

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

**OPERAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO,
UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS E
LÓGICA FUZZY, CONSIDERANDO A CURVA DE CARGA DIÁRIA**

GUILLERMO PEDRO ALONSO CARDOZO

Itajubá, Agosto de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

GUILLERMO PEDRO ALONSO CARDOZO

**OPERAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO,
UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS E
LÓGICA FUZZY, CONSIDERANDO A CURVA DE CARGA DIÁRIA**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Itajubá, como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.**

Área de concentração: Sistemas
Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Antonio Carlos
Zambroni de Souza

Agosto de 2018

ITAJUBÁ, MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

GUILLERMO PEDRO ALONSO CARDOZO

**OPERAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO,
UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS E
LÓGICA FUZZY, CONSIDERANDO A CURVA DE CARGA DIÁRIA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 28 de Agosto de 2018, conferindo ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza (Orientador)

Prof. Dr. Benedito Isaías de Lima Lopes (UNIFEI)

Prof. Dr. Adriano Batista de Almeida (UNIOESTE)

Itajubá 2018

*Dedicado a meus queridos pais, meus
irmãos, e especialmente a minha enamorada,
amiga e esposa Perla.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tornar esse esforço possível.

Ao Professor Dr. Antonio Carlos Zambroni, pela ajuda, apoio, confiança, exigência e fundamentalmente pela amizade sincera.

A meus queridos pais e meus irmãos pelo apoio constante.

Aos diretivos e colegas da ANDE pelo apoio para alcançar esta meta.

Aos colegas da UNI pela confiança.

Agradeço especialmente a minha enamorada, amiga e esposa Perla pelo apoio, compreensão e ajuda nos momentos necessários.

RESUMO

A eficiência na operação dos sistemas elétricos é um desafio cada vez maior para as empresas concessionárias, quanto à redução das perdas elétricas, o aumento da confiabilidade do sistema, e a qualidade do abastecimento aos usuários.

O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia de otimização para a reconfiguração horária de uma rede de distribuição do tipo radial com recursos, considerando os dados da curva de carga diária estimada.

A reconfiguração horária da rede é abordada como um problema de otimização multiobjetivo, onde os objetivos são a minimização das perdas elétricas, do desvio da tensão de seu valor nominal e do desequilíbrio das correntes nos circuitos.

Analisa-se dois problemas, primeiro a reconfiguração para a demanda fixa considerando a corrente média dos circuitos no período de tempo considerado, e o segundo problema considerando a demanda variável propondo três mudanças da configuração do sistema por dia, considerando esta condição como uma restrição da operação levando em conta a vida útil do equipamento, o estudo pode ser posteriormente estendido a diferentes quantidades de operações diárias.

São considerados 24 níveis de carga (demanda média horária), obtidos da estimação da curva de carga por cada alimentador em uma determinada configuração, para cada nível de carga é utilizado um fluxo de potência adequado considerando o desequilíbrio presente nas redes de distribuição.

É utilizada a representação topológica da rede mediante a Teoria de Grafos devido a sua versatilidade e ampla utilização nos problemas de distribuição aferida pela bibliografia consultada, as diferentes configurações são obtidas mediante operações algébricas propostas neste trabalho.

Para a abordagem do problema é proposto um novo algoritmo baseado na heurística de Sistemas Imunológicos Artificiais, com o auxílio da lógica Fuzzy para a procura da solução do problema multiobjetivo, propondo modificações de forma a melhorar o desempenho quanto à procura da solução e custo computacional.

Palavras-chave: *Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição; Sistemas Imunológicos Artificiais; lógica Fuzzy, fluxo de potência*

ABSTRACT

Efficiency in the operation of electrical systems is an increasing challenge for concessionaires, reducing electric losses, increasing system reliability, and quality of supply to users.

The present work aims to propose an optimization methodology for the hourly reconfiguration of a distribution network of the radial type with resources, considering the data of the estimated daily load curve.

The hourly reconfiguration of the network is approached as a multiobjective optimization problem, where the objectives are the minimization of electrical losses, the deviation of the voltage of its nominal value and the imbalance of the currents in the circuits.

We analyze two problems, first the reconfiguration for the fixed demand considering the average current of the circuits in the period of time considered, and the second problem considering the variable demand proposing three changes of the configuration of the system per day, considering this condition as a restriction of the operation taking into account the life of the equipment, the study can be further extended to different quantities of daily operations.

Are considered 24 load levels, average demand per hour, obtained from the estimation of the load curve for each feeder in a given configuration, for each load level an adequate power flow is used considering the imbalance present in the power networks distribution.

The topological representation of the network is used through the Theory of Graphs due to its versatility and wide use in the distribution problems ascertained by the consulted bibliography, the different configurations are obtained through algebraic operations proposed in this work.

In order to approach the problem, a new algorithm based on the Artificial Immunological Systems heuristic is proposed, with the aid of Fuzzy logic to solve the multiobjective problem, proposing modifications in order to improve the performance regarding the solution search and computational cost.

Keywords: *Reconfiguration of Electrical Distribution Systems; Artificial Immunological Systems; Fuzzy logic, power flow*

SUMARIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. Introdução.	1
1.1. Revisão bibliográfica.....	3
1.2. Motivação.....	5
2. Representação do Sistema de Distribuição Radial através de Grafos.	7
2.1. Breve histórico	7
2.2. Definições Principais.....	8
2.3. Árvores:.....	11
2.4. Floresta.....	11
2.5. Matriz de Incidência de Elementos.	12
2.6. Matriz de Adjacências e Matriz de Alcance.....	13
2.6.1. Lista de Adjacência.	15
2.7. Algoritmo de Prim.....	16
2.8. Laços Fundamentais (Fundamental Loops)	16
2.8.1. Formação de árvores mediante laços fundamentais:	17
2.9. Representação da Rede.....	19
2.9.1. Obtenção de diferentes configurações.....	22
2.10. Operações Algébricas utilizadas	23
2.10.1. Construção das matrizes de incidência e alcance: Sistema IEEE de 33 barras.	23
2.8.2 Alteração da Configuração	28
3. Fluxo de Potência.....	36
3.1. Método da soma de potência:.....	37
3.2. Método de Suma de Correntes.	39
3.2.1. Rateio da demanda dos alimentadores nas barras de carga.	42
3.3. Características do Sistema Elétrico de Distribuição em estudo - O caso Paraguaio.	45
3.3.1. Redes de Distribuição do tipo Urbano.	45
3.3.2. Redes de Distribuição do tipo Rural.....	45
4. Logica Fuzzy	47
4.1. Funções de Pertinência (Membership Function – MF).	49
4.1.1 Função de saturação:	50
4.1.2. Função Ombro.....	50
4.1.3. Função Triangular	50

4.1.4. Função Trapezoidal	51
4.1.5. Função Gaussiana.....	51
4.1.6. Função S ou Sigmoide.....	52
4.2. Aplicações da Lógica Fuzzy na Optimização Multiobjetivo	52
4.2.1. Optimização Multiobjetivo	52
4.2.2. Formulação Matemática.....	53
4.2.3. Metodologia baseada na Dominância de Pareto.....	53
4.2.3.1. Dominância de Pareto:	53
4.2.3.2. Solução Ótima de Pareto/ Solução Não dominada.....	54
4.2.3.3. Conjunto ótimo de Pareto.....	54
4.2.3.4. Frente de Pareto.....	54
4.2.4. Metodologia baseada na Lógica Fuzzy	54
5. Sistemas Imunológicos Artificiais	57
5.1. O Sistema Imunológico.....	57
5.2. Características do Sistema Imunológico	58
5.3. Sistema Imunológico Artificial.....	60
5.3.1. Principais Definições e Características do Sistema Imune.....	60
5.4. O princípio de Seleção Clonal.....	63
5.5. Optimização baseada no Algoritmo de Seleção Clonal.	65
5.5.1. Diagrama de fluxo do Algoritmo de Seleção Clonal.....	66
5.5.2. Estado do Arte dos AIS – Aplicações.	67
5.6. Algoritmos Principais Baseados em AIS	68
5.6.1. CLONALG.....	68
5.6.2. Algoritmo Opt-Ainet	71
5.6.4 Algoritmo Proposto EAIS	72
6. Reconfiguração de Sistemas Eléctricos de Distribuição Radial.....	74
6.1. Considerações preliminares.....	74
6.1.1. Notação	74
6.1.2. Sistemas utilizados	74
6.1.2.1. Sistemas Testes	75
6.1.2.2. Sistema Real.....	77
6.1.3. Dados de Demanda horária	78
6.1. Funções Objectivos Analisadas	81
6.1.1. Função Perdas.	81
6.1.2. Função Balanço de Carga.....	83

6.1.3. Função Desvio da tensão.....	85
6.2. Formulação do problema a demanda fixa	87
6.3. Formulação do problema a demanda variável considerando a Curva de Carga.....	88
6.4. Análise Multiobjetivo mediante Lógica Fuzzy	88
6.4.1. Fuzzificação das perdas de potência elétrica.....	88
6.4.2. Fuzzificação do desequilíbrio das correntes dos alimentadores.....	89
6.4.3. Fuzzificação do desvio da tensão	90
6.4.4. Ponderação da função objetivo Fuzzificada.....	91
6.4.5. Formulação do problema de maximização da função objetivo fuzzificada	92
6.5. Algoritmo Proposto para a solução do problema de reconfiguração	92
6.5.1. Fluxogramas Propostos para Otimização demanda fixa e demanda variável	93
6.5.2. Processo de Clonagem – Hipermutação Proposta.....	94
6.5.3. Exemplo de Processo de Clonagem – Hipermutação Proposta.....	96
7. Resultados	101
7.1 Sistemas Testes	101
7.1.1. Sistemas Teste de 33 barras.....	101
7.1.2. Sistemas Teste de 84 barras.....	103
7.1.3. Sistemas Teste de 136 barras.....	104
7.2. Sistema Real do Microcentro de Encarnação.....	105
8. Conclusões	116
8.1 . Temas para Trabalhos Futuros	118
Referencias.....	120
<i>ANEXOS</i>	124
A. Dados de Sistema Teste de 84 Barras	124
B. Dados de Sistema Teste de 136 Barras	126
C. Dados de Sistema Real de Encarnação.....	128

Lista de Figuras.

Figura 1: Problema dos Pontes de Königsberg	7
Figura 2: Grafo não Orientado e Grafo Orientado	8
Figura 3: Grafo Completo	9
Figura 4: Grafo - Caminhos	10
Figura 5: Exemplo de um Sistema Elétrico de Distribuição apresentado por um Grafo.....	11
Figura 6: Matriz de Incidência de Elementos.....	12
Figura 7: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.	13
Figura 8: Matriz de Adjacências	14
Figura 9: Matriz de Alcance.....	14
Figura 10: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.	18
Figura 11: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.	18
Figura 12: Grafo de Sistema de Distribuição	20
Figura 13: Diagrama Unifilar do Sistema Trifásico e seu correspondente Grafo. Fonte: [14]	21
Figura 14: Grafo do Sistema Teste de 33 barras	26
Figura 15: Matriz de Incidência. Configuração Inicial.	27
Figura 16: Matriz de Alcance R_0 da Configuração Inicial	27
Figura 17: Matriz de Alcance $R_0 *$, com anel formado por fechamento da chave 36	31
Figura 18: Grafo $G_0 *$ do Sistema Teste de 33 barras com anel, chave 36 fechada.....	32
Figura 19: Grafo $G_0 **$ do Sistema Teste de 33 barras . Chave 36 fechada e chave 13 aberta.	32
Figura 20: Matriz de Alcance $R_0 **$, chave 36 fechada e chave 13 aberta, (sem corrigir).....	33
Figura 21: Matriz de Alcance R_1 , chave 36 fechada e chave 13 aberta, (corrigida).....	33
Figura 22: Grafo $G_0 **$ do Sistema Teste de 33 barras . Chave 36 fechada e chave 13 aberta (corrigida).....	34
Figura 23: Método de varredura iterativo.....	37
Figura 24: Esquema de Nó Típico.....	38
Figura 25: Fluxograma do método de soma de potência.....	38
Figura 26: Diagrama de fluxo do algoritmo proposto	40
Figura 27: Distribuição de Cargas no alimentador.....	43
Figura 28: Controlador Fuzzy Mamdani . Estrutura Básica.....	49
Figura 29: Exemplo de Função de Pertinência.....	49
Figura 30: Função de Pertinência de Saturação	50
Figura 31: Função de Pertinência Ombro	50
Figura 32: Função de pertinência triangular.....	51
Figura 33: Função de pertinência trapezoidal	51
Figura 34: Função de pertinência gaussiana.....	51
Figura 35: Função de pertinência S ou Sigmoide.....	52
Figura 36: Abordagem do Problema Multiobjetivo com Lógica Fuzzy.....	55
Figura 37: Princípio de Seleção Clonal.....	65
Figura 38: Fluxograma do Algoritmo de Seleção Clonal.....	66
Figura 39: Sistema Teste de 14 barras [14].....	77
Figura 40: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.	77
Figura 41: Dados de Demanda de Tipo Comercial Estimada para o Alimentador 1 do dia de trabalho em [A]	79
Figura 42: Dados de Demanda Média de Tipo Comercial Estimada para o Alimentador 1 do dia Laboral em [A]......	80
Figura 43: Curvas Estimadas no cenário proposto.....	81
Figura 44: Demanda Horária média em [A] do alimentador de exemplo de um dia típico.	83

Figura 45: Demandas de Correntes de alimentadores	84
Figura 46: SDR composto de n-alimentadores pertencente a uma Subestação qualquer.....	84
Figura 47: Função de pertinência das perdas elétricas	89
Figura 48: Função de pertinência do balanço de correntes	90
Figura 49: Função de pertinência do desvio das tensões.....	90
Figura 50: Fluxograma de Algoritmo Proposto para demanda fixa.....	93
Figura 51: Fluxograma de Algoritmo Proposto para Demanda Variável.....	94
Figura 52: Sistema Teste de 14 barras - Configuração Inicial $N_{21} = 9, 11, 16$	97
Figura 53: Mutação Leve – Alta Afinidade. $N_{21} = 9, 11, 16 \Rightarrow N_{21}^* = 9, 7, 16$	98
Figura 54: Mutação Forte – Baixa Afinidade $N_{210} = 11, 14, 10 \Rightarrow N_{210}^* = 11, 6, 10$	99
Figura 55: Mutação Sucessiva à Mutação Forte $N_{210}^* = 11, 6, 10 \Rightarrow N_{210}^{**} = 5, 6, 10$	99
Figura 56: Convergência de sistema de 33 barras. Algoritmo EAIS.	102
Figura 57: Convergência de sistema de 33 barras. Algoritmo AIS.....	102
Figura 58: Convergência de sistema de 84 barras. Algoritmo EAIS.	103
Figura 59: Convergência de sistema de 84 barras. Algoritmo AIS.....	104
Figura 60: Convergência de sistema de 136 barras. Algoritmo EAIS.	105
Figura 61: Convergência de sistema de 136 barras. Algoritmo AIS.....	105
Figura 62: Convergência de sistema Real. Função Objetivo Perdas.....	107
Figura 63: Convergência de sistema Real. Abordagem Multiobjetivo.	107
Figura 64: Grafos da Configuração inicial (esquerda) e configuração ótima a demanda constante (direita) do Micro Centro de Encarnação.	109
Figura 65: Perdas Elétricas. Otimização Demanda Variável versus Otimização a Demanda Constante Inicial.....	110
Figura 66: Perdas Elétricas. Otimização Demanda Variável versus Otimização a Demanda Constante Inicial.....	110
Figura 67: Perdas Elétricas. Otimização Demanda Variável versus Otimização a Demanda Constante Inicial.....	110
Figura 68: Correntes dos alimentadores. Condição Inicial versus Otimização a Demanda Variável considerando 3 trocas de configuração	112
Figura 69: Perdas Elétricas. Condição Inicial versus Otimização a Demanda Media	114
Figura 70: Perdas Elétricas. Otimização a Demanda Media Constante versus Otimização a Demanda Variável com 3 trocas de configuração.....	114
Figura 71: Tensão Extremas nas barras. Condição inicial versus Otimização a Demanda Variável com 3 trocas de configuração.....	115

Lista de Tabelas

Tabela 1: Lista de Adjacências do Grafo da Figura 7	15
Tabela 2: Dados de Ramos de Sistema Teste de 33 Barras.....	24
Tabela 3: Dados de Barras de Sistema Teste de 33 Barras	25
Tabela 4: Dados de Ramos de Sistemas Teste de 14 Barras	76
Tabela 5: Dados de Barras de Sistemas IEEE de 14 Barras.....	76
Tabela 6: Dados de corrente media [A] do Cenário de dia Laboral estimado	80
Tabela 7: Resultados de Sistema de 33 barras. Redução de Perdas.	102
Tabela 8: Resultados de Sistema de 84 barras. Redução de Perdas.	103
Tabela 9: Resultados de Sistema de 136 barras. Redução de Perdas.	104
Tabela 10: Resultados de Funções. Otimização com Demanda Constante. Sistema Real.....	106
Tabela 11: Chaves Abertas. Otimização com Demanda Constante. Sistema Real.	108
Tabela 12: Chaves Abertas. Otimização com Demanda Variável. Sistema Real.....	111
Tabela 13: Correntes dos alimentadores na condição inicial. Sistema Real.	111
Tabela 14: Correntes dos alimentadores. Resultado Ótimo	112
Tabela 15: Perdas Elétricas. Configuração Inicial e Otimizada. Sistema Real.	113

Os problemas significativos com os quais nos deparamos não podem ser resolvidos no mesmo nível de pensamento em que estávamos quando eles foram criados.

(Albert Einstein)

CAPÍTULO 1

1. Introdução.

A topologia dos sistemas elétricos de distribuição normalmente é do tipo radial. Esta configuração permite um desenho e uma operação das proteções de maneira mais simples e confiável. No entanto, esta disposição faz com grande parte da rede fique fora de serviço logo de uma falha no mesmo, e por isso, normalmente a disposição das chaves é feita de forma que em caso de uma falha ou um corte programado existam várias alternativas de abastecimento das cargas por outro circuito. Isto torna a configuração da rede do tipo radial com recurso. Isso é possível mediante umas chaves alocadas nas posições de fronteira chamadas de acoplamentos que são de posição normalmente abertas (NA), além de isso para isolar as falhas e facilitar as transferências de carga são colocadas chaves normalmente fechadas (NF) ao longo dos circuitos, isso amplia as quantidades das possíveis configurações.

Estas chaves podem ser feitas para ser operadas de forma manual ou podem ser instaladas chaves automáticas, que operam em forma telecomandada desde o Centro de Controle de Distribuição, para melhorar o tempo de operação e outros recursos de medição e automação.

Com a automação das redes elétricas de distribuição, os estudos de otimização da configuração em tempo real são fundamentais para a tomada de decisões dos operadores do sistema para o atendimento do serviço com qualidade e ao menor custo possível.

Numerosos estudos são realizados neste sentido, tanto para a alocação ótima das chaves automáticas como para a configuração ótima das redes elétricas, principalmente os estudos são feitos considerando um nível fixo de demanda que pode ser geralmente a máxima demanda de certo período de tempo, a demanda média, ou a demanda instantânea dos circuitos.

Neste trabalho é abordado o problema de reconfiguração ótima considerando primeiro a análise com demanda fixa e logo com demanda variável que pode ser obtida mediante a previsão de curva de carga diária. Esta demanda variável é introduzida de forma

discreta com 24 valores os quais são distribuídos pelas barras de carga de cada circuito, de modo a realizar um planejamento na operação diária.

O problema é abordado mediante uma otimização multiobjetivo, onde as funções a minimizar são as perdas de potência (perdas de energia no caso de demanda variável), o desvio da tensão de seu valor nominal, e o balanço das demandas dos alimentadores.

Para a solução do problema de otimização é escolhida uma abordagem meta-heurística, por se tratar de um problema combinatório, não linear e com variáveis contínuas e inteiras. A heurística utilizada para a procura da solução do problema é baseada em Sistema Imunológico Artificial (AIS).

Vários trabalhos foram abordados com a heurística de AIS, em [1], para a solução do problema de reconfiguração em sistemas de distribuição multiobjetivo (redução de perdas e melhora da confiabilidade), onde esta análise é baseada na Dominância de Pareto.

Em [2] foi utilizado um algoritmo baseado em AIS chamado CLONR. Esse algoritmo é uma adequação do algoritmo CLONALG que é a versão inicial do AIS.

Em [3] foi utilizado dois algoritmos: Copt-aiNet (*Artificial Immune Network for Combinatorial Optimization*) e Opt-aiNet (*Artificial Immune Network for Optimization*). Esses algoritmos são inspirados nas Redes Imunes que basicamente é uma variante dos algoritmos AIS.

O presente trabalho propõe utilizar a heurística de AIS similar ao utilizado em [1] e também ao algoritmo CLONR proposto em [2], mas com uma nova proposta introduzindo uma melhoria no processo de hipermutação e também incluindo uma abordagem multiobjetivo utilizando lógica fuzzy com três funções a otimizar: redução de perdas, melhora da tensão, e balanço de correntes nos alimentadores.

A nova proposta de algoritmo baseada em AIS implica uma melhora na forma de fazer as mutações. Essa melhora consiste em uma mutação inteligente com uma relação de proporcionalidade à corrente da chave na condição prévia, de maneira a fazer uma busca mais robusta, com um aumento na eficiência no custo computacional. Esta melhoria junto com a abordagem de lógica fuzzy para o problema multiobjetivo permite a robustez necessária para a abordagem de problema com demanda variável. O algoritmo proposto é chamado EAIS (*Enhanced Artificial Immune Systems*) e é feito em duas versões, para a Otimização com Demanda Fixa e com Demanda Variável.

1.1. Revisão bibliográfica.

Há referência abundante na literatura sobre os casos de análise multiobjetivo de reconfiguração em sistemas de distribuição para demanda constante ou instantânea, métodos heurísticos são preferencialmente usados.

São utilizados amplamente os algoritmos bio-inspirados para a abordagem de problemas de reconfiguração. Em [4] é utilizado um Algoritmo Genético (AG) para resolução de problemas de configuração de redes de distribuição, com aplicação à minimização de perdas elétricas, o principal objetivo deste trabalho foi a análise de diversas variantes do algoritmo genético, como diferentes métodos de seleção (proporcional ou “roleta”, torneio e ranking, com opção elitista), cruzamento (um ponto, dois pontos, e uniforme com controle estatístico) e controle dinâmico sobre a probabilidade de mutação aplicada aos indivíduos da população.

Em [5] foi utilizada uma heurística baseada em Algoritmos genéticos na procura de uma solução de reconfiguração multiobjetivo, minimizando perdas e melhorando a confiabilidade, o algoritmo genético proposto é uma versão melhorada especializando o operador de cruzamento.

Em [6] se resolve as reconfigurações e Controle de capacitores para minimizar as duas funções objetivas perdas elétricas e o desvio de tensão, utilizando uma técnica baseada numa heurística multiobjetivo (MOMH) para avaliar um conjunto de soluções de Pareto (SPEA2) para as duas funções objetivas, o método de Pareto (SPEA2) é uma modificação de SPEA (*Strength Pareto Evolutionally Algorithm*), são utilizados operadores genéticos de cruzamento e mutação.

Em [1], é abordado o problema de reconfiguração em sistemas de distribuição multiobjetivo (redução de perdas e melhora da confiabilidade), utilizando Sistema Imunológico Artificial (AIS), onde a análise multiobjetivo é baseada na Dominância de Pareto.

Em [2], é abordado o problema de reconfiguração em sistemas de distribuição para a redução das perdas elétricas (mono-objetivo), propondo uma meta-heurística baseada em AIS, são analisados diferentes níveis de carga, mas não são propostas trocas de configuração diárias.

Em [7] é desenvolvida uma metodologia de Otimização do Sistema de Recarga de veículos elétricos e híbridos recarregáveis considerando um sistema de recarga, com uma heurística baseada em AIS.

Foram encontradas também algumas referências sobre o problema de reconfiguração multiobjetivo em sistemas de distribuição com demanda variável. Em [8], foi analisada a influência da variação de carga na otimização de configuração de redes de distribuição considerando a redução das perdas utilizando enfoques heurísticos existentes, neste trabalho é proposta trocas de configuração em 24 patamares inicialmente, e apresentada a discussão de quanto é o número de trocas de configuração ótima por dia e quais são as condições necessárias.

Um problema multiobjetivo com carga variável é abordado em [9] consistente na análise de reconfiguração considerando a recarga de veículos elétricos e híbridos, procurando a redução de perdas, a qualidade da tensão, e o balanço de carga de alimentadores, utilizando uma heurística baseada num algoritmo de enxame de partículas inspirado na computação quântica “Quantum-inspired binary particle swarm optimization” (QBPSO), combinada com lógica fuzzy na análise multiobjetivo de uma rede com múltiplas reconfigurações para todo o dia prevendo o sistema de recarga de veículos elétricos.

Em [10] é abordado um problema de reconfiguração para redução de perdas elétricas com um algoritmo novo desenvolvido para esses tipos de problemas, nesse artigo é considerado a curva de carga diária em 24 níveis de demanda horária, os resultados obtidos são satisfatórios, são obtidas várias configurações durante o período de tempo considerado.

