \forall ij \in \Omega_L \quad (16)$$

Na Equação (11), X representa a configuração do sistema,  $x_{ij}$  é o estado da chave entre as barras  $i$  e  $j$ ,  $G_{ij}$  é a condutância entre as barras  $i$  e  $j$ ,  $V$  é o vetor de tensões,  $V_i$  é a tensão na barra  $i$ ,  $\theta_{ij}$  é a diferença dos ângulos de tensão nas barras  $i$  e  $j$ . Esta função, então, é dada pelo somatório das perdas que ocorrem nas linhas ativas dos sistemas de distribuição.

Na Equação (12):

- $Ps_i$ ,  $Pd_i$ ,  $P_{ij}$  são a potência ativa fornecida pela subestação à barra  $i$ , potência ativa demandada pela barra  $i$  e potência ativa dissipada, respectivamente.  $\Omega_{Bi}$  é o conjunto das barras conectadas à barra  $i$ .

Na Equação (13):

- $Qs_i$ ,  $Qd_i$ ,  $Q_{ij}$  são a potência reativa fornecida pela subestação à barra  $i$ , potência reativa demandada pela barra  $i$  e potência reativa dissipada, respectivamente.

Na Equação (14):

- $V_i$ ,  $V_{i,\min}$  e  $V_{i,\max}$  correspondem às tensões na barra  $i$ , mínima e máxima, respectivamente.

Na Equação (15):

- $x_{ij}$  indica o estado da chave entre as barras  $i$  e  $j$ , podendo assumir o valor de 0 (zero), caso a chave esteja aberta ou valor de 1 (um), caso a chave esteja fechada.

Na Equação (16):

- Esta equação é a condição necessária, mas não suficiente para que ocorra a operação radial do sistema. Indica que o número de chaves fechadas deve ser igual à diferença entre o número de barras e 1 (um). Para que ocorra a radialidade é necessária a conexidade, ou seja, todas as cargas devem estar energizadas.

### 2.2.4 Número de chaveamentos

Nesta dissertação, objetiva-se descobrir como o planejamento visando a melhor distribuição de ramos influencia no restabelecimento de energia em caso de falta quanto ao número de chaveamentos. Considera-se o número de chaveamentos como uma das análises, pois este está relacionado com a velocidade da reconfiguração e, portanto, com os danos devido à interrupção do fornecimento de energia. Para calcular o número de manobras necessárias, foi utilizada a Equação (17) abaixo:

$$Ncha = \sum_{ij \in \Omega_L} (x_{ij} - y_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_L \quad (17)$$

Esta equação representa o somatório da diferença entre os estados das chaves da configuração corrente ( $x$ ) e a inicial ( $y$ ). Essa função também está sujeita às restrições explicadas na Seção 2.2.3 *Perdas de potência*.

## 2.3 Algoritmo Genético

O AG, inicialmente desenvolvido por Holland (1992), possui funcionamento baseado na Teoria da Evolução das espécies de Charles Darwin. Holland pretendia entender e aplicar os processos de adaptação da natureza em sistemas artificiais.

### 2.3.1 Conceitos Básicos – AG

No Algoritmo 1, pode ser observado o pseudocódigo do AG.

---

Algoritmo 1. Pseudocódigo do AG.

---

1. Gerar a população inicial  $P_0$ .
  2. Atribuir  $i = 0$ .
  3. Avaliar a população  $P_i$ .
  4. Atribuir o valor de aptidão aos indivíduos de  $P_i$ .
  5. Aplicar os operadores de seleção, cruzamento e mutação a  $P_i$  e gerar a população  $P_{i+1}$ .
  6. Atribuir  $i = i + 1$ . Se o número máximo de gerações não tiver sido alcançado, ou outro critério de parada não tiver sido satisfeito, voltar ao passo 3.
- 

As etapas do algoritmo implementado serão explicadas, mais detalhadamente, a seguir.

### 2.3.2 Geração da população

A população  $P_i$  é formada por indivíduos, também chamados de cromossomos, cadeias binárias ou cadeia de valores dinâmicos (DEB,2001). Normalmente, o conjunto de soluções é composta por cromossomos com codificação binária, ou seja, com genes com

valores 0 (zero) ou 1 (um). Os indivíduos terão suas características melhoradas a cada iteração, a fim de convergir para o melhor resultado.

### 2.3.3 Avaliação dos indivíduos

Os candidatos são avaliados, recebendo um valor que quantifique o quão são adequados ao problema. Este valor é chamado de *fitness* e varia de acordo com a função de avaliação. O *fitness* tem papel importante pois precede ao processo de seleção, no qual indivíduos melhores adaptados serão escolhidos.

### 2.3.4 Seleção

Através deste operador genético, um ou dois cromossomos são escolhidos, de acordo com o *fitness* para se reproduzirem, gerando descendentes que participarão da nova população.

A seleção poderá ocorrer por diversos métodos, os mais utilizados são: torneio, roleta e *ranking*. A sua escolha se não for adequada, influenciará a direção de busca para um ótimo local. A seguir, uma breve explicação sobre cada método.

#### **Torneio:**

As soluções participarão de competições entre dois ou mais participantes, e o que possuir o melhor *fitness* será escolhido. A quantidade de participantes ideal dependerá da aplicabilidade do AG.

#### **Roleta:**

Neste método, a probabilidade de seleção do candidato está diretamente relacionada ao *fitness*. Por isso, quanto maior o valor de avaliação do indivíduo, maior a chance deste de ser selecionado.

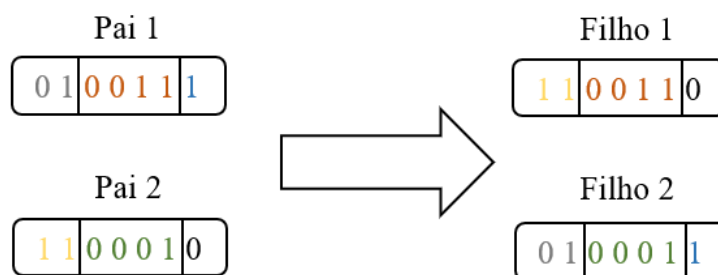
#### **Ranking:**

Os indivíduos recebem um valor de ranqueamento conforme o *fitness*. Os que possuem bons *fitness* recebem valor de ranking maior, por isso maior probabilidade de escolha.

### 2.3.5 Cruzamento

É durante o cruzamento que ocorre a troca do material genético entre os indivíduos, gerando descendentes. Nesse processo, partes cromossômicas dos pais são combinadas. Para que sejam geradas essas partes, o cromossomo pode ser dividido em um ou mais pontos. A taxa de cruzamento é utilizada para determinar a quantidade de indivíduos que serão submetidos a este operador, sendo aconselhável valores acima de 60% (GOLDBERG, 1989). Um exemplo de cruzamento pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo ilustrativo de cruzamento com indivíduos de sete bits.



Fonte: elaborada pela autora.

Neste exemplo, dois pontos aleatórios foram escolhidos para dividir os pais. As partes do Pai 1 e Pai 2 foram recombinadas, formando Filho 1 e Filho 2.

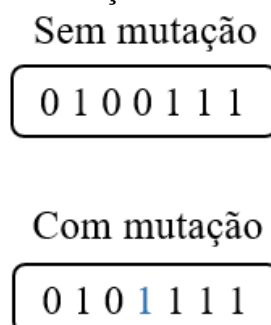
### 2.3.6 Mutação

Este operador genético realiza alteração genética em alguns candidatos, conforme uma taxa de mutação. A mutação poderá ser aplicada por indivíduo ou por gene. Trata-se de um bom artifício para manter a diversidade das soluções e evitar a convergência para ótimos locais.

Os indivíduos ou genes a sofrerem ação deste operador serão determinados de acordo com uma taxa, que pode variar, geralmente, entre 1% e 5% (YANG, 2014). Os novos indivíduos gerados comporão a nova população.

A seguir, na Figura 2, pode ser observado um exemplo da ocorrência de mutação através da troca de valores.

Figura 2 – Exemplo ilustrativo de mutação em um indivíduo de sete bits.



Fonte: elaborada pela autora.

### 2.3.7 Elitismo

Algumas soluções boas podem ser perdidas de uma geração para outra através do cruzamento e da mutação. Por isso, o elitismo é utilizado para que indivíduos com bons esquemas (estrutura sequencial de genes) sejam mantidos e ao longo das gerações a solução



possa vir a ser utilizada para gerar melhores.

### 2.3.8 Critério de parada

Alguns critérios de parada mais utilizados são: número máximo de gerações, estabilização do valor da função de avaliação, obtenção do mínimo ou máximo custo conhecido.

## 2.4 Algoritmo genético multiobjetivo

O algoritmo genético lida com problema com somente um objetivo. Porém, é comum, assim como o problema proposto neste trabalho, lidar com problemas reais com mais de um objetivo. Problemas que envolvem a minimização/maximização de mais de um objetivo, simultaneamente, podem ser resolvidos através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivos. Um problema de otimização multiobjetivo pode ser escrito da seguinte forma (DEB, 2001):

$$\text{Min ou Máx} \quad f_b(x), \quad b = \{1,2,3,4,\dots, N\}$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0, & i &= \{1,2,3,4,\dots, R_{des}\} \\ h_j(x) &\leq 0, & j &= \{1,2,3,4,\dots, R_{igual}\} \\ x_w^{\text{inf}} &\leq x_w \leq x_w^{\text{sup}}, & w &= \{1,2,3,4,\dots, N_v\} \end{aligned}$$

Na qual:

- $x$  é o vetor de variáveis de decisão de tamanho  $N_v$ .
- $b$  é a quantidade de funções objetivo do problema.
- $g_i$  e  $h_j$  são funções de restrição de desigualdade e igualdade, de tamanhos  $R_{des}$  e  $R_{igual}$  respectivamente.
- $x_w^{\text{inf}}$  e  $x_w^{\text{sup}}$  são os limites inferior e superior da variável de decisão  $x_w$ .

Para programação mono-objetivo, a comparação entre os indivíduos pode ser realizada visando somente um alvo: minimizar ou maximizar o *fitness*. Para a programação multiobjetivo, isto não é suficiente, pois um indivíduo com um bom valor para um objetivo  $f_1$ , pode ter valor ruim para um outro objetivo  $f_2$ . Para lidar com isso, na teoria da programação multiobjetivo, criou-se o conceito de dominância. Considerando dois objetivos,  $f_1$  e  $f_2$ , um indivíduo A domina um outro indivíduo B, se  $A(f_1)$  é melhor do que  $B(f_1)$  e  $A(f_2)$  é não pior do que  $B(f_2)$ . Com isso, pode-se facilmente elencar os indivíduos da população como dominados e não dominados. Sendo o conjunto dos não dominados o objetivo a ser alcançado pelos algoritmos multiobjetivos.

Algumas técnicas clássicas mono-objetivas podem ser utilizadas para lidar com

problemas multiobjetivos, como por exemplo: Método da Soma Ponderada e Método  $\varepsilon$ -Restrito. No primeiro, pesos são atribuídos a cada objetivo, formando uma só função. No outro, somente um objetivo é escolhido para ser minimizado/maximizado e os demais são considerados como restrições limitados pelo vetor  $\varepsilon$ . Essas técnicas precisam de informações adicionais, como pesos e vetores de restrições. Há técnicas meta-heurísticas que também são bastante utilizadas para resolver problemas multiobjetivos como: busca tabu, *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos Multiobjetivos.

Os Algoritmos Genéticos Multiobjetivos são bastante utilizados, pois (COELLO,2002):

- Podem trabalhar com mais de uma função simultaneamente;
- Tem boa capacidade de encontrar ótimos globais;
- Não precisam de informações extras.

O primeiro Algoritmo Genético Multiobjetivo a ser desenvolvido foi o *Vector Evaluated Genetic Algorithm* (VEGA) (SCHAFER, 1985), porém este apresentou como problema a tendência em encontrar soluções mais adaptadas somente para alguns objetivos do problema multiobjetivo. Por isso, foram desenvolvidos outros algoritmos com estratégias para garantir a diversidade e a convergência do conjunto de soluções, utilizando o conceito de dominância de Pareto, explicados mais a frente. Dentre estes podem ser citados: *Multiobjective Optimization Genetic Algorithm* – MOGA, *Niched Pareto Genetic Algorithm* – NPGA, NSGA, SPEA, *Pareto-Archived Evolution Strategy* – PAES, SPEA-II, NSGA-II.

Estes algoritmos podem ser divididos em dois tipos (DEB,2001):

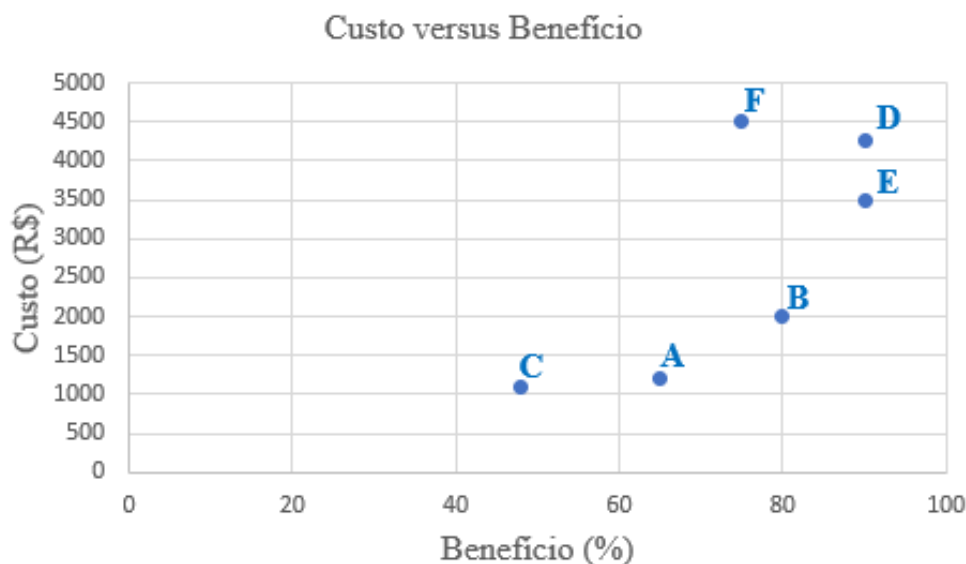
- Elitistas: Nesse tipo, os algoritmos utilizam elitismo. Exemplos: NSGA-II, SPEA, SPEAII.
- Não elitistas: Não empregam elitismo. Exemplos: NSGA, MOGA, NPGA.

#### **2.4.1 Conceitos Básicos – NSGA-II**

Problemas multiobjetivos podem envolver funções objetivo conflitantes, ou seja, a melhora do *fitness* de uma das funções implica na piora do *fitness* da outra função. Portanto, as soluções ótimas das funções não coincidem. Caso as soluções ótimas fossem iguais, a programação mono-objetivo seria suficiente para resolver o problema.

Para apresentar os conceitos essenciais no entendimento do Algoritmo Genético Multiobjetivo implementado para este trabalho, NSGA-II, é apresentado, na Figura 3, um exemplo de tomada de decisão para a compra de notebook, a partir dos critérios custo e benefício.

Figura 3 – Exemplo com possíveis soluções para a compra de notebook.



Fonte: elaborada pela autora.

Quanto maior o custo, provavelmente, mais benefício este notebook trará. O interessante é encontrar uma solução que maximize o benefício com baixo custo. Observando as 6 (seis) opções apresentadas de notebook, percebe-se que a opção F pode ser descartada, já que a opção B fornece o mesmo benefício que a opção F, porém com um custo menor. Seguindo o mesmo raciocínio, a opção D também pode ser descartada quando comparada com a opção E. Restam então as opções A, B, C e E para serem analisadas. Observa-se que todas as opções restantes são boas escolhas, já que enquanto uma fornece maior benefício, a outra apresenta menor custo e vice e versa. Na otimização multiobjetivo, quando uma solução é melhor que outra em todos objetivos, diz-se que a solução melhor domina a outra, assim, B domina F, e E domina D. Já quando uma solução é melhor que outra em um ou mais objetivos, mas não em todos, diz-se que há uma relação de não-dominância entre elas. Logo, A, B, C e E são opções não dominadas entre si.

Ao conjunto de soluções não dominadas, soluções ótimas do problema, dar-se o nome conjunto Pareto-ótimo. A fronteira Pareto-ótima é encontrada interligando-se as soluções ótimas.

Como na otimização multiobjetivo, não existe uma solução ideal em comum para as funções objetivo envolvidas no problema. Deb (2001) salienta que os algoritmos multiobjetivos devem ter duas metas:

- Obter um conjunto de soluções dominantes o mais próximo possível do conjunto Pareto ótimo, termo explicado mais a frente;
- Obter a melhor diversidade das soluções dominantes, pois a diversidade impede que alguma função seja tratada com maior privilégio em relação às outras.

A seguir, o NSGA-II será explicado por ter sido utilizado neste trabalho. Este foi escolhido pois fornece boa diversidade das soluções e bom desempenho quando aplicado a problemas de reconfiguração.

### 2.4.2 NSGA-II

Este algoritmo baseado no conceito de dominância de Pareto, foi desenvolvido por Deb (2001) e apresenta três mecanismos responsáveis por sua eficiência:

#### I. *Fast Nondominated Sorting* (FNS)

Através deste mecanismo, dois parâmetros são determinados para cada elemento  $p$ : o número de elementos que dominam  $p$ ,  $n_p$ , e o conjunto de elementos que  $p$  domina,  $S_p$ . Com a utilização desses parâmetros é possível classificar as soluções em várias fronteiras, graus de não dominância. O processo ocorre da seguinte forma:

Os parâmetros são inicializados vazios. Para cada solução  $p$ , é analisado se uma solução  $q$  a domina. Em caso afirmativo, o contador  $n_p$  é acrescido em uma unidade. Caso contrário, o conjunto  $S_p$  receberá  $q$ . Caso  $n_p = 0$ ,  $p$  então pertence a fronteira Pareto de rank=1. Em seguida, cada elemento  $q$  do conjunto  $S_p$  é visitado, decrementando  $n_q$  em uma unidade. Caso  $n_q = 0$ ,  $q$  pertence a fronteira de rank=2. Esse processo se repetirá até alocar todas as soluções em fronteiras. No Algoritmo 2, o FNS é descrito.

---

Algoritmo 2. Pseudocódigo do FNS.

---

Para cada  $p \in P$

$S_p = \phi$

$n_p = 0$

para cada  $q \in P$  (se  $p$  domina  $q$ )

se ( $p \prec q$ ) então (Adicione  $q$  ao conjunto de soluções dominadas por  $p$ )

$S_p = S_p \cup \{q\}$

Caso contrário de se ( $p \prec q$ ) então

$n_p = n_p + 1$  (Incremente o contador de dominância de  $p$ )

se ( $n_p = 0$ ) então ( $p$  pertence ao primeira fronteira)

$prank = 1$

$F1 = F1 \cup \{p\}$

$i = 1$  (Inicialize o contador de front)

enquanto  $F_i \neq \phi$

$Q = \phi$  (Usado para armazenar os membros da próxima fronteira)

para cada  $p \in F_i$

para cada  $q \in S_p$

$n_q = n_q - 1$

se ( $n_q = 0$ ) (então  $q$  pertence a próxima fronteira)

$qrnk = i + 1$

$Q = Q \cup \{q\}$

$i = i + 1$

$F_i = Q$

---

## II. Crowding Distance (CD)

O CD é utilizado para medir a densidade das soluções ao redor de cada solução. Através deste mecanismo, é possível encontrar quais indivíduos são qualificados para garantir a diversidade. O CD de um elemento é calculado medindo a distância média deste elemento e outros dois, na região das funções objetivo. As soluções com poucos vizinhos ao seu redor terão maior valor de CD e as localizadas nos extremos terão valor infinito. A seguir, no Algoritmo 3 é mostrado o procedimento para o cálculo do CD.

---

### Algoritmo 3. Pseudocódigo do CD.

---

$l = |F|$  (número de soluções pertencentes à fronteira  $F$ )

para cada  $i$ , atribua  $F_{distância}^i = 0$  (inicializa distância)

para cada objetivo  $m$

Executar  $ordenar(F, m)$  (ordenar usando cada valor de objetivo)

$f_m^{\max} = \max(ordenar(F, m))$  (máximo valor da função objetivo  $m$ )

$f_m^{\min} = \min(ordenar(F, m))$  (mínimo valor da função objetivo  $m$ )

$F_{distância}^1 = F_{distância}^l = \infty$  (para garantir que os indivíduos das extremidades sejam selecionados)

Para  $i = 2$  até  $(l-1)$  (para todos os pontos)

$$F_{distância}^i = F_{distância}^i + \frac{F_m^{(i+1)} - F_m^{(i-1)}}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}$$


---

## III. Operator Crowded Comparison ( $\prec_b$ )

Este operador é fundamental durante o processo de seleção por torneio. Dadas duas soluções  $p$  e  $q$  pertencentes a fronteiras diferentes, a com menor valor de *rank* ganha o torneio. Já se essas soluções pertencem à mesma fronteira, a vencedora do torneio será a que estiver em região de menor densidade, ou seja, com maior CD, favorecendo então a diversidade.

O NSGA-II inicia com uma população aleatória  $P_t$ , de tamanho  $M$ . Aplicando os operadores genéticos de seleção, cruzamento e mutação é gerada a população descendente  $Q_t$ , de mesmo tamanho de  $P_t$ . Essas populações são unidas em uma só, formando a população  $R_t$ , de tamanho  $2M$ .  $R_t$  é então ordenado através do FNS. A nova população  $P_{t+1}$  será composta pelas primeiras fronteiras de  $R_t$ . Caso a última fronteira a compor  $P_{t+1}$  exceda o tamanho  $M$ , os indivíduos com maior distância de aglomeração serão priorizados. A partir de  $P_{t+1}$  é criada  $Q_{t+1}$ . O procedimento será repetido até o critério de parada ser satisfeito. O Algoritmo 4 descreve o pseudocódigo do NSGA-II.