Em [11] é proposta uma metodologia para resolver o problema de reconfiguração com demanda variável utilizando o algoritmo imune artificial Copt-aiNet (Artificial Immune Network for Combinatorial Optimization). Este algoritmo é uma técnica de otimização inspirada pela teoria da rede imune (aiNet), esse trabalho encontra uma configuração para um período de 24 horas, não propõe trocas de configuração diária.

1.2. Motivação.

Muitas pesquisas de problemas de configuração em redes de distribuição de energia elétrica foram desenvolvidas, em maior quantidade com um enfoque de demanda fixa, as mais utilizadas nos últimos tempos são os algoritmos baseados em heurísticas bio-inspiradas devido a que o problema é de programação inteira não linear bastante complexo.

A complexidade deste problema é maximizada quando o estudo de reconfiguração considera a demanda variável, devido a que a configuração ótima vai trocando para cada valor da demanda dos circuitos. Além disso, o problema é mais real considerando a curva de carga, porque a demanda é muito variável durante o dia. Então é necessário um estudo com um maior espaço de soluções possíveis, também é necessário limitar a quantidade das trocas de configuração devido aos custos da operação, a diminuição da vida útil dos equipamentos e da confiabilidade dos circuitos elétricos. Porém é preciso fazer um estudo de planejamento a curto prazo das operações de otimização de configuração da rede de distribuição, para tornar a abordagem mais robusto e viável nas empresas distribuidoras de energia elétrica.

Destaca-se a versatilidade e êxito da nova heurística baseada em Sistemas Imunológicos Artificiais em problemas de Configuração Ótima de Redes de Distribuição. Destaca-se também a facilidade do enfoque multiobjetivo baseado em lógica fuzzy e a única solução oferecida por esta metodologia, facilitando a tomada de decisões dos operadores dos centros de controle ou centros de despacho de distribuição.

Não há referências de que a combinação das ferramentas AIS e Fuzzy ainda seja utilizada para o problema de reconfiguração ótima de redes de distribuição considerando a curva de carga diária e propondo mudanças na configuração.

O presente trabalho propõe utilizar uma ferramenta baseada em Sistemas Imunológicos Artificiais e Lógica Fuzzy para a solução do Problema de Reconfiguração da rede de Distribuição considerando a Curva de Carga Diária para otimizar as perdas elétricas, o desvio da tensão e o balanço de carga dos alimentadores.

O algoritmo de AIS utilizado propõe uma modificação quanto às mutações com a ideia de fazer uma melhor busca com menor custo computacional.

A ferramenta desenvolvida tem que ter uma eficiência computacional devido a que deve ser utilizado em operação de sistemas elétricos porém deve ter potência para ser utilizada em tempo real (on-line).

O desafio deste trabalho é, portanto, projetar uma ferramenta que contribua para o estado da arte da solução do complexo problema de reconfiguração considerando a demanda variável.

CAPÍTULO 2

2. Representação do Sistema de Distribuição Radial através de Grafos.

Os cálculos de fluxo de carga, as construções das diferentes topologias da rede radial e os cálculos das funções objetivo para cada configuração precisam de uma modelagem matemática adequada para a representação algébrica e gráfica das componentes do sistema elétrico. A ferramenta matemática com maior força para estes tipos de aplicações é a Teoria de Grafos que está definida com matrizes e vetores. Mediante operações destas matrizes e vetores é possível fazer os cálculos de fluxo de potência em diferentes configurações, considerando as ações de controle de abertura e fechamento das chaves alocadas nos circuitos.

A seguir as principais definições de Teoria de Grafos utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

2.1. Breve histórico

A teoria de Grafos data do século XVIII [12]. Um dos principais artigos conhecidos foi o problema descrito por Euler que trata sobre as Pontes de Königsberg. Este problema foi proposto em 1736 em uma cidade do mesmo nome que tinha sete pontes entre as margens do Rio Pregel e duas de suas ilhas. O problema estava na aparente impossibilidade de passar por todas as pontes somente uma vez e retornar ao ponto inicial. Posteriormente ficou conhecido como o problema do Caminho Euleriano. Pode-se observar na Figura 1 a representação do problema.

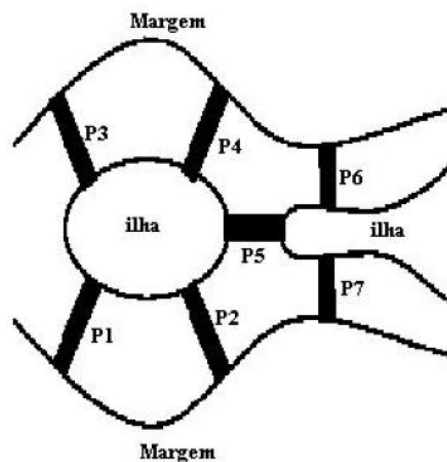


Figura 1: Problema das Pontes de Königsberg

A utilização da Teoria de Grafos para a representação de circuitos elétricos data do século XIX com os primeiros trabalhos do pesquisador alemão Kirchhoff [12].

2.2. Definições Principais

Grafo: Um grafo é um conjunto, não vazio, de objetos chamados vértices (ou nós) e uma seleção de pares de vértices, chamados arestas que podem ser orientados ou não [13], i.e. um grafo é um par de conjuntos $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de vértices $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, e E é o conjunto de arestas $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, este último é um conjunto de pares da forma (v_i, v_j) tal que $v_i, v_j \in V$.

Grafos podem também ser classificados como:

- **Grafo não orientado:** As arestas não têm um endereço e, por conseguinte, (v_i, v_j) e (v_j, v_i) apresentam a mesma aresta. Num grafo não orientado, dois vértices são ditos adjacentes se existe uma aresta que une esses dois vértices.

- **Grafo orientado (ou dígrafo):** as arestas têm uma direção definida, assim (v_i, v_j) e (v_j, v_i) representam arestas diferentes. Um grafo orientado (ou dígrafo) também pode ser fortemente ligado se existe um caminho de qualquer vértice para qualquer outro vértice.

Na Figura 2 se representa um grafo não orientado dado por $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ $E = \{(v_1, v_2), (v_1, v_3), (v_2, v_4), (v_3, v_4), (v_4, v_5), (v_5, v_1)\}$ e um grafo orientado dado por $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, $E = \{(v_2, v_1), (v_1, v_3), (v_4, v_2), (v_3, v_4), (v_4, v_5), (v_5, v_1)\}$.

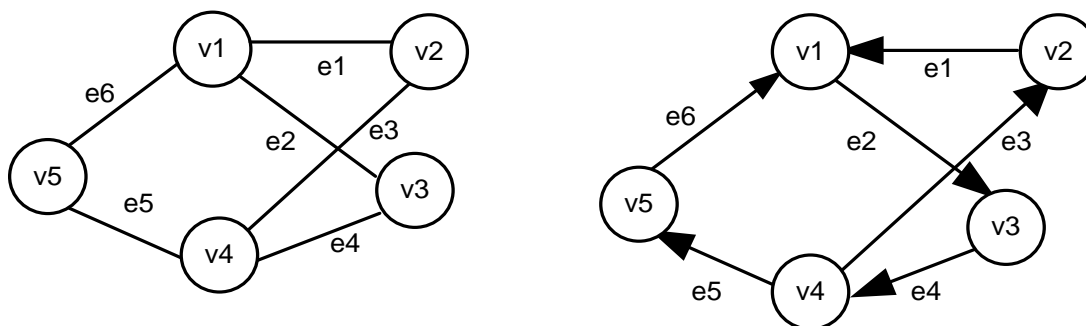


Figura 2: Grafo não Orientado e Grafo Orientado

- **Grafo completo:** É um grafo simples onde cada par de nós está conectado por uma aresta. Para representar o grafo completo é suficiente indicar o conjunto de vértices. Se todos os vértices de G são mutuamente adjacentes, o grafo é dito completo, como mostra o exemplo da Figura 3.

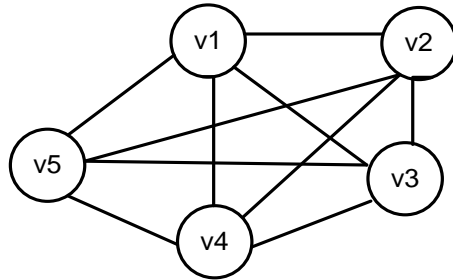


Figura 3: Grafo Completo

- **Subgrafo:** Em um grafo G_1 é um grafo cujos conjuntos de vértices e arestas são subconjuntos dos de G . Os grafos apresentados na Figura 2 são Subgrafos do Grafo apresentado na Figura 3.

- **Grafo Ponderado:** Em um grafo ponderado, um peso ou conjunto de pesos (atributos) é associado a cada aresta, representado da forma $w(i, j)$, ou seja, $w(1,2)$ é o peso associado a aresta que une os nós 1 e 2, normalmente $w(i, j) = w(j, i)$. Um grafo com atributos pode ser representado por $G = (V, E, A)$.

- **Caminho:** É uma sequência de vértices (v_1, v_2, \dots, v_n) tal que de cada um dos vértices existe uma aresta para o vértice seguinte.

- **Ciclo:** Dois nós v_i e v_j são conectados se existe ao menos um caminho entre v_i e v_j . Um caminho onde $v_1 = v_n$ é chamado de ciclo. Também tem o nome de laço.

- **Caminho Simples:** Um caminho é chamado **simples** se nenhum dos vértices no caminho se repete.

- **Comprimento do caminho** é o número de arestas que o caminho usa, contando-se arestas múltiplas vezes.

- **Custo de um caminho** O custo de um caminho num grafo balanceado é a soma dos custos das arestas atravessadas.

- **Caminhos independentes:** Dois caminhos são **independentes** se não tiverem nenhum vértice em comum, exceto o primeiro e o último.

- **Grafo Conexo:** Um grafo é **conexo** se a partir de qualquer vértice existe um caminho para qualquer outro vértice do grafo.

No exemplo da Figura 4 tem-se um Grafo conexo, pode-se determinar os caminhos: $C_1 = \{v_1, v_2\}$, e $C_2 = \{v_1, v_3, v_4, v_5\}$, e, ambos são caminhos simples. O comprimento do caminho C_1 é igual a $Cp_1 = 1$, e o comprimento caminho C_2 é igual a $Cp_2 = 3$. Se os pesos das arista para o grafo ponderado são $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ associados à arestas $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$, então o custo para o caminho C_1 é igual a $P_1 = a_1$ e o custo para o caminho C_2 é igual a $P_2 = a_2 + a_3 + a_4$.

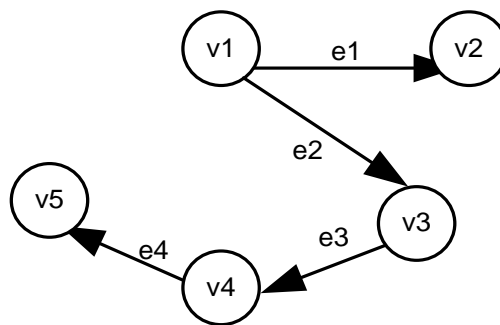


Figura 4: Grafo - Caminhos

Um dígrafo $D = (V, E)$ é **fortemente conexo** se para cada par de vértices u e v existe um caminho dirigido de u para v .

Dois vértices são **adjacentes** se eles são extremos da mesma aresta. Duas arestas são adjacentes se elas têm um extremo comum. Um vértice e uma aresta são **incidentes** se o vértice é extremidade da aresta. Um vértice é **isolado** se não houver outros vértices adjacentes. No caso de sistema elétrico um ou mais vértices isolados tem o nome de **ilha**.

Antes de continuar, será dada algumas definições em relação com este tema.

- **Percurso:** corresponde a uma sequência, finita e não vazia, de nós do grafo, na qual $(v_0, \dots, v_i, \dots, v_{k-1}, v_k)$ é tal que, para todo $0 \leq i \leq k - 1$, v_i e v_{i+1} são nós adjacentes. Os nós v_0 e v_k são chamados, respectivamente, de origem e fim do percurso, enquanto que v_1, v_2, \dots, v_{k-1} são os nós internos ao caminho. O inteiro k é o comprimento do percurso.

Caminho: em um dígrafo é um percurso no qual todos os vértices estão orientados no sentido origem do percurso – fim do percurso.

2.3. Árvores:

Um grafo $G = (V, E)$ qualquer pode ser definido como uma árvore, se e somente se, G é um grafo conexo sem ciclos. Alguns teoremas importantes sobre árvores são transcritos abaixo. Isto implica que todos os vértices estão conectados e não existem ciclos.

Teorema 1: existe um e apenas um caminho, entre qualquer par de vértices em uma árvore.

Teorema 2: Uma árvore com n vértices tem $n-1$ arestas. A adição de qualquer nova aresta cria exatamente um ciclo.

Teorema 3: Teorema de Cayley – Em um grafo completo G_c , com n vértices e $m = \frac{n(n-1)}{2}$ arestas, existem n^{n-2} árvores que são subgrafos de G_c .

2.4. Floresta.

Uma floresta é um grafo não orientado, em que todos os componentes ligados são árvores, em outras palavras, uma floresta é um conjunto disjunto de árvores.

A rede elétrica de distribuição é normalmente radial com recursos, pode-se representar matematicamente mediante a Teoria de Grafos como uma floresta, onde cada alimentador constitui uma árvore. Na Figura 5 pode-se ver a representação da rede de distribuição mediante grafos.

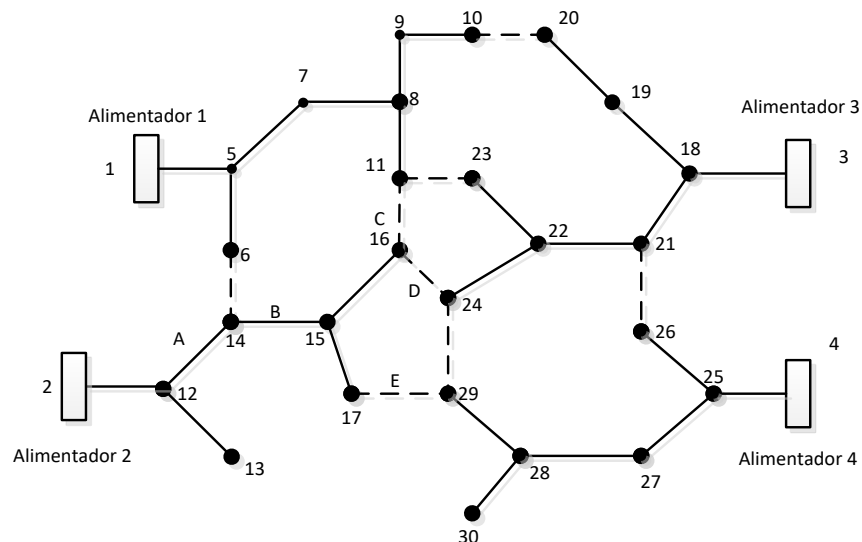


Figura 5: Exemplo de um Sistema Elétrico de Distribuição apresentado por um Grafo

2.5. Matriz de Incidência de Elementos.

A matriz de incidência $B = [b_{ij}]$ de um grafo $G = (V, E)$, com $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, e $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, é definida da seguinte forma

$$B(i, j) = \begin{cases} \pm 1 & \text{se } v_i \in e_j \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (2.1)$$

Se G é um dígrafo, então $B(i, j) = +1$ se v_i está no início da seta e $B(i, j) = -1$, caso v_i esteja na cabeça da seta.

Por tanto para as árvores os termos são reduzidos ao seguinte:

$$B(i, j) = \begin{cases} +1 & \text{para os elementos diagonais } B(i, i) \\ -1 & \text{se } e_k = (v_i, v_j) \\ 0 & \text{para todas as outras componentes} \end{cases} \quad (2.2)$$

Esta mesma técnica é utilizada para construir as matrizes que são então utilizadas no processo de otimização como, por exemplo, para construir a população inicial de “árvores”, obter uma nova configuração por meio da abertura e fechamento de chaves, apurar os índices de desempenho, etc.

Por exemplo, para a Figura 7 correspondente é a dada na Figura 6

		nó "para"													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
nó "de"	1	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1
	5	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1

Figura 6: Matriz de Incidência de Elementos

Como pode ser visto os elementos $A(6,7)$, $A(8,9)$ e $A(12,14)$ da Matriz de Incidências de Elementos que correspondem às ligações entre os nós 6-7, 8-9 e 12-13 respectivamente, estão indicadas com valor 0, já que a chave correspondente que liga cada par destes nós

está aberta. Neste caso a chave correspondente não está incluída no Grafo dirigido que é um Subgrafo do Grafo que inclui todas as arestas.

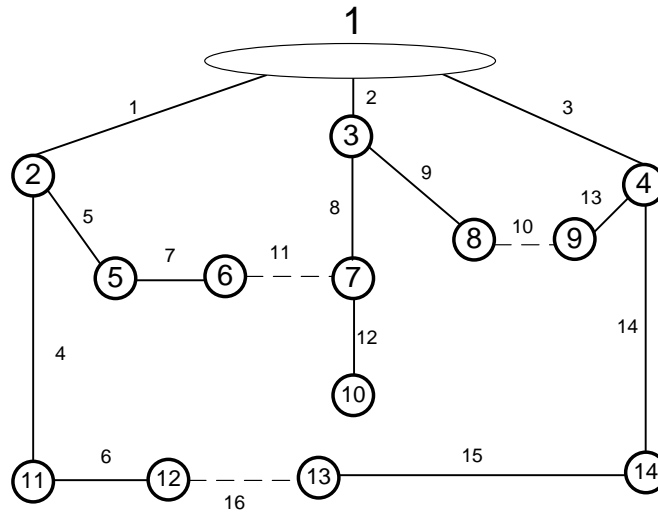


Figura 7: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.

2.6. Matriz de Adjacências e Matriz de Alcance.

Outra forma de representar a conectividade de um Grafo por meio de Matrizes é através da Matriz de Adjacências. Dado um grafo G com n nós, é possível representá-lo por uma Matriz $A(G) = [a_{ij}]$ de ordem $n \times n$, onde o valor a_{ij} guarda informações sobre como os nós v_i e v_j estão relacionados, i.e. informações sobre a adjacência de v_i e v_j . Para representar o grafo da Figura 7, ou seja, um grafo orientado e sem pesos nas arestas, basta que as entradas a_{ij} da matriz A , contenham 1 se v_i e v_j são adjacentes e 0 no caso contrário.

A representação correspondente ao grafo da Figura 8 pode-se observar a matriz de adjacências.

		nó "para"													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
nó "de"	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Figura 8: Matriz de Adjacências

Um resultado interessante acontece ao multiplicar esta matriz A, k vezes.

$$A^k = A \times A \times \dots \times A \text{ (k vezes)} \tag{2.3}$$

Com as definições anteriores é possível definir a equação 2.4. O resultado de esta operação é uma Matriz de Percursos, no qual, em cada fila i temos quais são os nós que estão no percurso (Nós Alcançados) desde o Nó i até o final do grafo correspondente. Observando a coluna j, é possível identificar quais são os nós que “precedem” a este desde o Nó de origem. Esta é a chamada Matriz de Alcance de um Grafo Orientado.

$$R = I + \sum_{i=2}^n A^{i-1} \tag{2.4}$$

Para o grafo da Figura 7, a Matriz de Alcance correspondente seria:

		nós alcançados													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
nó de partida	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	4	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1
	5	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 9: Matriz de Alcance

É possível observar nesta matriz que, por exemplo, desde o Nó 1 (observando a fila 1) são alcançados todos os Nós do grafo da Figura 7, e importante descrever que todos os nós são alcançados uma soa vez, por tanto o grafo corresponde a uma árvore. Por outro lado, do Nó 2 (observando a fila 2) os nós alcançados serão os nós: 5-6-10 e 12. Também pode ser observado que o nó 13 (observando a coluna 13) está conectado a traves dos nós 1-4 e 14. Todas estas afirmações estão em concordância com o grafo da Figura 7.

Se algum nó j fora alcançado duas vezes pelo nó 1 (nó principal), então o elemento $R(1,j)=2$, isso implica que o grafo tem um ciclo.

Esta mesma matriz pode ser apurada por médio da inversa da Matriz de Incidência de Elementos

$$R = inv(A) \quad (2.5)$$

2.6.1. Lista de Adjacência.

Uma Lista de Adjacência, estrutura de adjacência ou dicionário é a representação de todas as arestas ou arcos de um grafo em uma lista.

Se o grafo é não direcionado, cada entrada é um conjunto de dois nós contendo as duas extremidades da aresta correspondente; se ele for dirigido, cada entrada é uma dupla de nós, um indicando o nó de origem e o outro o nó destino do arco correspondente.

Para o grafo da Figura 7, a Lista de Adjacência correspondente é:

Tabela 1: Lista de Adjacências do Grafo da Figura 7

1	adjacente a	2	3	4
2	adjacente a	1	5	11
3	adjacente a	1	7	8
4	adjacente a	1	9	14
5	adjacente a	2	6	
6	adjacente a	5		
7	adjacente a	3	10	
8	adjacente a	3		
9	adjacente a	4		
10	adjacente a	7		
11	adjacente a	2	12	
12	adjacente a	11		
13	adjacente a	14		
14	adjacente a	4	13	

2.7. Algoritmo de Prim.

O Algoritmo de Prim é um algoritmo em Teoria de Grafos que procura uma árvore geradora mínima para um grafo ponderado conectado. Isto significa que este algoritmo encontra um subconjunto de arestas que formam uma árvore e que inclui todos os nós, onde o peso total desta árvore é minimizado.

Outros algoritmos para este problema são o Algoritmo de Kruskal e o Algoritmo de Boruvkas. No entanto estes algoritmos podem ser empregados em grafos desconexos, enquanto o algoritmo de Prim precisa de um grafo conexo.

Em cada iteração do algoritmo de Prim, uma aresta que conecta um vértice em um subgrafo a um vértice fora do subgrafo deve ser encontrada. Uma vez que o grafo G está ligado, sempre haverá um caminho para cada vértice. A saída Y do Algoritmo é uma árvore, já que cada aresta e vértice adicionado a Y estão conectados. Seja então Y a árvore geradora mínima.

O algoritmo continuamente incrementa o tamanho da árvore, uma aresta por vez, iniciando-se com uma árvore de um só vértice, até cobrir todos os vértices. Estes passos são descritos a continuação:

- Entrada: Um grafo ponderado conectado com vértices V e arestas E (os pesos podem ser negativos);
- Inicializar: $V_{new} = \{x\}$, onde x é um nó arbitrário (ponto de partida) de V , $E_{new} = \{\}$.
- Repetir até $V_{new} = V$:
- Escolher uma aresta (u,v) com mínimo custo, tal que u está em V_{new} e v não (se há múltiplas arestas com mesmo peso, algum de eles pode ser escolhido).
- Adicionar v a V_{new} e (u,v) a E_{new} ;
- Saída: V_{new} e E_{new} descrevem a árvore geradora mínima.

2.8. Laços Fundamentais (Fundamental Loops)

Uma árvore tem $n-1$ arestas, os Laços Fundamentais (Fundamental Loops) estão definidos como os laços ou ciclos principais que são formados ao incluir as arestas agregadas a uma árvore. O número de laços fundamentais de um grafo está dado por (2.6).

$$L_f = m - n + 1 \quad (2.6)$$

Onde m e n são os números de arestas e nós respectivamente. Pode-se entender que o número de laços fundamentais é igual ao número de arestas que deve ser retirado do grafo não direcionado para formar o conjunto de grafo direcionado neste caso a árvore.

Mais adiante é descrita a rede elétrica em forma de um Grafo não direcionado a partir do qual pode-se obter grafos direcionados em forma de árvore para obter as configurações elétricas radiais.

Na Figura 10 pode-se apreciar os laços fundamentais de grafos, que são os possíveis anéis de uma árvore ou ciclos que podem ser feitos com as arestas disponíveis no grafo não orientado inicial. Para o exemplo ilustrado tem-se 3 laços fundamentais $L_1 = \{e_1, e_2, e_8, e_{11}, e_7, e_5\}$, $L_2 = \{e_2, e_3, e_{13}, e_{10}, e_9\}$, $L_3 = \{e_1, e_3, e_{14}, e_{15}, e_{16}, e_6, e_4\}$, note que esses conjuntos são formados ao incluir as arestas que inicialmente não estão na árvore mas pertencem ao grafo não dirigido por exemplo o conjunto L_1 se consegue adicionando a aresta e_{11} , que não pertence à árvore inicial, mas pertence ao grafo não dirigido.

2.8.1. Formação de árvores mediante laços fundamentais:

A partir de uma árvore inicial G_1 e considerando os laços fundamentais do grafo G (G é o grafo não dirigido que contém todas as arestas possíveis), é possível gerar todas as árvores que são Subgrafos de G [3]. Se seleciona uma aresta que não pertence ao grafo G_1 . Por exemplo na Figura 10 a aresta e_{10} , esta aresta forma um ciclo, se identifica todas as arestas pertencentes ao ciclo $L_2 = \{e_2, e_3, e_{13}, e_{10}, e_9\}$ posteriormente se seleciona um deles, por exemplo a aresta e_3 para retirar do grafo então tem-se o novo grafo G_2 que é uma árvore na Figura 11.