---

**Algoritmo 4. Pseudocódigo do NSGA-II.**

---

- 1 Gerar uma população inicial  $P_t$  de tamanho  $M$  e uma descendência  $Q_t$ , também de tamanho  $M$ , dessa população.
  - 2 Atribuir  $R_t = Q_t \cup P_t$ .
  - 3 Aplicar a ordenação por não-dominância a  $R_t$  identificando as fronteiras:  
 $F_i, i = 1, 2, \dots, \text{etc.}$
  - 4 Atribuir  $P_{t+1} = \emptyset$  e  $i = 1$ .
  - 5 Enquanto  $|P_{t+1}| + |F_i| < M$  faça
  - 6 Atribuir  $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$
  - 7  $i = i + 1$
  - 8 fim
  - 9 Realizar uma ordenação de  $F_i$ , que é a fronteira que não coube por completo em  $P_{t+1}$ , por distância de aglomeração.
  - 10 Inserir  $M - |P_{t+1}|$  elementos de  $F_i$  em  $P_{t+1}$ .
  - 11 Criar uma população  $Q_{t+1}$  a partir de  $P_{t+1}$  usando os operadores de seleção por Operator Crowded Comparison, recombinação e mutação. Enquanto um critério de parada não for satisfeito, voltar ao passo 2.
-

### 3 MÉTODOS PROPOSTOS

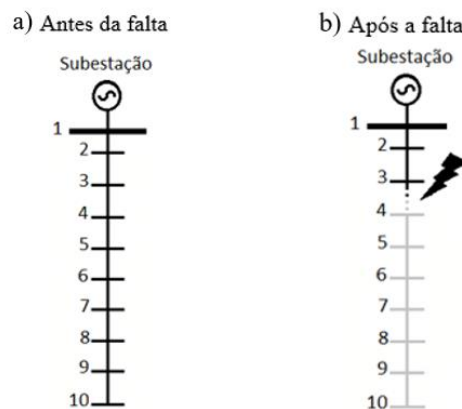
Neste capítulo é explicado o processo de ramificação aplicado aos sistemas testes e informações sobre o Algoritmo Genético e NSGA-II aplicados nesta dissertação.

#### 3.1 Ramificação

Sistemas nos quais as barras estão muito longe da subestação podem possuir elevadas perdas de potência, muito aquecimento nos condutores, perfil de tensão ruim nas últimas barras, entre outros malefícios (MARTINS, 2018). Tudo isso se deve à distância entre subestação e barra, uma vez que o sistema não possui uma boa quantidade de ramificações.

Além dos problemas relacionados ao funcionamento do sistema, é evidente que redes pouco ramificadas sofrem um impacto mais severo com a ocorrência de faltas em suas linhas, como mostra a Figura 4. Em a) Ilustração de uma subestação antes da falta. Em b) Ilustração de uma subestação depois da falta no trecho 3-4.

Figura 4 - Sistema com apenas um ramo.

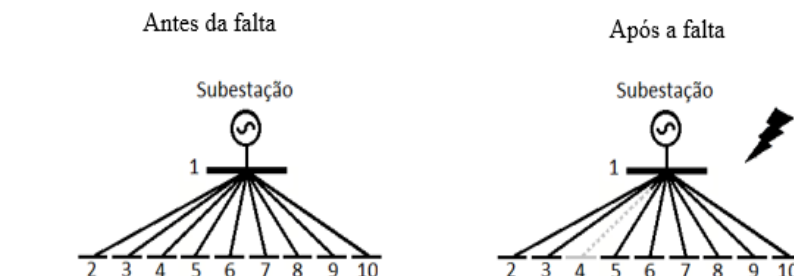


Fonte: elaborada pela autora.

Em sistemas radiais, com a queda de uma linha, todo o sistema, além do ponto de contingência, fica desenergizado. Embora a reconfiguração da rede possa reestabelecer o fornecimento de energia, esse processo leva um certo tempo para ser realizado.

A Figura 5 consiste em todos os consumidores ligados diretamente à subestação. Essa figura representa um cenário ideal, pois na ocorrência de uma falta, apenas uma única barra fica desconectada do sistema.

Figura 5 - Sistema bem ramificado.



Fonte: elaborada pela autora.

Entretanto, é um cenário inviável, visto que as redes reais não possuem essa estrutura; as redes de distribuição devem ramificar-se pela área atendida, misturando-se com a topologia da cidade (FONSECA, 2016). Seriam necessárias muitas subestações nesse formato para atender toda a demanda.

Normalmente, sistemas reais não são configurados visando a ramificação, mas como mostrado esse objetivo tem sua importância. Portanto, são necessários métodos eficientes para tornar a rede ramificada, que mantenham a radialidade, dê confiabilidade e robustez ao enfrentar contingências.

Para cálculo da ramificação, consideramos a rede de distribuição como um gráfico acíclico e não direcionado: uma árvore. Para um dado nó da árvore, sua altura é dada contando os nós descendentes da raiz até o referido nó. Por exemplo, voltando à Figura 1. a), o nó 1 tem altura 1, dado que está ligado ao nó raiz (subestação). Já o nó 2 tem altura 2, pois está ligado a um nó de altura 1 e assim sucessivamente. Diante deste contexto, o objetivo de a minimização da ramificação pode ser representado pela minimização do somatório das alturas dos nós da rede, como mostrado na Equação (18).

$$\text{Min}(A_r) = \sum_{i=1}^n Ab_i \quad (18)$$

Na Equação (18):

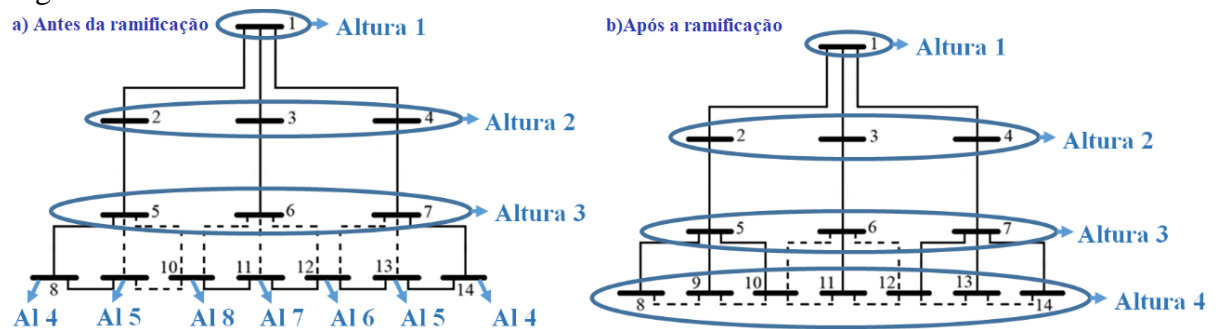
- $A_r$  é a altura total do sistema;
- $n$  é o número de barras do sistema;
- $Ab_i$  é a altura da barra  $i$ ;
- $i$  é o índice da barra, variando de 1 a  $n$ .

A minimização da altura total está sujeita às mesmas restrições da função objetivo perdas técnicas, já explicadas na Seção 2.2.3 *Perdas de potência*.

A análise feita quanto aos benefícios da ramificação compõe-se da verificação dos níveis de tensão, perda de potência e, principalmente, o número de barras desenergizadas em caso de contingência. Para este estudo, foi realizada a comparação entre os sistemas antes e depois da ramificação.

Para diminuir longos corredores, propõe-se diminuir a altura geral da rede. Para melhor entendimento, na Figura 6 é apresentado um exemplo prático da metodologia.

Figura 6 - Sistema com 14 barras.



Fonte: elaborada pela autora.

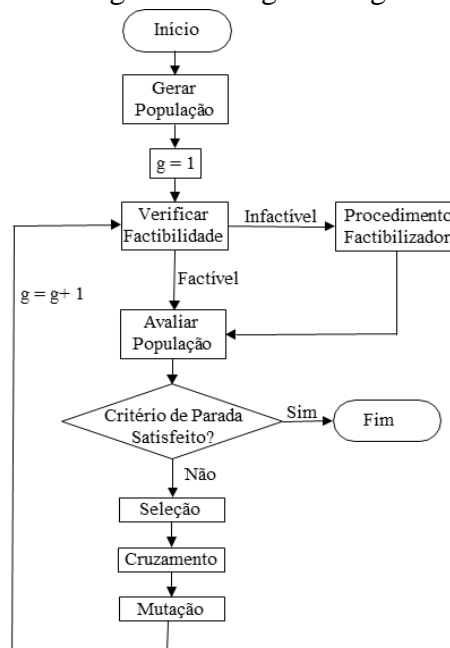


Convencionalmente, a altura da barra é a altura que essa barra se encontra partindo da subestação. Realizando o somatório da rede antes da ramificação, obtemos a altura total no valor de 55. Já no sistema após a ramificação, a altura total foi diminuída para 44. Com a redução da altura total, pode-se observar no primeiro cenário que a barra mais distante da subestação é a barra 10 e está na altura 8, pois ela é a oitava barra a partir da subestação. Já no segundo cenário, a maior altura é encontrada nas barras 8 a 14, com altura 4. Por isso o processo de ramificação, possibilitou a aproximação das barras mais distantes da rede. Uma outra análise que pode ser feita é quanto à suposição de uma falta, por exemplo entre as barras 7 e 14. Antes da ramificação, haverá uma situação em que 5 barras ficam desconectadas, enquanto para o sistema após a ramificação, somente uma barra fica desconectada. Isso demonstra como a metodologia diminui consideravelmente o impacto causado por contingências.

### 3.2 Algoritmo Genético aplicado ao problema de reconfiguração de redes de distribuição

O Algoritmo Genético foi empregado neste trabalho para obter respostas que solucionem o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica, considerando a minimização da altura da rede. Nesse algoritmo foi utilizado um procedimento factibilizador que verifica se o indivíduo é factível, ou seja, se é radial e se possui todas as barras conectadas. Quando o indivíduo não possuir essas características, o factibilizador o tornará factível. Os parâmetros adotados no AG são explicitados a seguir. Na Figura 7, pode ser observado o fluxograma do AG aplicado, para favorecer o entendimento.

Figura 7 – Fluxograma do algoritmo genético utilizado.



Fonte: elaborada pela autora.

#### 3.2.1 Geração da população:

A população foi inicializada aleatoriamente, sendo que cada gene do indivíduo representa o estado das chaves dos sistemas, 0 (zero) para chave aberta e um (1) para chave

fechada. Portanto, o tamanho do indivíduo foi indicado pela quantidade de ramos de cada sistema teste.

### 3.2.2 *Factibilizador:*

Os sistemas utilizados para análise operam com configuração radial. Por isso, antes de avaliar os cromossomos, foi realizada a factibilização, checando as restrições de radialidade e conectividade. Um algoritmo sem utilizar o procedimento factibilizador analisaria as restrições dos candidatos e caso não fossem adequados, seriam descartados. Porém, esse descarte provavelmente iria causar a exclusão de indivíduos com boas informações genéticas. Essa estratégia possibilitou melhora na convergência do algoritmo.

Para entender o factibilizador, é necessário inicialmente entender o que são grafos. Um grafo  $G(V, A)$  é uma estrutura composta por dois conjuntos finitos:  $V$  de vértices e por  $A$  de arestas. Um grafo pode ser considerado uma árvore quando é conexa e existe apenas um caminho de um vértice ao outro. Na reconfiguração de redes, as arestas são os ramos e os vértices são as barras. Como os sistemas utilizados neste trabalho possuem operação radial, é necessário garantir que as configurações estejam operando desta forma. Para isso, utilizam-se de **Algoritmos de Busca**. Estes algoritmos exploram o grafo analisando todos os vértices e arestas. Podem ser citados dois destes algoritmos: Busca em Largura e Busca em Profundidade. Na Busca em Largura, os vértices a serem percorridos são os que estão a menor distância do vértice corrente. Já na Busca em Profundidade, todos os vértices são explorados partindo do vértice raiz, seguindo a sequência mais profunda possível (BILÉSIMO, 2013).

O factibilizador implementado baseou-se na Busca em Profundidade para encontrar ciclos e verificar se há vértices sem conexão com a árvore. A seguir, no Algoritmo 5, o pseudocódigo do procedimento pra factibilizar os indivíduos.

---

#### Algoritmo 5. Pseudocódigo do procedimento de factibilização

---

*Identificar a barra de referência, torná-la o nó corrente e marcar como visitada*

***Enquanto (Existir barras não visitadas) Faça***

*Verificar as barras adjacentes ao nó corrente*

***Se (Há barras adjacente)***

*Visitar a próxima barra e marcar como visitada*

***Se (Próxima barra já tiver sido visitada)***

*Ciclo detectado*

*Desfazer uma ligação aleatória do ciclo*

*Tornar a barra visitada antes do ciclo o nó corrente*

***Fim***

***Senão***

*Volte para o nó anterior*

***Fim***

***Se (Não há mais ciclos) e (Ainda há barras não visitadas)***

*Ilhamento detectado*

*Ligar a uma barra aleatória*

***Fim***

***Fim***

---

O factibilizador varre a rede verificando as barras conectadas. Procura por ciclo e, caso encontre algum, o desfaz desligando uma linha do ciclo selecionada aleatoriamente. Caso não haja ciclos, ocorre a procura por ilhamentos. Desfeito o ilhamento, o factibilizador verifica se todas as barras conectadas foram visitadas, checando assim a radialidade.

### **3.2.3 *Fitness:***

O cálculo do *fitness*, quando aplicado ao problema em questão, considera o indivíduo mais adaptado como sendo o que proporciona o menor somatório das alturas das barras da rede, considerando as restrições físicas e operacionais do sistema.

### **3.2.4 *Seleção:***

Foi utilizado como método de seleção o torneio, com participação de 4 indivíduos. O tamanho do torneio foi definido após testes empíricos, para evitar a convergência prematura para um ótimo local. Esse método de seleção foi escolhido pois é mais simples de ser implementado, e não há necessidade de realizar ranqueamento das soluções ou escalonamento das avaliações (BENTO e KAGAN, 2008).

### **3.2.5 *Cruzamento:***

O cruzamento foi realizado escolhendo um ponto de corte aleatório de cada pai, para gerar os filhos. A taxa de cruzamento utilizada para cada sistema foi de 80%. Esta taxa foi escolhida pois, após vários testes, foi a que possibilitou menor tempo de convergência.

### **3.2.6 *Mutação:***

Foi utilizada taxa de mutação de 2% para a implementação do Algoritmo Genético. Desta forma o algoritmo apresentou boa capacidade em encontrar o mínimo global. Essa taxa foi obtida empiricamente, analisando o tempo de convergência.

### **3.2.7 *Critério de parada:***

Como critério de parada foi utilizado o número máximo de gerações. Este foi escolhido conforme o tamanho do sistema. Para o sistema de 16 barras foram utilizadas 50 gerações, 100 para o de 33 barras, 200 para o de 84 e, 300 para o de 136, respectivamente.

### 3.2.8 Elitismo:

Não foi utilizado elitismo pois sem elitismo o algoritmo já apresentou bons resultados. Resumidamente, os parâmetros do algoritmo implementado para minimização da altura total podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do AG implementado para minimização da altura total.

Algoritmo Genético	16 barras	33 barras	84 barras	136 barras
População	50	100	200	200
Gerações	50	100	200	300
Taxa de cruzamento	80%	80%	80%	80%
Taxa de mutação	2%	2%	2%	2%

Fonte: elaborada pela autora.

### 3.3 Aplicação do NSGA-II ao problema de reconfiguração de redes de distribuição

O algoritmo NSGA-II foi empregado neste trabalho para obter respostas que solucionem o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica, considerando ao mesmo tempo a minimização da altura e das perdas elétricas dos sistemas. O procedimento utilizado é descrito nas etapas a seguir.

**Etapa 1:** Primeiramente os parâmetros de entrada são inicializados: tamanho da população  $M$ , taxa de cruzamento, de mutação e critério de parada.

**Etapa 2:** A população  $P_t$  é inicializada aleatoriamente, com os valores dos genes sendo 0 (chave aberta) ou 1 (chave fechada).

**Etapa 3:** Então é realizada a factibilização dos candidatos e a avaliação dos mesmos para cada um dos objetivos considerados.

**Etapa 4:** À população  $P_t$  são aplicados os mecanismos FNS e CD.

**Etapa 5:** A população  $Q$ , do mesmo tamanho de  $P_t$ , é criada a partir da *população factibilizada*, utilizando os operadores genéticos: cruzamento e mutação.

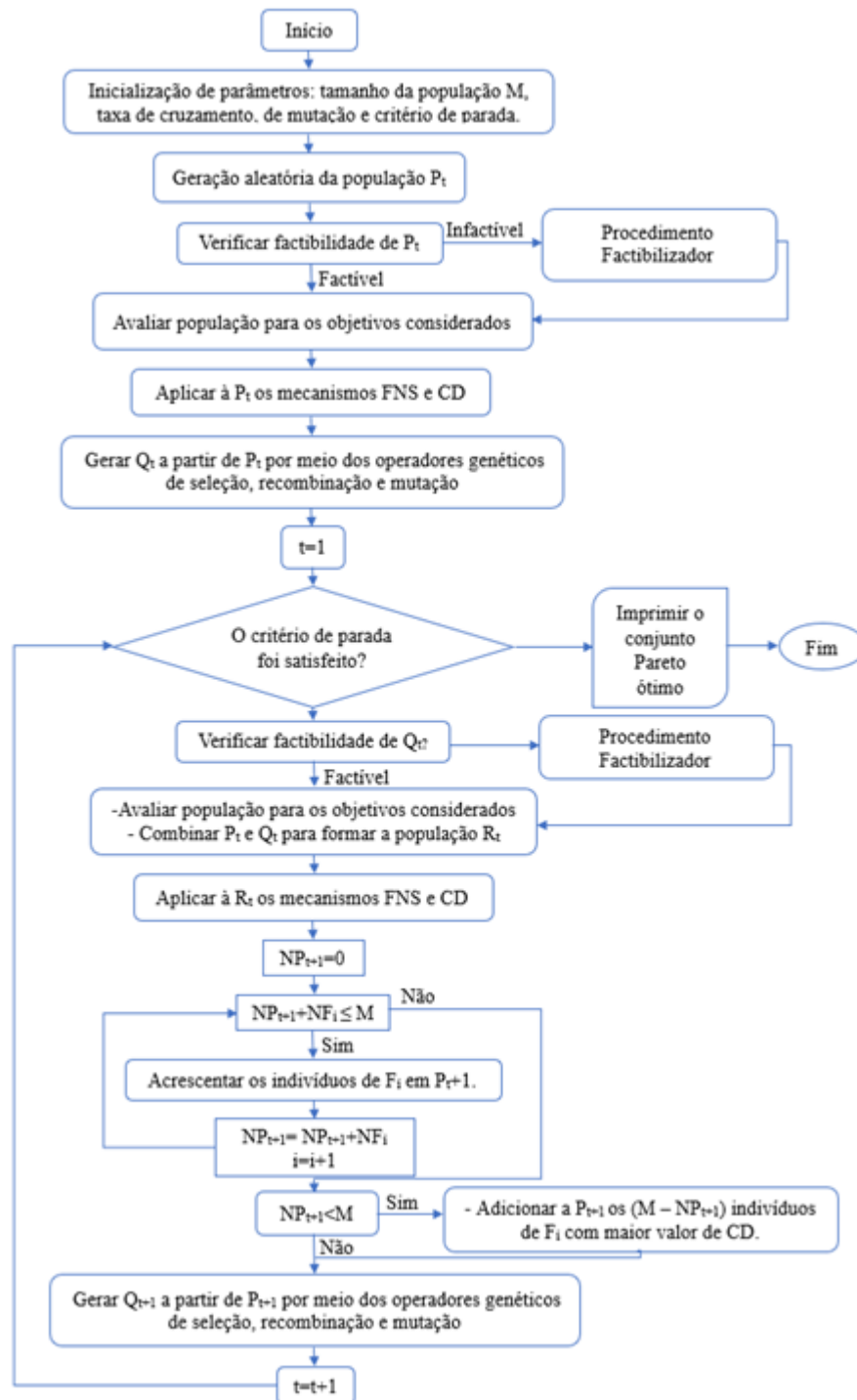
**Etapa 6:** Nesta etapa, é iniciado o ciclo que tem como critério de parada o número de gerações. As populações  $P_t$  e  $Q_t$  foram combinadas, formando assim a população  $R$  de tamanho  $2M$ . Os candidatos da população  $R_t$  foram factibilizados.

**Etapa 7:** Muitos indivíduos estavam se repetindo, por isso foi utilizado como estratégia uma mutação forçada nestes até que todos os indivíduos da geração fossem diferentes.

**Etapa 8:** O algoritmo *Fast Non Dominated Sorting* foi aplicado à  $R_t$  para que esta seja ordenada e classificada em fronteiras de Pareto. As primeiras fronteiras são atribuídas a nova população  $P_{t+1}$  até que atinja o tamanho  $M$ . À  $R_t$  também foi aplicado um algoritmo de ordenação por distância de aglomeração CD, pois possivelmente a última fronteira a ser atribuída à nova população, não caberá por completo. Este algoritmo faz com que indivíduos com menos soluções próximas sejam escolhidos para próxima geração.

Ao final da execução deste algoritmo, no conjunto Pareto-ótimo, estará as soluções não dominadas que são eficientes para a reconfiguração de redes de distribuição. Na Figura 8, pode ser observado o fluxograma do NSGA-II aplicado ao problema.

Figura 8- Fluxograma do NSGA-II aplicado ao problema.



Fonte: adaptado de (MACIEL, 2012).

## 4 TESTES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados dos testes realizados utilizando o Algoritmo Genético e *Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II* (NSGA-II) para os sistemas de 16, 33, 84 e 136 barras. O AG e o NSGA-II, foram implementados utilizando o software Matlab® 2015. As simulações foram executadas utilizando um computador com processador Intel Core™ i7 de 2.7GHz e 8GB de memória RAM; sistema operacional Windows 10. Para atestar e examinar o processo proposto, foram realizados testes em 4 sistemas: 16, 33, 84 e 136 barras, todos operando com potência base de 100 MVA. Os dados desses sistemas, como resistências e reatâncias das linhas, potências ativas e reativas das barras, podem ser encontrados no ANEXO A. Para obtenção do perfil de tensão e valores de perda de potência, foi utilizada a biblioteca MATPOWER (ZIMMERMAN, 2011).