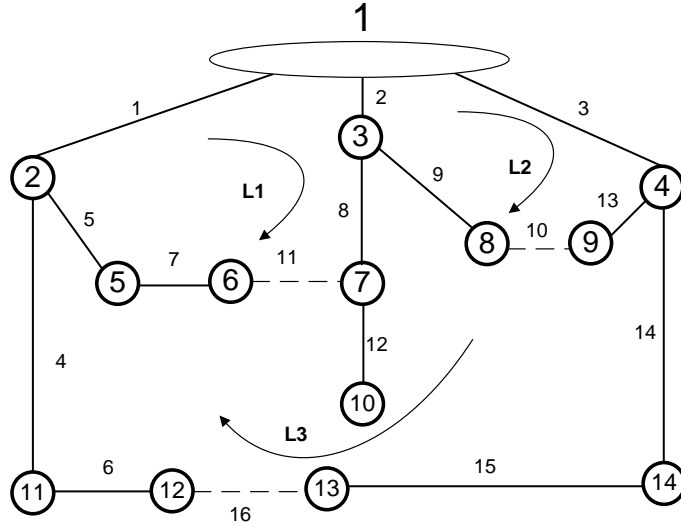


Figura 10: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.

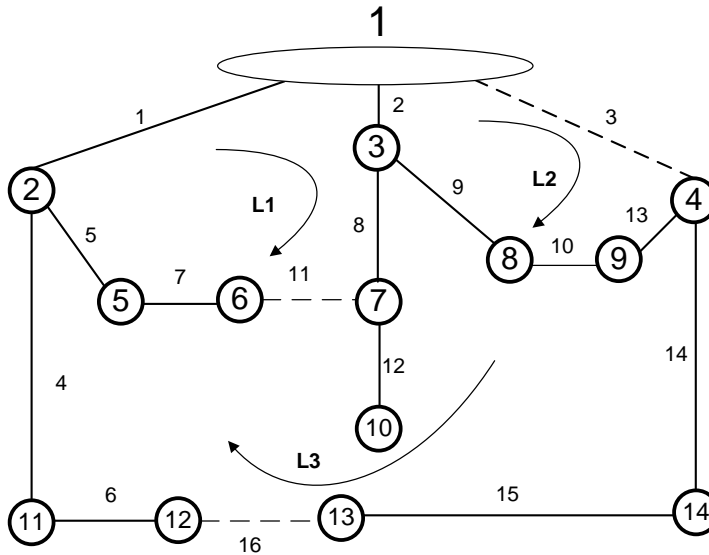


Figura 11: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.

Para a obtenção das matrizes de incidência e de alcance do grafo orientado modificado é necessário fazer uma série de operações matriciais de acordo à Teoria de Grafos, que será descrito na seção 2.10. A partir destas definições são descritas os Modelos e Algoritmos para a Representação da Rede de Distribuição Radial tanto para o manejo das configurações como para o cálculo de Fluxo de Potência.

2.9. Representação da Rede.

A rede elétrica de Distribuição é normalmente radial com recursos, pode-se representar matematicamente mediante a Teoria de Grafos como uma floresta, onde cada alimentador constitui uma árvore, tanto para o cálculo de fluxo de potência como para a obtenção de diferentes topologias na reconfiguração.

Para o cálculo de fluxo de potência os nós representam as barras de carga ou barras de geração distribuída e as arestas representam os ramos da rede elétrica. Enquanto para a representação da topologia existem 2 maneiras de modelar a Rede em Sistemas de Distribuição que são a Representação Direta e a Representação Mediante Simplificação do Grafo.

- Representação Direta.

Neste caso as matrizes de incidência e alcance são as mesmas que para o cálculo de fluxo de potência e representação da configuração. No caso dos sistemas testes IEEE de 14,33,69,84,119 barras são desenvolvidos desta maneira, nestes sistemas os ramos têm impedância série equilibradas e não tem impedâncias shunt, os ramos são desconectados ou conectados como chaves para as trocas de configuração, e os nós são barras de carga. Estes sistemas são utilizados para o âmbito científico-acadêmico para o desenvolvimento das pesquisas.

Esta representação pode ser aplicada a um sistema real de forma a identificar as arestas correspondentes às chaves e modeladas para que possam ser incluídas (fechadas) ou excluídas (abertas) do grafo orientado na forma de árvore, entanto que as demais arestas (ramos correspondentes a linhas) são fixas (sempre pertence ao grafo), onde só devem ser modificadas a orientação das mesmas se precisa de mudança de sentido de fluxo, na Figura 12 pode-se observar a representação da rede.

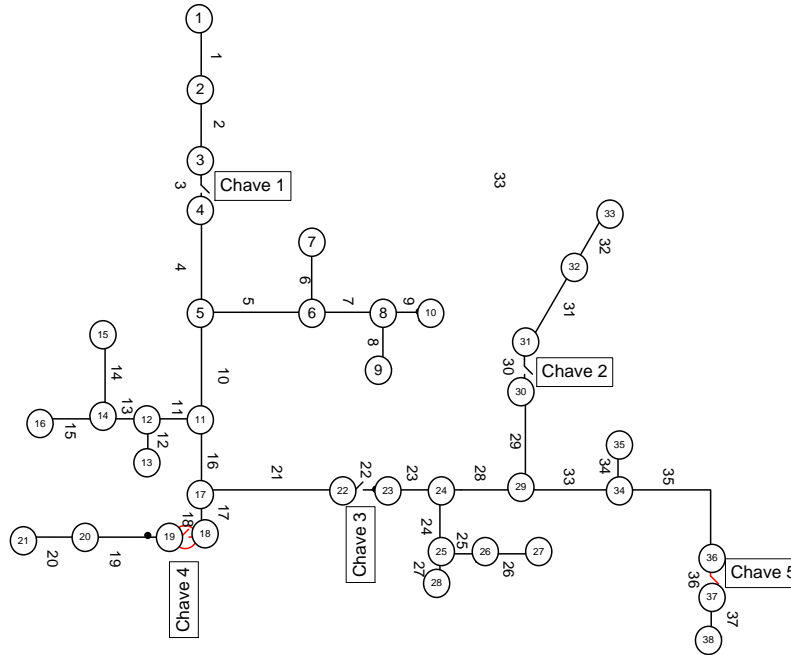


Figura 12: Grafo de Sistema de Distribuição

As arestas **3-30-22-18-36** representam as chaves **1-2-3-4** respectivamente. Estas arestas podem ser ou não incluídas no grafo dirigido para as trocas de configuração, as demais arestas são arestas fixas, e só podem mudar de sentido de fluxo.

- Representação Mediante Simplificação do Grafo [1]:

Neste caso as matrizes de incidência e alcance não são as mesmas que para o cálculo de fluxo de potência. A representação da topologia é feita por meio de um grafo onde as chaves são as arestas e os nós são um conjunto de linhas e cargas que são agrupadas, então este grafo só é utilizado para as trocas de configuração. A matriz deste grafo é de ordem $n \times n$, onde n é a quantidade dos nós. O grafo utilizado para o cálculo de fluxo de potência é desenvolvido a partir da representação para o grafo da topologia, como uma ampliação da mesma. A matriz de incidência para o cálculo de fluxo de potência é desenvolvida mediante um algoritmo de ampliação da matriz de incidência da topologia e é de ordem $[nb \times nb]$, onde nb é o número de barras do sistema elétrico, de forma que $nb \geq n$. Na Figura 13 pode-se ver a representação de uma rede de distribuição por grafos usando este método. Nesta representação as arestas constituem as chaves que ligam um ramo a outro. Os nós ou

vértices contém internamente a informação dos ramos. Estas informações são a demanda de cada barra de carga, a bitola e tipo de condutor, reguladores de tensão, capacitores, fontes de geração distribuída, etc.

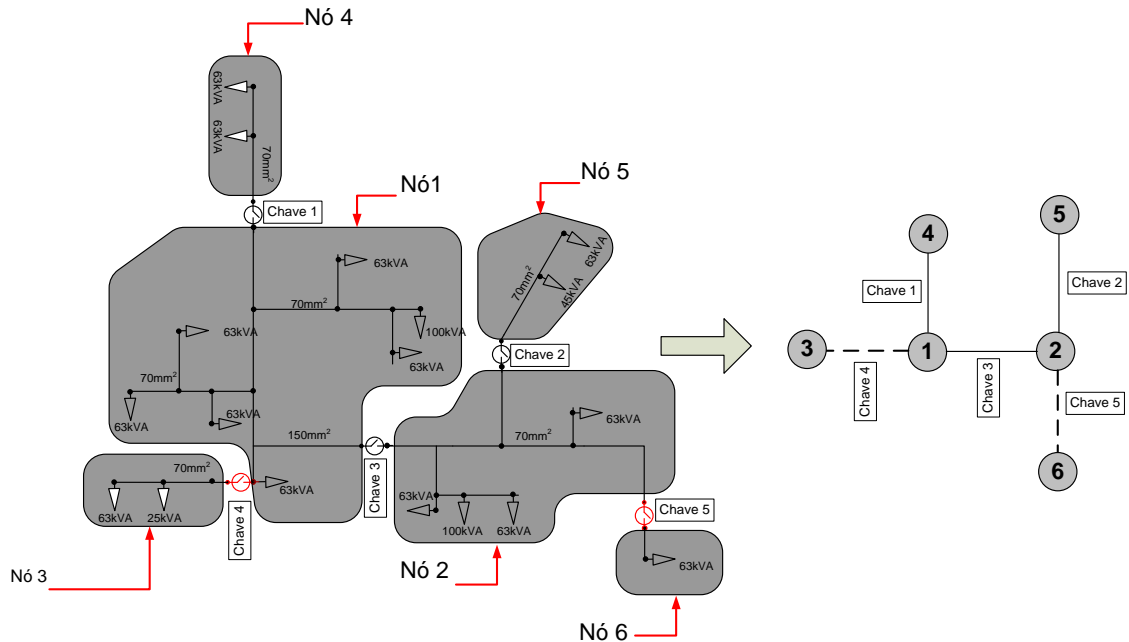


Figura 13: Diagrama Unifilar do Sistema Trifásico e seu correspondente Grafo.

Fonte: [14]

A partir desta representação é possível descrever uma técnica mediante operações matriciais como descrito em [14], que permitirá obter a matriz para o Fluxo de Carga e calcular as demais funções dependentes da topologia da rede.

A mesma rede é mostrada na Figura 12 **Figura 14** mediante a Representação Direta, neste caso o grafo é o mesmo para o cálculo de fluxo de potência e para topologia, como as matrizes de incidência e suas correspondentes matrizes de alcance.

Os custos computacionais nas diferentes representações são semelhantes, mas de acordo com as quantidades de operações é possível estimar que na Representação Direta ela deve ser mais eficiente se os algoritmos forem programados de maneira apropriada.

2.9.1. Obtenção de diferentes configurações

Serão consideradas duas maneiras de obter diferentes configurações:

- Mediante o Algoritmo de Prim

Em [1] é utilizado o algoritmo de Prim para a obtenção da população inicial. O processo consistente em criar as árvores de caminhos de menor custo, a partir de estabelecer pesos aleatórios às arestas do Grafo G_c inicial. Também o trabalho utiliza o algoritmo de Prim para a obtenção de configurações novas mediante mutações estabelecendo os pesos adequados para garantir a ação de controle determinada. Como o algoritmo de Prim cria árvores, a viabilidade da configuração modificada é garantida.

- Mediante a utilização dos Conceitos de laços fundamentais

A partir de uma árvore inicial, (ela é considerada a configuração de partida) são obtidas as outras configurações aplicando o conceito de laços fundamentais.

O processo parte de uma configuração inicial (grafo em forma de árvore) logo é realizado o processo descrito na seção 2.10. Posteriormente este processo é feito de forma sucessiva partindo da configuração anterior. Obtendo diferentes árvores que asseguram a configuração válida do sistema elétrico de distribuição.

Na Figura 14 temos o grafo dirigido da configuração inicial do sistema teste de 33 barras, note-se que o grafo é uma árvore, onde as arestas [33,34,35,36,37], não são incluídos inicialmente na árvore, mas eles são incluídos no grafo não dirigido do qual pode-se obter as diferentes configurações agregando e retirando estas arestas e as outras de forma a manter a árvore, umas das condições para que o grafo seja uma árvore é que o número de arestas seja igual a $n-1$, neste caso igual a 32. Então para manter essa quantidade de arestas em todos os casos devem ser excluídos sempre cinco arestas do grafo não dirigido.

Em seguida serão detalhadas as operações algébricas utilizadas para os câmbios de configuração e a obtenção das matrizes para o fluxo de potência.

2.10. Operações Algébricas utilizadas

A Rede do Sistema Elétrico será apresentada como um grafo G_c onde os nós representam as barras e as arestas representam as chaves ou os ramos dos circuitos. Este grafo G_c é não direcionado incluindo todas as arestas (chaves), a quantidade de chaves é maior que a quantidade das barras, então o grafo formado não pode ser inicialmente uma árvore. A partir desse grafo não direcionado G_c se pode construir os diferentes subgrafos que representam árvores, selecionando de forma adequada as arestas que pertencem ao grafo, a quantidade de ramos selecionados deve ser igual a $n-1$, onde n é o número de barras. As arestas excluídas do grafo equivalem às chaves que são abertas no circuito. De forma que a abertura ou fechamento das chaves afetará se a aresta vinculada fica incluída ou excluída do grafo direcionado.

2.10.1. Construção das matrizes de incidência e alcance: Sistema IEEE de 33 barras.

Para facilitar o entendimento se aplicará o processo ao sistema teste de 33 barras, o processo é o mesmo para os demais sistemas testes e também para o sistema real. Na Tabela 2, tem-se os dados de ramos do sistema de 33 barras, na coluna “RAMO” tem-se os números das chaves (arestas), as arestas tem a informação do nó inicial na coluna “DE” e o nó final na coluna “PARA”, para apresentar o grafo dirigido para a formação da árvore a mesma chave pode trocar de sentido de fluxo então o nó “PARA” seria o nó inicial e o nó “DE” o nó final. O conjunto total destas arestas é o grafo G_c .

Na Tabela 3 tem-se os dados dos nós ou vértices do grafo, neste caso são correspondentes a barras de carga e um nó de início (o número 1).

Tabela 2: Dados de Ramos de Sistema Teste de 33 Barras

Ramo	De	Para	R(ohm)	X (ohm)	Ramo	De	Para	R(ohm)	X (ohm)
1	1	2	0,0922	0,047	20	20	21	0,4095	0,4784
2	2	3	0,493	0,2511	21	21	22	0,7089	0,9373
3	3	4	0,366	0,1864	22	3	23	0,4512	0,3083
4	4	5	0,3811	0,1941	23	23	24	0,898	0,7091
5	5	6	0,819	0,707	24	24	25	0,896	0,7011
6	6	7	0,1872	0,6188	25	6	26	0,203	0,1034
7	7	8	0,7114	0,2351	26	26	27	0,2842	0,1447
8	8	9	1,03	0,74	27	27	28	1,059	0,9337
9	9	10	1,044	0,74	28	28	29	0,8042	0,7006
10	10	11	0,1966	0,065	29	29	30	0,5075	0,2585
11	11	12	0,3744	0,1238	30	30	31	0,9744	0,963
12	12	13	1,468	1,155	31	31	32	0,3105	0,3619
13	13	14	0,5416	0,7129	32	32	33	0,341	0,5302
14	14	15	0,591	0,526	33	8	21	2	2
15	15	16	0,7463	0,545	34	9	15	2	2
16	16	17	1,289	1,721	35	12	22	2	2
17	17	18	0,732	0,574	36	18	33	0,5	0,5
18	2	19	0,164	0,1565	37	25	29	0,5	0,5
19	19	20	1,5042	1,3554					

A notação mais utilizada para a variável de controle de configurações consiste em um vetor de componentes binárias [1] a seguir:

$\bar{x} = [x_1, x_2, x_3 \dots \dots, x_i, \dots \dots, x_n]$, onde $x_i = 0$ se a chave i está aberta e $x_i = 1$ se a chave i está fechada.

Também pode ser representado pelos vetores de chaves N , N_1 e N_2 .

Onde $N = [1, 2, 3, \dots \dots \dots, i, \dots \dots \dots, n]$ representa as chaves em ordem correlativa, $N_1 = \{n_m\}$ é o conjunto de chaves fechadas e $N_2 = \{n_l\}$ é o conjunto de chaves abertas de forma que $N = \{N_1, N_2\}$ é o conjunto total de chaves.

A partir dos conjuntos de chaves fechadas e abertas seja na notação \bar{x} ou na notação $N = \{N_1, N_2\}$ é possível conseguir as diferentes configurações do sistema elétrico de distribuição, ou seja, os grafos dirigidos em forma de árvore que representam essas configurações.

Tabela 3: Dados de Barras de Sistema Teste de 33 Barras

BARRA	Pd(kW)	Qd(kVAR)	Qbc(kVAR)	BARRA	Pd(kW)	Qd(kVAR)	Qbc(kVAR)
1	0	0	0	18	90	40	0
2	100	60	0	19	90	40	0
3	90	40	0	20	90	40	0
4	120	80	0	21	90	40	0
5	60	30	0	22	90	40	0
6	60	20	0	23	90	50	0
7	200	100	0	24	420	200	0
8	200	100	0	25	420	200	0
9	60	20	0	26	60	25	0
10	60	20	0	27	60	25	0
11	45	30	0	28	60	20	0
12	60	35	0	29	120	70	0
13	60	35	0	30	200	600	0
14	120	80	0	31	150	70	0
15	60	10	0	32	210	100	0
16	60	20	0	33	60	40	0
17	60	20	0				

Na configuração inicial do sistema teste IEEE de 33 barras da **Figura 14** está representada pelos vetores:

$$\bar{x}_0 = [1,0,0,0,0,0,0]$$

$$N = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37]$$

$$N_1^0 = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32]$$

$$N_2^0 = [33,34,35,36,37]$$

A notação simplificada é $N_2^0 = [33,34,35,36,37]$, conhecido o vetor N previamente.

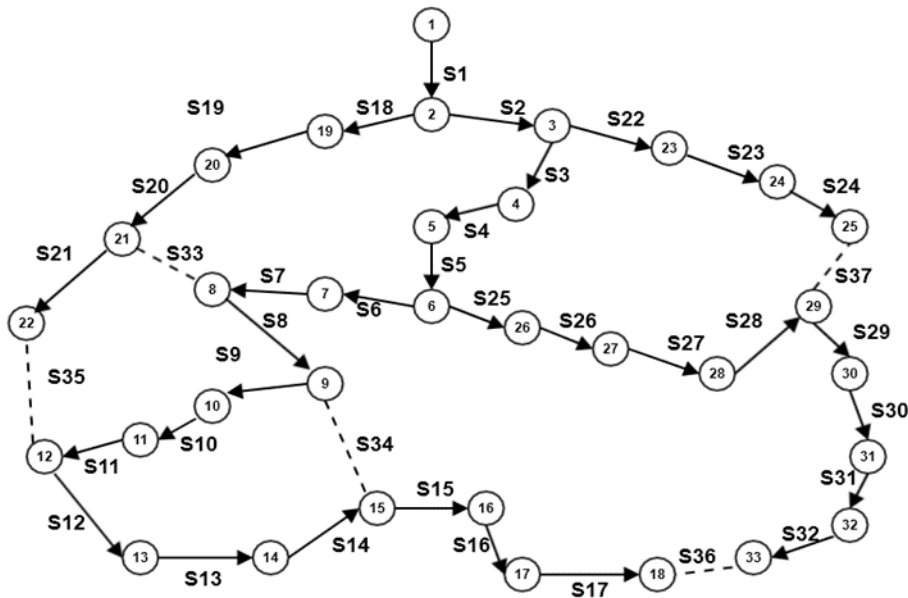


Figura 14: Grafo do Sistema Teste de 33 barras

A partir desta variável de controle pode ser apurado o conjunto de arestas do grafo $G_0 = \{V, E_0\}$ direcionado dado pelos conjuntos V e E_0 .

$$V = \{1,2,3, \dots \dots \dots, 33\}$$

$$E_0 = \left\{ (1,2), (2,3), (3,4), (4,5), (5,6), (6,7), (7,8), (8,9), (9,10), (10,11), (12,13), (14,15), (15,16), (16,17), (17,18), (2,18), (18,19), (19,20), (20,21), (21,22), (3,23), (23,24), (24,25), (6,26), (26,27), (27,28), (28,29), (29,30), (30,31), (31,32), (32,33) \right\}$$

A partir do conjunto E_0 é possível construir a matriz de incidência A_0 da Figura 15 segundo os passos da seção 2.3 fazendo $A_0(i, i) = 1$ e $A_0(i, j) = -1$ se existe a aresta $(i, j) \in E_0$, e as demais componentes iguais a 0. A partir da matriz de incidência é possível calcular a matriz de Alcance $R_0 = inv(A_0)$ os resultados são mostrados na Figura 16.

De acordo com a definição de matriz de alcance pode-se notar que todos os nós são alcançados pelo nó 1, uma soa vez, portanto o grafo obtido é uma árvore.

2.8.2 Alteração da Configuração

Segundo a Teoria de Grafos [12], os passos para obter a nova configuração a partir duma inicial dado pela matriz de incidências A_0 pode-se resumir nas seguintes operações:

- 1- Fechamento do anel.
- 2- Identificação das chaves que compõem o anel.
- 3- Apertura duma chave que pertence ao anel.
- 4- Construção das novas matrizes de incidência e matriz de alcance.

Em seguida serão explicadas as operações com as matrizes que são necessárias para a obtenção das novas configurações.

1- Fechamento do anel: É selecionada uma aresta desconectada do subgrafo Gc . Esta aresta é uma chave aberta ou elemento do vetor $N_2^0 = [33,34,35,36,37]$ por exemplo a chave **36**. A chave 36 é a aresta $e^{36} = (18,33)$ (pode ser também a aresta com sentido oposto $e^{-36} = (33,18)$, terá o mesmo resultado). Esta aresta e^{36} é incluída em um grafo auxiliar $G_0^* = \{V, E_0^*\}$, de acordo à Teoria de Grafos o grafo G_0^* terá um ciclo ou anel, considerando o Teorema que afirma que qualquer aresta que se agrega a uma árvore incorpora um ciclo. Neste caso o grau do grafo é igual ao número de vértices.

2- Identificação das chaves que compõem o anel: O anel do grafo G_0^* é composto por arestas que podem ser identificadas da seguinte maneira:

- Se forma a matriz A_0^* fazendo $A_0^* = A_0$, e $A_0^*(18,33) = -1$, agora obtém-se a matriz de alcance fazendo $R_0^* = inv(A_0^*)$. Depois se verifica a coluna da matriz R_0^* igual ao nó incidente da chave fechada. Na **Figura 17** pode-se observar a matriz R_0^* veja-se na coluna **33** que todos os elementos iguais a 2 ($R_0^*(k, 33) = 2$) pertencem aos nós k que tenham duas incidências no nó **33**. Neste caso os nós [1,2,3,4,5,6] tem duas incidências no nó **33**, significa que para chegar ao nó **33** a partir desses nós existem dois caminhos possíveis, na **Figura 18** pode-se observar os dois caminhos possíveis para chegar ao nó **33**.

Para procurar as arestas que pertencem ao anel formado pelo fechamento da chave deve-se fazer as seguintes operações

- Na matriz de alcance R_0^* buscar os nós m de forma que $R_0^*(m:,33) = 1$, todos os nós m que alcançam o nó 33 uma só vez são nós incidentes das arestas que formam o anel.
- Na matriz de incidências A_0^* buscar as arestas $e^p = (n,m)$ de modo que $A_0^*(n:,m) = -1$. Estas são as arestas que tem incidência nos nós m , portanto pertencem ao anel.

Neste caso o conjunto das arestas que pertencem ao anel são

$$E_{anel}^* = \left\{ \begin{array}{l} (6,7), (7,8), (8,9), (9,10), (10,11), (12,13), (14,15), \\ (15,16), (16,17), (17,18), (6,26), (26,27), (27,28), (28,29), \\ (29,30), (30,31), (31,32), (32,33), (18,33) \end{array} \right\}$$

Correspondentes às chaves:

$$N_{anel}^* = [6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,25,26,27,28,29,30,31,32,33]$$

3- Apertura de uma chave que pertence ao anel: Para este passo qualquer aresta de E_{anel}^* deve ser excluída do conjunto de arestas de forma que o grafo formado constitui uma árvore. A seleção da aresta não deve incluir a aresta $e^{36} = (18,33)$, porque essa eleição seria equivalente a obter o mesmo grafo inicial G_0 . A seleção da aresta pode ser feita de forma aleatória ou pode ter outro critério que poderia ser útil. Para este exemplo é excluída a aresta $e^{13} = (13,14)$ correspondente à chave **13**. Posteriormente se procede a fazer as seguintes operações:

$A_0^{**} = A_0^*$, $A_0^{**}(13,14) = 0$. Apaga a aresta $e^{13} = (13,14)$, ela é excluída do grafo.