### 4.1 Resultados – AG

Para encontrar a solução que minimize a altura total de rede, foi utilizado o Algoritmo Genético. Não foi encontrado na literatura um trabalho visando a ramificação para ser usado como base de comparação da metodologia proposta. Então, como forma de validar o desempenho do algoritmo implementado, antes de usá-lo com o objetivo de ramificar, este foi utilizado para minimização de perda e comparado com pesquisas bem difundidas no meio acadêmico. Os resultados encontrados pelo algoritmo, relacionados com a perda dos sistemas testes utilizados, são mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Comparação de perda de potência – sistemas de 16, 33 e 84 barras.

Sistemas	Configuração	Chaves Abertas	Perdas (kW)
16 barras	Inicial	14, 15, 16	511,44
	Metodologia Proposta (CARREÑO et al. 2007)	7, 8, 16	466,13
		7, ,8,16	466,10
33 barras	Inicial	33, 34, 35, 36, 37	202,67
	Metodologia Proposta (MANTOVANI <i>et al.</i> , 2000)	7, 9, 14, 32 e 37	139,55
		7, 9, 14, 32 e 37	139,55
84 barras	Inicial	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96	531,99
	Metodologia Proposta (WANG e CHENG, 2008)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92	469,88
		7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92	469,88

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 3 - Comparação de perda de potência – sistema 136 barras.

Sistemas	Configuração	Chaves Abertas	Perdas (kW)
136 barras	Inicial	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156	320,39
	Metodologia Proposta	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141,142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155	280,21
	(CARREÑO et al. 2008)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141,142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155	280,16

Fonte: elaborada pela autora.

Como visto, o AG foi validado, encontrando as melhores topologias que minimizam as perdas ativas para os sistemas testados. Observa-se que os valores de perda obtidos na metodologia proposta são diferentes, para alguns sistemas, em comparação com os valores obtidos pelos outros autores. Essa diferença existe devido ao fluxo de potência utilizado, que nesse trabalho foi o de método de Newton. Os parâmetros do algoritmo implementado para minimização de perdas técnicas podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do AG implementado para minimização de perdas.

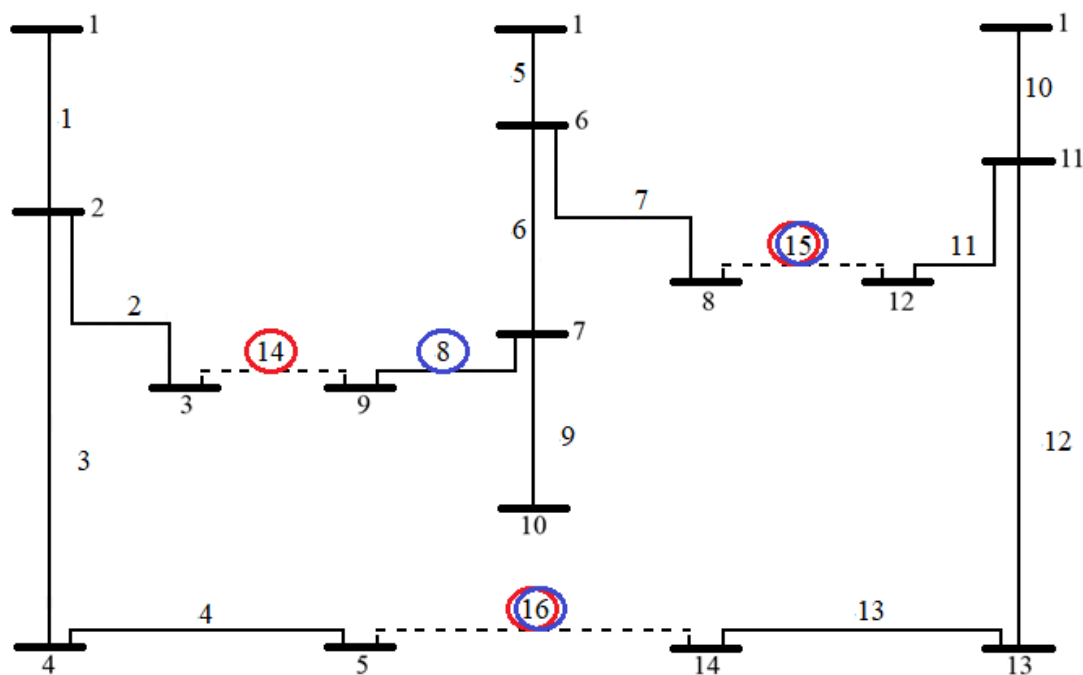
Algoritmo Genético	16 barras	33 barras	84 barras	136 barras
População	50	70	100	100
Gerações	100	150	200	300
Taxa de cruzamento	80%	80%	80%	80%
Taxa de mutação	2%	2%	2%	2%

Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.1.1 Sistema de 16 barras

O primeiro sistema teste possui originalmente 16 barras, 3 subestações, 13 chaves fechadas e 3 abertas, opera com tensão de 23 kV (CINVALAR *et al.*, 1988). Para a aplicação proposta, este sistema, como mostrado na Figura 9, foi utilizado com 14 barras, já que as barras das subestações podem ser modeladas como uma só. Em vermelho, as chaves que estão abertas na configuração padrão, e em azul, as chaves que estão abertas na configuração proposta.

Figura 9 - Sistema de 16 barras.



n

Fonte: Adaptado de Cinvalar et al. (1988).

Na Tabela 5, são mostradas a configuração padrão, a solução encontrada a configuração de mínimas perdas, as respectivas perdas, número total de consumidores desconectados e o valor total de carga, supondo todas as possíveis faltas, a média de consumidores e de cargas desconectados.

Tabela 5 - Resultados encontrados para o sistema de 16 barras.

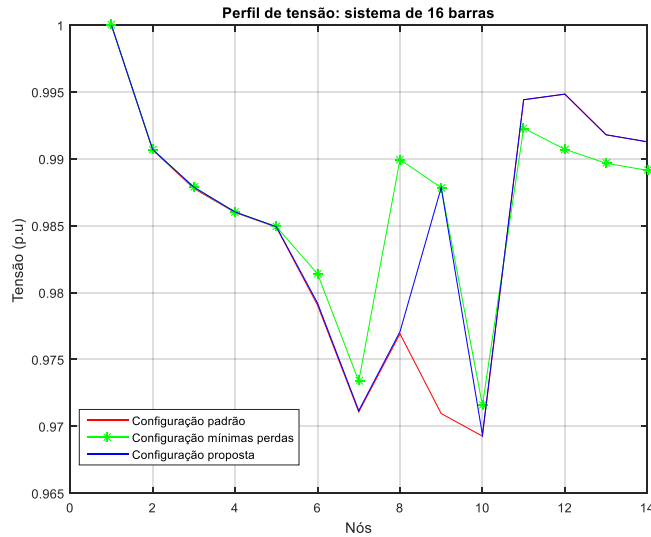
Configuração	Padrão	Proposta	Mínimas perdas
Chaves Abertas	14, 15, 16	8, 15, 16	7, 8, 16
Altura total	41	41	42
Perdas (kW)	511,44	493,15	466,13
Desenergizados	27	27	28
Média de desenergizados	2	2	2
Cargas (kW)	59100	59100	60100
Média de cargas (kW)	4546	4546	4623

Fonte: elaborada pela autora.

Com a configuração padrão já era possível encontrar a mínima altura, porém o algoritmo encontrou outra solução que proporciona menor perda ao sistema, redução de 3,58%, e possui a mesma quantidade de consumidores desconectados supondo todas as faltas, média de desenergizados e média de cargas. Já a configuração que fornece a mínima perda para este sistema, possui altura total, número de desconectados, valor total de carga e média de cargas maiores. Abaixo, na Figura 10 são mostrados os perfis de tensão do sistema antes (em vermelho), com mínimas perdas (em verde) e depois (em azul) da reconfiguração.



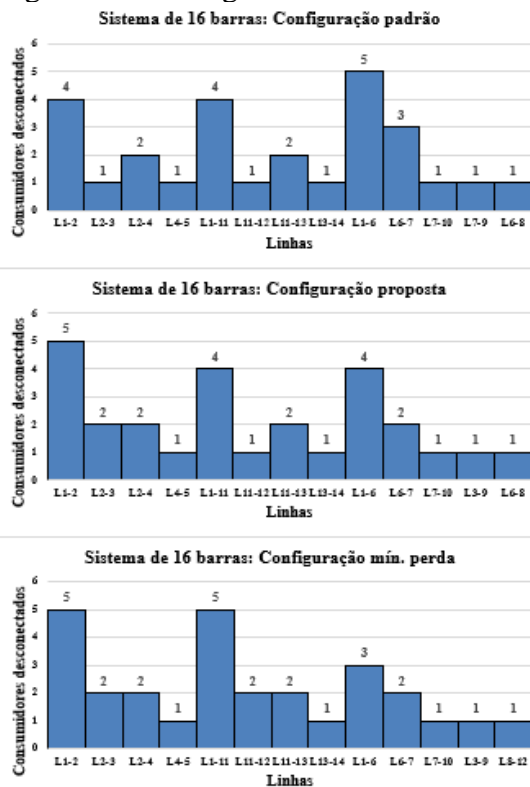
Figura 10 - Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 16 barras.



Fonte: elaborada pela autora.

Percebe-se que os níveis de tensão foram semelhantes para as configurações padrão e proposta, porém a configuração proposta obteve melhor tensão na barra 9. A topologia com menor perda é melhor, quanto ao nível de tensão, ou igual para as barras anteriores à 10, mas a partir da barra 11, a topologia proposta a supera. A mínima tensão (0,965) comparando as três configurações ocorreu na barra 10 das configurações padrão e proposta. Na Figura 11, pode ser observado o histograma do sistema de 16 barras, mostrando a relação entre o número de consumidores desconectados, devido à interrupção de cada linha do sistema padrão, da metodologia proposta e de mínimas perdas.

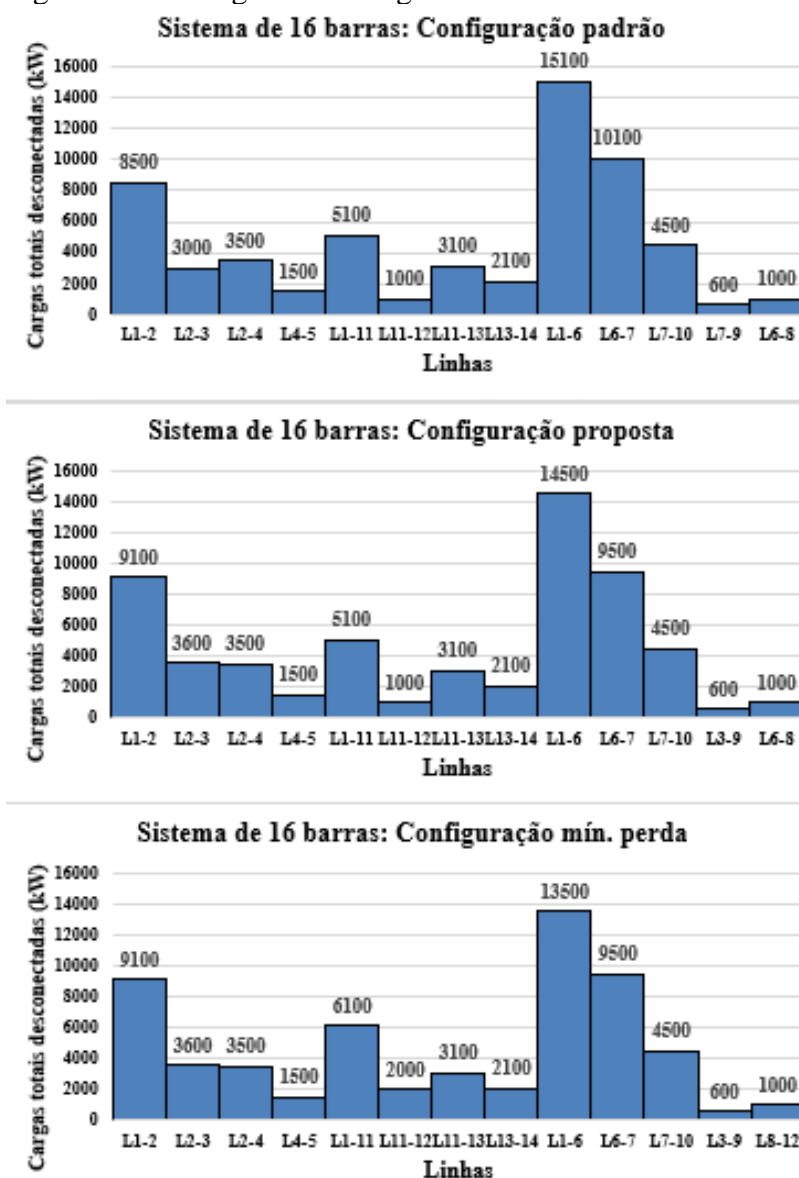
Figura 11 – Histograma de faltas do sistema de 16 barras.



Fonte: elaborada pela autora.

Para este sistema, não percebe-se diferença nos histogramas de faltas das configurações padrão e proposta, já que o número total de barras desconectadas é o mesmo. Entretanto, detecta-se que na configuração de mínimas perdas há ramos com mais barras sem energia, nas linhas L1-11 e L11-12. A maior quantidade de consumidores desconectados (5) ocorreu na L1-2 nas topologias proposta e de mínimas perdas. Na Figura 12, pode ser observado o histograma do sistema de 16 barras, mostrando a relação entre os valores de cargas desconectadas devido à interrupção de cada linha do sistema padrão, da metodologia proposta e de mínimas perdas.

Figura 12 – Histograma de cargas do sistema de 16 barras.



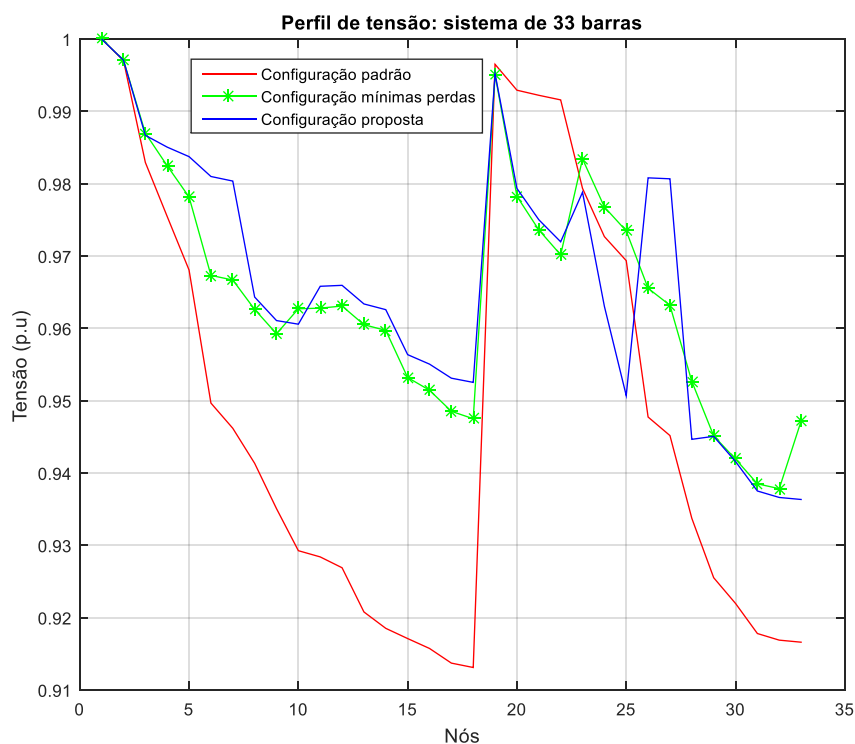
Fonte: elaborada pela autora.

Quanto aos histogramas de cargas, nota-se que nas linhas L1-11 e L11-12 há maior valor de carga desenergizada na configuração de perdas mínimas, enquanto nas demais configurações as cargas estão apenas com distribuições diferentes, mas com a mesma quantidade no total. O maior valor de carga desconectado (15100) ocorreu na L1-6 da configuração padrão.



O AG foi capaz de encontrar topologia que reduz em até 28% o valor das perdas ativas e em 26,67% o número total de consumidores desconectados em relação à configuração padrão. A altura total, o número de consumidores e de cargas desenergizados e a média de cargas das configurações com mínimas perdas e padrão são maiores do que os da proposta. A seguir, na Figura 14 é mostrado os perfis de tensão do sistema antes e depois da reconfiguração.

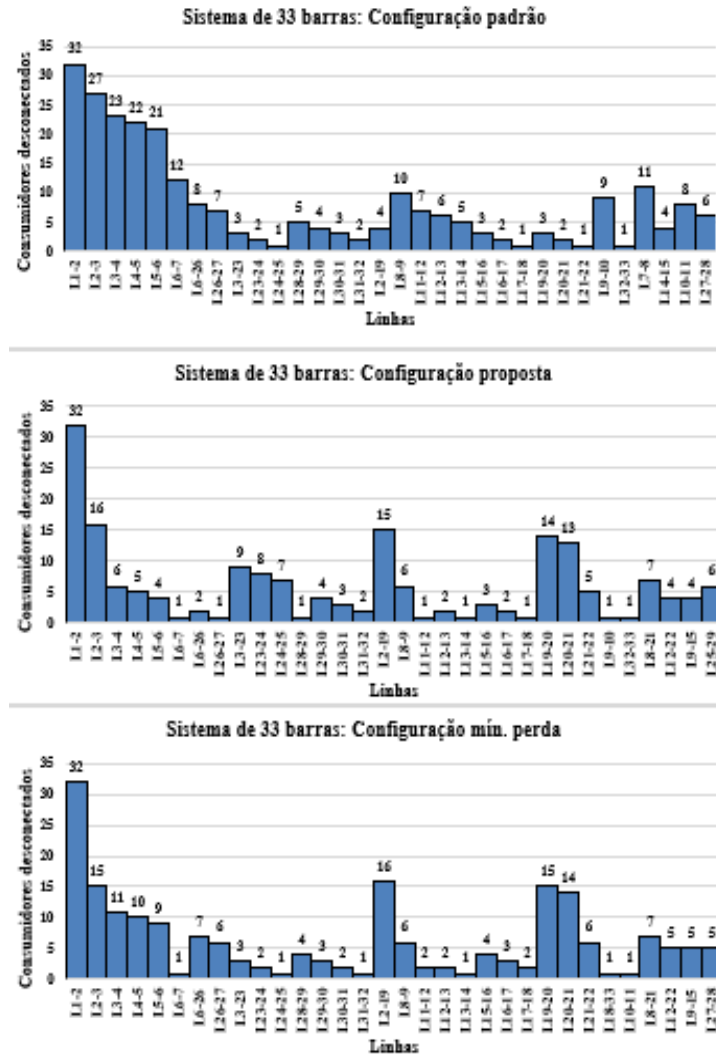
Figura 14 - Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 33 barras.



Fonte: elaborada pela autora.

A tensão de menor valor na topologia padrão é de 0,9131, enquanto na solução foi 0,9363 e na de perdas mínimas foi 0,9378. A mínima tensão (0,9131), comparando as três configurações, ocorreu na barra 18 da configuração padrão. Em 84,85% das barras, o nível de tensão da solução foi maior do que o do padrão, e em 60,61% das barras, foi maior do que a de perdas mínimas. Pode ser observado o histograma do sistema de 33 barras, na Figura 15, mostrando a relação entre o número de consumidores desconectados, devido à interrupção de cada linha do sistema padrão e da metodologia proposta.

Figura 15 – Histograma de faltas do sistema de 33 barras.

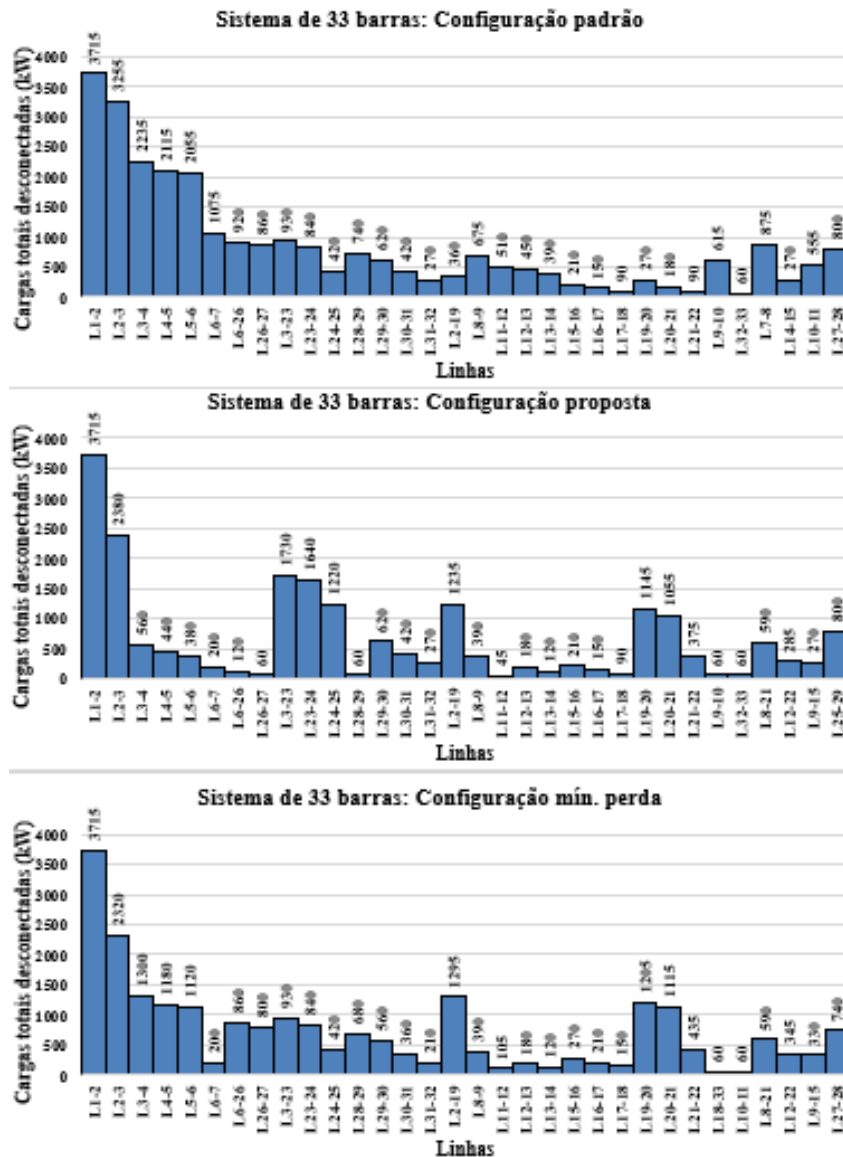


Fonte: elaborada pela autora.