$R_0^{**} = inv(A_0^{**})$ procura a matriz de alcance nova.

4- Construção das novas matrizes de incidência e matriz de alcance: A matriz E_0^{**} pode ser observada na Figura 20 , na fila 1 tais que a componente $R_0^{**}(1, : q_i) = 0$ implicam os nós que não são alcançados desde o nó 1. Esses nós ficam desconectados devido a que as arestas que devem conectar esses nós estão em sentido de fluxo inverso, na **Figura 19** pode-se observar os caminhos que ficam em sentido contrário ao fluxo radial. Para corrigir as matrizes é necessário fazer as seguintes operações:

- Identificar os elementos desconectados “ q_i ” tais que as componentes $R_0^{**}(1, : q_i) = 0$.
- Dos elementos do conjunto de arestas do anel, identificar quais contém os elementos “ q_i ” desconectados tais que $e_i^*(r_i, q_i) \in E_{anel}^*$ onde:

$$A_0^{**}(r_i, q_i) = -1$$

Depois fazer

$$A_0^{**}(r_i, q_i) = 0$$

$$A_0^{**}(q_i, r_i) = -1$$

$$R_0^{**} = inv(A_0^{**})$$

De forma a inverter o sentido de fluxo dos caminhos e conectar os nós isolados.

No exemplo os elementos $R_0^{**}(1,15)$, $R_0^{**}(1,16)$, $R_0^{**}(1,17)$, $R_0^{**}(1,18)$ e $R_0^{**}(1,33)$ são iguais a 0 de acordo à matriz da Figura 20, então os nós [15,16,17,18,33] ficam desconectados, as arestas que contem esses nós como nós de incidência e pertencem a E_{anel}^* , são (14,15), (15,16), (16,17), (17,18), (18,33). Então para corrigir as matrizes deve-se fazer as seguintes operações:

$$A_0^{**}(14,15) = A_0^{**}(15,16) = A_0^{**}(16,17) = A_0^{**}(17,18) = A_0^{**}(18,33) = 0$$

$$A_0^{**}(15,14) = A_0^{**}(16,15) = A_0^{**}(17,16) = A_0^{**}(18,17) = A_0^{**}(33,18) = -1$$

$$A_1 = A_0^{**}$$

$$R_1 = inv(A_1)$$

O resultado da matriz de alcance R_1 tem-se na **Figura 21**, como pode-se observar todos os nós são alcançados pelo nó 1 só uma vez portanto o grafo é uma árvore.

O novo vetor $N_2^1 = [33,34,35,14,37]$ representa as chaves abertas, este vetor obtém-se retirando a chave fechada 36 e agregando a chave aberta 14 ao conjunto inicial N_2^0 .

Finalmente temos os resultados para a nova configuração dados pelo vetor N_2^1 , a matriz de incidência A_1 e a matriz de alcance R_1 da Figura 21 e o grafo correspondente na Figura 22.

		NÓ "PARA"																																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33		
NÓ "DE"	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
	3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
	4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
	5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
	6	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	
	7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Figura 17: Matriz de Alcance R_0^* , com anel formado por fechamento da chave 36

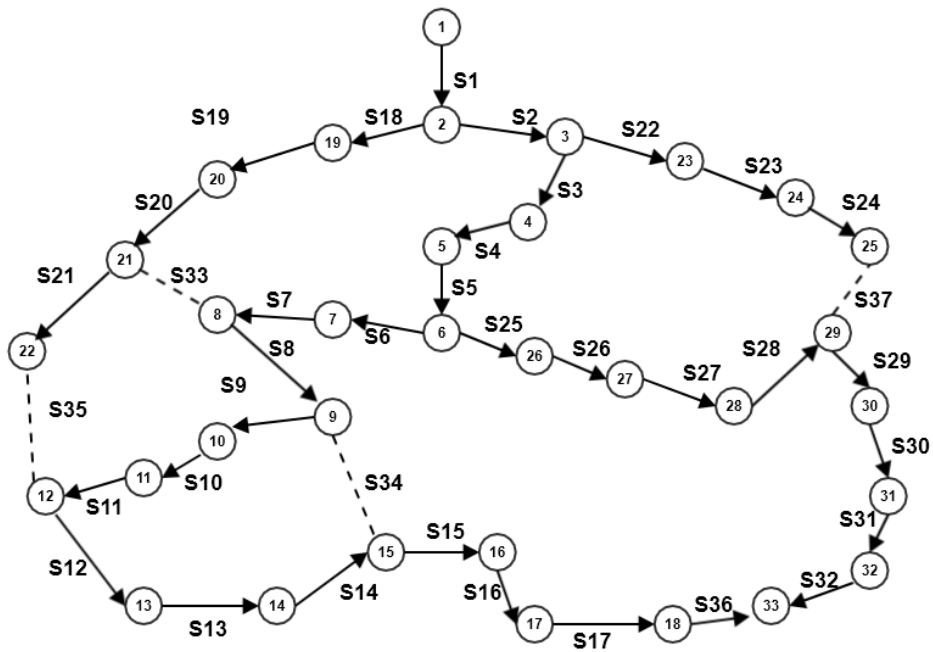


Figura 18: Grafo G_0^* do Sistema Teste de 33 barras com anel, chave 36 fechada.

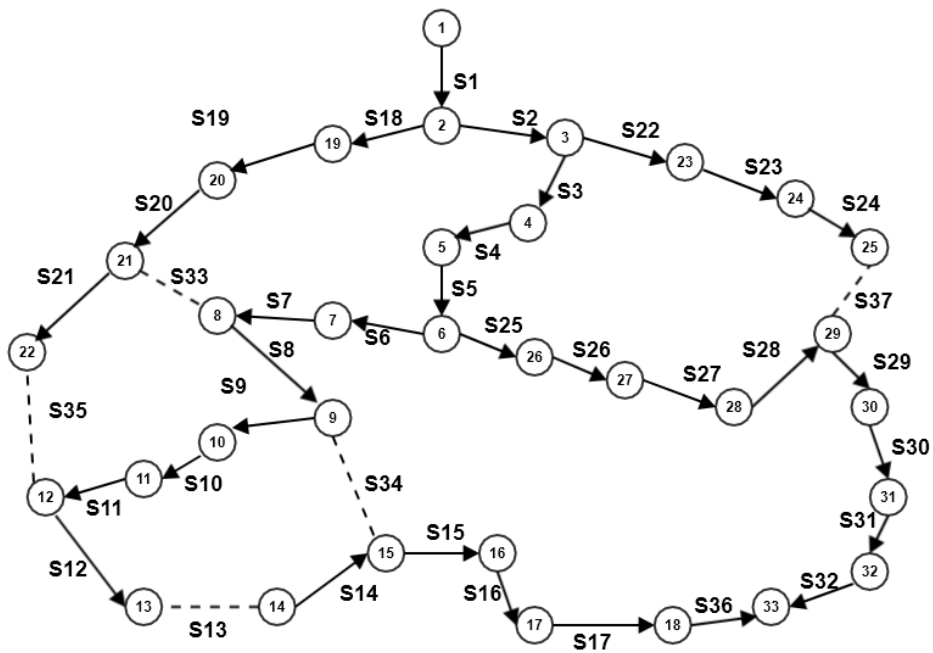


Figura 19: Grafo G_0^{**} do Sistema Teste de 33 barras . Chave 36 fechada e chave 13 aberta.

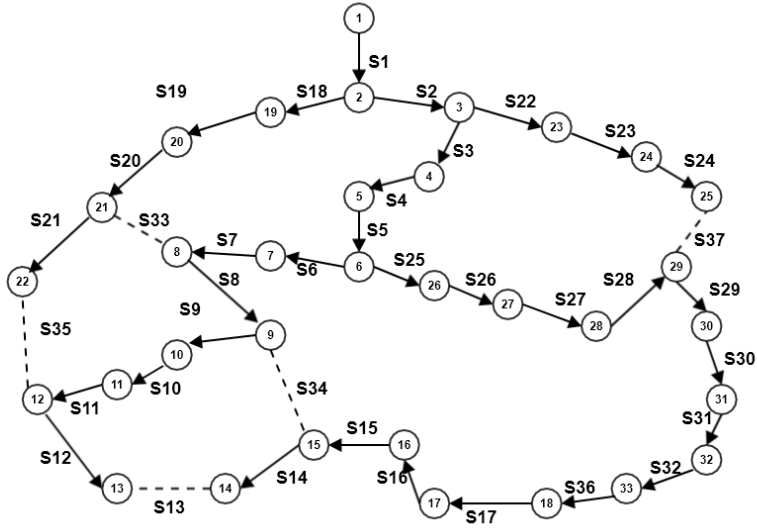


Figura 22: Grafo G_0^{**} do Sistema Teste de 33 barras . Chave 36 fechada e chave 13 aberta (corrigida).

RESUMO

Em resumo para qualquer sistema dado pelo grafo $G_0 = \{V, E_0\}$, com matriz de incidência A_0 onde $G_0 \in G_c = \{V, E\}$, e os vetores N representa o conjunto de chaves $N \equiv E$, N_1^0 e N_2^0 são os vetores de chaves fechadas e abertas da configuração inicial. As operações que devem ser feitas são as seguintes:

- Selecionar uma chave $p \in N_2^0$ do grafo G_c ou seja uma aresta $e_p = (q, r) \in G_c \cap \notin G_0$
- Fazer: $A_0^* = A_0$, $A_0^*(q, r) = -1$, $R_0^* = inv(A_0^*)$
- Buscar os elementos m_i tais que $R_0^*(m_i, r) = 1$
- Buscar todas as arestas $e_i = (n_i, m_i)$ de modo que $A_0^*(n_i, m_i) = -1$, $E_{anel}^* = \{e_i\}$
- Selecionar uma aresta $e_0 = (n_0, m_0) \in E_{anel}^*$
- Fazer: $A_0^{**} = A_0^*$, $A_0^{**}(n_0, m_0) = 0$.
- $R_0^{**} = inv(A_0^{**})$
- Identificar os elementos desconectados “ q_i ” tais que $R_0^{**}(1, : q_i) = 0$.

- Buscar os elementos $A_0^{**}(r_i, q_i) = -1$ e logo fazer $A_0^{**}(r_i, q_i) = 0$, $A_0^{**}(q_i, r_i) = -1$ (inversão do sentido de fluxo do caminho).

- Obtém-se as matrizes $A_1 = A_0^{**}$, $R_1 = inv(A_1)$ e o vetor $N_2^1 = \{N_2^0 - e_{0+p}\}$.

Outra maneira de fazer alterações na configuração e ter uma certeza na viabilidade da configuração é utilizar o algoritmo de Prim como fora feito em [14] dando pesos de forma adequada para obter as modificações desejadas.

CAPÍTULO 3

3. Fluxo de Potência.

Os métodos de fluxo de potência mais utilizados em transmissão são baseados em Newton-Rapshon, com suas variantes desacoplado e desacoplado rápido. Mas para sistemas de distribuição eles não são adequados devido a elevada quantidade de barras e à necessidade de fatoração das matrizes que são mal condicionadas, este mal condicionamento é devido a alta relação R/X, os circuitos de distribuição apresentam alta carga distribuída em seções com pequenas impedâncias de acoplamentos.

Normalmente a topologia da rede em sistemas de distribuição e radial com recursos, os alimentadores podem trocar de configuração através das operações de fechamento e abertura das chaves seccionadoras instaladas ao longo dos circuitos, normalmente o número de chaves é grande. As operações são feitas de maneira a manter a topologia radial, então o cálculo de fluxo de potência é feito aproveitando esta característica da rede.

Foram desenvolvidos métodos adaptados à sistemas de distribuição a partir do ano 1967, com a desenvolvimento da técnica de varredura inversa-direta (backward-forward) escrito por Berg. Depois foram desenvolvidos outros métodos como versões melhoradas desta técnica. O algoritmo é determinada por dois passos fundamentais:

A varredura inversa (*backward*) consistente em cálculos elétricos partindo das correntes ou potências desde as barras terminais até a fonte (nó inicial).

A varredura direita (*forward*) consistente em cálculos elétricos utilizando as tensões de cada nó a partir do nó inicial até as barras terminais.

Esses cálculos são feitos de forma iterativa até que o critério de erro de convergência seja satisfeito, desta forma o cálculo de fluxo de potência é feito com uma alta taxa de convergência e custo computacional baixo.

A topologia da rede do caso de estudo é tipicamente radial com recursos, isto é o alimentador tem possibilidade de transferência de carga para outro alimentador por meio do fechamento e abertura de chaves seccionadoras, sempre mantendo uma topologia radial. Então, uma metodologia que aproveita a condição indicada é vantajosa do ponto de vista da convergência do fluxo e também do esforço computacional.

Os métodos de varredura direto-inversa são:

- a) Método da soma de potência.
- b) Método da soma de corrente.
- c) Método da soma de impedância.

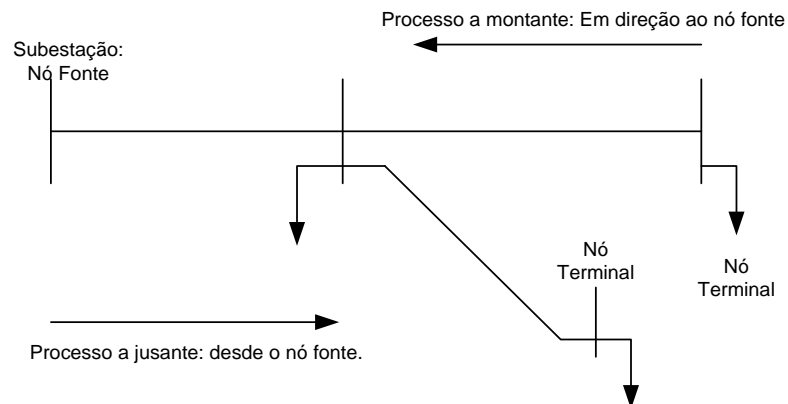


Figura 23: Método de varredura iterativo.

3.1. Método da soma de potência:

Uma variante do método de varredura inversa-direta é o método da soma de potência proposto inicialmente em [15] utilizando potências nodais em vez das correntes. Foi demonstrado os bons resultados para redes de distribuição radiais em termos de precisão dos resultados, custo computacional e facilidade de modelagem dos componentes do sistema.

Na técnica da soma de potências são incorporadas em uma única iteração os dois processos: cálculos de potências nodais (Processo a Montante: Em direção ao nó fonte) e o cálculo das tensões nodais (Processo a Jusante: Em direção desde o nó fonte). O esquema de nó é descrito na Figura 24 e o Fluxograma do Processo na Figura 25.

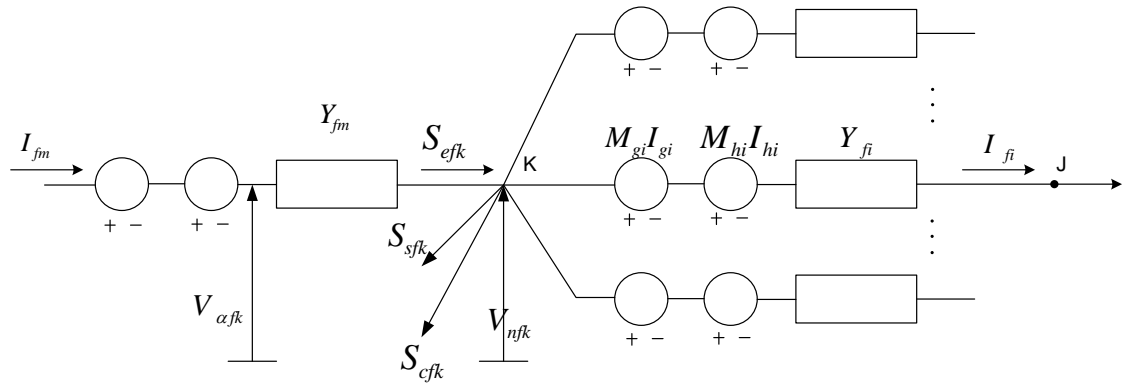


Figura 24: Esquema de Nó Típico

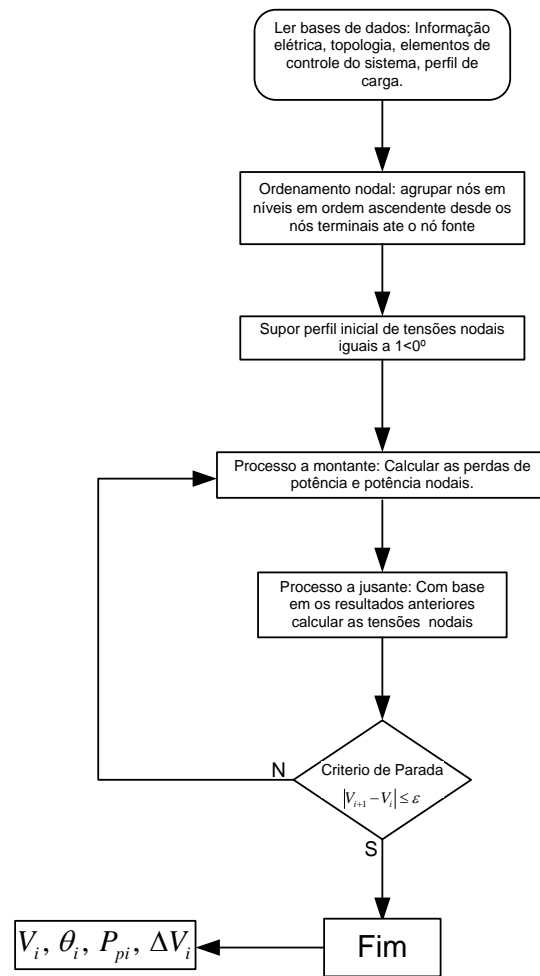


Figura 25: Fluxograma do método de soma de potência.

3.2. Método de Suma de Correntes.

O Método de Suma de Correntes é descrito em [15], este método é baseado na relação entre injeção de corrente nas barras e as correntes nos ramos. Como todos os métodos de varredura este é especializado para redes radiais de distribuição, as redes radiais de distribuição tem N barras (bus) para N-1 linhas ou ramos (*branch*). As correntes de ramos podem expressar-se em termos de correntes de barras. As correntes do nó **j** e as correntes dos ramos **i-j** estão relacionados pela equação (3.1)

$$I_j = I_{ij} - \sum I_{jk(j)} \quad (3.1)$$

Onde $k(j)$ é o conjunto de nós conectado ao nó j . Para a barra de referência a potência não é especificada portanto é excluída, e a relação entre correntes de barra e ramos são derivadas, como uma matriz quadrada não singular (3.2).

$$I_{bus} = KI_{branch} \quad (3.2)$$

A matriz K é chamada de matriz de incidência de elementos. É a mesma matriz de incidência da Teoria de Grafos $K = A$ da seção 2.3 mediante a representação 1 para a topologia da Rede da seção 2.7, e é a matriz ampliada para a representação 2, por tanto é uma matriz quadrada não singular de ordem N-1, onde N é o número de nós. É construída de maneira simples, onde cada linha descreve os elementos incidentes. Os elementos da matriz de incidência são construídos da seguinte maneira:

- a) $K(i, i) = 1$ Para $i = j$ (Elementos diagonais)
- b) $K(i, m(i)) = -1$ Onde $m(i)$ são os nos conectados ao nó i
- c) $K(i, j = m(i)) = 0$ Para os nós não conectados ao nó i

As correntes de ramo são obtidas pela equação (3.3) a partir da inversão da equação (3.2)

$$I_{branch} = K^{-1}I_{bus} \quad (3.3)$$

A matriz K^{-1} é a mesma matriz de alcance da Teoria de Grafos $K^{-1} = R$, para a representação 1 para a topologia da Rede da seção 2.7, e é a matriz ampliada para a representação 2.

É importante ressaltar que as matrizes de incidência e de alcance são calculadas uma só vez e são utilizadas para o cálculo de fluxo de potência e para as alterações de configuração reduzindo desta forma o custo computacional.

O método da soma de Soma de Correntes é realizado mediante o fluxograma representado na Figura 26.

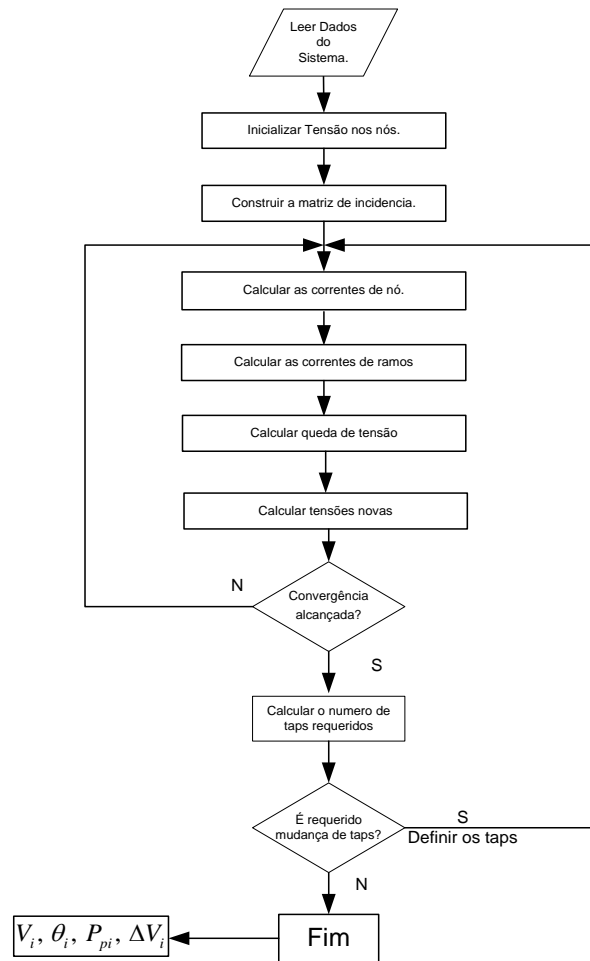


Figura 26: Diagrama de fluxo do algoritmo proposto

Passos:

Passo 1: tomar valores iniciais das magnitudes de todas as tensões de barra iguais a 1.0 p.u., para qualquer fase que deixa-se de representar, definir o valor da sua tensão igual a zero.

Passo 2: construir as matrizes de incidência K_a , K_b e K_c para as fases a, b e c, respectivamente. Note que o tamanho da matriz K_a é $(N_a-1) \times (N_a-1)$, da matriz K_b é $(N_b-$

1)x(Nb-1) e da matriz Kc é (Nc-1)x(Nc-1), onde Na, Nb e Nc é o número total de barras nas que as fases a, b e c existem.

$$\begin{aligned} I_{bus}^a &= I_L^a + I_{sh}^a - I_G^a \\ I_{bus}^b &= I_L^b + I_{sh}^b - I_G^b \\ I_{bus}^c &= I_L^c + I_{sh}^c - I_G^c \end{aligned} \quad (3.4)$$

Onde $I_L^{a,b,c}$ poder ser calculado por:

$$I_L^{a,b,c} = \frac{abs(V_{bus}^{a,b,c})^n \times conj(S_{L,espec}^{a,b,c})}{conj(V_{bus}^{a,b,c})} \quad (3.5)$$

$I_{sh}^{a,b,c}$ é calculado segundo:

$$\begin{bmatrix} I_{sh}^a \\ I_{sh}^b \\ I_{sh}^c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{bus}^a \\ V_{bus}^b \\ V_{bus}^c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$I_G^{a,b,c}$ é a corrente da geração distribuída e pode ser calculado segundo:

$$I_G^{a,b,c} = \frac{(P_{g,espec}^{a,b,c} - jQ_{g,espec}^{a,b,c})}{conj(V_{bus}^{a,b,c})} \quad (3.7)$$

Passo 4: as correntes de ramo em cada fase podem ser expressados por:

$$\begin{aligned} I_{branch}^a &= K_a^{-1} I_{bus}^a \\ I_{branch}^b &= K_b^{-1} I_{bus}^b \\ I_{branch}^c &= K_c^{-1} I_{bus}^c \end{aligned} \quad (3.8)$$

Passo 5: as quedas de tensão em cada fase em cada ramo pode expressar-se por:

$$\begin{bmatrix} V_{branch_i}^a \\ V_{branch_i}^b \\ V_{branch_i}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa_i} & Z_{ab_i} & Z_{ac_i} \\ Z_{ba_i} & Z_{bb_i} & Z_{bc_i} \\ Z_{ca_i} & Z_{cb_i} & Z_{cc_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{branch_i}^a \\ I_{branch_i}^b \\ I_{branch_i}^c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Passo 6: calcular as tensões das extremidades que recebem em relação às tensões de extremidade de envio utilizando a varredura para trás, então a tensão na barra j é encontrado por:

$$\begin{bmatrix} V_{bus_j}^a \\ V_{bus_j}^b \\ V_{bus_j}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{bus_i}^a \\ V_{bus_i}^b \\ V_{bus_i}^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{branch_i}^a \\ V_{branch_i}^b \\ V_{branch_i}^c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Passo 7: a diferença absoluta entre as novas tensões de barra e a tensão inicial dá o *mismatch* que representa o fator de convergência.

Passo 8: repetir os passos desde 3 a 7 até alcançar o requerido *mismatch* de convergência.