Analisando o histograma de faltas para este sistema, nota-se que da linha L2-3 a L26-27, por exemplo, ocorre grande redução do número de consumidores sem energia na topologia proposta comparado às topologias padrão e de mínimas perdas. Porém, nas linhas L3-23, L23-24 e L24-25 da topologia proposta o número de barras desconectadas é maior. A maior quantidade de consumidores desconectados (32) ocorreu na L1-2 das três configurações. Em vista disso, um outro estudo, baseado em estatísticas de ocorrência de faltas em cada ramo, pode ser realizado para saber qual configuração melhor se adéqua ao problema de planejamento. Para saber a configuração que possibilita a menor quantidade de consumidores desconectados em um intervalo de tempo, o cálculo da função *fitness* pode ser a média de consumidores desconectados, considerando a média da ocorrência de faltas. Neste trabalho, este cálculo foi realizado para demonstrar o que e como pode ser feito através desses histogramas. Feito o estudo para esse sistema, a topologia proposta mostrou-se ser a mais adequada para o problema, porém, a escolha da solução para esta dissertação não foi feita dessa forma. Mais detalhes sobre esta análise encontram-se no APÊNDICE A.

Na Figura 16, pode ser observado o histograma do sistema de 33 barras, mostrando a relação entre os valores de cargas desconectados devido à interrupção de cada linha do sistema padrão, da metodologia proposta e de mínimas perdas.

Figura 16 – Histograma de cargas do sistema de 33 barras.



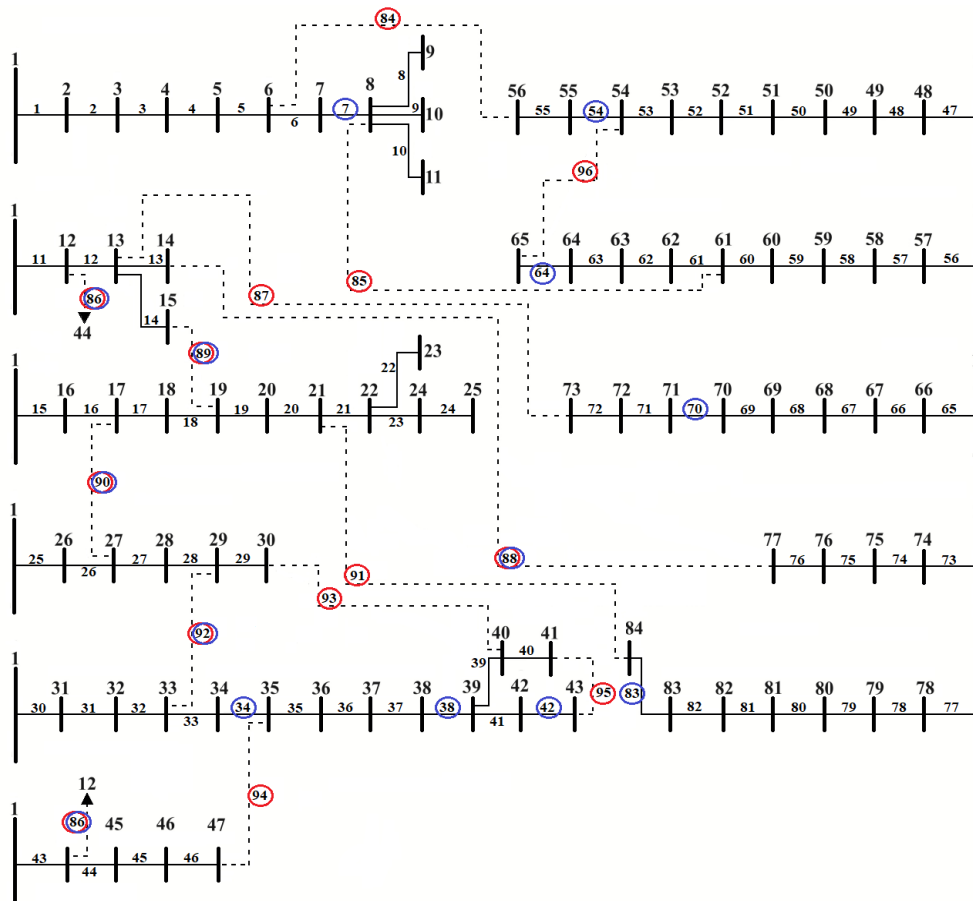
Fonte: elaborada pela autora.

Comparando os histogramas de cargas, para a maioria dos ramos da configuração proposta, o valor de carga desconectado é menor, como por exemplo, da terceira à oitava linha. A maior quantidade de carga desconectada (3715) ocorreu na L1-2 das três configurações.

#### 4.1.3 Sistema de 84 barras

No terceiro sistema teste há 84 barras, 96 circuitos de interconexão, sendo 13 abertos e 83 fechados e pode ser observado na Figura 17. Em vermelho, as chaves que estão abertas na configuração padrão, e em azul, as chaves que estão abertas na configuração proposta. Este sistema tem como tensão base 11,4 kV (CHIOU, 2005).

Figura 17 - Sistema de 84 barras.



Fonte: Adaptado de Chiou et al. (2005).

Na Tabela 7, são mostradas a configuração padrão, a solução encontrada a configuração de mínimas perdas, as respectivas perdas, número total de consumidores desconectados e o valor total de carga, supondo todas as possíveis faltas, a média de consumidores e de cargas desconectados.

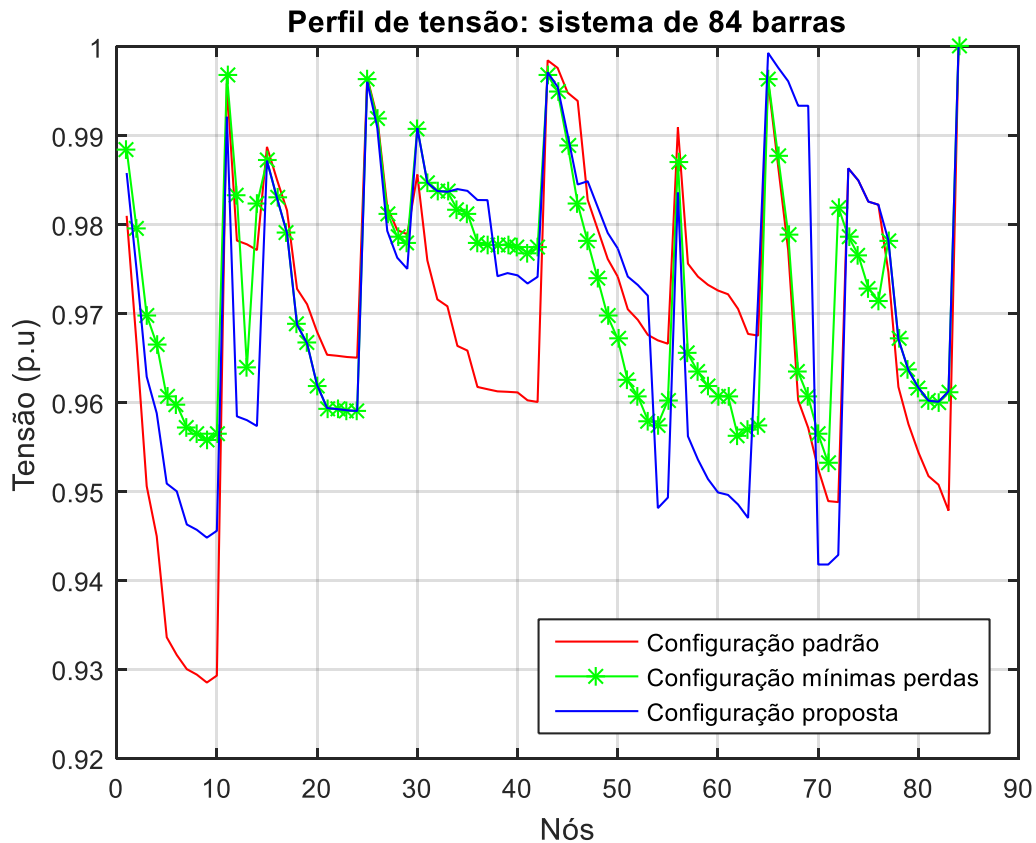
Tabela 7 - Resultados encontrados para o sistema de 84 barras.

Configuração	Padrão	Proposta	Mínimas perdas
Chaves Abertas	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96	7, 34, 38, 42, 54, 64, 70, 83, 86, 88, 89, 90, 92	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92
Altura total	474	441	456
Perdas (kW)	531,99	546,6	469,88
Desenergizados	390	357	372
Média de desenergizados	5	4	4
Cargas (kW)	52802	49671	52121
Média de cargas	636	598	628

Fonte: elaborada pela autora.

A resposta encontrada pelo AG aumentou em apenas 2,67% as perdas, e diminuiu em 6,39% o número total de consumidores desconectados supondo todas as possíveis faltas, em relação a configuração padrão. Além disso, fornece o menor valor de carga desconectada e de média de cargas. A altura total e o número de barras desenergizadas são maiores nas configurações padrão e de mínimas perdas. Abaixo, na Figura 18, é mostrado os perfis de tensão do sistema antes e depois da reconfiguração.

Figura 18 - Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 84 barras.

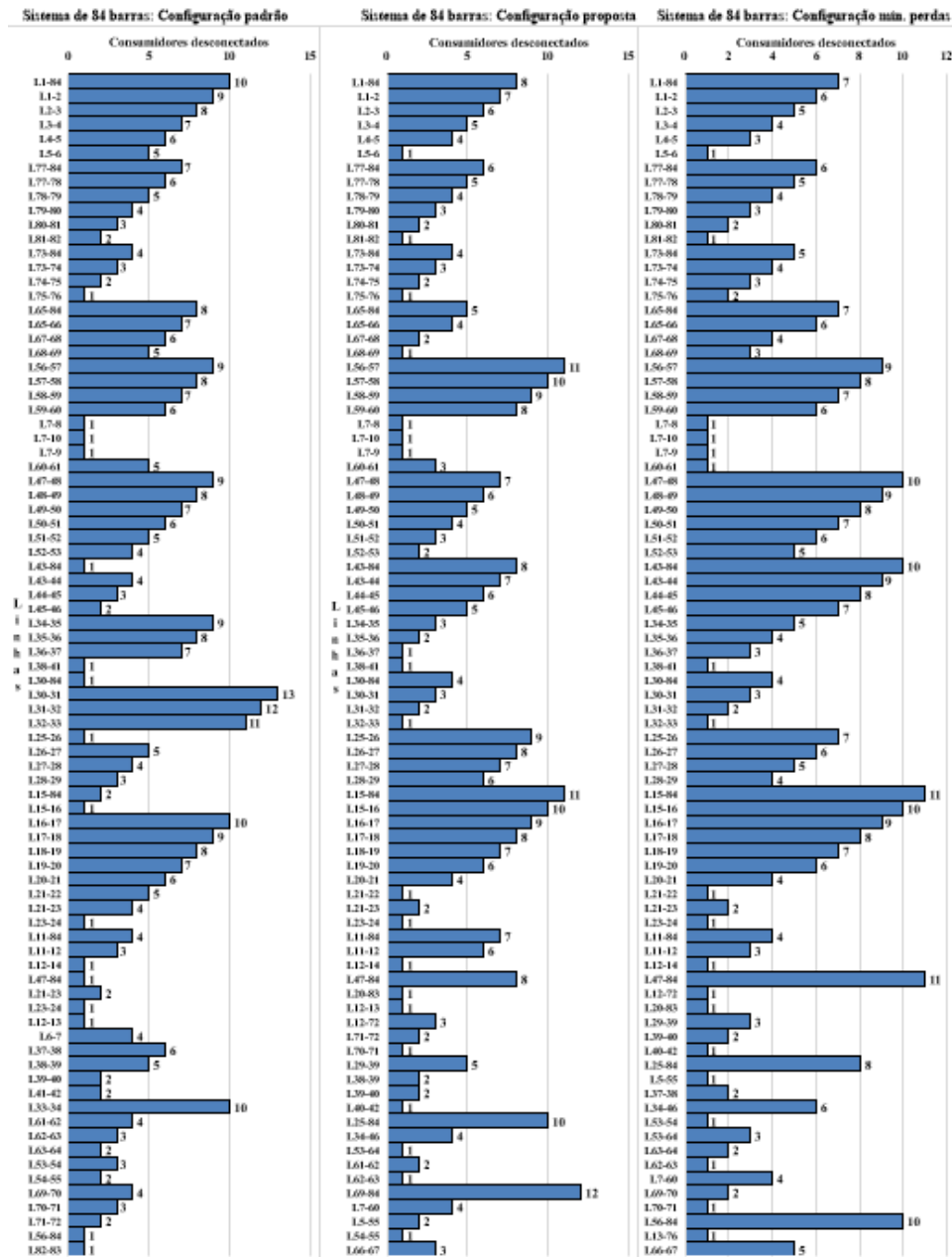


Fonte: elaborada pela autora.

Para este sistema, 51,2% das barras da solução tiveram nível de tensão melhor que as da configuração padrão, sendo o valor mínimo 0,9418 na primeira, 0,9285 na última e 0,9557. A mínima tensão (0,9285), comparando as três configurações, ocorreu na barra 9 da configuração padrão. Somente em 29,76% das barras da solução proposta, os valores de tensão foram melhores do que as da topologia de mínima perda. Na Figura 19, pode-se observar o histograma do sistema de 84 barras, mostrando a relação entre o número de consumidores desconectados devido à interrupção de cada linha do sistema padrão e da metodologia proposta.



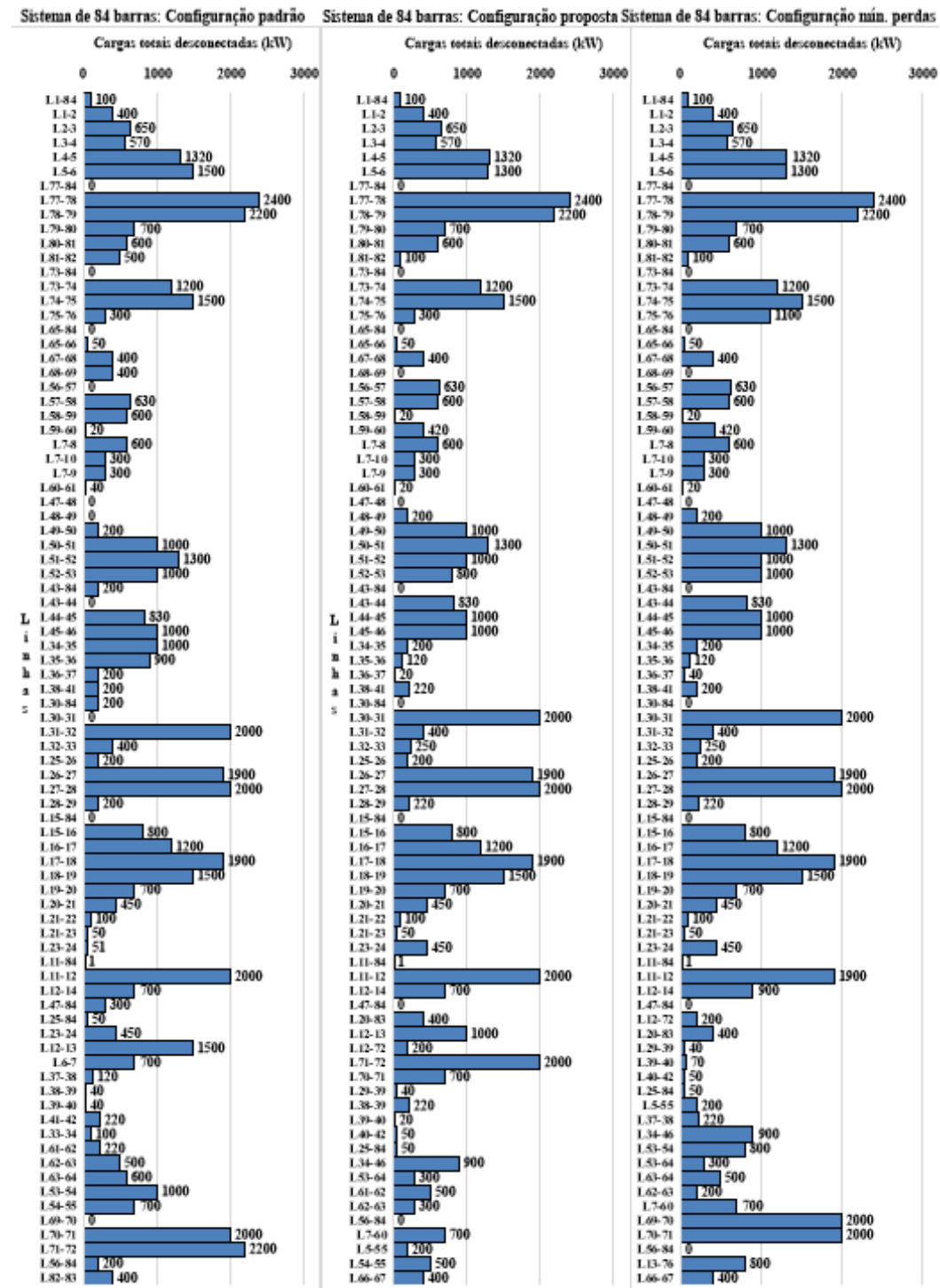
Figura 19 – Histograma de faltas do sistema de 84 barras.



Fonte: elaborado pela autora.

Entre os histogramas das três topologias, é perceptível a desvantagem da configuração padrão quanto ao número de barras desconectadas. Comparando as topologias proposta e de perdas mínimas, nota-se que entre os ramos L47-48 e L36-37, na topologia proposta a menor quantidade de consumidores desenergizados. A maior quantidade de consumidores desconectados (13) ocorreu na L30-31 da topologia padrão. Na Figura 20, pode ser observado o histograma do sistema de 84 barras, mostrando a relação entre os valores de cargas desconectados devido à interrupção de cada linha do sistema padrão, da metodologia proposta e de mínimas perdas.

Figura 20 – Histograma de cargas do sistema de 84 barras.



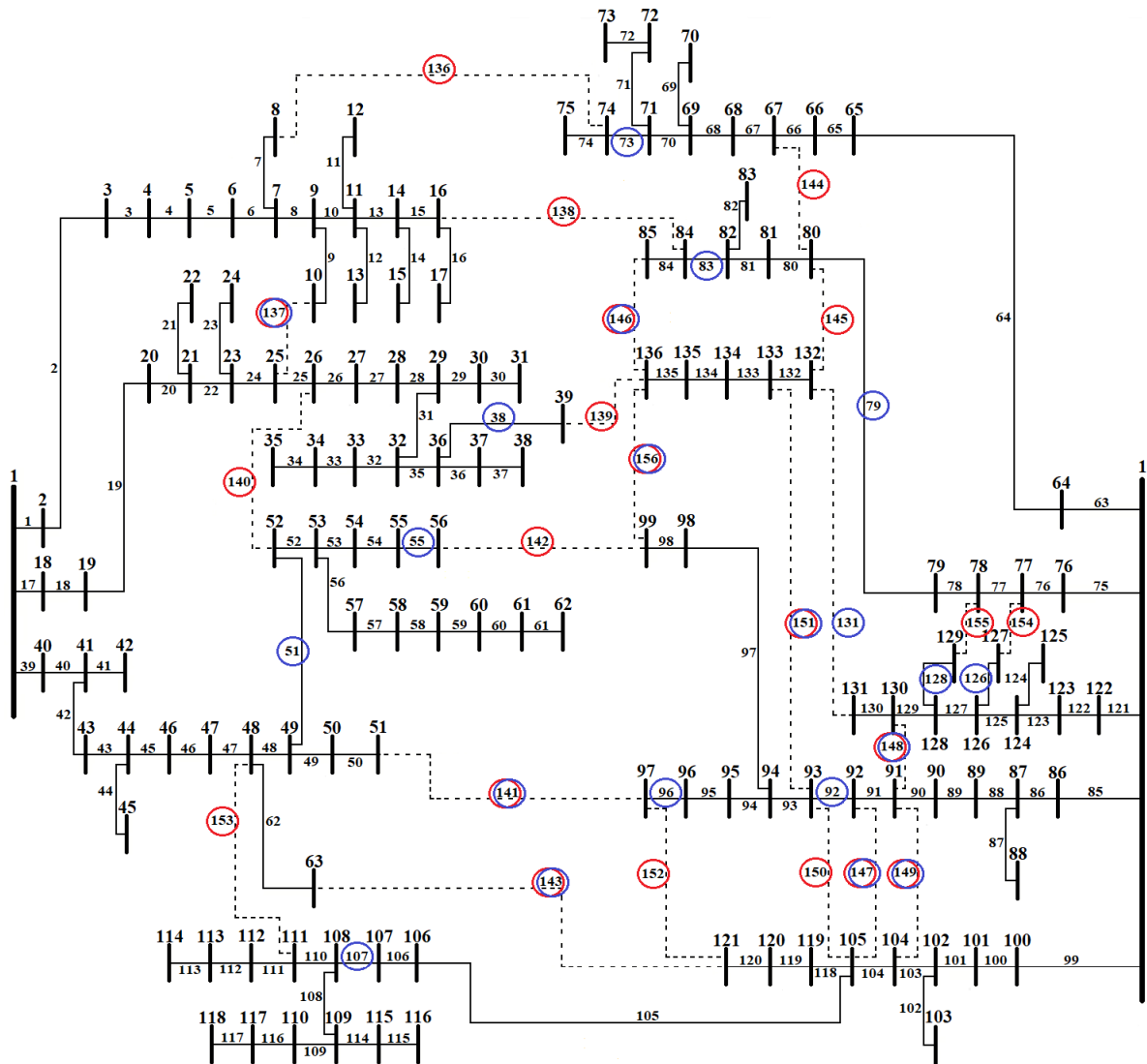
Fonte: elaborado pela autora.

Para este sistema, a configuração proposta possui vantagem sobre as outras duas. Porém, quanto a quantidade de cargas desenergizadas, somente nas últimas barras a proposta é melhor do que a de perdas mínimas. Na L77-78 das três configurações houve a maior quantidade de carga desenergizada (2400).

#### 4.1.4 Sistema de 136 barras

Este sistema é real, localizado no Mato Grosso do Sul, Brasil. Possui as seguintes características: 136 barras, 156 ramos, opera com tensão base 13,8 kV e possui 21 chaves abertas e 135 fechadas e pode ser observado na Figura 21 (MANTOVANI, 2000).

Figura 21 - Sistema de 136 barras.



Fonte: Adaptado de Mantovani et al. (2000).

Na Tabela 8, são mostradas a configuração padrão, a solução encontrada a configuração de mínimas perdas, as respectivas perdas, número total de consumidores desconectados e o valor total de carga, supondo todas as possíveis faltas, a média de consumidores e de cargas desconectados.

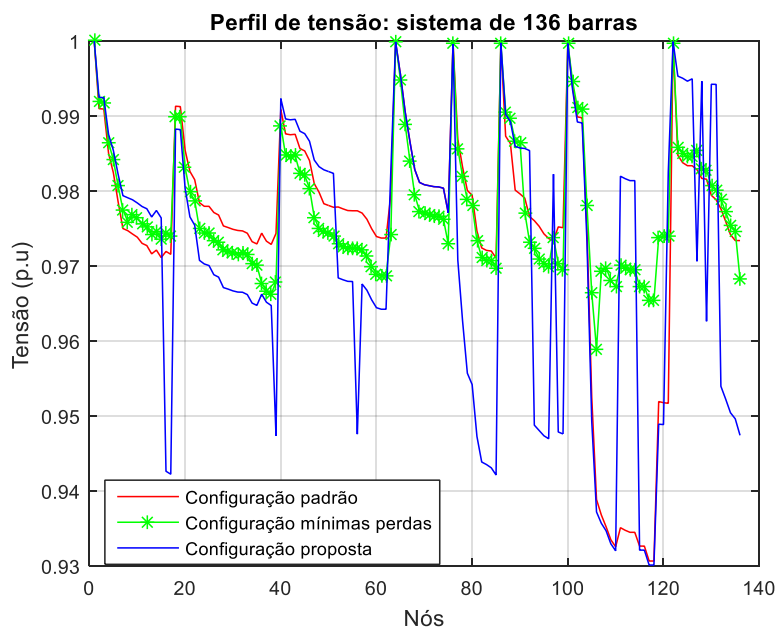
Tabela 8 - Resultados encontrados para o sistema de 136 barras

Configuração	Padrão	Proposta	Mínimas perdas
Chaves Abertas	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156	15, 38, 51, 55, 92, 96, 110, 120, 126, 128, 131, 135, 136, 137, 141, 144, 146, 147, 148, 149, 151	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155
Altura total	1112	1071	1116
Perdas (kW)	320,39	370,97	280,21
Desenergizados	976	935	980
Média de desenergizados	7	7	7
Cargas (kW)	32581	31886	31600
Média de cargas (kW)	241,34	236,19	234,07

Fonte: elaborada pela autora.

A resposta encontrada pelo AG aumentou em 15,78% as perdas, comparando com a configuração padrão e a de mínimas perdas, porém, diminuiu em 4,2% e em 4,8% o número total de consumidores desconectados supondo todas as possíveis faltas, respectivamente. A configuração de menor perda possível, possui altura total e número de consumidores desconectados maiores que os valores das topologias proposta e padrão e quantidade total de cargas desenergizadas e média de cargas menores. A média de desenergizados para todas as topologias é a mesma. Abaixo, na Figura 22, são mostrados os perfis de tensão do sistema antes e depois da reconfiguração.

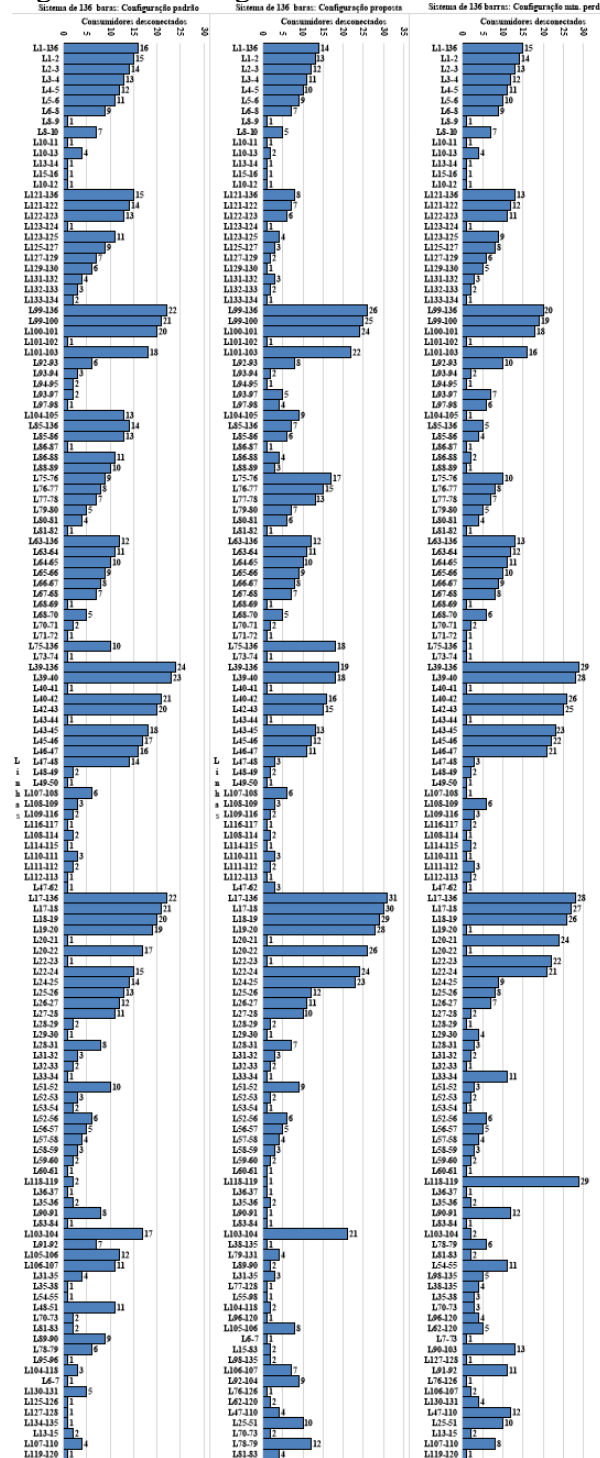
Figura 22 - Perfil de tensão da configuração padrão e da solução do sistema de 136 barras.



Fonte: elaborada pela autora.

Em 41,18% das barras da configuração proposta, os valores de tensão foram melhores em relação à padrão e em 40.44% estes valores foram melhores em relação a de mínima perda. Os níveis de tensão mínimo e máximo são 0,9301 e 1 para a solução, 0,9306 e 1 para a configuração anterior à reconfiguração e 0,9589 e 1 na de perdas mínimas, respectivamente. A mínima tensão (0,9301), comparando as três configurações, ocorreu na barra 117 da configuração proposta. Na Figura 23, pode-se observar o histograma do sistema de 136 barras, mostrando a relação entre o número de consumidores desconectados devido à interrupção de cada linha do sistema padrão, da metodologia proposta e de mínimas perdas.

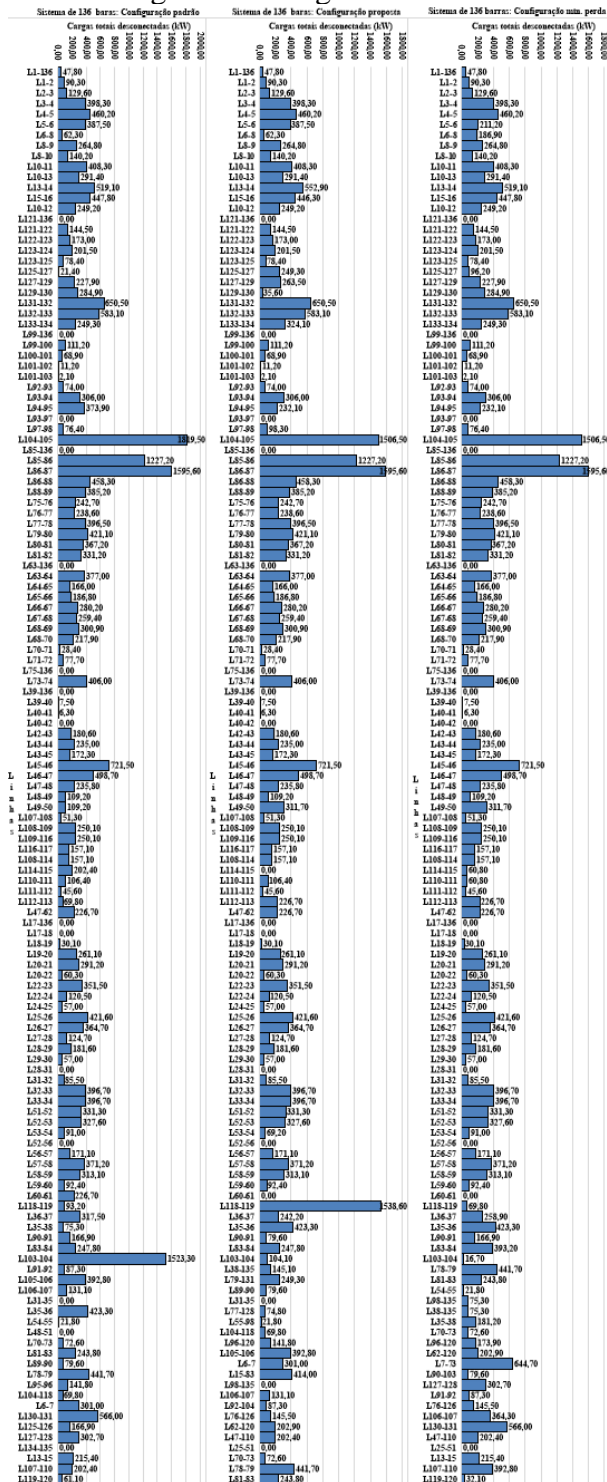
Figura 23 – Histograma de faltas do sistema de 136 barras.



Fonte: elaborada pela autora.

Ao longo de todo o sistema, pode-se observar que na topologia proposta, ocorre a redistribuição da quantidade de consumidores desconectados. Na L17-136 da configuração proposta houve a maior quantidade de barras desenergizadas (31). Na Figura 24, pode ser observado o histograma do sistema de 84 barras, mostrando a relação entre os valores de cargas desconectados devido à interrupção de cada linha do sistema padrão, da metodologia proposta e de mínimas perdas.

Figura 24 – Histograma de cargas do sistema de 136 barras.



Fonte: elaborada pela autora.

Nos três histogramas a diferença é quase imperceptível, diferindo com grande expressividade apenas nos ramos L118-119 da configuração proposta e L103-104 da configuração padrão, que possuem altos valores de carga. Na L104-105 da configuração padrão houve o maior valor de carga desenergizado (1819,5 kW).

É importante ressaltar que o algoritmo implementado objetivou unicamente a minimização da altura da árvore. Por isso, devido às vantagens econômicas, foi realizada a utilização de um algoritmo multiobjetivo para a minimização simultânea da altura e das perdas do sistema.

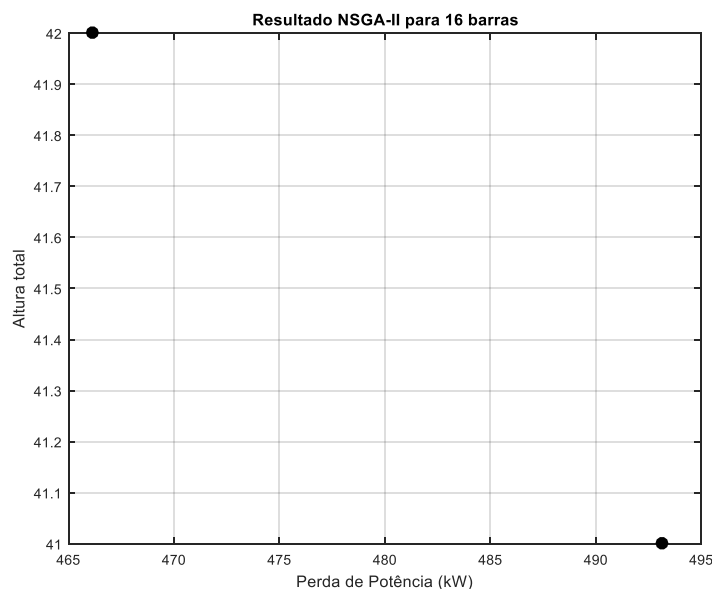
## 4.2 Resultados – NSGA-II

O NSGA-II foi utilizado neste trabalho para duas aplicações. Primeiramente, para resolver o problema de reconfiguração de redes minimizando as perdas elétricas e altura total da rede. E depois, para minimizar perdas e número de chaveamentos, a fim de confirmar a hipótese de que com o planejamento de operação para obter uma rede mais ramificada, menos comutações de chaves seriam necessárias para recompor o sistema em caso de contingências. O algoritmo foi executado para reconfigurar a rede, partindo da configuração padrão (caso 1), em seguida, partindo da configuração proposta (caso 2), encontrada na fase mono-objetiva. As linhas utilizadas para supor falta, foram escolhidas aleatoriamente, observando se essa falta implicaria na impossibilidade de restabelecimento de energia para todas as barras.

### 4.2.1 Sistema de 16 barras: Altura total x Perdas

Para esse sistema foi utilizada uma população de tamanho  $M = 20$ , e 500 gerações. A fronteira Pareto foi encontrada com 250 iterações e se manteve. A Figura 25 mostra a Fronteira ótima encontrada pelo algoritmo para o sistema de 16 barras.

Figura 25 – Fronteira Pareto para o sistema de 16 barras: Altura total x Perdas.



Fonte: elaborada pela autora.

Na Tabela 9, podem ser observados os valores das funções objetivo das soluções da fronteira Pareto-ótima.

Tabela 9 – Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 16 barras.

Soluções	Topologias			Perdas(kW)	Altura total
SOL16-1	7	8	16	466,13	42
SOL16-2	8	15	16	493,15	41

Fonte: elaborada pela autora.

O algoritmo encontrou somente dois resultados: SOL16-1 e SOL16-2. A quantidade pequena de resultados deve-se a baixa dimensão do sistema, o que faz com que poucas configurações se diferenciem quanto ao *fitness* de altura. A SOL16-1 é composta pelo menor valor possível de perda (466,13 kW) com respectivo valor de ramificação para esta solução (42). Já a SOL16-2 é composta pelo mínimo valor de altura total da rede (41) com respectivo valor de perda para esta solução (493,15 kW). Portanto, o conjunto Pareto, para o sistema de 16 barras, compõe-se somente pelos extremos não dominados das funções de perda e ramificação e estes resultados ratificam os valores encontrados na fase mono-objetiva para ambos os casos.

#### 4.2.2 Sistema de 16 barras: Perdas x Número de chaveamentos

O NSGA-II aplicado para minimizar perdas e número de chaveamentos utilizou população de tamanho  $M=15$ , e necessitou apenas de 100 gerações. Para realizar uma análise das vantagens advindas do processo de ramificação neste sistema, foi escolhida, aleatoriamente, a linha 3 para supor falta. Foram comparados os resultados obtidos, exibidos nas Tabelas 10 e 11, para os casos 1 e 2, respectivamente.

Tabela 10 – Conjunto Pareto para o sistema de 16 barras com configuração inicial padrão (caso1).

Topologias			Perdas(kW)	Nº de Chaveamentos
3	7	8	531,10	6
3	8	15	547,70	4
3	14	15	568,60	2

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 11 – Conjunto Pareto para o sistema de 16 barras com configuração inicial proposta (SOL16-2) (caso 2).

Topologias			Perdas(kW)	Nº de Chaveamentos
3	7	8	531,10	4
3	8	15	547,70	2

Fonte: elaborada pela autora.

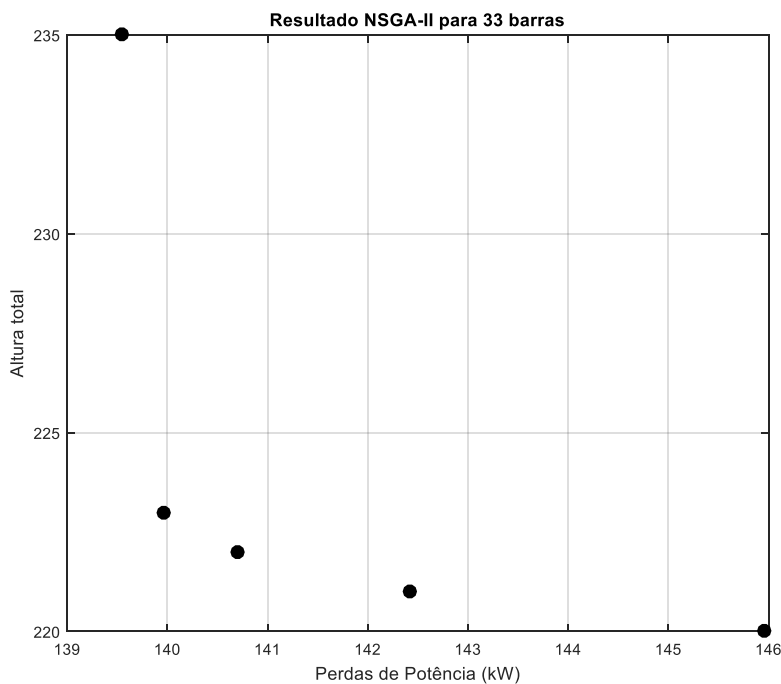


Para os dois casos, o algoritmo encontrou as mesmas configurações, porém, percebe-se que a partir da configuração proposta, é possível alcançar as mesmas condições de perda com menor número de chaveamentos.

#### 4.2.3 Sistema de 33 barras: Altura total x Perdas

Neste sistema foi utilizada uma população de tamanho  $M = 20$ , e 500 gerações. O conjunto Pareto deste sistema foi encontrado com 450 iterações. A Figura 26 mostra a Fronteira ótima encontrada pelo algoritmo para o sistema de 33 barras.

Figura 26 – Fronteira Pareto para o sistema de 33 barras: ramificação x perdas.



Fonte: elaborada pela autora.

Na Tabela 12, podem ser observados os valores das funções objetivo das soluções da fronteira Pareto-ótima.

Tabela 12 – Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 33 barras.

Soluções	Topologias					Perdas(kW)	Altura total
SOL33-1	7	9	14	32	37	139,55	235
SOL33-2	7	9	14	28	32	139,97	223
SOL33-3	7	10	14	28	32	140,7	222
SOL33-4	7	10	14	28	36	142,42	221
SOL33-5	7	10	14	27	36	145,96	220

Fonte: elaborada pela autora.

Para o sistema de 33 barras foram encontrados cinco resultados. Os valores de mínima perda e ramificação, 139,55 kW e 220 respectivamente, corroboram os resultados de minimização mostrados no capítulo 5.

Entre as SOL33-2 e SOL33-5, percebe-se pequenas diferenças entre os valores da função de adaptação ramificação. Lembrando que para o *fitness* de ramificação, apenas existem valores inteiros, já que este é calculado somando os níveis de todas as barras conectadas. Entretanto, entre a SOL33-1 e a SOL33-2, há uma grande disparidade entre os *fitness* de ramificação, 235 e 223, e pequena discrepância entre os valores de perda, de 0,42 kW. Deve-se a essa pequena discrepância da perda, a não existência de mais respostas entre essas soluções, mesmo com as diversas possibilidades de valores de ramificação para este sistema.

#### 4.2.4 Sistema de 33 barras: Perdas x Número de chaveamentos

Para minimizar perdas e número de chaveamentos deste sistema, foi utilizado população de tamanho  $M=30$ , e foram necessárias 300 gerações para encontrar o conjunto Pareto. A linha escolhida para supor a falta foi a 25. São exibidos nas Tabelas 13 e 14, os resultados obtidos para os casos 1 e 2, respectivamente.

Tabela 13 – Conjunto Pareto para o sistema de 33 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologias					Perdas(kW)	Nº de Chaveamentos
7	9	14	25	32	151,63	10
9	14	25	31	33	152,50	8
11	25	32	33	34	153,74	6
11	25	33	34	36	156,74	4

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 14 – Conjunto Pareto para o sistema de 33 barras com configuração inicial proposta (SOL33-5) (caso 2).