Esta metodologia será implementada para os cálculos de fluxo de potência neste trabalho por ser mais robusto.

3.2.1. Rateio da demanda dos alimentadores nas barras de carga.

O cálculo de Fluxo de Carga precisa dos dados de demanda em cada barra do Sistema Elétrico, e essas demandas devem ser atualizadas para cada horário em que precisasse fazer a análise de fluxo, para esse objetivo é necessário dispor de medidores de potência em cada nó de carga do sistema (transformador) e o medidor deve ser capaz de enviar a informação de forma on-line, para dispor desses dados em tempo real. Na maioria das empresas elétricas da região não tem disponível essa tecnologia nos pontos de carga, então são utilizados algoritmos simples para aproximar a demanda dos nós a partir de informações de demanda no primeiro nó do circuito alimentador (relé de saída do alimentador) de distribuição ou alguns pontos de medição intermédios no circuito geralmente alocados nos equipamentos instalados na rede.

O processo para estimar a demanda dos nós consiste em um rateio da demanda na saída do alimentador ou do ponto de medição existente, a todos os nós de carga da rede elétrica. O processo consiste basicamente nas seguintes etapas:

- 1- Conhecimento da demanda do alimentador ou em um nó de medição. Essa demanda deve ser igual à soma de todas as demandas dos nós conectados ao nó de medição. Na Figura 27 tem-se as cargas dos nós conectados a cada alimentador para realizar a distribuição de cargas.

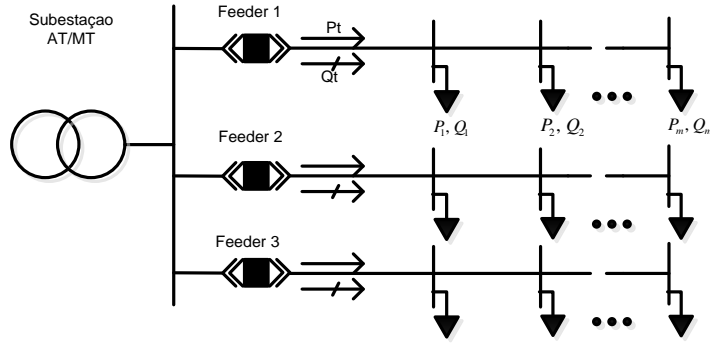


Figura 27: Distribuição de Cargas no alimentador.

- 2- Classificar as cargas como cargas com demanda fixa e cargas com demanda variável. As cargas fixas são as cargas conhecidas, podem ter registro de medições e outra informação útil como tipos de consumo: residencial, industrial, comercial e outros. Esses dados podem estar disponíveis de forma online ou não, em todos os casos podem ser aproveitados para melhorar a distribuição das cargas nos nós, esses dados serão considerados como cargas de potência fixa, geralmente as cargas conhecidas correspondem a usuários conectados à rede de média Tensão, portanto tem medição exclusiva para seu transformador. As cargas não conhecidas têm dados de menor qualidade como potência instalada ou potência contratada.
- 3- Distribuição da demanda do alimentador às barras de carga: A distribuição da demanda é feita mediante as equações (3.11)-(3.12). De forma que a soma das contribuições de todas as barras de carga seja igual à demanda do alimentador.

$$P_t = \sum_{i=1}^m P_i^f + \sum_{j=1}^n P_j^v \quad (3.11)$$

$$Q_t = \sum_{i=1}^m Q_i^f + \sum_{j=1}^n Q_j^v \quad (3.12)$$

Onde:

P_t, Q_t representa a demanda ativa e reativa total do alimentador.

P_i^f Representa a demanda de potência ativa do nó i de demanda fixa.

P_j^v Representa a demanda de potência ativa do nó j de demanda variável.

Q_i^f Representa a demanda de potência reativa do nó i de demanda fixa.

Q_j^v Representa a demanda de potência reativa do nó j de demanda variável.

A demanda não conhecida no nó j se estima com as equações seguintes:

$$P_j^v = \frac{P_j^{inst}}{\sum_{j=1}^n P_j^{inst}} \cdot \left(P_t - \sum_{i=1}^m P_i^f \right) \quad (3.13)$$

$$Q_j^v = \frac{Q_j^{inst}}{\sum_{j=1}^n Q_j^{inst}} \cdot \left(Q_t - \sum_{i=1}^m Q_i^f \right) \quad (3.14)$$

O

n

de:

P_j^{inst}, Q_j^{inst} representa a potência ativa e reativa instalada do nó j considerado de demanda não conhecida

Basicamente estas equações implicam rateio de forma proporcional à demanda instalada de cada nó em base à demanda total e as demandas conhecidas consideradas fixas. Neste rateio existe um erro devido às perdas na rede, elas são desconsideradas para a consideração de distribuição da demanda. Existe maior quantidade de variáveis que podem melhorar o modelo de distribuição de carga, mas este trabalho não abarca esses estudos, por não interferir com a análise de maneira significativa.

Para o rateio da demanda considerando a curva de carga, é necessário repartir a corrente conhecida num nó como ser o interruptor principal ou algum equipamento instalado na rede (religador, regulador de tensão, medidor) para cada valor médio em cada hora considerando o fator de potência na distribuição de carga e a configuração da rede para cada horário, este cálculo agrega um custo computacional adicional ao algoritmo de fluxo de potência.

3.3. Características do Sistema Elétrico de Distribuição em estudo - O caso

Paraguaio.

O caso de estudo real corresponde a uma rede de distribuição meramente radial com recursos, é uma rede de tipo passiva não tem geração distribuída. A tensão de fornecimento é de 23kV fase-fase. A característica radial é principalmente devido a que a função de proteção dos relés é restringida pela função de Sobrecorrente, e mesmo tenham outras características, a quantidade de ramificações limita a possibilidade de seletividade de outras funções de proteção. Em consequência não é recomendável praticar paralelismo entre alimentadores de maneira permanente, embora possa ser praticado o paralelismo durante um breve tempo nas operações de transferências de cargas para evitar cortes, mas posteriormente deve voltar à radialidade da rede. Outra característica muito importante é o desequilíbrio existente entre fases que se incrementa em redes de distribuição com ramificações a localidades rurais em comparação com os alimentadores com carga exclusivamente urbana.

3.3.1. Redes de Distribuição do tipo Urbano.

Redes urbanas estão compostas principalmente por linhas trifásicas abastecendo em maior quantidade a transformadores de distribuição trifásicos e em menor medida a transformadores monofásicos.

A tendência nos sistemas elétricos de distribuição é a implementação de tecnologias de automatismos, esta tecnologia inclui a instalação de chaves telecomandadas que são operadas desde o Centro de Controle de Distribuição. Estas equipes podem incluir funções de automatismos, e funções de proteção ou detecção de falhas nas redes.

As redes das zonas urbanas estão compostas geralmente por linhas mais confiáveis como ser redes subterrâneas e linhas protegidas. As redes protegidas são as mais utilizadas e estão substituindo às redes com condutores nus principalmente nos troncos dos alimentadores, devido a sua elevada relação de benefício-custo.

3.3.2. Redes de Distribuição do tipo Rural.

A rede de distribuição das áreas rurais tem características especiais tais como o elevado comprimento alcançando em alguns casos entre 100 km ou mais, e o elevado

desequilíbrio de correntes entre fases devido principalmente á instalação de ramais monofásicos para consumidores de baixa carga a uma grande distância, geralmente as características destas redes são radiais com menor possibilidades de reconfiguração devido à escassas quantidades de circuitos próximos. Outras caraterísticas deste tipo de redes é a instalação de maior quantidade de equipamentos de reguladores de tensão, capacitores, religadores, e outros devido ao comprimento das linhas.

Geralmente as reconfigurações neste tipo de redes são estudadas para determinados casos pontuais devido a escassa disponibilidade de opções, porém não requerem de ferramentas especiais além do cálculo de fluxo de potência.

CAPÍTULO 4

4. Logica Fuzzy

Os computadores manejam dados precisos que são combinações de uns (1) e zeros (0), isto é, proposições que são verdadeiras ou falsas. O cérebro humano pode raciocinar com informação que tem uma quantidade de incerteza e julgamentos de valor como: “o aire é frio”, “a velocidade é rápida” [16] . Além disso as pessoas podem razoar num mundo onde tudo é parcialmente certo, não existe uma certeza exata nos dados das variáveis.

A origem da lógica fuzzy começa com os matemáticos do século XX como Bertrand Russell que retoma um antigo paradoxo grego que diz o seguinte: “ Um cretense afirma que todos os cretenses mentem”. Então existe uma aparente contradição na afirmação, se ele mentir, então ele diz a verdade e ele mente, e se ele diz a verdade, então ele mente, portanto, essa afirmação não pode ser verdadeira ou falsa.

Na década de 1920 independentemente de Russell, o matemático polonês Jan Lukasiewicz começou a trabalhar com os princípios de uma lógica multivalorada, em que as proposições podem tomar valores verdadeiros contínuos entre uns (1) e zeros (0) da lógica clássica.

A lógica fuzzy mais formal data do ano 1965, quando Zadeh introduziu os primeiros conceitos com novos paradigmas conceituais relacionados à teoria dos conjuntos matemáticos em seu artigo **Fuzzy Sets** [17]. A lógica fuzzy também tem o nome de lógica nebulosa ou fuzzy. Ele trabalhou com uma nova álgebra baseada em conjuntos difusos, que são valores compreendidos no rango [0.00 , 1.00].

Assim, um conjunto fuzzy é definido no universo da discussão como um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{x, \tilde{z} = \mu_A(x)\} / x \in X, \tilde{z} \in [0.00 , 1.00] \quad (4.1)$$

Onde

$\mu_A(x)$: função de Pertinência

x : variável real

X: Conjunto das variáveis reais ou valores nítidos

\tilde{z} : Valor difuso correspondente

A função de pertinência deve ser elaborada de forma a representar o grau de importância da variável de estudo de forma correta.

O valor de cada variável representa seu grau de pertinência, onde o valor zero (0) implica uma falsidade ou ausência total e o grau um (1) implica uma verdade absoluta ou certeza total, e os valores compreendidos entre eles implicam seu grau de pertinência ou valor fuzzificado.

A lógica fuzzy encontra sua principal aplicação na Teoria de Controle e para conhecer o resultado desejado consta de três etapas: fuzzificação, inferência e defuzzificação.

A etapa de Fuzzificação consiste em converter as variáveis reais ao conjunto de valores difusos compreendido no intervalo $[0.00, 1.00]$, e concebidas mediante as Funções de Pertinência.

A segunda etapa de Inferência, consiste na fase de controle de variáveis mediante as regras linguísticas ou de Inferência, de forma a obter a variável fuzzy de saída que otimize o problema de controle.

A terceira etapa de Defuzzificação consiste em obter os valores reais de saída, é o processo inverso da Fuzzificação.

A lógica fuzzy hoje é comum na utilização das diferentes tecnologias, em eletrônica, controle, matemáticas, robótica. O objetivo principal da lógica fuzzy é criar um sistema baseado no comportamento e pensamentos humanos, isso é possível mediante à abordagem de um modelo adequado a um contexto e traduzi-lo a regras gramaticais ou linguagem humano [16]. A chave para o sucesso da lógica fuzzy é baseada na experiência, depende do banco de dados e da correta aplicação do sistema chamado Sistema Experto na área de sua aplicação.

Na figura Figura 28 tem-se a estrutura básica de um controlador Fuzzy proposto em [18].

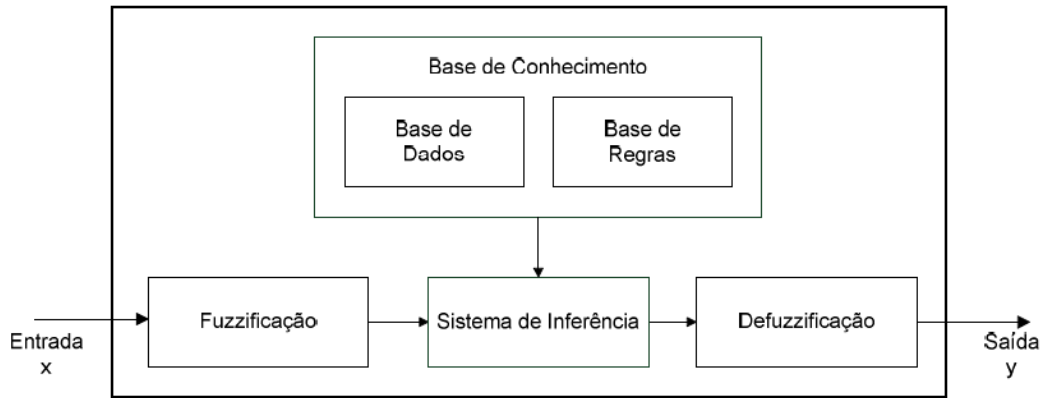


Figura 28: Controlador Fuzzy Mamdani . Estrutura Básica.

4.1. Funções de Pertinência (Membership Function – MF).

Ao contrário dos conjuntos nítidos baseados na teoria de conjuntos clássicos, os conjuntos difusos não têm limites bem estabelecidos, então a pertinência ou não de um elemento é estabelecida conforme grau de pertinência, que são valores compreendidos entre zero (0) e um (1).

O grau de pertinência de uma variável determinada é estabelecido mediante as funções de pertinência $\mu_A(x)$.

A variável x pertence ao conjunto real ou de valores nítidos \mathbf{X} , que pode consistir de objetos discretos ou contínuos no espaço. Na Figura 29 tem-se um exemplo de Função de Pertinência, que representa o conjunto fuzzy no universo de discurso como um conjunto de pares ordenados: $A = \{x, \mu_A(x) / x \in X\}$, os valores $\tilde{z} = \mu_A(x)$ são os valores difusos.

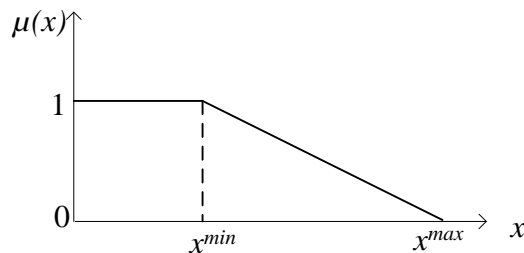


Figura 29: Exemplo de Função de Pertinência

A continuação se resume algumas das principais funções de pertinência utilizadas.

4.1.1 Função de saturação:

A função de saturação é muito simples. Tem um valor de zero (0) até certo ponto e depois cresce com inclinação constante até alcançar o valor de um (1), onde se estaciona. Na Figura 30 se apresenta o gráfico da função de pertinência de Saturação.

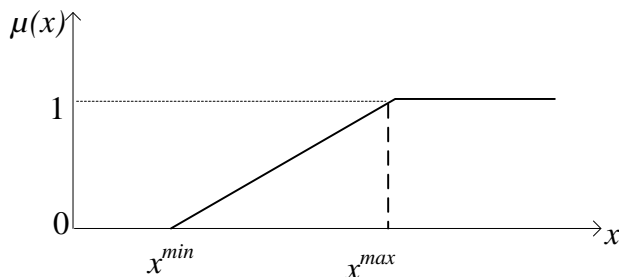


Figura 30: Função de Pertinência de Saturação

4.1.2. Função Ombro

Esta função é de uma forma o contrário da função de saturação. Neste tipo de função se inicia num valor 1 e logo descende com inclinação constante até alcançar o valor 0. Na Figura 31 se apresenta o gráfico desta função de pertinência.

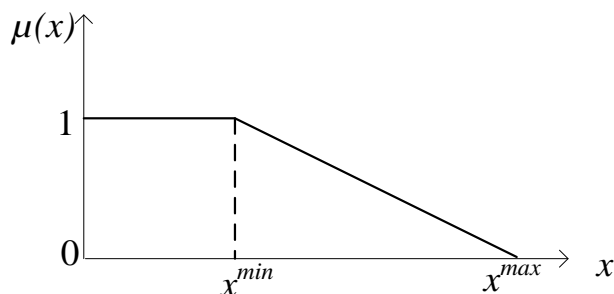


Figura 31: Função de Pertinência Ombro

4.1.3. Função Triangular

A Figura 32 apresenta a função triangular. Como se pode observar na ilustração consta de uma parte de inclinação positiva constante até alcançar o valor de 1, para depois descer com

inclinação constante. Esta função é muito útil para representar variáveis com um valor ótimo central.

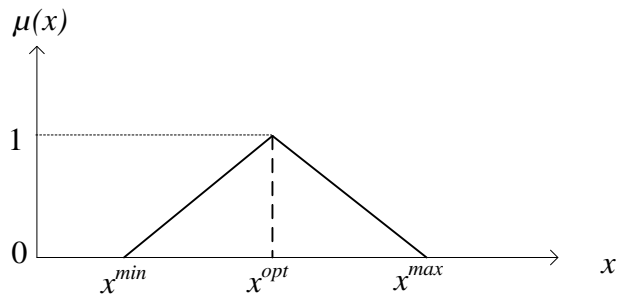


Figura 32: Função de pertinência triangular

4.1.4. Função Trapezoidal

Uma forma mais geral de função triangular e a função trapezoidal, é representada na Figura 33. Nesta função é permitido um intervalo de valor ótimo entre x^1 e x^2 .

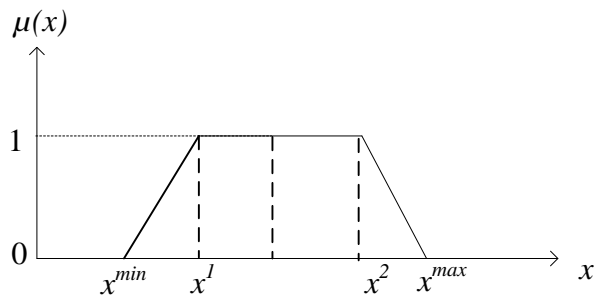


Figura 33: Função de pertinência trapezoidal

4.1.5. Função Gaussiana

A forma desta função é dada por uma curva de Gauss. Na **Figura 34** se mostra a função de pertinência gaussiana.

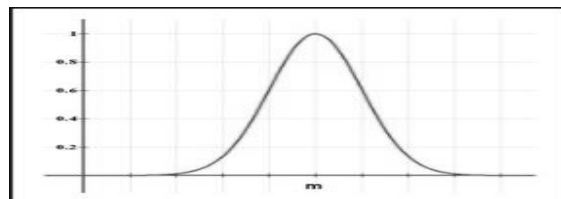


Figura 34: Função de pertinência gaussiana

4.1.6. Função S ou Sigmoide

A forma desta função é similar à da saturação. Porém como seu nome o indica, o segmento de subida não é uma linha reta, sino uma curva de segundo ordem.

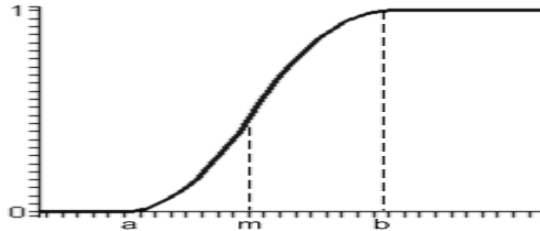


Figura 35: Função de pertinência S ou Sigmoide

4.2. Aplicações da Lógica Fuzzy na Otimização Multiobjetivo

Neste trabalho a Lógica Fuzzy é utilizada para a abordagem multiobjetivo, devido aos bons resultados aferidos na bibliografia consultada e a vantagem da solução única quanto á tomada de decisões em tempo real. O método utilizado é detalhado abaixo.

4.2.1. Otimização Multiobjetivo

Os problemas de otimização na engenharia são frequentemente multiobjetivos, no caso da otimização da operação também normalmente tem-se mais de um objetivo proposto que são características desejável quanto ao custo de operação e qualidade do serviço de abastecimento, que podem ser dois ou mais funções. Se não existe conflito entre as funções objetivo, então uma solução pode ser encontrada onde cada função objetivo atinge seu ótimo, nesse caso, nenhum método especial é necessário [20].

Agora o problema é que normalmente as funções objetivo que dependem de um conjunto de variáveis de controle são conflitantes. No caso dos sistemas elétricos de distribuição, reduzindo as perdas não precisamente é reduzido a diferença de carga entre circuitos alimentadores (balanço de carga), e tampouco é necessariamente diminuído o desvio da tensão do valor nominal, devido às características das componentes das redes e a

alocação dos equipamentos de distribuição, essas variáveis podem ser conflitantes entre elas, mesmo também quando o problema trata de outras variáveis não elétricas como o custo da operação e a confiabilidade do sistema.

4.2.2. Formulação Matemática

A formulação geral do problema de otimização multiobjetivo é apresentado como:

$$\text{Minimizar } \Lambda = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\}, x \in \Omega \quad (4.2)$$

$$\text{s.a} \quad \Omega = \{x \in \mathbb{R}^n / g_r(x) \leq 0, r \in I, h_q(x) = 0, q \in J\} \quad (4.3)$$

Onde, Λ é o vetor de funções objetivos f_i consistindo de k critérios, funções que podem ser mutuamente conflitantes. O vetor de variáveis de decisão, x , deve pertencer ao conjunto Ω viável que inclui as restrições do problema dado pelas desigualdades às funções de restrição g_r e igualdade às funções de restrição h_q .

Existem muitos enfoques para a abordagem do problema multiobjetivo, serão descritos os enfoques pelo método de Frente de Pareto e Lógica Fuzzy.

4.2.3. Metodologia baseada na Dominância de Pareto

Em seguida, serão apresentadas algumas definições mais utilizadas.

4.2.3.1. Dominância de Pareto:

Um vetor $u = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ é dito que domina ao vetor $v = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$, ou v é inferior a u , se u é parcialmente menor que v , i.e., $u_i \leq v_i, \forall i \in (1, 2, \dots, k) \wedge u_i < v_i, \exists i \in (1, 2, \dots, k)$. Denotada como $u \preceq v$.

4.2.3.2. Solução Ótima de Pareto/ Solução Não dominada.

A Variável de decisão $x_u \in \Omega$ é dita solução de Pareto ou solução não dominada se somente se não existe $x_v \in \Omega$ que satisfaz a relação: $v = f(x_v \in \Omega) = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ domina $u = f(x_u \in \Omega) = (u_1, u_2, \dots, u_k)$, nomeadamente,

$$\forall i \in (1, 2, \dots, k) f_i(x_u) \leq f_i(x_v) \wedge \exists i \in (1, 2, \dots, k) f_i(x_u) < f_i(x_v) \quad (4.4)$$

4.2.3.3. Conjunto ótimo de Pareto.

Para um dado *Multi Objective Problem* MOP $f(x)$, o Conjunto Ótimo de Pareto (P^*), é definido como:

$$P^* = \{x \in \Omega \mid \neg \exists x' \in \Omega, f(x') \preceq f(x)\} \quad (4.5)$$

4.2.3.4. Frente de Pareto

Para um dato MOP $f(x)$ e um Conjunto Ótimo de Pareto P^* , a frente de Pareto FP^* é definido como:

$$FP^* = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x) \mid x \in P^*\} \quad (4.6)$$

O problema para a aplicação em operação de sistemas elétricos deste método é que o Frente de Pareto oferece um conjunto de soluções possíveis do qual o operador de Sistema ou Despachante deve optar por um deles, isto muitas vezes necessita de uma análise que em tempo real dificulta a tomada de decisões.

4.2.4. Metodologia baseada na Lógica Fuzzy

Em [21] é apresentada uma metodologia baseada na lógica fuzzy para a abordagem do Problema Multiobjetivo. As funções objetivo de um problema são descritas mediante o conjunto de $\{f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)\}$, onde X é a variável de controle, e as variáveis do conjunto $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$ são valores reais que representam os pesos para cada função com

o propósito de fazer a ponderação da importância de cada função para a otimização global onde $\sum_{j=1}^p \alpha_j = 1$. Na Figura 36 se mostra a análise da lógica fuzzy para a resolução do problema multiobjetivo, a abordagem consiste em fuzzificar as funções de entrada (variáveis reais), depois em no domínio de variáveis difuso estabelecer uma regra para o análise das funções de forma que a saída do sistema seja uma única função no domínio difuso, então para aquela única função que concilia todas as funções objetivos é aplicada a otimização mono-objetivo, depois é obtido os valores de saída da variável X correspondente ao valor ótimo.

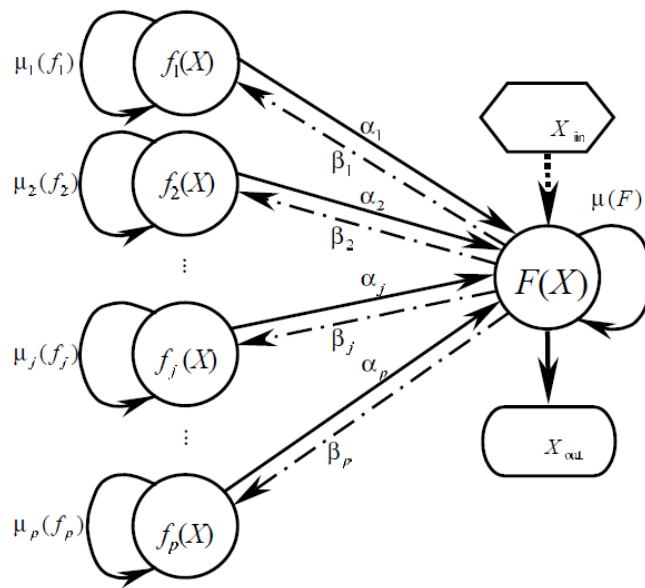


Figura 36: Abordagem do Problema Multiobjetivo com Lógica Fuzzy.