Topologias					Perdas(kW)	Nº de Chaveamentos
7	9	14	25	32	151,63	6
7	10	14	25	32	152,36	4
7	10	14	25	36	154,76	2

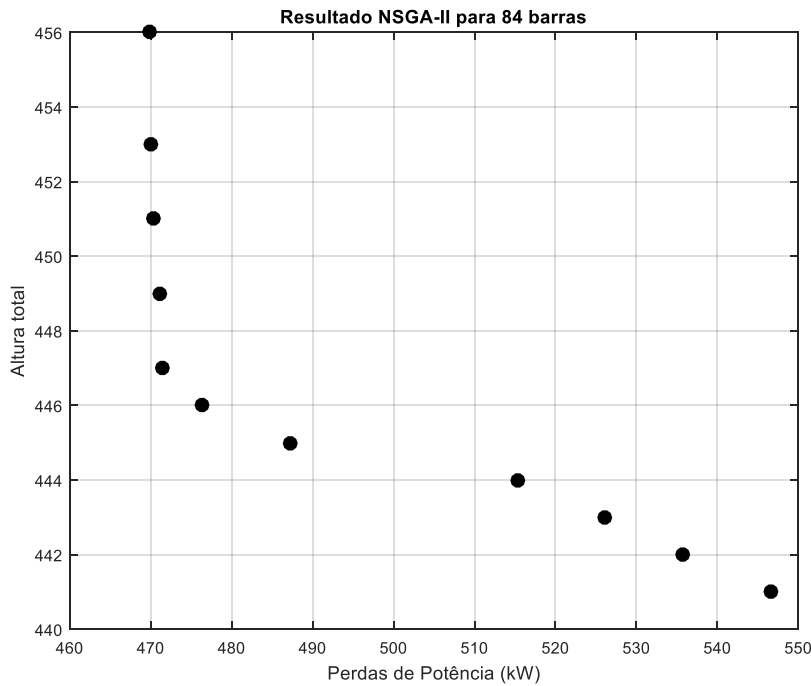
Fonte: elaborada pela autora.

Partindo da configuração inicial padrão, o NSGA-II obtém mais soluções, porém, percebe-se que, no caso 2, para alcançar a solução com menor perda (151,63 kW), são necessárias somente 6 (seis) manobras, enquanto no caso 1 são necessárias 10 (dez). Observando as demais soluções, ainda no caso 2, observa-se que há resultados que recompõem a rede com menos alterações nas chaves e baixos valores de perdas do que os resultados encontrados no caso 1.

#### 4.2.5 Sistema de 84 barras: Altura total x Perdas

Para o sistema de 84 barras, foram utilizadas 1500 gerações e tamanho de população  $M=70$ . O NSGA-II encontrou a fronteira Pareto com 1200 gerações. A fronteira pode ser observada na Figura 27:

Figura 27 – Fronteira Pareto para o sistema de 84 barras: Altura total x Perdas.



Fonte: elaborada pela autora.

Os valores do conjunto Pareto, com respectivas topologias podem ser observados na Tabela 15:

Tabela 15 – Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 84 barras.

Soluções	Topologias	Perdas(kW)	Altura total
SOL84-1	7 13 34 39 42 55 62 72 83 86 89 90 92	469,86	456
SOL84-2	7 13 34 39 42 55 63 72 83 86 89 90 92	470,04	453
SOL84-3	7 34 39 42 55 63 72 83 86 88 89 90 92	470,35	451
SOL84-4	7 13 34 38 42 55 63 72 83 86 89 90 92	471,10	449
SOL84-5	7 34 38 42 55 63 72 83 86 88 89 90 92	471,41	447
SOL84-6	7 34 38 42 55 64 72 83 86 88 89 90 92	476,33	446
SOL84-7	7 34 38 42 54 64 72 83 86 88 89 90 92	487,18	445
SOL84-8	7 13 34 38 42 55 64 70 83 86 89 90 92	515,29	444
SOL84-9	7 13 34 38 42 54 64 70 83 86 89 90 92	526,13	443
SOL84-10	7 34 38 42 55 64 70 83 86 88 89 90 92	535,73	442
SOL84-11	7 34 38 42 54 64 70 83 86 88 89 90 92	546,58	441

Fonte: elaborada pela autora.

Foram encontrados onze resultados para o sistema de 84 barras. Os resultados de minimização para perda e ramificação, 469,8575 kW e 441, mostrados no capítulo 5 para o sistema de 84 barras podem ser confirmados.

Entre as soluções SOL84-5 e SOL84-11, os *fitness* em relação a perda diferem de 5 (cinco) a 28 kW entre cada resposta, enquanto para os *fitness* em relação a ramificação essa diferença é pequena. Já entre as SOL84-1 e SOL84-4, os valores de ramificação diferem entre 2 (dois) e 3 (três) níveis de um resultado para o outro, o que sugere a existência de possíveis soluções nesse intervalo. Porém, os valores de perda entre estas soluções variam em pouquíssimos kW, diminuindo a expectativa de existirem possíveis outras soluções devido aos *fitness* de ramificação.

#### 4.2.6 Sistema de 84 barras: Perdas x Número de chaveamentos

Ao supor uma falta na linha 13 do sistema de 84 barras, foram utilizados como parâmetros do NSGA-II, população de tamanho 30 e 400 gerações. Nas Tabelas 16 e 17 podem ser observados os resultados obtidos para os casos 1 e 2, respectivamente.

Tabela 16 – Conjunto Pareto para o sistema de 84 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia													Perdas(kW)	Nº de Chaveamentos
7	13	34	39	42	55	62	72	83	86	89	90	92	469,86	18
7	13	34	39	55	62	72	83	86	89	90	92	95	469,99	16
7	13	34	55	62	72	83	86	89	90	92	93	95	470,12	14
7	13	34	62	72	83	84	86	89	90	92	93	95	470,76	12
7	13	34	62	72	84	86	89	90	91	92	93	95	473,20	10
7	13	34	62	84	86	87	89	90	91	92	93	95	478,98	8

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 17 – Conjunto Pareto para o sistema de 84 barras com configuração inicial proposta (SOL84-11) (caso 2).

Topologia													Perdas(kW)	Nº de Chaveamentos
7	13	34	39	42	55	62	72	83	86	89	90	92	469,86	10
7	13	34	38	42	55	62	72	83	86	89	90	92	470,92	8
7	13	34	38	42	55	64	72	83	86	89	90	92	476,01	6
7	13	34	38	42	54	64	72	83	86	89	90	92	486,86	4
7	13	34	38	42	54	64	70	83	86	89	90	92	526,13	2

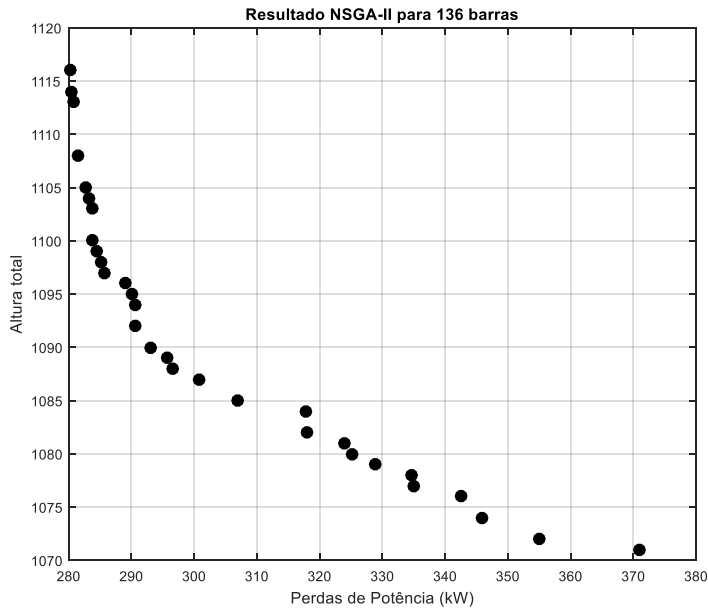
Fonte: elaborada pela autora.

Observa-se que quando a configuração inicial é a proposta, o algoritmo fornece duas soluções (a primeira e a segunda) com poucas perdas. Percebe-se também que o número de comutações é bem reduzido quando comparado ao caso 1, no qual há resultados de perdas ativas baixos, porém para alcançá-los é necessário maior número de comutações.

#### 4.2.7 Sistema de 136 barras: Altura total x Perdas

No NSGA-II utilizado para reconfigurar o sistema de 136 barras, foi usado tamanho de população  $M = 100$ , com 3000 gerações. A fronteira Pareto encontrada em 2800 gerações, possui 31 soluções. Na Figura 28 esta fronteira pode ser visualizada. Nas Tabelas 18 e 19, todos os valores das funções objetivo do conjunto Pareto podem ser vistos.

Figura 28 – Fronteira Pareto para o sistema de 136 barras: Altura total x Perdas.



Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 18 – Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 136 barras (parte 1).

Soluções	Topologias	Perda(kW)	Altura total
SOL136-1	7 35 51 90 96 106 118 126 135 137 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151 155	280,21	1116
SOL136-2	7 35 51 90 96 106 118 126 128 135 137 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151	280,45	1114
SOL136-3	9 35 51 90 96 106 118 126 135 136 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151 155	280,76	1113
SOL136-4	9 35 51 90 96 106 119 126 135 136 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151 155	281,53	1108
SOL136-5	9 38 51 54 90 96 106 119 126 135 136 138 141 144 145 146 147 148 150 151 155	282,8	1105
SOL136-6	38 51 54 96 106 119 126 128 135 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151	283,29	1104
SOL136-7	9 38 51 54 96 106 119 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151	283,76	1103
SOL136-8	9 38 51 54 96 106 120 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151	283,81	1100

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 19 – Conjunto Pareto encontrado para o sistema de 136 barras (parte 2).

Soluções	Topologias	Perda(kW)	Altura total
SOL136-9	9 38 51 55 96 106 120 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151	284,39	1099
SOL136-10	9 38 51 54 96 106 126 128 135 136 138 141 143 144 145 146 147 148 149 150 151	285,11	1098
SOL136-11	9 38 51 55 96 106 126 128 135 136 138 141 143 144 145 146 147 148 149 150 151	285,69	1097
SOL136-12	9 38 51 55 96 107 126 128 135 136 138 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152	288,96	1096
SOL136-13	38 51 92 95 106 120 126 128 135 136 137 138 141 142 144 145 146 147 148 149 151	290,04	1095
SOL136-14	7 9 38 51 54 92 95 106 120 126 128 135 138 141 144 145 146 147 148 149 151	290,57	1094
SOL136-15	9 38 51 55 92 95 106 120 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 151	290,65	1092
SOL136-16	9 38 51 55 92 96 106 120 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 151	293,14	1090
SOL136-17	9 38 51 55 92 95 107 120 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 151	295,76	1089
SOL136-18	9 38 51 55 92 96 106 126 128 135 136 138 141 143 144 145 147 148 149 151 156	296,57	1088
SOL136-19	9 38 51 55 92 96 107 120 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 151	300,8	1087
SOL136-20	9 38 51 55 92 96 107 126 128 135 136 138 141 143 144 145 146 147 148 149 151	306,92	1085
SOL136-21	9 38 51 55 92 96 106 120 128 131 135 136 138 141 144 146 147 148 149 151 154	317,73	1084
SOL136-22	9 38 51 55 92 95 110 120 126 128 135 136 138 141 144 145 146 147 148 149 151	317,92	1082
SOL136-23	9 38 51 55 92 95 107 120 126 128 131 135 136 138 141 144 146 147 148 149 151	323,89	1081
SOL136-24	9 38 51 55 92 96 106 126 128 131 135 136 138 141 143 144 146 147 148 149 151	325,14	1080
SOL136-25	9 38 51 55 92 96 107 120 126 128 131 135 136 138 141 144 146 147 148 149 151	328,93	1079
SOL136-26	9 15 38 51 55 92 96 110 120 126 128 135 136 141 144 145 146 147 148 149 151	334,63	1078
SOL136-27	9 38 51 55 92 96 107 126 128 131 135 136 138 141 143 144 146 147 148 149 151	335,05	1077
SOL136-28	9 38 51 55 92 95 110 120 128 131 135 136 138 141 144 146 147 148 149 151 154	342,51	1076
SOL136-29	9 38 51 55 92 95 110 120 126 128 131 136 138 141 144 146 147 148 149 151 156	345,87	1074
SOL136-30	9 38 51 55 92 96 110 120 126 128 131 136 138 141 144 146 147 148 149 151 156	354,99	1072
SOL136-31	15 38 51 55 92 96 110 120 126 128 131 135 136 137 141 144 146 147 148 149 151	370,97	1071

Fonte: elaborada pela autora.

Foram encontradas 31 soluções bem distribuídas ao longo do espaço de busca. Analisando a tabela, percebe-se que as onze primeiras topologias possuem valores de perda muito próximos, porém com *fitness* de ramificação não tão próximos assim (com diferença de 1 (um) até 5 (cinco) níveis entre as soluções). Já nas topologias posteriores, percebe-se valores de ramificação próximos (com diferença de 1 (um) até 2 (dois) níveis, porém com *fitness* de perda variados, visto o sistema considerado ser bem maior que os anteriores estudados.

#### 4.2.8 Sistema de 136 barras: Perdas x Número de chaveamentos

Nessa aplicação, foram utilizadas 1000 gerações com 40 indivíduos. Foi provocada uma falta na linha 95 do sistema de 136 barras, escolhida aleatoriamente. São observados nas Tabelas 20 e 21 os resultados obtidos para os casos 1 e 2, respectivamente. Para este sistema foram feitas avaliações das soluções de recomposição, quanto aos custos e número de manobras. O custo do kWh considerado foi de R\$ 0,569, de acordo com as tarifas residenciais homologadas pela ANEEL.

Tabela 20 – Falta na linha 95: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7 38 51 54 84 95 106 120 126 128 135 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	282,00	160,46	22
7 38 51 84 95 106 120 126 128 135 137 138 141 142 144 145 147 148 149 150 151	282,55	160,77	20
38 51 54 84 95 106 120 126 135 136 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151 155	282,66	160,83	18
38 51 54 84 95 106 120 135 136 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151 154 155	283,39	161,25	16
51 54 84 95 106 120 135 136 137 138 139 141 144 145 147 148 149 150 151 154 155	284,03	161,62	14
51 54 84 95 106 135 136 137 138 139 141 143 144 145 147 148 149 150 151 154 155	287,68	163,69	12
51 95 106 120 126 136 137 138 139 140 141 144 145 146 147 148 149 150 151 155 156	288,91	164,39	10
51 95 106 120 136 137 138 139 140 141 144 145 146 147 148 149 150 151 154 155 156	289,25	164,58	8

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 21 – Falta na linha 95: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7 38 51 54 84 95 106 120 126 128 135 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	282,00	160,46	16
7 38 51 55 84 95 106 120 126 128 135 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	282,39	160,68	14
38 51 55 84 95 106 120 126 128 135 136 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	283,02	161,04	12
15 38 51 55 84 95 106 120 126 128 135 136 137 141 144 145 147 148 149 150 151	285,87	162,66	10
15 38 51 55 84 95 106 120 126 128 131 135 136 137 141 144 147 148 149 150 151	317,69	180,77	8

Fonte: elaborada pela autora.

O NSGA-II encontrou 8 (oito) soluções para o caso 1 e 5 (cinco) para o caso 2. No caso 2, para atingir a solução que minimiza as perdas para a falta considerada, são necessários somente 16 chaveamentos enquanto no caso 1, são necessárias 22 manobras. Esta solução possui menor custo, porém são necessárias muitas manobras para alcançá-la. Na última solução de cada caso, são necessários 8 (oito) manobras (menor tempo para recomposição), entretanto, o valor de custo é alto. Então, são analisados os resultados de meio termo de ambos os casos. No caso 1, com 16 e 14 chaveamentos, são obtidas configurações com maior custo que a conseguida com 12 chaveamentos no caso 2.

Foi provocada uma outra falta, dessa vez na linha 107 do sistema de 136 barras, escolhida também aleatoriamente. São observados nas Tabelas 22 e 23 os resultados obtidos para os casos 1 e 2, respectivamente. Para essa falta também foram realizadas avaliações das soluções de recomposição, quanto aos custos e número de manobras.

Tabela 22 – Falta na linha 107: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7 38 51 54 84 95 107 118 126 128 135 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	283,97	161,58	22
7 38 51 54 84 95 107 118 126 135 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151 155	284,00	161,59	20
7 51 53 84 95 107 118 126 135 137 138 139 141 144 145 147 148 149 150 151 155	284,27	161,75	18
7 51 53 95 107 118 137 138 139 141 144 145 146 147 148 149 150 151 154 155 156	284,82	162,06	12
51 53 95 107 118 136 137 138 139 141 144 145 146 147 148 149 150 151 154 155 156	285,45	162,42	10
53 95 107 120 136 137 138 139 140 141 144 145 146 147 148 149 150 151 154 155 156	287,59	163,64	8
62 107 120 136 137 138 139 140 141 142 144 145 146 147 148 149 150 151 154 155 156	289,62	164,79	6

Fonte: elaborada pela autora.



Tabela 23 – Falta na linha 107: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7 38 51 54 84 95 107 118 126 128 135 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	283,97	161,58	18
38 51 54 84 95 107 118 126 128 135 136 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	284,61	161,94	16
38 51 55 84 95 107 118 126 128 135 136 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	285,00	162,16	14
38 51 55 84 96 107 118 126 128 135 136 137 138 141 144 145 147 148 149 150 151	285,58	162,50	12
38 51 55 95 107 120 126 128 135 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150 151	287,73	163,72	10
38 51 55 92 96 107 120 126 128 135 136 137 138 141 144 145 146 147 148 149 150	291,83	166,05	8
15 38 51 55 96 107 120 126 128 135 136 137 141 144 145 146 147 148 149 150 151	293,67	167,10	6
15 38 51 55 92 96 107 120 126 128 135 136 137 141 144 145 146 147 148 149 151	306,54	174,42	4
15 38 51 55 92 96 107 120 126 128 131 135 136 137 141 144 146 147 148 149 151	344,22	195,86	2

Fonte: elaborada pela autora.

O NSGA-II encontrou 7 (sete) resultados para o caso 1 e 9 (nove) para o caso 2. Novamente observa-se que partindo da configuração proposta (SOL136-31) para atingir a solução de menor perda possível, são necessários 18 chaveamentos, ao passo que no caso 2 são necessárias 22. A solução mínima perda possui menor custo, porém são necessárias muitas manobras, ou seja, mais tempo sem fornecimento, para alcançá-la. E mesmo que, para atingir a última solução de cada caso sejam utilizadas poucas manobras, 6 (seis) para o caso 1 e 2 (dois) para o caso 2, o valor de custo é alto. Assim, analisando os resultados de meio termo de ambos os casos, nota-se que no caso 1, com 12 chaveamentos é obtido uma resposta com menor custo, R\$ 162,06, que a conseguida com 10, R\$ 163,72, no caso 2.

No **APÊNDICE B**, são exibidas outras situações de faltas para o sistema de 136 barras, nesse apêndice pode ser notado que para a linha 106, partindo da configuração padrão o número de comutações para alcançar a mínima perda é menor. Assim, o processo de ramificação possibilita o menor número de chaveamentos dependendo da linha na qual ocorre a falta.

#### 4.3 Análise dos resultados

Percebe-se que para os sistemas de menor porte (16 e 33 barras) o algoritmo aplicado visando a ramificação encontrou uma perda de potência menor do que a configuração padrão. Isso ocorreu em virtude de o processo de ramificação ter dividido longos trechos, causadores de grandes perdas, em trechos menores.

Por outro lado, para os sistemas maiores (84 e 136 barras), as perdas encontradas

foram maiores do que na configuração original. Isso se deve ao fato de que ao aplicar o AG com o objetivo de diminuir a altura total do sistema, o algoritmo forçou a utilização de linhas com maior impedância, provocando uma perda maior.

Para os sistemas de 16, 33 e 84 barras, o perfil de tensão melhorou em boa parte das barras, já para o sistema de 136 barras, a melhora ocorreu, mas em poucas barras da rede.

Analisando o número de barras desconectadas, supondo todas as faltas possíveis, e a média de desenergizados, a configuração proposta apresentou os menores valores. Já quanto a quantidade total de carga, supondo todas as possíveis faltas, e a média de cargas a solução proposta obteve melhores resultados apenas para os sistemas de 16, 33 e 84 barras.

No sistema de 16 barras, ocasionando o desligamento entre as barras 1 e 6, 5 barras ficam desenergizadas no sistema inicial e somente 4, na solução do problema. Porém, ocorre o aumento de consumidores desconectados, caso fosse suposto falta em outras linhas do sistema ramificado, ratificando os *fitness* de valores iguais.

Para o sistema de 33 barras, considerando todas as possíveis faltas, ocorre diminuição de 68 consumidores desconectados quando comparadas às configurações proposta e padrão. Supondo-se especificadamente uma falta entre as barras 3 e 4, 23 barras ficam desconectadas na topologia padrão e somente 6 na topologia ramificada, diminuindo em 73,91% o impacto.

No sistema de 84 barras, há diminuição de 29 consumidores desconectados partindo da configuração padrão para a proposta, considerando todas as possíveis faltas. Considerando-se uma contingência entre as barras 31 e 32, 13 barras ficam desconectadas na configuração original e somente 3 barras ficam desenergizadas no sistema ramificado, ou seja, 76,92% de diminuição de prejuízo.

No sistema de 136 barras, desconectando a linha entre as barras 43 e 45, ficam 18 barras desconectadas na topologia inicial, já na solução encontrada do problema, 7 barras ficam desconectadas, redução de 61,11%. Supondo todas as faltas, o número de consumidores desconectados diminui em 36, comparando as topologias padrão e proposta.

Vale evidenciar a proporcionalidade direta que há entre o número de consumidores desconectados e a altura total do sistema, o que valida a aplicação da minimização da altura total da rede, para a minimização de consumidores desconectados em caso de falta.

Através dos histogramas, pode-se ver que nos trechos nos quais haveria maior desenergização dos consumidores, a ramificação foi capaz de mitigar esse problema, distribuindo melhor os consumidores desenergizados.

Ao aplicar o NSGA-II, observou-se que, considerando a configuração planejada como inicial, é possível obter soluções de perdas mínimas com menor número de chaveamento quando comparado à situação em que a configuração inicial é a padrão para a falha considerada. Por meio da aplicação do NSGA-II, também foram verificadas as soluções de restabelecimento do fornecimento de energia, analisando-se os custos e número de manobras envolvidos. Percebeu-se que para a escolha da topologia de recomposição, dependendo do local da falta, nem sempre a solução planejada para a ramificação será a melhor opção.