Fonte: [21]

Existem vários tipos de abordagem para a obtenção da função Fuzzy $\mu(F)$ que engloba todas as funções objetivos entre elas se citam:

$$\mu(F) = \frac{\sum_{j=1}^p (1-\mu_j)\mu_j}{\sum_{j=1}^p (1-\mu_j)} \quad [21]$$

$$\mu(F) = \left(\prod_{j=1}^p \mu_j\right)^{\frac{1}{p}} \quad [9]$$

$\mu(\mathbf{F}) = \sum_{j=1}^p \alpha_j \mu_j$ [22] e [23], onde α_j é um fator que implicam a importância ou peso da função objetivo f_j com relação às demais funções.

A vantagem da abordagem com lógica fuzzy consiste em simplificar o problema de maneira significativa e oferecer um só resultado, ao contrário do método baseado em Frente de Pareto que tem um conjunto de resultados possíveis. A lógica fuzzy tem a vantagem de fazer filtro aos ruídos de dados na entrada, tais como as variações de tensão e correntes em uma ou várias barras. Também quanto a procura de uma solução ótima em operação é necessário que a solução ótima seja fácil de aplicar para os operadores do sistema, então a abordagem pelo método baseado na lógica fuzzy é mais robusta e simples.

Os valores dos pesos α_j refletem a importância relativa da função f_j associada à função de pertinência μ_j , a eleição dos valores α_j e as funções de pertinência μ_j são de vital importância na eficiência de processo de otimização e devem ser procuradas de acordo às características do sistema e as políticas da empresa concessionária, mediante uma análise da experiência do operador de sistema chamado Sistema Experto.

Neste trabalho é aplicado a análise multiobjetivo mediante a lógica fuzzy fazendo a função global $\mu(\mathbf{F}) = \sum_{j=1}^p \alpha_j \mu_j$ [22] e [23], por sua praticidade e os resultados satisfatórios demonstrados.

Então o problema de otimização multiobjetivo dado pela equação (4.2) e (4.3) é reduzido a um problema de maximização mono-objetivo da função global Fuzzy dada pela equação (4.7) e (4.8), as restrições são as mesmas.

$$\text{Maximizar } \mu(\mathbf{F}) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)\}, x \in \Omega \quad (4.7)$$

$$\text{s.a} \quad \Omega = \{x \in \mathbb{R}^n / g_r(x) \leq 0, r \in I, h_q(x) = 0, q \in J\} \quad (4.8)$$

CAPÍTULO 5

5. Sistemas Imunológicos Artificiais

O Sistema Imunológico Artificial (AIS) é um algoritmo evolutivo, inspirado no Sistema Imunológico dos Vertebrados que trata de emular os mecanismos concernentes à eficácia da defesa do organismo ao ataque de agentes externos, fundamentalmente devido ao êxito destes mecanismos baseados na hipermutação somática e a proliferação clonal.

5.1. O Sistema Imunológico

Os algoritmos bio-inspirados utilizados em otimização são muito populares, eles estão baseados nos processos naturais e tratam de emular as ações que são as chaves do sucesso na sobrevivência dos seres vivos. Os mais destacados são: Algoritmos Genéticos (AG), Enxame de Partículas (Swarm), Colônia de Formigas (Ant Colony) e Sistemas Imunológicos Artificiais. Estes algoritmos são também chamados algoritmos de computação evolutiva pela natureza evolutiva quanto à busca da solução ótima.

Os algoritmos de computação evolutiva têm algumas características principais comuns, como por exemplo: utilizam um conjunto de possíveis soluções, chamada população; executam a busca a partir da própria função, e não de uma derivada ou outras informações; e aplicam regras probabilísticas de transição. Essas regras probabilísticas não são puramente aleatórias, o fato de utilizar transições probabilísticas é direcionar a busca para regiões do espaço amostral onde existe a maior possibilidade de haver valores ótimos, é feita mediante operadores inteligentes bio-inspirados. A partir da própria função, a aptidão de uma solução é medida diretamente naquela, avaliando diretamente o desempenho de cada indivíduo da população.

No campo de Reconfiguração de Sistemas Elétricos os algoritmos evolutivos, entre eles os algoritmos baseados em AG são muito utilizados na busca de soluções a problemas complexos tais como a reconfiguração de sistemas elétricos. Em [4] é proposto um algoritmo genético (AG) chamado *enhanced genetic algorithm* (EGA) fazendo modificações no algoritmo genético original quanto os operadores de cruzamento e mutação baseados nos Teoremas de Kruskal da Teoria de Grafos e o conceito de ciclo

simples. Em [24], a população inicial é gerada de forma aleatória mediante a aplicação dos algoritmos de Prim e Kruskal, e os operadores de cruzamento e mutação são baseados no conceito de ciclo simples e também o Teorema de Kruskal. Em ambos artigos são utilizados a Teoria de Grafos para fornecer a população inicial e para a determinação de uma configuração factível nas operações efetuadas para cada iteração.

Os algoritmos baseados em AIS têm muita similitude aos algoritmos genéticos com as diferenças fundamentais que o AIS não conta com o operador de cruzamento (*Crossover*) e que o operador Mutação e Clonagem são muito mais especializados, também quanto a características de estabilidade de população.

Em [1] é proposto um algoritmo AIS para a procura da solução do problema de reconfiguração multiobjetivo, o operador de mutação é aplicado de forma aleatória mediante a mudança de qualquer estado da chave e depois a configuração é corrigida mediante a aplicação do algoritmo de Prim de forma que um grafo seja uma árvore.

Em [3] são aplicados dois algoritmos baseados em AIS os algoritmos Copt-aiNet (*Artificial Immune Network for Combinatorial Optimization*) e Opt-aiNet (*Artificial Immune Network for Optimization*), estes algoritmos são variantes do AIS, a mutação é baseada no conceito de laço fundamental assim também a geração da população inicial é feita com esse conceito.

Abaixo estão algumas das principais definições dos algoritmos de AIS necessários para o desenvolvimento do trabalho.

5.2. Características do Sistema Imunológico

O sistema imunológico (SI) é um complexo de células, moléculas e órgãos que representa um mecanismo de identificação capaz de perceber e combater a disfunção da própria célula e da ação de micro-organismos infecciosos exógenos. A interação entre o SI e vários outros sistemas e órgãos permite a regulação do corpo, garantindo seu estável funcionamento.

O SI permite a defesa do organismo de uma infecção que pode produzir a doença e até a morte do indivíduo. Os mecanismos de SI reconhecem uma variedade quase ilimitada de células e substâncias infecciosas exógenas, conhecidos como elementos não próprios, distinguindo-os daquelas células nativas não infecciosas, conhecidas como moléculas próprias.

O sistema tem uma memória capaz de lembrar cada infecção, de forma que em uma segunda infecção o mesmo patógeno é eliminado sem dificuldade, e o patógeno da mesma família, mas com leve variação é eliminado mediante a capacidade adaptativa do SI.

Duas características principais do SI podem ser distinguidas de acordo com a forma como o corpo identifica um material externo:

- O Sistema Imunológico Inato.
- O Sistema Imunológico Adaptativo.

O Sistema Imune Inato é a capacidade do corpo que nasce com a habilidade de reconhecer certos micróbios ou agentes externos e imediatamente e destruí-los. O Sistema Inato pode destruir muitos patógenos no primeiro encontro.

A Imunidade Adaptativa utiliza receptores de antígenos que são gerados somaticamente, clonalmente distribuídos nos dois tipos de linfócitos: células B e células T. Estes receptores de antígenos são gerados por processos aleatórios e, como consequência, a concepção geral da resposta imunitária adaptativa baseia-se na seleção clonal de linfócitos que expressam receptores com especificidades particulares. As moléculas de anticorpos (Ab) desempenham um papel preponderante no sistema imune adaptativo. Os receptores utilizados na resposta imunitária adaptativa são formados reunindo segmentos de genes. Cada célula utiliza as peças disponíveis de forma diferente para fazer um receptor único, permitindo que as células reconheçam coletivamente os organismos infecciosos, confronta-los durante toda a vida. A imunidade adaptativa permite ao organismo reconhecer e responder a qualquer micróbio, mesmo aquele que nunca foi um invasor antes.

A Imunologia é uma ciência ainda bastante nova, no ano 1798 Edward Jenner fez o tratado de Jenner sobre a vacinação (do latim *vaccinus*, das vacas) quando foi publicado seu experimento consistente em comprovar a imunidade provocada pela injeção do material de uma pústula de varíola bovina no braço de um menino de 8 anos, quando mais tarde o menino foi intencionalmente inoculado com o vírus de varíola humana, uma variedade muito mais letal, o menino não desenvolveu a doença, seu organismo foi imunizado mediante a “vacinação” fazendo a primeira imunização com ajuda de uma injeção e criando um novo ramo da ciência.

No século XIX, Robert Koch provou que as doenças infecciosas eram causadas por micro-organismos patogênicos, cada um dos quais era responsável para uma determinada

patologia. Posteriormente, Louis Pasteur na década do 1880, desenvolveu com sucesso as vacinas antirrábica e anti-varíola e Metchnikoff descobriu os processos celulares de fagocitose. Ainda no século XIX, Behring e Kitasato descobriram os anticorpos em soros de pacientes inoculados e Ehrlich investigou os processos de aumento de produção de anticorpos depois da exposição a antígenos [25]

No início de 1900, Jules Bordet e Karl Landsteiner trouxeram à discussão a noção de especificidade imunológica. Foi mostrado que o sistema imunológico foi capaz de produzir anticorpos específicos contra os produtos químicos sintetizados artificialmente que não existiam.

As propostas teóricas originadas durante o período de 1930-1950, eram principalmente sub-celular. Foi focado na biossíntese de moléculas de anticorpo, produzida por células. A conclusão foi que o antígeno deve trazer para a célula informação sobre a estrutura complementar da molécula de anticorpo. Esta teoria foi abandonada posteriormente em favor da teoria de seleção clonal, proposta por Burnet.

Nos últimos anos, a maioria dos trabalhos em imunologia está concentrando em apoptose, a apresentação de antígeno, as citosinas, regulação imune, memória, doenças anti-imune, as vacinas de ADN, a sinalização intracelular e intercelular, e maturação da resposta imunitária.

5.3. Sistema Imunológico Artificial.

Os sistemas imunes artificiais são sistemas adaptativos, inspirados pela teoria da imunologia e funções, princípios e modelos observados no sistema imune, os quais são aplicados para solucionar problemas. Uma das características mais marcantes destes sistemas é a robustez, expressada em uma tolerância às perturbações em componentes individuais, que podem realizar tarefas complexas [25].

5.3.1. Principais Definições e Características do Sistema Imune.

Anticorpo: molécula de proteína solúvel produzida e secretada pelos linfócitos B em resposta à presença de antígenos, a qual é capaz de se ligar a um antígeno específico. Traduzindo para o problema de otimização, o anticorpo é a solução do problema que satisfaz a função objetivo. Particularmente neste caso, trata-se da configuração da rede que

satisfaz a condição de configuração ótima, dado pelo conjunto de chaves abertas e fechadas.

Antígeno: qualquer agente que, quando introduzido no corpo, é reconhecido pelo sistema imunológico e prontamente combatido. Para um problema de otimização, o antígeno é a função objetivo ou qualquer outra equação a ser calculada. Particularmente neste caso o antígeno pode ser a função objetivo que é o valor das perdas elétricas do sistema no caso mono-objetivo, ou a função global fuzzy que engloba várias funções objetivos no caso multiobjetivo.

Clone: um grupo de células ou organismos geneticamente semelhantes que descendem de um ancestral comum; múltiplas cópias idênticas reproduzidas a partir de um antecessor comum. Neste caso, os clones são apenas cópias da mesma solução ou seja as cópias de cada conjunto de chaves abertas e fechadas;

Seleção clonal: teoria que afirma que a resposta imunológica é realizada pelos anticorpos de maior afinidade obtidas a partir de um processo evolutivo onde os melhores indivíduos são escolhidos a cada geração. Para esta aplicação, é equivalente a afirmar que o processo de busca encontra a melhor solução através da seleção e clonagem das melhores soluções de uma geração anterior;

Hipermutação: altas taxas de mutações somaticamente introduzidas nos genes dos anticorpos. Essas mutações são realizadas a partir de recombinação de genes durante a reprodução dos anticorpos. Para este problema, o processo de hipermutação é executado quando um par de chaves é mudada de posição (aberto ou fechado) uma menor perda elétrica, ou seja, uma resposta melhor;

Maturação: processo de desenvolvimento e produção de anticorpos de alta afinidade através da aplicação de hipermutação e edição de receptores. O processo de pesquisa de soluções diferentes pode ser considerado um processo de maturação, visto que durante o mesmo são aplicados os processos de hipermutação e seleção;

Diversidade de repertório: o conjunto de anticorpos produzidos pelo sistema imunológico durante toda a vida do indivíduo, contendo informações sobre a produção de

anticorpos de alta afinidade dentro dos linfócitos. Esta característica ocasiona que o sistema imune possa reconhecer uma variedade quase ilimitada de antígenos, fazendo que este seja mais eficiente.

Memória: capacidade do sistema imunológico de armazenar informações sobre antígenos combatidos anteriormente, possibilitando a produção de anticorpos de alta afinidade em uma infecção posterior pelo mesmo antígeno. Para este problema, trata-se do armazenamento das respostas obtidas para determinado problema. Todas as soluções obtidas fazem parte do repertório e ficam arquivadas na memória;

Aprendizado reforçado: característica que permite ao sistema imunológico melhorar as respostas para determinados antígenos, criando anticorpos de maior afinidade a cada vez que o organismo entra em contato com um determinado antígeno. Para o problema de otimização em questão, trata-se da capacidade de obter melhores respostas a cada vez que a função objetivo é solucionada. O sistema imune é capaz de aprender das experiências, e com isto ele sabe como atacar aos corpos estranhos. Este mecanismo multiplica as células boas que atacam as más para poder preservar a integridade do sistema.

Reconhecimento de padrões: o sistema imune pode reconhecer e classificar diferentes padrões e gerar determinadas respostas.

Extração de Características: Há células que são responsáveis por detectar a presença de corpos estranhos.

Co-estimulação: a ativação das células B está regulada por meio da estimulação.

Proteção dinâmica: a expansão clonal e a expansão somática permitem a geração de células imunes de alta afinidade. Este processo realiza um equilíbrio dinâmico entre a exploração e o aproveitamento na imunidade adaptativa.

Diversidade: esta característica ocasiona que o sistema imune possa reconhecer uma variedade quase ilimitada de antígenos, fazendo que este seja mais eficiente.

Autorregulatório: quando o sistema produz muitos anticorpos para destruir os antígenos, o sistema tem que eliminar estes, já que uma vez que elas cumpriram seu

propósito não servem para nada ao sistema. Alguns não são eliminados, são conservados para um possível uso posterior.

Detecção Distribuída: o sistema imune pode agir como um sistema distribuído, ou seja, as células boas circulam por todo o organismo por meio do sangue. Estes sistemas não dependem de nenhum sistema centralizado e ao detectar algum corpo estranho avisam ao resto do sistema.

Detecção probabilística: a reação cruzada na resposta do sistema imune é um processo estocástico. Também a detecção é aproximada. Isto é, um linfócito pode combinar com muitos tipos de antígenos.

Estes Sistemas Artificiais são sistemas computacionais baseados em metáforas dos sistemas imunológicos biológicos, utilizam informações contidas no problema para obter a solução utilizando padrões da resposta imunológica dos seres viventes.

5.4. O princípio de Seleção Clonal.

A teoria de seleção clonal propõe uma explicação de como faz o sistema imune para descrever as características básicas de uma resposta imune a um estímulo antigênico. Este princípio estabelece a ideia que só aquelas células que reconhecem os antígenos proliferam; desta maneira são selecionadas aquelas que tem a capacidade de reconhecer. A seleção clonal opera nas células B e T. Na Figura 37 pode-se observar uma ilustração do princípio de seleção clonal.

As principais características da teoria de seleção clonal são:

- As células novas são copiadas (clonadas) de seus pais, submetidas a um mecanismo de mutação (hipermutação somática).
- Eliminação dos linfócitos recentemente diferenciados que levam a receptores autorreativos.
- A proliferação e diferenciação das células maduras com antígenos em contato.
- A persistência de clones proibidos, resistindo a precoce eliminação por antígenos próprios, como a base de doenças autoimunes.

Para realizar a função de proteção, a capacidade de reconhecimento de antígenos não é suficiente. O sistema imunológico deve ter recursos suficientes para efetuar uma resposta efetiva contra os agentes externos. Como em uma típica situação predador-presa, o tamanho da população de linfócitos específicos contra os micro-organismos patogênicos é crucial para a recuperação da infecção.

Assim, a resposta imunológica adaptativa envolve o aumento do tamanho da população daqueles linfócitos que apresentaram maior afinidade contra o antígeno reconhecido. Devido ao fato de que a população total de linfócitos ser regulada, o aumento em uma variedade deles implica na diminuição das outras variedades.

Um organismo deve encontrar um mesmo antígeno repetidas vezes durante a vida. A exposição inicial estimula a resposta adaptativa e cria uma variedade de clones de linfócitos B, que por sua vez produzem anticorpos com diferentes afinidades. Ao entrar em contato com determinado antígeno, a resposta se inicia por meio dos anticorpos com maior especificidade, mesmo que esta não seja completa, caracterizando a flexibilidade do sistema e sua capacidade de detecção anômala.

A ação continua por meio de um processo de hipermutação dos anticorpos, com o objetivo de criar uma variedade mais eficiente contra o antígeno presente por meio de mutações nos receptores. Esta diversidade no repertório de células permite ao sistema combater antígenos nunca antes encontrados, mesmo que não haja reconhecimento absoluto dos padrões presentes nos mesmos, dada a flexibilidade da resposta.

A efetividade da resposta durante infecções posteriores depende do armazenamento dos anticorpos com maior afinidade produzidos durante eventos anteriores. Esta característica de aprendizado reforçado traz uma evolução contínua da resposta devido a maior especialização das células, aumentando a efetividade do sistema.

Dentre estas células criadas por meio dos processos de clonagem e mutação, alguns linfócitos B se diferenciam e se tornam células de memória, permitindo que as melhores variedades encontradas pelo corpo sejam armazenadas geneticamente para posterior produção em outra ocasião [25]

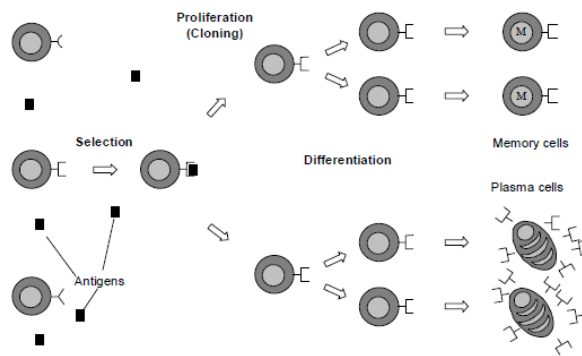


Figura 37: Princípio de Seleção Clonal.

5.5. Otimização baseada no Algoritmo de Seleção Clonal.

O algoritmo de seleção clonal representa uma implementação computacional [26] do princípio de seleção clonal responsável de descrever o comportamento das células B durante uma resposta imune adaptativa. Na implementação é assumido um repertório de anticorpos (Ab) que podem ser estimulados por um antígeno (ou o valor da função objetivo $g(\cdot)$ a ser otimizada) e os anticorpos com uma afinidade alta podem ser selecionados para gerar populações de clones. Durante o processo de clonagem, alguns anticorpos podem sofrer mutações somáticas para formar o conjunto de memória. Os anticorpos de baixa afinidade são substituídos, simulando o processo de edição do receptor. Na Figura 38 tem-se a fluxograma do algoritmo de Seleção Clonal.

5.5.1. Diagrama de fluxo do Algoritmo de Seleção Clonal.

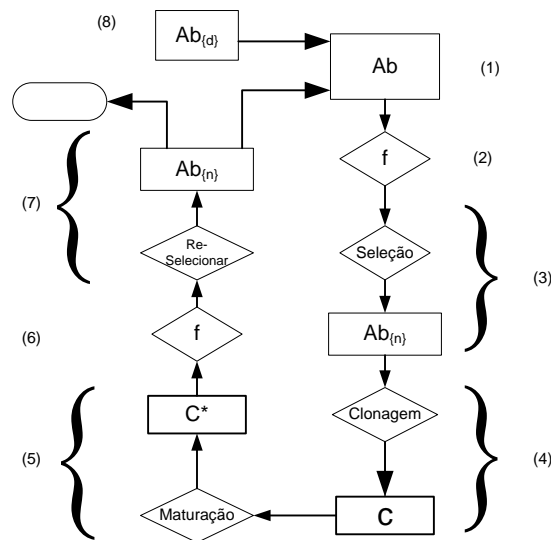


Figura 38: Fluxograma do Algoritmo de Seleção Clonal.

A descrição dos passos deste algoritmo é a seguinte:

1. No passo um não há uma população de antígenos a reconhecer explicitamente, mas uma função objetivo a ser otimizada. Desta maneira, a afinidade de um anticorpo corresponde à avaliação da função objetivo, e cada anticorpo representa um elemento no espaço de entrada. Em adição, como não existe uma população específica de antígenos a ser reconhecido, o conjunto de anticorpos fornece a memória e isto faz que não seja necessário que a memória esteja em outra estrutura separada.
2. Determinar o vetor f que obtém sua afinidade de todos os N anticorpos.
3. Selecionar os n anticorpos com a afinidade mais alta para formar o novo conjunto de anticorpos.
4. Os n melhores anticorpos podem ser clonados, para gerar uma nova população de clones dos melhores anticorpos, ou seja, de clones que tem a melhor afinidade.

5. A nova população de clones é submetida a um processo de mutação, proporcional a sua afinidade: o clone que tem uma afinidade mais elevada é aquele que tem uma porcentagem de mutação menor.
6. Determinar a afinidade da população de clones mutados.
7. Do conjunto de clones maturados, selecionar o anticorpo que tenha a mais elevada afinidade com relação ao antígeno e este é candidato a ser agora o antígeno, sempre e quando seja melhor que o atual.
8. Finalmente são substituídos os “d” piores indivíduos da população de anticorpos com os melhores que gerem depois do processo de clonagem e mutação.

5.5.2. Estado da Arte dos AIS – Aplicações.

Os Sistemas Imunológicos Artificiais são utilizados em várias áreas de estudo, segurança dos sistemas informáticos, reconhecimento de padrões, otimização em problemas de engenharia e outros.

Em [27] é apresentada a solução do problema do agente viajante utilizando os AIS.

Em [19] é proposto o algoritmo *Co-Evolutionary Immunological System* (CAISFLO) que gera um sistema baseado em regras fuzzy utilizando-se uma técnica de co-evolução, utilizando o conceito de SIA para escolha da melhor combinação de regras e da otimização das funções de pertinência.

Em [28] são utilizados os SIA como ferramenta para a extração de informação (*data mining*), e em [29] é proposto um sistema de detecção de Vírus (VDS) baseado no sistema Imune Artificial.

Na área dos Sistemas Elétricos de Potência o AIS tem sido utilizado com eficácia comprovada em vários problemas de Otimização como em [30] para a otimização dos parâmetros de aprendizagem em redes neuronais para previsão de demanda de carga elétrica por hora de energia. Na área de Despacho Econômico de Geração em Sistemas de Potência, uma das aplicações do AIS foi desenvolvida em [31].

No âmbito da distribuição, foram desenvolvidos trabalhos que exploram, por exemplo, a alocação de falhas por meio dos AIS [32], em [33] é desenvolvido uma metodologia de Otimização do Sistema de Recarga de veículos elétricos e híbridos recarregáveis ou um esquema organizado de recarga mediante a aplicação dum algoritmo baseado em AIS com o objetivo de minimizar as perdas no sistema e melhorar as condições operativas do mesmo, instalando capacitores para garantir níveis de tensão apropriados durante todas as horas em que a recarga é permitida.

Na área de reconfiguração de sistemas de distribuição foram desenvolvidos algoritmos baseados em AIS em [1] para a procura da configuração ótima com duas funções objetivos: as perdas e a melhora de índices de confiabilidade. Em [3] foi resolvido o problema de reconfiguração para redução de perdas com algoritmos baseados em rede imune artificial que é uma variante do AIS.

Em [2] é proposto para a otimização da reconfiguração um algoritmo chamado CLONR baseado no algoritmo CLONALG que é uns dos principais algoritmos baseados no paradigma de sistemas imunológicos. Os resultados dos algoritmos baseados em AIS foram satisfatórios, mas não se encontraram referencias de utilização destes algoritmos para a solução de problemas de reconfiguração com carga variável com múltiplos objetivos.