## 5 CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi apresentar a utilização do AG e do Algoritmo Genético Multiobjetivo: *Nondominated Sortinh Genetic Algorithms-II* (NSGA-II) na reconfiguração de rede de distribuição de quatro sistemas encontrados na literatura especializada: 16 barras, 33 barras, 84 barras e 136 barras.

Os sistemas utilizados foram testados operando de forma radial. Foi utilizado um procedimento chamado factibilizador para garantir que os indivíduos das populações tivessem características de radialidade e conexidade. Este procedimento possibilitou que indivíduos possuidores de boa carga genética, mas ineficazes, pudessem ter genes reaproveitados, auxiliando na convergência dos algoritmos utilizados.

O AG foi empregado desejando obter, para o planejamento de operação, sistemas com maior ramificação possível. Partiu-se das hipóteses de que, com o objetivo alcançado, após a queda de uma linha, menos barras seriam desenergizadas, menor número de chaveamentos seria necessário para recomposição do sistema e a solução encontrada alcançaria menor perda de potência e melhor perfil de tensão quando comparada a rede padrão. Foi averiguado também a quantidade de carga em kW que ficou desconectada em caso de contingência.

Para melhor sondar os efeitos da ramificação, foram feitos histogramas exibindo quantos consumidores e quanta potência de carga deixam de ser atendidos com a contingência de cada linha da rede. Os histogramas de barras desconectadas demonstraram que a topologia proposta possibilita que mais consumidores sejam atendidos para maioria das faltas consideradas. Já os histogramas de quantidade de carga desenergizada mostraram que para os sistemas de 16, 33 e 84 barras na configuração proposta menos kW de carga ficam desconectados, enquanto para o sistema de 136 barras o mesmo não acontece. Através da análise desses histogramas, observou-se que é possível realizar a reconfiguração de redes com o objetivo de priorização de cargas, e ramificação do sistema baseado em estatísticas de ocorrência de faltas.

Nos sistemas de 16 e 33 barras, o AG conseguiu encontrar topologias que diminuem a altura total e forneçam perda de potência menor que a configuração padrão. Já para os sistemas de 84 e 136 barras, a perda fornecida pela configuração proposta é maior que a obtida com a padrão.

Para o sistema de 16 e 33 barras o nível de tensão da configuração proposta é melhor que a padrão e que a de mínimas perdas para boa parte das barras. Para os sistemas de 84 e 136 barras o perfil de tensão da proposta é melhor que o da topologia padrão para algumas barras, porém o perfil de tensão da configuração de mínimas perdas é que melhor se destaca para maioria das barras.

Percebe-se que a configuração proposta conseguiu diminuir a altura total, porém quanto a quantidade de carga desconectada, a perda de potência e o perfil de tensão esta solução não é a mais adequada para todos os sistemas testados. Pois o AG foi implementado unicamente para minimização da altura total. A utilização de um algoritmo multiobjetivo é necessário para encontrar soluções que otimizem esses objetivos simultaneamente.

O processo de ramificação usado possibilitou melhor redistribuição de ramos, realocando barras pertencentes a grandes corredores, em menores trechos. Foi detectável a

eficiência da proposta, ao observar-se o número de cargas desconectadas após uma contingência.

A reconfiguração multiobjetivo objetivou, num primeiro momento, aliar interesses em relação à ramificação e à minimização das perdas, já que são questões importantes para melhor funcionamento dos sistemas de distribuição. Com a implementação do NSGA-II, foram encontrados conjuntos de soluções adequados ao problema. Nota-se que os valores de *fitness* da ramificação e perda não são necessariamente conflitantes, já que o *fitness* de perda depende da característica física das linhas.

Em seguida, o NSGA-II foi executado para reconfigurar o sistema e encontrar soluções que minimizem as perdas resistivas e o número de manobras úteis para restabelecimento de energia em caso de contingência. Percebeu-se que ao empregar a topologia proposta como inicial, o número de manobras fundamentais para reconfigurar o sistema com mínimas perdas possíveis é menor, somente para algumas faltas. Para o sistema de 136 barras, por ser um sistema maior, realizou-se uma avaliação para saber se compensa realizar o planejamento alvejando a ramificação, em caso de recomposição do sistema. Foram analisados os custos e o número de manobras, e percebeu-se que planejar dessa forma pensando em uma possível recomposição será vantajosa dependendo do local da falta.

Ressalta-se que a escolha da melhor solução, na otimização multiobjetivo, ficará sob critério do especialista que saberá qual ponto se adequa melhor aos interesses da concessionária.

A seguir, algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Aplicação da ramificação em sistemas de distribuição que possuam geradores distribuídos.
- Utilização do AG para minimização de barras afetadas por falhas e melhoria do perfil de tensão.
- Aplicação da metodologia em sistemas de maior porte.
- Reconfiguração de redes de distribuição considerando prioridade de carga e estatísticas de ocorrência de faltas.
- Aplicação de outros algoritmos multiobjetivos, como PAES-II para verificar o desempenho comparado ao NSGA-II.

## REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, Aliyu Sanni; EKUNDAYO, Kehinde Rasaq; OLANIYAN, A. Abayomi. Optimal reconfiguration of radial distribution networks using improved genetic algorithm. *Nigerian Journal of Technological Development*, v. 16, n. 1, p. 10-16, 2019.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Audiência Pública nº. 033/2009 – Revisão do Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Brasília, DF, 2016g. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/DIC%20FIC%20DMIC.pdf>>.
- BARAN, Mesut; WU, Felix. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, p. 1401-1407, 1989.
- BATISTA, Samuel, CANIZES, Bruno, OLIVEIRA, António, NOGUEIRA, Teresa, VALE, Zita, “Optimal location of normally open switches in order to minimize power losses in distribution networks”. In: *Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016*, pp. 1–5, 2016
- BENTO, Eduardo Prevedello; KAGAN, Nelson. Algoritmos genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de redes de distribuição. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 19, n. 3, p. 302-315, 2008.
- BILÉSIMO, Vanessa Felisberto; PORFÍRIO, Patrícia José; DA SILVA, Rosângela Westphal; SIMÕES, Priscyla Waleska Targino de Azevedo; AZEVEDO, Silvana Campo. Implementação do algoritmo de busca em profundidade em um grafo: Utilização da Biblioteca Padrão do C++-STL. *Anais SULCOMP*, 2013.
- CARREÑO, Edgar; MOREIRA, N.; ROMERO, Ruben. Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting – IEEE-PES-GM, New York*. Anais... New York: IEEE-PES-GM, 2007. v. 1, p. 24-28, 2007.
- CARDOZO, Ricardo Francisco Alonso. Reconfiguração ótima de Sistemas de Distribuição Radiais utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá, MG, BR, 2015.
- CARREÑO, Edgar; ROMERO, Ruben; PADILHA, Antonio Feltrin. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 23, n. 4, p. 1542–1551, 2008.
- CHIOU, Ji Pyng; CHANG, Chung Fu.; SU, Ching Tzong. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.

CINVALAR, Seyhan; GRAINGER J. J.; Yin H., and LEE S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. III, No. 3, pp. 1217-1223, 1988.

COELLO, Carlos; Veldhuizen, David; Lamont, Gary. Evolutionary Algorithms for Solving Multi Objective Problems, Kluwer Academic Publishers, Nova York, 2002.

DA SILVA, Lindenberg Isac; BELATI, Edmarcio Antonio; DA SILVA JUNIOR, Ivo Chaves. Algoritmo heurístico de reconfiguração de sistemas elétricos de distribuição baseado na equação de movimento do vaga-lume. Blucher Mathematical Proceedings, v. 1, n. 1, p. 176-185, 2015.

DEB, Kalyanmoy. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Nova York, EUA, 2001.

DIMITRIJEVIC, Srdjan, RAJAKOVIC, Nikola. Service Restoration of Distribution Networks Considering Switching Operation Costs and Actual Status of the Switching Equipment. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 6, n. 3, p. 1227-1232, 2015.

FERREIRA, Ewerton L.; OLIVEIRA, Leonardo W.; OLIVEIRA, Edimar J.. Aplicação de Sistema Imunológico Artificial para Aumento da Estabilidade de Tensão de Sistemas de Distribuição. In: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), 2015, Porto de Galinhas-PE. Aplicação de Sistema Imunológico Artificial para Aumento da Estabilidade de Tensão de Sistemas de Distribuição, 2015.

FERREIRA, Saulo Custodio de Aquino. Reconfiguração de sistemas de distribuição através de técnica de decomposição e otimização robusta, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, BR, 2017.

FERREIRA, Saulo Custodio Aquino; ARAUJO, Taís Lacerda Oliveira; Oliveira, Leonardo Willer; CARVALHO, Jerson Santos; OLIVEIRA, Edimar José. Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Visando Balanceamento entre Alimentadores Através de Técnica de Decomposição. In: XII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission (CLAGTEE 2017), Mar del Plata, 2017.

FONSECA, Alexandre Gomes. Análise de reconfiguração de redes de distribuição baseada em fluxo de potência desacoplado rápido. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, PR, BR, 2006.

GARCIA, Vinícius Jacques. Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica., Ph.D. Thesis, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, BR, 2005.

GOIS, Marcilyanne Moreira. Redução de perdas em sistemas de distribuição por reconfiguração de redes utilizando aceleradores de hardware. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, SP, BR, 2017.

GOLDBERG, David Edward Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. 1st. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1989.

GOMES, Flávio Vanderson. Reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando técnicas de otimização contínua e heurística para minimização de custos. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

GRAINGER, J. John; STEVENSON, William D.; CHANG, Gary W. Power system analysis. New York: McGraw-Hill, 1994.

HOLLAND, John Henry. "Adaptation in Natural & Artificial Systems". Press 2<sup>nd</sup> ed.: MIT Press, 1992.

JARDIM, Marco Antonio Souza. Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica usando algoritmo genético multiobjetivo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, BR, 2011.

KOUTSOUKIS, Nikolaos C., SIAGKAS, Dimitris O., GEORGILAKIS, Pavlos S., & HATZIARGYRIOU, Nikos D. Online reconfiguration of active distribution networks for maximum integration of distributed generation. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 14(2), 437-448, 2017.

LAVORATO, Marina; FRANCO, John F.; RIDER, Marcos J.; ROMERO, Rubén. Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems, IEEE Transaction on Power Systems, New York, v. 27, n. 1, p. 172-180, 2012.

MACIEL, Renan Silva. Otimização multiobjetivo na análise da integração de geração distribuída às redes de distribuição, Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2012.

MANTOVANI, José Roberto Sanches; CASARI, Fernando; ROMERO, Rubén Augusto. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. Controle and Automacao, p. 150-159, 2000.

MARTINS, Caio César Costa. Fluxo de carga em redes de distribuição operando em emergência, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Maranhão, MA, BR, 2018.

MARQUES, Leandro Tolomeu. Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição considerando aspectos práticos, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, SP, BR, 2018.

MARQUEZ, Remy Amorim Caero. Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica com priorização de chaves automáticas. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in na urban power distribution system. Proc. 5th Power System Computation Conference, p. 1–18,1975.

NARA, Koich; SHIOSE, A; KITAGAWA, Minoru; ISHIHARA, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 3, p. 1044 -1051, 1992.

NASCIMENTO, Luís Bruno Pereira; AMORA, Márcio André Baima; PINTO, Vandilberto Pereira; SOUZA, Darielson Araújo. Busca Harmônica com ajuste adaptativo de parâmetro por meio de Algoritmo Genético aplicada na otimização do projeto LQR. In: Congresso Brasileiro de Inteligencia Computacional. Curitiba-PR: ABRICOM, 2015.

NETO, Miguel Pereira Santos; Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Algoritmo Híbrido; Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Bahia, 2014;

OLIVEIRA, Leandro Willer, Oliveira, Ângelo Rocha, Junior, Ivo Chaves Silva, Gomes, Flávio Vanderson, & Oliveira, Edimar José. Restabelecimento de sistemas de distribuição de energia através da técnica enxame de partículas. LINKSCIENCEPLACE-Interdisciplinary Scientific Journal, 3, 2016.

OLIVEIRA, Marlon Borges Correia de. Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística GRASP, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",SP, BR, 2011.

PERALTA, Renzo Amilcar Vargas. Desenvolvimento de uma metodologia para restauração automática de redes de distribuição, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",SP, BR, 2015.

PEREIRA, Ezequiel Campos. Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica para Minimização de Perdas Técnicas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, BR, 2014.

POSSAGNOLO, Leonardo Henrique Faria Macedo. Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",SP, BR, 2015.



ROSSETI, Gustavo José Santiago. Técnicas para restabelecimento de sistemas de distribuição de energia elétrica, Tese de doutorado, Universidade Federal de Juiz de Fora, MG, Brasil, 2015.

SAADAT, Hadi. Power Flow Analysis, In: Power System Analysis, 1nd ed, Boston: McGraw-Hill Primis Custom Publishing, cap 6, p, 195-256, 1999.

SCHÄFER, Florian; BRAUN, Martin. An efficient open-source implementation to compute the Jacobian matrix for the Newton-Raphson power flow algorithm. arXiv preprint arXiv:1804.06742, 2018.

SCHAFFER, James David. Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms, Genetic Algorithms and their Applications: Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, Lawrence Erlbaum, pp. 93-100, 1985.

SCHMIDT, Hernán Prieto. Reconfiguração de redes de distribuição através de programação não-linear inteira mista. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2005.

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

SOARES, F. S. Algoritmo evolutivo para reconfiguração de redes e posicionamento eficiente de geradores distribuídos em sistemas de distribuição de energia elétrica. 2018.90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

SOUSA, João, COSSI, Antonio Marcos, RIDER, Marcos Julio, & MANTOVANI, Jose Roberto Sanches (2012). Técnica Heurística para o Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Considerando a Confiabilidade da Rede. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 4, 1-6, 2012.

SOUSA, João de. Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de programação linear inteiro misto. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" ,SP, BR 2013.

SOUZA, Simone Silva Frutuoso; ROMERO, Ruben; FRANCO, John F. Artificial immune networks Copt-aiNet and Opt-aiNet applied to the reconfiguration problem of radial electrical distribution systems. Electric Power Systems Research, v. 119, p. 304-312, 2015.

YANG, Fan; LIU, Jun; LU, Bingbing. Research on Distribution Network Reconfiguration Method Considering Switching Operations. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, p. 012064, 2018.

YANG, Xin-Ela. (Ed.), Nature-Inspired Optimization Algorithms, Genetic algorithms - chapter 5. Oxford: Elsevier, p. 77 – 87, 2014.

WANG, Chun; CHENG, Hao Zhong. Optimization of network configuration in large distribution systems using plant growth simulation algorithm. IEEE Transactions on Power Systems, v. 23, n. 1, p. 119-126, 2008.

ZIMMERMAN, Ray Daniel; MURILLO-SÁNCHEZ, Carlos Edmundo; THOMAS, Robert John. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. IEEE Transactions on power systems, v. 26, n. 1, p. 12-19, 2011.

## APÊNDICE A – ESTUDO SOBRE RECONFIGURAÇÃO DE ESTATÍSTICAS DE OCORRÊNCIA FALTAS

A seguir, um exemplo de como o estudo baseado em estatísticas de ocorrência de faltas em cada ramo pode ser executado no sistema de 33 barras.

### *Exemplo*

Considere a média das estatísticas de ocorrência de contingências dos últimos 10 anos, na Tabela A.1:

Tabela A.1 – Média das estatísticas de ocorrência de falta para o sistema de 33 barras.

Ramo	Média de ocorrência de faltas
L1-2	1
L2-3	2
L3-4	2
L4-5	2
L5-6	2
L6-7	4
L6-26	1
L26-27	3
L3-23	3
L23-24	5
L24-25	2
L28-29	5
L29-30	3
L30-31	4
L31-32	3
L2-19	5
L8-9	3
L11-12	3
L12-13	2
L13-14	5
L15-16	3
L16-17	3
L17-18	3
L19-20	1
L20-21	3
L21-22	5

Fonte: elaborada pela autora.

A função *fitness*, considerando a média da ocorrência de faltas, pode ser por exemplo, a média de consumidores que, provavelmente, ficarão desconectados em um ano. Essa média é obtida realizando o somatório do número de consumidores desconectados multiplicando pela média de faltas dos últimos 10 anos, como mostrado na Equação (A.1).

$$M_d = \sum_{i=1}^n C_d * m_o \quad (\text{A.1})$$

Na Equação A.1,  $M_d$  é a média de desenergizados total no ano,  $m_o$  é a média de ocorrência de contingência,  $C_d$  é a quantidade de consumidores desconectados com a saída de operação de cada linha e  $n$  é a quantidade de linhas consideradas para o estudo, neste caso foram consideradas todas as linhas em comum às três topologias (padrão, proposta e de mínima perda). Dessa forma, o valor da função de avaliação para cada configuração pode ser visualizado na Tabela 6:

Tabela A.2 – Média de desenergizados total no ano para o sistema de 33 barras.

Configuração	Padrão	Proposta	Mínimas perdas
Chaves Abertas	33, 34, 35, 36, 37	7, 10, 14, 27, 36	7, 9, 14, 32 e 37
Média de desenergizados total no ano	511	420	439

Fonte: elaborada pela autora.

A partir dessa avaliação, a topologia proposta novamente seria a mais adequada para o problema, porém, a escolha da solução para esta dissertação não foi feita dessa forma. O exemplo explicado acima foi realizado apenas para demonstração do que também pode ser executado para decidir a configuração para o planejamento de operação.

A verificação realizada no *Exemplo* pode ser também executada para os histogramas de cargas. Lembrando que, a partir desses histogramas, também é possível reconfigurar o sistema considerando carga prioritária, como hospitais.

## APÊNDICE B – OUTRAS SITUAÇÕES DE FALTA

Foram realizadas outras situações de contingência para o sistema de 136 barras, com a aplicação do NSGA-II, utilizando 1000 gerações com 40 indivíduos. A seguir, supondo a falta na linha 54, são apresentados nas tabelas B.1 e B.2, os conjuntos Pareto do caso 1 e 2, respectivamente.

Tabela B.1 – Falta na linha 54: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 35, 51, 54, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,79	159,77	20
7, 35, 51, 54, 90, 96, 106, 118, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 155	281,13	159,96	18
35, 51, 54, 90, 96, 106, 118, 135, 136, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 155	281,76	160,32	16
51, 54, 90, 106, 118, 126, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155	282,82	160,93	14
7, 38, 51, 54, 106, 120, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156	283,56	161,35	12
7, 51, 54, 96, 106, 137, 138, 139, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156	284,00	161,60	10
51, 54, 96, 106, 136, 137, 138, 139, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156	284,64	161,96	8

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela B.2 – Falta na linha 54: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 35, 51, 54, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,79	159,77	20
7, 35, 51, 54, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151	281,03	159,90	18
7, 38, 51, 54, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151	281,44	160,14	16
38, 51, 54, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 136, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151	282,08	160,50	14
7, 38, 51, 54, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	282,70	160,86	12
38, 51, 54, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	283,34	161,22	10
15, 38, 51, 54, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	289,66	164,82	8
15, 38, 51, 54, 96, 106, 120, 126, 128, 131, 135, 136, 137, 141, 144, 146, 147, 148, 149, 150, 151	327,34	186,26	6

Fonte: elaborada pela autora.

Foram encontradas 7 (sete) soluções para o caso 1 e 8 (oito) para o caso 2. Para os dois casos é necessário o mesmo número de comutações para atingir a solução que minimiza as perdas para a falta considerada, 20 comutações.

Outra contingência causada, foi a na linha 83, são apresentados nas tabelas B.3 e B.4, os conjuntos Pareto do caso 1 e 2, respectivamente.

Tabela B.3 – Falta na linha 83: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 54, 83, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151	282,17	160,56	26
7, 51, 53, 83, 84, 90, 95, 106, 119, 126, 128, 135, 137, 139, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151	282,93	160,99	24
7, 51, 53, 83, 84, 90, 95, 106, 119, 126, 135, 137, 139, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151, 155	283,20	161,14	22
7, 51, 53, 83, 84, 95, 106, 120, 126, 137, 139, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 155, 156	284,25	161,74	18
51, 53, 83, 84, 95, 106, 120, 126, 136, 137, 139, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 155, 156	285,72	162,57	16
7, 51, 53, 83, 95, 106, 120, 137, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155, 156	287,03	163,32	14
7, 51, 53, 83, 84, 106, 137, 139, 141, 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156	287,55	163,62	12
7, 51, 53, 83, 106, 137, 139, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156	288,84	164,35	10
7, 51, 83, 106, 137, 139, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156	289,33	164,63	8

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela B.4 – Falta na linha 83: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 54, 83, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151	282,18	160,56	18
7, 38, 51, 55, 83, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151	282,43	160,70	16
38, 51, 55, 83, 84, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 136, 137, 141, 144, 145, 147, 148, 150, 151	283,90	161,54	14
7, 38, 51, 55, 83, 84, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	284,23	161,73	12
38, 51, 55, 83, 84, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	285,70	162,56	10
38, 51, 55, 83, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	288,40	164,10	8
38, 51, 55, 83, 96, 110, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	311,05	176,99	6

Fonte: elaborada pela autora.

Percebe-se que são necessárias 26 manobras partindo da configuração padrão para atingir a topologia de mínimas perdas, enquanto partindo da proposta, são necessárias apenas 18.

Admitindo uma falta na linha 106, nas tabelas B.5 e B.6, são apresentados os conjuntos Pareto do caso 1 e 2, respectivamente.

Tabela B.5 – Falta na linha 106: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,21	159,44	18
35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 136, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,85	159,80	16
51, 53, 90, 96, 106, 118, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 155	281,75	160,32	14
51, 90, 106, 118, 126, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 152, 155	283,73	161,44	12
51, 90, 106, 118, 135, 136, 137, 138, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 155, 156	284,93	162,13	10
51, 106, 118, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155	286,62	163,09	8

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela B.6 – Falta na linha 106: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,21	159,44	20
35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 136, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,85	159,80	18
35, 51, 90, 96, 106, 120, 126, 135, 136, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	282,04	160,48	16
38, 51, 84, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	283,15	161,11	12

Fonte: elaborada pela autora.