5.6. Algoritmos Principais Baseados em AIS

Existem vários Algoritmos baseados em AIS utilizados em otimização de reconfiguração de sistemas de distribuição, entre eles destacam os algoritmos CLONALG (*Clonal Selection Algorithm*), Copt-AiNet (*Artificial Immune Network for Combinatorial Optimization*). e Opt-AiNet (*Artificial Immune Network for Optimization*), que serão descritas a continuação.

5.6.1. CLONALG

O algoritmo de seleção clonal (CLONALG) foi proposto em [34], inicialmente desenvolvido para a resolução de problemas de aprendizagem de máquina, e reconhecimento de padrões, está baseado em uma população aleatória de anticorpos que devem aprender e reconhecer um conjunto de antígenos, uma característica deste algoritmo

é sua capacidade adaptativa, depois foi estendido par aplicações de problemas de otimização.

O algoritmo trata de representar a resposta da imunização adaptativa do organismo ante a presença de um antígeno (Ag), onde o operador mutação e realizada utilizando o critério de diversificação, e o operador clonagem com o critério de intensificação. Desta maneira os indivíduos com altas afinidades são reproduzidos e selecionando seus melhores clones.

De acordo a [19] o algoritmo CLONALG pode ser simplificado com os seguintes passos:

1. Gere um conjunto (P) de candidatos a solução, composto pelo subconjunto de células de memória (M) mais o restante (P{r}) da população ($P = P\{r\} \cup M$);
2. Determine (processo de seleção) os n melhores indivíduos (P{n}) da população (P), baseado em uma medida de afinidade;
3. Reproduza (processo de clonagem) estes n melhores indivíduos, gerando uma população temporária de clones (C). A quantidade de filhos (clones) de cada indivíduo é diretamente proporcional à sua afinidade;
4. Submeta a população de clones a um esquema de hipermutação em que a taxa de mutação é proporcional à afinidade do anticorpo. Uma população de anticorpos maduros é gerada (C*);
5. Re-selecione os melhores indivíduos de C* para compor o conjunto de memória M;
6. Substitua d anticorpos por novos indivíduos (diversidade). Os anticorpos com menores afinidades possuem maiores probabilidades de serem substituídos.

Neste algoritmo, se $n = N$, ou seja, se todos os indivíduos da população forem selecionados para reprodução, cada candidato à solução será visto localmente, resultando em um algoritmo capaz de executar uma busca multimodal dentro do espaço S.

O passo 3 (Clonagem: número de Clones) é gerado em [35] de acordo a equação (5.1), e em [3] de acordo a equação (5.2), e feita de forma diretamente proporcional a sua afinidade,

os números de clones são números inteiros e a proporcionalidade é feita de acordo à posição da afinidade.

$$numClones = round\left(\frac{\beta \times N}{i} + 0.5\right) \quad (5.1)$$

Onde:

numClones: é o número de clones gerados por cada iteração

N: é o número de indivíduos da população selecionado para a reprodução

β : é o fator de clonagem, é o número constante normalmente é menor que um (1).

i : é a posição de sua afinidade, onde *i*=1 é o indivíduo com maior afinidade,

$$numClones = round\left(\frac{\beta \times N}{i}\right) \quad (5.2)$$

Ambas equações (5.1) e (5.2) diferem em 0.5, que é um fator de arredondamento.

De acordo a [35] a hipermutação é realizado conforme a probabilidade dada pela equação (5.3), de maneira inversamente proporcional a sua afinidade.

$$\alpha_i = \beta^{-1} \times \exp(-fitness_i) \quad (5.3)$$

Onde:

α_i : Fator de hipermutação

fitness_i: é a função fitness ou de atitude para cada posição *i* . Dado pela equação (5.4)

$$fitness_i = \frac{1}{1 + \text{função objetivo}} \cdot \quad (5.4)$$

Em [2] a função fitness é realizado mediante uma normalização de seu valor mediante a equação (5.5), e as equações (5.6) e (5.7) são utilizadas para a clonagem e hipermutação.

$$f^*(i) = \frac{1}{1 + \exp(-(f(i) - \bar{f})/\delta^*)} \cdot \quad (5.5)$$

Onde:

$f(i)$: afinidade do anticorpo i

\bar{f} : média aritmética da afinidade de conjunto de anticorpos

δ^* : Desvio padrão

$$numClones = round(\beta \cdot f^*(i)) \quad (5.6)$$

$$\alpha_i = exp(-\rho \cdot f^*(i)) \quad (5.7)$$

De forma geral estas equações são bastante similares implicam o cálculo de número de clones de forma proporcional à afinidade do anticorpo e a mutação de forma inversamente proporcional à afinidade do anticorpo.

5.6.2. Algoritmo Opt-Ainet

O Opt-Ainet é um algoritmo inspirado na mesma base do princípio de seleção clonal mais o agregado da teoria da rede imunológica, foi desenvolvido para solucionar problemas de otimização multimodal. É um tipo de algoritmo de busca evolutivo com o operador principal a mutação, onde a população tem tamanho dinâmico [19].

Este algoritmo pode ser considerado como uma variante ou extensão do CLONALG com passos que apresentam interações anticorpos-anticorpos e não apenas antígenos-anticorpos.

É considerado um procedimento de busca evolutivo baseado na mutação e população com tamanho dinâmico. Apresenta várias características interessantes, como a possibilidade de ajustar o tamanho da população dinamicamente, exploração no espaço de busca para soluções novas e melhores, capacidade de localizar múltiplos ótimos, definir critérios de parada, dentre outros. A estabilidade da rede é medida pela diferença entre a afinidade média da população anterior. A população inicial é gerada de forma aleatória. O critério de parada é feito mediante a variação do tamanho da população até que este não varia em duas iterações consecutivas. Em [19] e [36] é desenvolvido o fluxograma do algoritmo.

O algoritmo Copt-aiNet, tem 2 tipos de mutações e também eliminação de indivíduos de similar afinidade com o intuito de manter a diversidade da população, sendo essas as características principais do algoritmo, as demais características são muito similares ao algoritmo CLONALG e ao algoritmo Opt-AiNet.

5.6.4 Algoritmo Proposto EAIS

O algoritmo proposto é chamado EAIS (*enhanced Artificial Immune Systems*) é basicamente o Algoritmo CLONALG com o operador de clonagem-hipermutação especializado para as características de sistemas elétricos de distribuição.

O processo de clonagem-hipermutação é feito segundo as etapas:

- 1- A clonagem da população é feita de forma proporcional à afinidade dada pela ordem i de cada indivíduo, onde a posição $i=1$ corresponde ao indivíduo com maior afinidade, e a posição $i=N$ corresponde à pior afinidade do subconjunto de população de controle de tamanho N formado pelos N indivíduos de maior afinidade em cada iteração.
- 2- O processo de mutação é realizado de forma inversamente proporcional à afinidade, considerando os seguintes conceitos:
 - **Pequenas mutações** são feitas variando levemente o indivíduo dado pela afinidade (pequena mudança na afinidade do indivíduo), no caso do sistema elétrico a topologia da rede é levemente modificada.
 - **Grandes mutações** implicam maior variação na topologia.

Então as mutações são realizadas de forma probabilística proporcional às correntes das chaves, considerando pequenas correntes como pequenos câmbios na configuração, e grandes correntes como grandes câmbios na configuração, isto de maneira contínua entre os extremos de menor e maior afinidade respectivamente. Para grandes câmbios na configuração, mutações sucessivas também são associadas feitas inversamente proporcional a sua afinidade, com o objetivo de favorecer a busca global e também a diversidade da população.

- 3- São atualizados os N melhores dos anticorpos gerados neste processo, incluindo a população inicial. Então se o indivíduo obtido mediante a mutação for de maior afinidade que do seu pai da população inicial então ele substitui a seu pai.

O algoritmo trata de satisfazer as principais características do AIS que é a busca global de forma ótima fazendo o equilíbrio entre a busca local e a exploração mediante as características de: aprendizagem, memória, reconhecimento de padrões, extração de características, coestimulação, proteção dinâmica, diversidade, autorregulatório, detecção distribuída, detecção probabilística.

Maiores detalhes do desenvolvimento com as equações correspondentes são descritos na Secção 6.5.

CAPÍTULO 6

6. Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição Radial

6.1. Considerações preliminares

6.1.1. Notação

A codificação utilizada para os sistemas elétricos de teste e real é a descrita na seção 2.7., onde a variável de controle é dada pelo vetor \bar{x}

Onde

$\bar{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n]$, $x_i = 0$ se a chave i está aberta e $x_i = 1$ se a chave i está fechada.

Também é utilizada a representação equivalente pelos vetores de chaves N , N_1 e N_2 .

Onde $N = [1, 2, 3, \dots, i, \dots, n]$ representa as chaves em ordem correlativa, $N_1 = \{n_m\}$ é o conjunto de chaves fechadas e $N_2 = \{n_l\}$ é o conjunto de chaves abertas de forma que $N = \{N_1, N_2\}$ é o conjunto total de chaves. E a representação da rede é a Representação Direta detalhada na seção 2.8., tanto para os sistemas testes como o sistema real.

A população inicial é gerada mediante a aplicação das operações algébricas detalhadas na seção 2.7. e 2.8., consistentes em obter configurações mediante alterações da configuração de uma configuração inicial feita de forma sucessivas e aleatoriamente baseadas no conceito de laço fundamental, estas alterações são também chamadas mutações aleatórias.

Deste modo é obtida uma população inicial com alto grau de qualidade, descartando desde o princípio condições de ilhamento e anel.

6.1.2. Sistemas utilizados

Para a validação da ferramenta foi feita da seguinte maneira: primeiro foi validada para o caso mono-objetivo segundo a literatura consultada comprovando as características de

convergência, resultados e tempo computacional. Para a comparação do tempo computacional foi desenvolvido o algoritmo AIS nas mesmas condições que o algoritmo EAIS proposto quanto às operações algébricas e fluxo de potência utilizado. Posteriormente a ferramenta foi aplicada para o caso multiobjetivo ao sistema real.

6.1.2.1. Sistemas Testes

Para a análise inicial da ferramenta são utilizados sistemas Testes de 14, 33, 84 e 119 barras. Eles são considerados no campo científico como referência para fazer as novas propostas de ferramentas das soluções dos problemas de reconfiguração e outros similares. Normalmente os sistemas testes são utilizados para o modelagem da proposta, e posteriormente feito as comparações com outros resultados do estado de arte atual, para depois finalmente ser desenvolvido no ambiente real de um sistema elétrico com dados reais.

Os sistemas testes tem uma característica de simplicidade, são circuitos elétricos de sistemas equilibrados compostos por redes com impedância série e cargas equilibradas. A continuação serão descritos esses circuitos.

Sistema Teste de 14 Barras

O sistema Teste de 14 Barras foi encontrado nas referências [24], [1], e outros, os dados de ramos são representados na Tabela 4, e os dados de barras na Tabela 5. Os ramos são impedâncias series equilibradas. Na representação é feita conforme à seção 2.7, aqui as chaves são os mesmos ramos, então se um ramo (chave) estivesse aberto, não circula corrente pelo ramo, considerando que ela não tem impedância shunt no final do seu tramo.

Tabela 4: Dados de Ramos de Sistemas Teste de 14 Barras

DE	PARA	R(%)	X(%)
14	13	7.50	10.00
13	12	8.00	11.00
13	11	9.00	18.00
11	10	4.00	4.00
14	9	11.00	11.00
9	8	8.00	11.00
9	7	11.00	11.00
8	6	11.00	11.00
8	5	8.00	11.00
14	4	11.00	11.00
4	3	9.00	12.00
4	2	8.00	11.00
2	1	4.00	4.00
12	6	4.00	4.00
7	3	4.00	4.00
10	1	9.00	12.00

Esta representação facilita a análise de reconfiguração para os casos testes por ser muito simples, as matrizes de incidência para o cálculo de fluxo de potência e para o grafo de configuração são coincidentes.

Tabela 5: Dados de Barras de Sistemas IEEE de 14 Barras

Barra	Pd(kW)	Qd(kW)	Qbc(kW)
14	0.0	0.0	0.0
13	2000.0	1600.0	0.0
12	3000.0	1500.0	1100.0
11	2000.0	800.0	1200.0
10	1500.0	1200.0	0.0
9	4000.0	2700.0	0.0
8	5000.0	3000.0	1200.0
7	1000.0	900.0	0.0
6	600.0	100.0	600.0
5	4500.0	2000.0	3700.0
4	1000.0	900.0	0.0
3	1000.0	700.0	1800.0
2	1000.0	900.0	0.0
1	2100.0	1000.0	1800.0

Na Figura 39 tem-se a representação do circuito e na Figura 40 sua correspondente representação em forma de grafo. Como se pode observar as arestas 1, 2, 3 correspondentes aos ramais 1-2, 1-3 e 1-4.

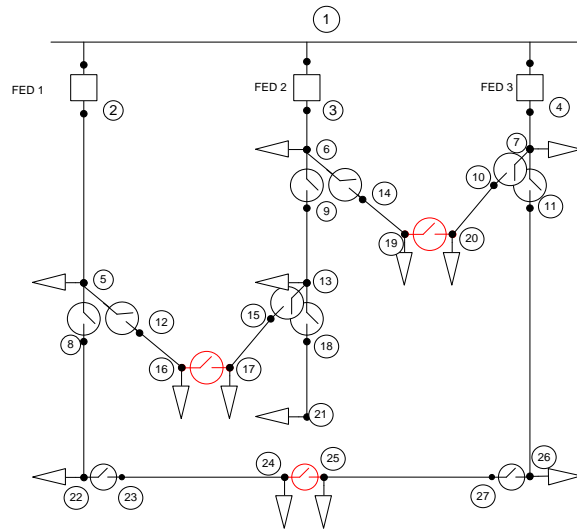


Figura 39: Sistema Teste de 14 barras [14]

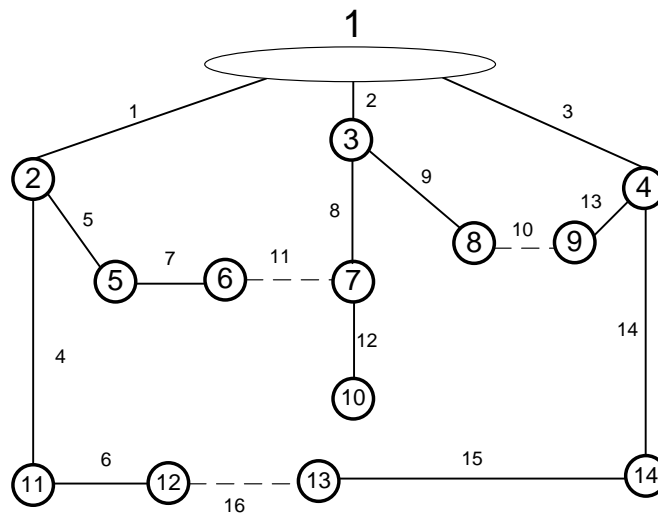


Figura 40: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.

Os dados do sistema teste de 33 barras estão representadas na seção 2.7, os demais sistemas testes de 84, e 136 barras têm a mesma notação e estão detalhadas nos Anexos A e B.

6.1.2.2. Sistema Real

As redes de distribuição geralmente são constituídas por linhas não transpostas, com retorno por cabo ou por terra. Devido a estas considerações, deve-se levar em conta as

assimetrias no cálculo dos parâmetros de linhas. Essas assimetrias são abordadas com as Equações de Carson simplificadas, basicamente estas equações implicam os cálculos com 3 matrizes de incidência e correspondentes matrizes de alcance para cada fase do condutor, que são relacionadas com as matrizes de impedâncias de cada fase para obter uma solução para redes desbalanceadas. A matriz de incidência é a mesma para as 3 fases, só é necessário a consideração dos valores das impedâncias diferentes de acordo aos parâmetros da rede. Em [38] se apresenta maior detalhe.

Para este trabalho foi utilizada a representação direta da rede apresentada na seção 2.9., onde os cálculos para a obtenção das diferentes configuração e para o fluxo de potência é feito utilizando a mesma matriz de incidência, são identificadas as arestas correspondentes às chaves como arestas operáveis e as arestas não operáveis correspondentes às linhas, e utilizadas as operações algébricas detalhadas na seção 2.10., reduzindo de forma notável o custo computacional.

Então o vetor $N = [1, 2, 3, \dots, i, \dots, n]$ corresponde só às chaves, e as demais arestas são consideradas fixas, podendo alterar só seu sentido de fluxo.

6.1.3. Dados de Demanda horária

Para um planejamento da operação para reconfiguração dos sistemas elétricos de distribuição é necessário contar com uma estimativa da curva de carga diária pelo menos 24 horas antes de fazer os programas de operação. Normalmente nos Centros de Controle ou Despachos de Carga de Distribuição das empresas elétricas tem banco de dados de históricos de parâmetros elétricos do interruptor de cada alimentador a partir do qual podem-se realizar previsões de curvas de carga, essas previsões podem ser feitas com ferramentas baseadas em progressões regressivas ou de maior força como redes neuronais. A previsão da curva de carga não está contemplada neste trabalho, a premissa é que se tem disponível ditos dados para cada alimentador e configuração determinada.

As curvas de carga diária consideradas para o presente estudo correspondem a um dia laboral do período quente. Desta forma é considerado um cenário de exemplo onde é feito

uma otimização de carga a corrente constante e outro com corrente variável ao longo do período de tempo de 24 horas propondo 3 trocas de configuração.

Na Figura 41 podem-se observar as correntes médias dos alimentadores, estas correntes são feitas calculando a média das correntes estimadas dos circuitos em cada período de 1 hora, obtendo valores por cada alimentador. Os dados estimados inicialmente foram obtidos a cada 15 minutos pela empresa elétrica ANDE.

Para a simplificação do problema é feito a curva de carga média pode-se observar na Figura 42.

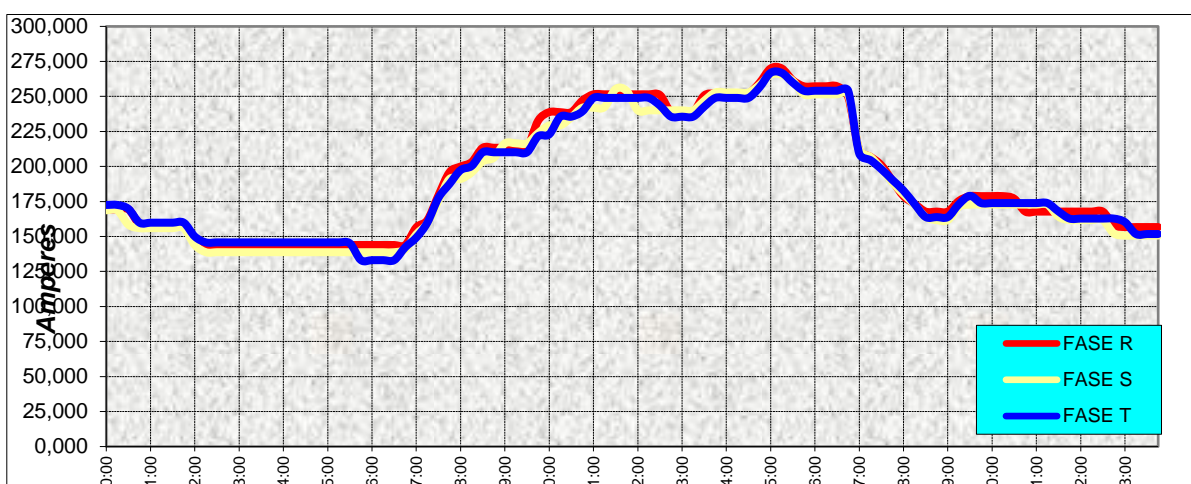


Figura 41: Dados de Demanda de Tipo Comercial Estimada para o Alimentador 1 do dia de trabalho em [A]

Os dados médios podem-se observar na **Tabela 6**, a carga com maior característica residencial corresponde ao alimentador 2, a carga predominantemente comercial ao alimentador 3, e a carga com características mista residencial - comercial corresponde ao alimentador 1.

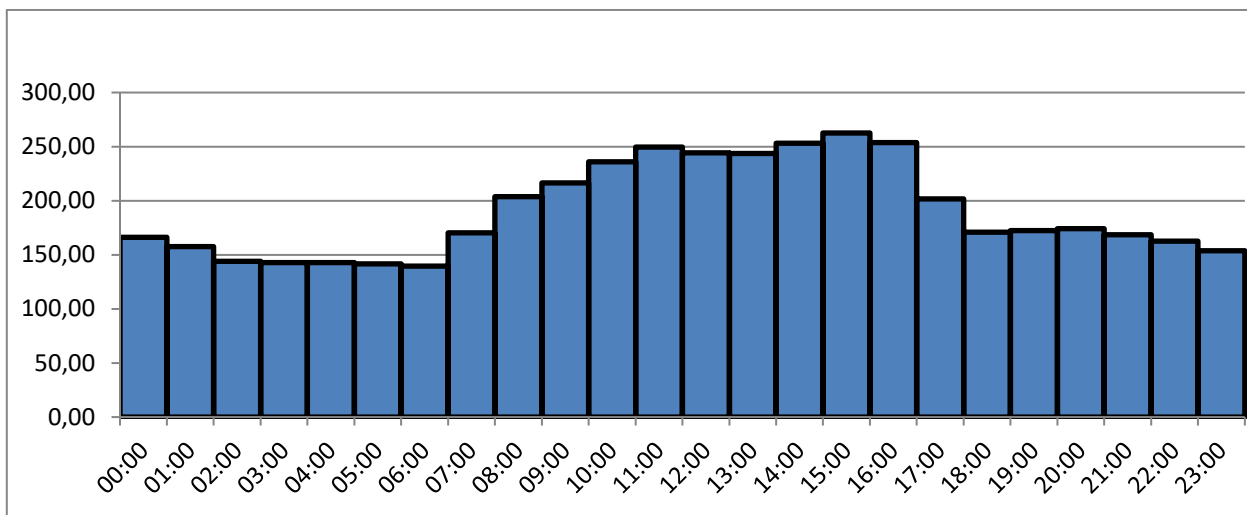


Figura 42: Dados de Demanda Media de Tipo Comercial Estimada para o Alimentador 1 do dia Laboral em [A].

Tabela 6: Dados de corrente media [A] do Cenário de dia Laboral estimado

Hora	Residencial Laboral	Comercial Laboral	Residencial-Comercial Laboral
00:00	185	166	171
01:00	177	157	157
02:00	168	144	148
03:00	165	143	144
04:00	163	143	143
05:00	164	142	141
06:00	154	140	141
07:00	166	170	175
08:00	170	204	202
09:00	168	216	213
10:00	180	236	225
11:00	188	250	233
12:00	174	244	214
13:00	171	244	207
14:00	173	253	218
15:00	173	262	228
16:00	194	254	221
17:00	197	202	206
18:00	204	171	200
19:00	272	172	225
20:00	295	174	227
21:00	280	168	218
22:00	259	162	202
23:00	212	154	193

Na Figura 43 pode-se apreciar a curva de carga utilizada no cenário considerado.

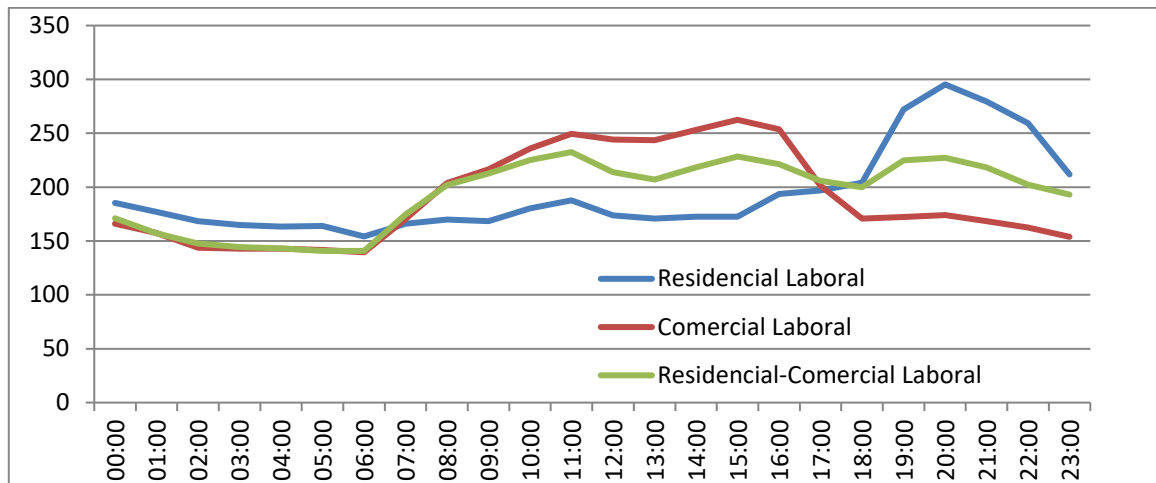


Figura 43: Curvas Estimadas no cenário proposto

O rateio da demanda é feito com a metodologia utilizada pelo fluxo de potência consiste em fazer a distribuição da demanda do alimentador de forma proporcional às cargas instaladas.