Foram encontradas 6 (seis) soluções para o caso 1 e 4 (quatro) para o caso 2. Para atingir a configuração de perdas mínimas, a partir padrão são necessárias menos manobras (18) do que a partir da proposta, 20.

Foi provocada também uma falta na linha 149 do sistema de 136 barras, escolhida aleatoriamente. São observados nas Tabelas B.7 e B.8 os resultados obtidos para os casos 1 e 2, respectivamente.

Tabela B.7 – Falta na linha 149: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 54, 84, 96, 106, 119, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	282,39	160,68	22
7, 38, 51, 53, 96, 106, 120, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155, 156	282,59	160,79	14
7, 51, 53, 96, 106, 120, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155, 156	282,93	160,99	12
51, 53, 96, 106, 120, 136, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155, 156	283,56	161,35	10
7, 54, 106, 119, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155, 156	285,88	162,67	8
54, 106, 119, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155, 156	286,52	163,03	6

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela B.8 – Falta na linha 149: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 54, 84, 96, 106, 119, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	282,39	160,68	16
7, 38, 51, 54, 96, 106, 119, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	282,66	160,83	14
7, 38, 51, 54, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	282,70	160,86	12
7, 38, 51, 55, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	283,17	161,12	10
38, 51, 55, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	283,81	161,49	8
15, 38, 51, 55, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	290,13	165,08	6

Fonte: elaborada pela autora.



O NSGA-II encontrou a mesma quantidade de soluções para ambos os casos. No caso 2, para atingir a solução que minimiza as perdas para a falta considerada, são necessários somente 16 chaveamentos enquanto no caso 1, são necessárias 22 manobras.

Outra contingência foi provocada, mas na linha 84. Nas tabelas B.9 e B.10 estão os resultados encontrados a partir da configuração padrão e proposta, respectivamente.

Tabela B.9 – Falta na linha 84: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão (caso 1).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 54, 84, 95, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	281,99	160,46	22
7, 38, 51, 84, 95, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	282,55	160,77	20
38, 51, 54, 84, 95, 106, 120, 135, 136, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155	283,39	161,25	16
51, 54, 84, 95, 106, 120, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155	284,03	161,62	14
51, 54, 84, 95, 106, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 143, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 154, 155	287,68	163,69	12

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela B.10 – Falta na linha 84: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 54, 84, 95, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	282,00	160,46	16
7, 38, 51, 55, 84, 95, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	282,39	160,68	14
7, 38, 51, 55, 84, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	282,46	160,72	12
38, 51, 55, 84, 96, 106, 120, 126, 128, 135, 136, 137, 138, 141, 144, 145, 147, 148, 149, 150, 151	283,10	161,08	10
38, 51, 55, 83, 84, 96, 106, 120, 126, 128, 131, 135, 136, 137, 141, 144, 147, 148, 149, 150, 151	303,06	172,44	8

Fonte: elaborada pela autora.

Foram obtidas a mesma quantidade de soluções para ambos os casos. No caso 2, para atingir a solução que minimiza as perdas para a falta considerada, são necessários somente 16 comutações enquanto no caso 1, são necessárias 22 comutações.

Causando uma contingência na linha 53, nas tabelas B.11 e B.12 são mostrados os resultados encontrados a partir da configuração padrão e proposta, respectivamente.

Tabela B.11 – Falta na linha 53: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial padrão.

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,50	159,61	20
7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 155	280,84	159,80	18
7, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 135, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 155	281,12	159,96	16
51, 53, 90, 96, 106, 118, 135, 136, 137, 138, 139, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 155	281,75	160,32	14

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela B.12 – Falta na linha 53: conjunto Pareto para o sistema de 136 barras com configuração inicial proposta (SOL136-31) (caso 2).

Topologia	Perdas(kW)	Custo das perdas (R\$)	Nº de Chaveamentos
7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151, 155	280,50	159,61	18
7, 38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151	280,74	159,74	16
38, 51, 53, 90, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 136, 137, 138, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151	281,38	160,10	14
38, 51, 53, 83, 96, 106, 118, 126, 128, 135, 136, 137, 141, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151	288,06	163,91	12

Fonte: elaborada pela autora.

Para os dois casos foram encontrados a mesma quantidade de resultados. Supondo a falta na topologia padrão, a topologia com mínimas perdas é alcançada com 20 chaveamentos, porém, a partir da configuração proposta, são necessários 18.

## ANEXO A – DADOS DOS SISTEMAS TESTES

### A.1 Sistema de 16 Barras

Os dados desse sistema foram extraídos de Cinvalar et al. (1988). Os dados das barras e das linhas se encontram na Tabela A.1. O valor base da tensão é 23,00 kV e o valor base da potência é 100 MW.

Tabela A.1 – Dados das barras e das linhas do sistema de 16 barras.

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (pu)	Reatância do ramo (pu)	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kVar)
1	1	2	0,075	0,1	0	0
2	2	3	0,08	0,11	2000	1600
3	2	4	0,09	0,18	3000	400
4	4	5	0,04	0,04	2000	-400
5	1	6	0,11	0,11	1500	1200
6	6	7	0,08	0,11	4000	2700
7	6	8	0,11	0,11	5000	1800
8	7	9	0,11	0,11	1000	900
9	7	10	0,08	0,11	600	-500
10	1	11	0,11	0,11	4500	-1700
11	11	12	0,09	0,12	1000	900
12	11	13	0,08	0,11	1000	-1100
13	13	14	0,04	0,04	1000	900
14	3	9	0,04	0,04	2100	-800
15	8	12	0,04	0,04	0	0
16	5	14	0,09	0,12	0	0

## A.2 Sistema de 33 Barras

Os dados desse sistema foram extraídos de Baran e Wu (1989). Os dados das barras e das linhas se encontram na Tabela A.2. O valor base da tensão é 12,66 kV e o valor base da potência é 100 MW.

Tabela A.2 – Dados das barras e das linhas do sistema de 33 barras.

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (pu)	Reatância do ramo (pu)	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kVar)
1	1	2	0,0575	0,0293	0	0
2	2	3	0,3076	0,1567	100	60
3	3	4	0,2283	0,1163	90	40
4	4	5	0,2378	0,1211	120	80
5	5	6	0,5110	0,4411	60	30
6	6	7	0,1168	0,3861	60	20
7	7	8	0,4438	0,1467	200	100
8	8	9	0,6426	0,4617	200	100
9	9	10	0,6514	0,4617	60	20
10	10	11	0,1227	0,0406	60	20
11	11	12	0,2336	0,0772	45	30
12	12	13	0,9159	0,7206	60	35
13	13	14	0,3379	0,4448	60	35
14	14	15	0,3687	0,3282	120	80
15	15	16	0,4656	0,3400	60	10
16	16	17	0,8042	1,0737	60	20
17	17	18	0,4567	0,3581	60	20
18	2	19	0,1023	0,0976	90	40
19	19	20	0,9385	0,8456	90	40
20	20	21	0,2555	0,2985	90	40
21	21	22	0,4423	0,5848	90	40
22	3	23	0,2815	0,1923	90	40
23	23	24	0,5603	0,4424	90	50
24	24	25	0,5590	0,4374	420	200
25	6	26	0,1267	0,0645	420	200
26	26	27	0,1773	0,0903	60	25
27	27	28	0,6607	0,5825	60	25
28	28	29	0,5017	0,4371	60	20
29	29	30	0,3166	0,1613	120	70
30	30	31	0,6079	0,6008	200	600
31	31	32	0,1937	0,2258	150	70
32	32	33	0,2127	0,3308	210	100
33	21	8	1,2478	1,2478	60	40
34	9	15	1,2478	1,2478	0	0
35	12	22	1,2478	1,2478	0	0

36	18	33	0,3120	0,3120	0	0
37	25	29	0,3120	0,3120	0	0

### A.3 Sistema de 84 Barras

Os dados desse sistema foram extraídos de Chiou et al. (2005). Os dados das barras e das linhas se encontram na Tabela A.3. O valor base da tensão é 11,4 kV e o valor base da potência é 100 MW

Tabela A.3 – Dados das barras e das linhas do sistema de 84 barras.

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (pu)	Reatância do ramo (pu)	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kVar)
1	1	84	0,1496	0,5097	0	0
2	1	2	0,1613	0,3312	100	50
3	2	3	0,1814	0,3726	300	200
4	3	4	0,0706	0,1449	350	250
5	4	5	0,1613	0,3312	220	100
6	5	6	0,0302	0,0621	1100	800
7	6	7	0,0312	0,1062	400	320
8	7	8	0,0806	0,1656	300	200
9	7	9	0,1814	0,3726	300	230
10	7	10	0,0806	0,1656	300	260
11	11	84	0,0605	0,1242	0,9	0
12	11	12	0,2621	0,5343	1200	800
13	12	13	0,0202	0,0414	800	600
14	12	14	0,0605	0,1242	700	500
15	15	84	0,0873	0,2973	0	0
16	15	16	0,0403	0,0828	300	150
17	16	17	0,0403	0,0828	500	350
18	17	18	0,121	0,2484	700	400
19	18	19	0,0302	0,0621	1200	1000
20	19	20	0,131	0,2691	300	300
21	20	21	0,1814	0,3726	400	350
22	21	22	0,121	0,2484	50	20
23	21	23	0,1512	0,3105	50	20
24	23	24	0,1008	0,207	50	10
25	25	84	0,0436	0,1487	50	30
26	25	26	0,0806	0,1656	100	60
27	26	27	0,1915	0,3933	100	70
28	27	28	0,0374	0,1274	1800	1300
29	28	29	0,1008	0,207	200	120
30	30	84	0,1512	0,3047	0	0
31	30	31	0,1008	0,207	1800	1600

32	31	32	0,1008	0,207	200	150
33	32	33	0,0202	0,0414	200	100
34	33	34	0,131	0,2691	800	600
35	34	35	0,0403	0,0828	100	60
36	35	36	0,383	0,7865	100	60
37	36	37	0,0302	0,0621	20	10
38	37	38	0,0302	0,0621	20	10
39	38	39	0,0605	0,1242	20	10
40	39	40	0,1613	0,3312	20	10
41	38	41	0,1512	0,3105	200	160
42	41	42	0,1613	0,3312	50	30
43	43	84	0,0374	0,1274	0	0
44	43	44	0,0302	0,0621	30	20
45	44	45	0,1008	0,207	800	700
46	45	46	0,1814	0,3726	200	150
47	47	84	0,187	0,6371	0	0
48	47	48	0,0504	0,1035	0	0
49	48	49	0,0504	0,1035	0	0
50	49	50	0,0302	0,0621	200	160
51	50	51	0,0605	0,1242	800	600
52	51	52	0,0302	0,0621	500	300
53	52	53	0,0605	0,1242	500	350
54	53	54	0,0403	0,0828	500	300
55	54	55	0,1008	0,207	200	80
56	56	84	0,1745	0,5946	0	0
57	56	57	0,4133	0,8486	30	20
58	57	58	0,0403	0,0828	600	420
59	58	59	0,0312	0,1062	0	0
60	59	60	0,0302	0,0621	20	10
61	60	61	0,0202	0,0414	20	10
62	61	62	0,0806	0,1656	200	130
63	62	63	0,1814	0,3726	300	240
64	63	64	0,0187	0,0637	300	200
65	65	84	0,0374	0,1274	0	0
66	65	66	0,131	0,2691	50	30
67	66	67	0,0935	0,3186	0	0
68	67	68	0,1683	0,5734	400	360
69	68	69	0,0374	0,1274	0	0
70	69	70	0,0561	0,1911	0	0
71	70	71	0,0436	0,1487	2000	1500
72	71	72	0,0202	0,0406	200	150
73	73	84	0,2493	0,8495	0	0
74	73	74	0,0249	0,0849	0	0
75	74	75	0,0436	0,1487	1200	950

76	75	76	0,0374	0,1274	300	180
77	77	84	0,1932	0,6584	0	0
78	77	78	0,0997	0,3398	400	360
79	78	79	0,0374	0,1274	2000	1300
80	79	80	0,1008	0,2031	200	140
81	80	81	0,1008	0,2031	500	360
82	81	82	0,0706	0,1449	100	30
83	82	83	0,2419	0,4968	400	360
84	5	55	0,1008	0,207	0	0
85	7	60	0,1008	0,207	0	0
86	11	43	0,1008	0,207	0	0
87	12	72	0,2621	0,5382	0	0
88	13	76	0,3528	0,7245	0	0
89	14	18	0,4133	0,8329	0	0
90	16	26	0,0706	0,1449	0	0
91	20	83	0,0605	0,1242	0	0
92	28	32	0,0403	0,0828	0	0
93	29	39	0,0605	0,1242	0	0
94	34	46	0,0202	0,0414	0	0
95	40	42	0,1512	0,3105	0	0
96	53	64	0,0302	0,0621	0	0

#### A.4 Sistema de 136 Barras

Os dados desse sistema foram extraídos de Mantovani et al. (2000). Os dados das barras e das linhas se encontram na Tabela A.4. O valor base da tensão é 13,8 kV e o valor base da potência: 100 MW.

Tabela A.4 – Dados das barras e das linhas do sistema de 136 barras.

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (pu)	Reatância do ramo (pu)	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kVar)
136	136	1	0,1744	0,4025	0	0
1	1	2	0,001	0,0023	0	0
2	2	3	0,1172	0,2706	47,78	19,01
3	3	4	0,0522	0,1205	42,55	16,93
4	4	5	0,0818	0,1887	87,02	34,62
5	5	6	0,0857	0,1978	311,31	123,86
6	6	7	0,0601	0,1387	148,87	59,23
7	6	8	0,0298	0,0298	238,67	94,96
8	8	9	0,2737	0,144	62,3	24,79
9	8	10	0,0571	0,057	124,6	49,57

10	10	11	0,209	0,1099	140,18	55,77
11	10	12	0,4817	0,1652	116,81	46,47
12	10	13	0,0621	0,062	249,2	99,14
13	13	14	0,2637	0,1387	291,45	115,95
14	13	15	0,0298	0,0298	303,72	120,84
15	15	16	0,1543	0,0811	215,4	85,69
16	136	17	0,1744	0,4025	198,59	79,01
17	17	18	0,001	0,0023	0	0
18	18	19	0,1172	0,2706	0	0
19	19	20	0,0571	0,1319	0	0
20	20	21	0,3732	0,1963	30,13	14,73
21	20	22	0,0956	0,2206	230,97	112,92
22	22	23	0,1592	0,0838	60,26	29,46
23	22	24	0,0128	0,0296	230,97	112,92
24	24	25	0,0236	0,0546	120,51	58,91
25	25	26	0,0099	0,0227	0	0
26	26	27	0,0621	0,062	56,98	27,86
27	27	28	0,0124	0,0124	364,67	178,28
28	28	29	0,0995	0,0524	0	0
29	29	30	0,209	0,1099	124,65	60,94
30	28	31	0,0298	0,0298	56,98	27,86
31	31	32	0,0498	0,0262	0	0
32	32	33	0,219	0,1152	85,47	41,79
33	33	34	0,0597	0,0314	0	0
34	31	35	0,0397	0,0397	396,74	193,96
35	35	36	0,1941	0,1021	0	0
36	36	37	0,1393	0,0733	181,15	88,56
37	35	38	0,0298	0,0298	242,17	118,4
38	136	39	0,1744	0,4025	75,32	36,82
39	39	40	0,0621	0,1433	0	0
40	40	41	1,5558	0,5336	1,25	0,53
41	40	42	0,001	0,0023	6,27	2,66
42	42	43	0,0364	0,0841	0	0
43	43	44	0,428	0,2251	117,88	49,97
44	43	45	0,0335	0,0773	62,67	26,57
45	45	46	0,069	0,1592	172,29	73,03
46	46	47	0,0325	0,075	458,56	194,39
47	47	48	0,0601	0,1387	262,96	111,47
48	48	49	0,149	0,1488	235,76	99,94
49	49	50	0,149	0,1488	0	0
50	48	51	0,0236	0,0546	109,22	46,3
51	51	52	0,0138	0,0318	0	0
52	52	53	0,0315	0,0728	72,81	30,86
53	53	54	0,0158	0,0364	258,47	109,57



54	54	55	0,0108	0,025	69,17	29,32
55	52	56	0,0571	0,1319	21,84	9,26
56	56	57	0,1344	0,0707	0	0
57	57	58	0,219	0,1152	20,53	8,7
58	58	59	0,2637	0,1387	150,55	63,82
59	59	60	0,1742	0,0916	220,69	93,55
60	60	61	0,1095	0,0576	92,38	39,16
61	47	62	0,0729	0,1683	0	0
62	136	63	0,0039	0,0091	226,69	96,1
63	63	64	0,1419	0,3275	0	0
64	64	65	0,201	0,4639	294,02	116,97
65	65	66	0,1734	0,4002	83,02	33,03
66	66	67	0,1724	0,398	83,02	33,03
67	67	68	0,0896	0,2069	103,77	41,28
68	68	69	0,2936	0,1544	176,41	70,18
69	68	70	0,0305	0,0705	83,02	33,03
70	70	71	0,3683	0,1937	217,92	86,7
71	71	72	0,5375	0,2827	23,29	9,27
72	70	73	0,0355	0,0819	5,08	2,02
73	73	74	0,695	0,2384	72,64	28,9
74	136	75	0,0059	0,0136	405,99	161,52
75	75	76	0,3832	0,8846	0	0
76	76	77	0,1182	0,2729	100,18	42,47
77	77	78	0,1093	0,2524	142,52	60,42
78	78	79	0,0246	0,0569	96,04	40,71
79	79	80	0,3253	0,3248	300,45	127,37
80	80	81	0,1788	0,1785	141,24	59,87
81	81	82	0,2986	0,1571	279,85	118,63
82	81	83	0,0571	0,057	87,31	37,01
83	83	84	0,2986	0,1571	243,85	103,37
84	136	85	0,0059	0,0136	247,75	105,03
85	85	86	0,2197	0,5071	0	0
86	86	87	0,0551	0,0716	89,88	38,1
87	86	88	0,2305	0,5321	1137,28	482,11
88	88	89	0,0395	0,0135	458,34	194,3
89	89	90	0,0404	0,0932	385,2	163,29
90	90	91	0,1744	0,4025	0	0
91	91	92	0,0443	0,1023	79,61	33,75
92	92	93	0,0699	0,1615	87,31	37,01
93	93	94	0,154	0,1537	0	0
94	94	95	0,1142	0,1141	74	31,37
95	95	96	0,1391	0,1389	232,05	98,37
96	93	97	0,0542	0,1251	141,82	60,12
97	97	98	0,0709	0,1637	0	0

98	136	99	0,0049	0,0114	76,45	32,41
99	99	100	0,0887	0,2047	0	0
100	100	101	0,0621	0,1433	51,32	21,76
101	101	102	1,2004	0,4118	59,87	25,38
102	101	103	0,2394	0,5526	9,06	3,84
103	103	104	0,3655	0,8437	2,09	0,89
104	104	105	0,2404	0,5549	16,74	7,09
105	105	106	0,1066	0,1385	1506,52	638,63
106	106	107	0,1121	0,1456	313,02	132,69
107	107	108	0,2886	0,1518	79,83	33,84
108	108	109	0,2837	0,1492	51,32	21,76
109	107	110	0,0239	0,031	0	0
110	110	111	0,2488	0,1309	202,44	85,81
111	111	112	0,4529	0,2382	60,82	25,78
112	112	113	0,2986	0,1571	45,62	19,34
113	108	114	0,4081	0,2147	0	0
114	114	115	0,5673	0,2984	157,07	66,58
115	109	116	0,5773	0,3036	0	0
116	116	117	0,2488	0,1309	250,15	106,04
117	104	118	0,1694	0,3911	0	0
118	118	119	0,0768	0,1774	69,81	29,59
119	119	120	0,065	0,1501	32,07	13,6
120	136	121	0,0059	0,0136	61,08	25,89
121	121	122	0,3408	0,7868	0	0
122	122	123	0,0236	0,0546	94,62	46,26
123	123	124	0,2764	0,0948	49,86	24,37
124	123	125	0,0108	0,025	123,16	60,21
125	125	126	0,2787	0,1466	78,35	38,3
126	125	127	0,0512	0,1183	145,48	71,12
127	127	128	0,0621	0,1433	21,37	10,45
128	127	129	0,0729	0,1683	74,79	36,56
129	129	130	0,0227	0,0523	227,93	111,43
130	130	131	0,0483	0,1114	35,61	17,41
131	131	132	0,0847	0,1956	249,3	121,88
132	132	133	0,1987	0,1984	316,72	154,84
133	133	134	0,2086	0,2083	333,82	163,2
134	134	135	0,154	0,1537	249,3	121,88
135	7	73	0,069	0,1592	0	0
137	9	24	0,1393	0,0733	0	0
138	15	83	0,0745	0,0744	0	0
139	38	135	0,0447	0,0446	0	0
140	25	51	0,0236	0,0546	0	0
141	50	96	0,0745	0,0744	0	0
142	55	98	0,0745	0,0744	0	0

143	62	120	0,0207	0,0478	0	0
144	66	79	0,068	0,1569	0	0
145	79	131	0,0089	0,0205	0	0
146	84	135	0,1742	0,0916	0	0
147	91	104	0,0745	0,0744	0	0
148	90	129	0,0404	0,0932	0	0
149	90	103	0,0404	0,0932	0	0
150	92	104	0,0404	0,0932	0	0
151	92	132	0,0404	0,0932	0	0
152	96	120	0,1391	0,1389	0	0
153	110	47	0,261	0,339	0	0
154	126	76	0,0896	0,0471	0	0
155	128	77	0,0276	0,0637	0	0
156	135	98	0,154	0,1537	0	0

---