6.1. Funções Objetivas Analisadas

Foram analisadas três funções objetivo para o estudo da reconfiguração, referente às variáveis de perdas elétricas, desvio da tensão, e balanço das correntes, na rede de distribuição, para demanda fixa e posteriormente estendido a carga variável.

6.1.1. Função Perdas.

Um dos principais objetivos das pesquisas na área elétrica é a redução de perdas técnicas, na área de projeto é fundamental essa análise para o dimensionamento da rede. Na área de planejamento da operação é fundamental o estudo da configuração ótima que faça a minimização das perdas sem afetar as demais variáveis do serviço elétrico.

A avaliação das perdas é realizada através dos resultados do fluxo de potência. A solução do fluxo de potência fornece os valores das tensões e os ângulos para cada uma das barras do sistema, permitindo calcular os valores das correntes dos ramos entre qualquer das barras i e j como segue:

$$\bar{I}_{ij} = \bar{Y}_{ij}(\bar{V}_i - \bar{V}_j) \quad (6.1)$$

Com o conhecimento das correntes dos ramos pode-se calcular as perdas de potência ativa (da barra i para a barra j) da seguinte maneira:

$$Ploss_j = |\bar{I}_{ij}|^2 \cdot R_{ij} = \text{real} \left((\bar{V}_i - \bar{V}_j) \cdot \bar{I}_{ij}^* \right) \quad (6.2)$$

$$Ploss_T = \sum_{j=1}^{nbr} Ploss_j \quad (6.3)$$

Onde:

$Ploss_j$: representa a perda de potência do ramo i-j

\bar{V}_i : representa a tensão na barra i

\bar{V}_j : representa a tensão na barra j

\bar{I}_{ij} : representa a corrente no ramo i-j

R_{ij} : representa a resistência do ramo i-j

$Ploss_T$ representa a perda de potência total dos ramos de i para j

nbr representa o número de ramos do sistema elétrico

Análise temporal:

Em um período de tempo determinado pode-se calcular a energia de perdas integrando as perdas de potência ativa ao tempo como segue:

$$Eloss = \sum_{i=1}^N Ploss_{Ti} \cdot \Delta t_i \quad (6.4)$$

Onde:

N representa o número da divisão temporal no período dado.

Δt_i representa o valor da divisão temporal (neste trabalho é uma hora)

$P_{loss_{T_i}}$ É a potência média total de perdas nos ramos para a demanda do período de tempo i .

Neste estudo é considerado $\Delta t = 1\text{ hora}$, e a divisão temporal é feita considerando três períodos em 24 horas. Na Figura 44 pode-se ver a demanda horária média de um alimentador.

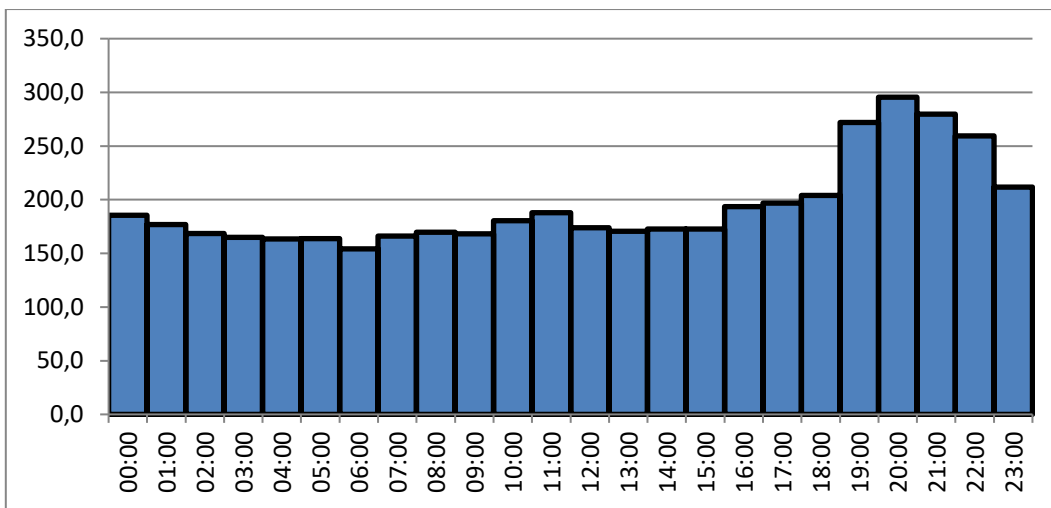


Figura 44: Demanda Horária média em [A] do alimentador de exemplo de um dia típico.

6.1.2. Função Balanço de Carga.

Uma ação importante para manter as instalações em condições é conseguir uma distribuição uniforme entre as demandas dos alimentadores de uma mesma Subestação transformadora ou entre uma ilha formada por alimentadores de várias Subestações. Esta consideração é importante também na consideração dos investimentos, dado que o balanço das correntes otimiza o avanço das correntes aos limites permitidos pelo dimensionamento, melhorando a vida útil dos mesmos e postergando os requerimentos de novos circuitos. Na Figura 46 tem-se um sistema de distribuição composto de n -alimentadores pertencentes a uma Subestação qualquer, os n alimentadores devem ter um mesmo valor de demanda em uma condição ótima.

A função de balanço pode ser apresentada por um índice que mede o equilíbrio de cargas entre os alimentadores, não violando restrições de queda de tensão, carregamento nas linhas e a radialidade da rede. Na Figura 45 podem-se observar as correntes de três alimentadores (utilizados nas simulações deste trabalho), onde existe um desequilíbrio devido aos tipos diferentes de carga.

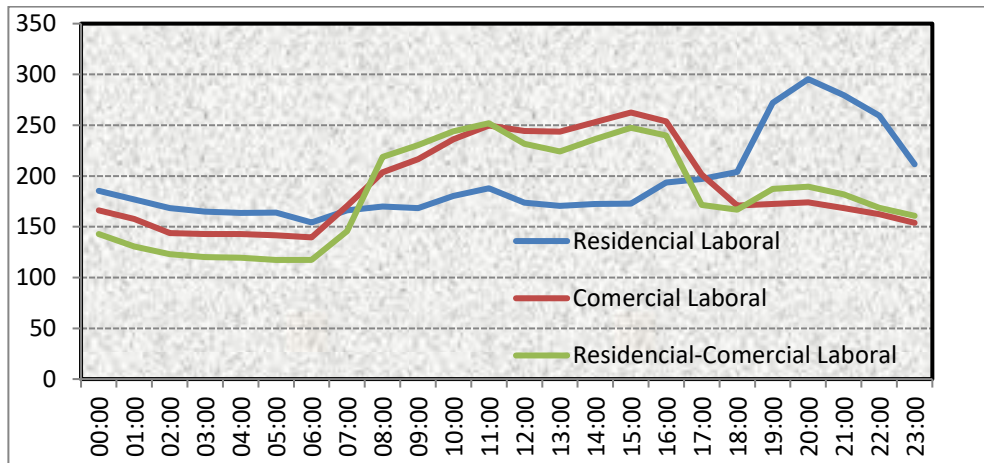


Figura 45: Demandas de Correntes de alimentadores

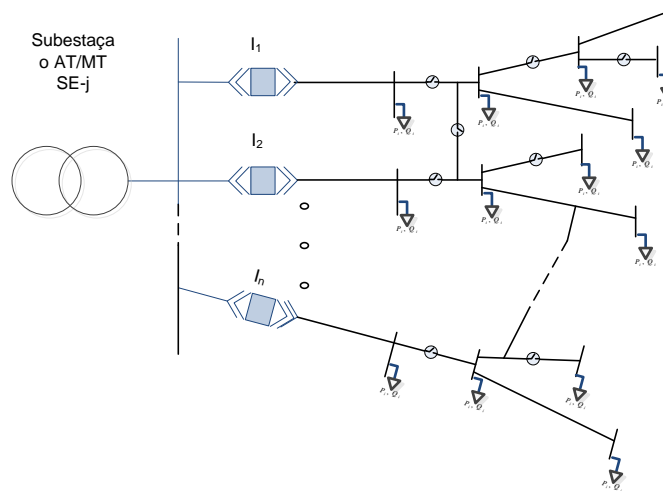


Figura 46: SDR composto de n-alimentadores pertencente a uma Subestação qualquer

Seja na Figura 46 uma dada Subestação composta por n – alimentadores o índice de balanço de cargas entre os alimentadores estará dado pela seguinte expressão:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n |I_i - \bar{I}|}{\bar{I}} \quad (6.5)$$

$$\bar{I} = \frac{I_1 + I_2 + \dots + I_n}{n} \quad (6.6)$$

Onde:

\bar{I} representa a corrente média dos alimentadores da subestação.

I_i representa a corrente do alimentador na iteração e subestação considerada obtida por o método de cálculo de fluxo de potência.

Para a análise temporal a função a considerar é a máximo valor escalar β_i como segue:

$$\delta_{bal} = \max\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N\} \quad (6.7)$$

Onde:

δ_{bal} representa o índice máximo do desequilíbrio em um período de tempo considerado dividido em N níveis.

,

N é o número de divisão temporal no período determinado.

6.1.3. Função Desvio da tensão

O desvio da tensão em referência a tensão nominal é dado pelas fórmulas (6.8) e (6.9).

(6.8)

$$\Delta V_j = |V_j - V_{ref}|$$

$$\Delta V_m = \max(|V_j - V_{ref}|) \quad j=1, \dots, nb \quad (6.9)$$

Onde

V_j representa a Tensão da barra j obtida do fluxo de potência

V_{ref} representa a Tensão de referência ou Nominal

nb representa o número de barras do circuito

ΔV_m representa o Máximo valor do desvio da tensão com referência à tensão nominal do sistema considerando todas as barras.

Na análise temporal o valor da função de desvio da tensão é considerado como segue:

$$\delta_{dV} = \max(\Delta V_{m1}, \Delta V_{m2}, \dots, \Delta V_{mN}) \quad (6.10)$$

Onde:

N representa a quantidades de divisão temporal no período determinado.

São formuladas duas situações, o caso de demanda fixa e o caso de demanda variável ao longo do período de tempo considerado.

6.2. Formulação do problema a demanda fixa

$$\min \begin{cases} P_{loosT}(\bar{x}) \\ \beta(\bar{x}) \\ \Delta V_m(\bar{x}) \end{cases}$$

s.a

$$I_{r_k} < I_{r_k} \max$$

$$I_{nap} \leq I_{\max- nap}$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

$$F(\bar{x}) \text{ ser uma floresta}$$

Onde:

F é o grafo corresponde a uma configuração do sistema, representado por uma floresta de grafo, onde cada árvore dessa floresta corresponde a um alimentador conectado a uma subestação.

(6.11)

\bar{x} é um vetor binário contendo todas as chaves do sistema considerado.

$x_i = 1$ se a chave correspondente é fechada, e $x_i = 0$ se é aberta .

$I_{\max- nap}$ é o limite da corrente do alimentador ap determinado pela proteção do interruptor

$I_{r_k} \max$ é o limite de sobrecarga de corrente do ramo k

V_{\min}, V_{\max} Valores máximos e mínimos das tensões

V_i Tensão na barra i

6.3. Formulação do problema a demanda variável considerando a Curva de Carga

$$\begin{aligned}
 & \min \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{loos}(\bar{x}) \\ \delta_{bal}(\bar{x}) \\ \delta_{dV}(\bar{x}) \end{array} \right\} \\
 & s.a \\
 & Ir_k < Ir_k \max \quad , \\
 & I_{nap} \leq I_{\max- nap} \\
 & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\
 & F(\bar{x}) \quad \text{ser uma floresta}
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

6.4. Análise Multiobjetivo mediante Lógica Fuzzy

O processo de análise do problema multiobjetivo consistiu na fuzzificação das funções objetivo reais e a posterior conversão a uma só função objetivo mediante a soma ponderada destas funções fuzzificadas, convertendo então o problema multiobjetivo num problema mono-objetivo.

6.4.1. Fuzzificação das perdas de potência elétrica

A função de pertinência utilizada é a função ombro, a fuzzificação é feita pelas seguintes equações:

$$\widetilde{P}_{lossTi} = \mu(P_{loosTi}) = \begin{cases} 1, & P_{lossTi} < P_{lossT}^{min} , \\ \frac{P_{lossT}^{max} - P_{loosTi}}{P_{lossT}^{max} - P_{loosT}^{min}} , & P_{lossT}^{min} \leq P_{lossTi} \leq P_{lossT}^{max} , \\ 0, & P_{lossTi} > P_{lossT}^{max} \end{cases} \tag{6.13}$$

Onde:

P_{lossT_i} representa a potência de perdas total correspondente ao anticorpo i

\widetilde{P}_{lossT_i} representa o calor fuzzificado da potência de perdas total correspondente ao anticorpo i

P_{lossT}^{min} representa o valor mínimo considerado de perdas, neste caso perto de zero,

P_{lossT}^{max} representa o maior valor permitido de perdas, para este estudo foi considerado de 10% da potência instalada.

Pode se notar que o problema de minimização é transformado em um problema de maximização da função fuzzificada \widetilde{P}_{lossT_i}

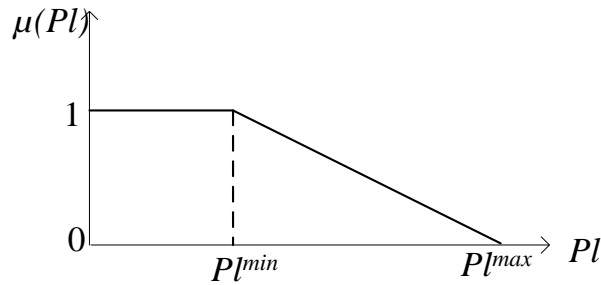


Figura 47: Função de pertinência das perdas elétricas

6.4.2. Fuzzificação do desequilíbrio das correntes dos alimentadores

A função de pertinência utilizada é a função ombro, considerando que tem que procurar um valor mínimo, a fuzzificação é feita pelas seguintes equações:

$$\tilde{\beta}_i = \mu(\beta_i) = \begin{cases} 1, & \beta_i < \beta^{min}, \\ \frac{\beta^{max} - \beta_i}{\beta^{max} - \beta^{min}}, & \beta^{min} \leq \beta_i \leq \beta^{max} \\ 0, & \beta_i > \beta^{max} \end{cases} \quad (6.14)$$

Onde β^{min} é o valor mínimo considerado de desequilíbrio, neste caso de 2%, e β^{max} é o maior valor permitido de desequilíbrio, para este estudo foi considerado de 40% referente ao valor médio da corrente. Pode se notar que o problema de minimização é transformado em um problema de maximização da função fuzzificada $\tilde{\beta}_i$.

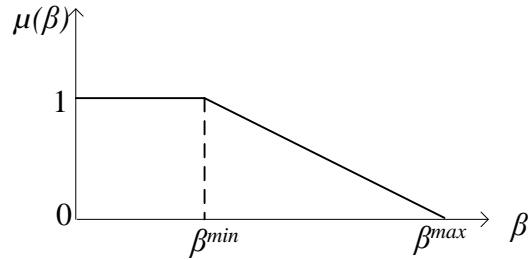


Figura 48: Função de pertinência do balanço de correntes

6.4.3. Fuzzificação do desvio da tensão

É utilizada a função de pertinência triangular devido a que a tensão tem um valor ótimo central, mediante as seguintes equações:

$$\widetilde{\Delta V}_{m_i} = \mu(\Delta V_{m_i}) = \begin{cases} 0, & V_i < V_{min} \\ \frac{V_i - V_{min}}{V_{ref} - V_{min}}, & V_{min} \leq V_i \leq V_{ref} \\ \frac{V_i - V_{max}}{V_{ref} - V_{max}}, & V_{ref} \leq V_i \leq V_{max} \\ 0, & V_i > V_{max} \end{cases}, \quad (6.15)$$

Onde

V_i , é a tensão relacionada ΔV_{m_i} , em valor absoluto.

Neste caso também pode se notar que o problema de minimização é transformado a um problema de maximização da função fuzzificada $\widetilde{\Delta V}_m$, onde o maior valor é dado quando a tensão tiver o valor de referencia ou nominal.

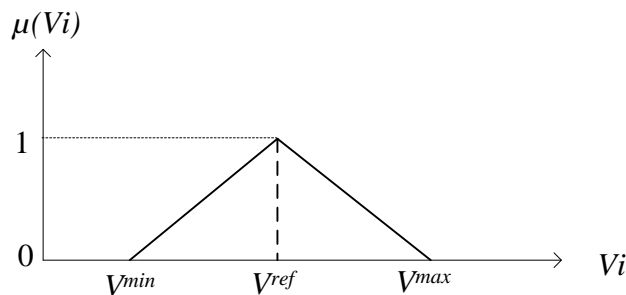


Figura 49: Função de pertinência do desvio das tensões

6.4.4. Ponderação da função objetivo Fuzzificada

Considerando a demanda fixa

O problema multiobjetivo pode ser representado como uma maximização das funções objetivos fuzzificadas, onde é considerada uma ponderação mediante a multiplicação pelos pesos considerados como segue:

$$\widetilde{Z}_1 = w_1 \cdot \widetilde{P}_{loosT_i} + w_2 \cdot \widetilde{\beta}_i + w_3 \cdot \widetilde{\Delta V}_{m_i} \quad (6.16)$$

Onde as constantes positivas w_1 , w_2 e w_3 , são os pesos correspondentes. A escolha dos valores destas constantes dependem do grau de importância que são requeridos para a operação do sistema de distribuição.

Desta forma é obtida a transformação de um problema multiobjetivo a um problema mono-objetivo, onde o objetivo é maximizar a função fuzzy \widetilde{Z}_1 .

Considerando a demanda variável

De forma análoga pode-se obter a função objetivo difuso para o caso de demanda variável, como segue:

$$\widetilde{Z}_2 = w_4 \cdot \widetilde{E}_{loosT_i} + w_5 \cdot \widetilde{\beta\delta}_{bal_i} + w_6 \cdot \widetilde{\beta\delta}_{av_i} \quad (6.17)$$

6.4.5. Formulação do problema de maximização da função objetivo fuzzificada

De maneira análoga à Equação 6.11 e 6.12, tem-se os problemas de maximização para o caso de demanda fixa na equação 6.18 e para demanda variável na equação 6.19

$$\begin{aligned}
 & \max \quad \left\{ \tilde{Z}_1(\bar{x}) \right\} \\
 & s.a \\
 & Ir_k < Ir_k \max \\
 & I_{nap} \leq I_{\max- nap} \\
 & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\
 & F(\bar{x}) \quad \text{ser uma floresta}
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

$$\begin{aligned}
 & \max \quad \left\{ \tilde{Z}_2(\bar{x}) \right\} \\
 & s.a \\
 & Ir_k < Ir_k \max \\
 & I_{nap} \leq I_{\max- nap} \\
 & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\
 & F(\bar{x}) \quad \text{ser uma floresta}
 \end{aligned} \tag{6.19}$$

6.5. Algoritmo Proposto para a solução do problema de reconfiguração

Para o problema de reconfiguração de demanda constante é proposto um algoritmo baseado em AIS e lógica fuzzy similar ao utilizado em [1] e [2] de acordo ao fluxograma da Figura 50, com modificações principalmente no operador de hipermutação. A geração da população inicial é feita mediante mutações sucessivas a partir de uma configuração viável e as diferenças nos processos de clonagem-hipermutação detalhados na seção 6.5.2.

No caso de demanda variável, devido aos tempos elevados para fazer os cálculos de fluxo de potência em cada nível de demanda, a geração da população inicial é feita mediante o algoritmo do fluxograma da Figura 51 a um nível de demanda igual à demanda inicial, desta forma os indivíduos mais afines de este algoritmo são utilizados como população inicial para o algoritmo proposto no fluxograma da Figura 50, desta forma se consegue uma

população inicial de boa qualidade com o intuito de reduzir o esforço computacional, esta consideração está baseada numa característica muito importante do AIS que é a Memória. Foi desenvolvido um programa em Matlab, que incorpora a metodologia apresentada.

6.5.1. Fluxogramas Propostos para Otimização demanda fixa e demanda variável

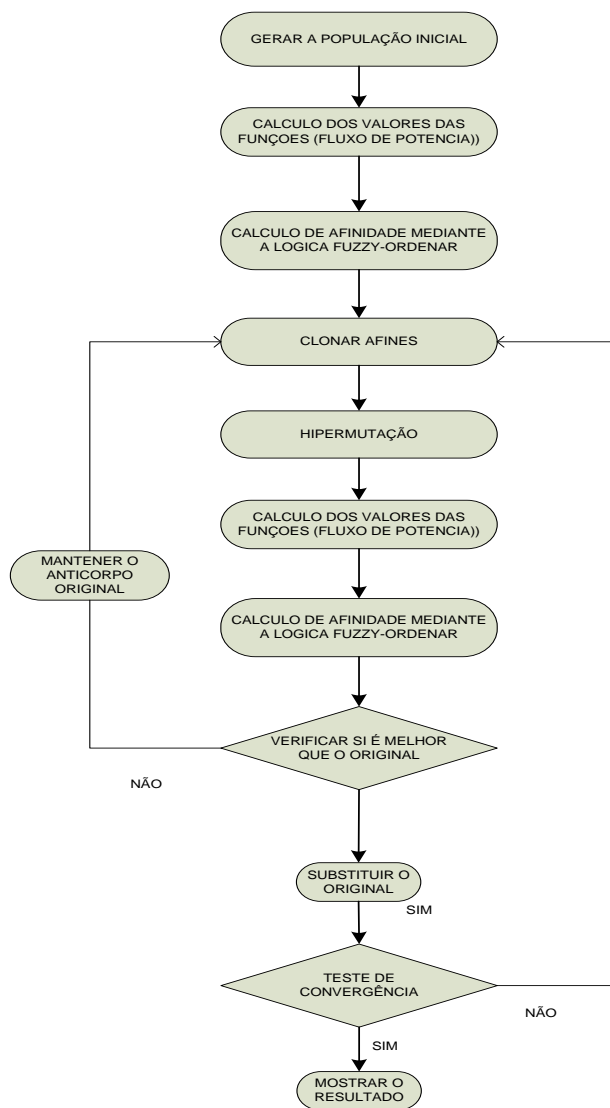


Figura 50: Fluxograma de Algoritmo Proposto para demanda fixa

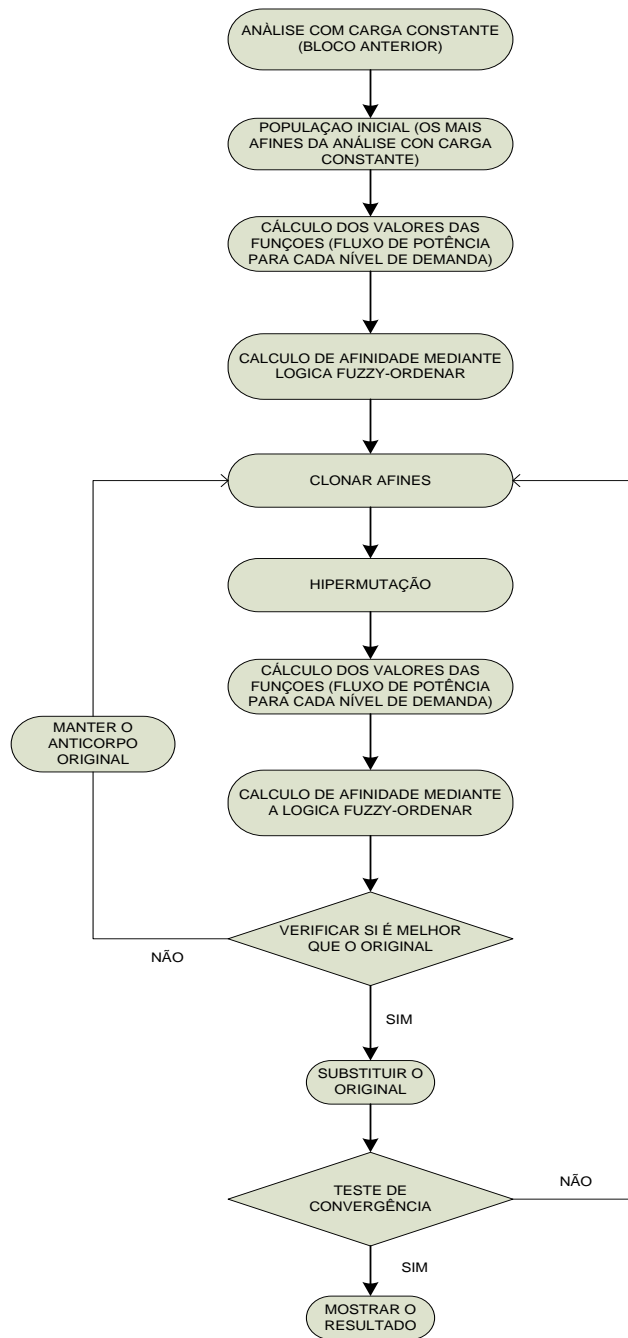


Figura 51: Fluxograma de Algoritmo Proposto para Demanda Variável

6.5.2. Processo de Clonagem – Hipermutação Proposta

Passo1: A clonagem da população é feita de acordo à equação (6.20). Onde o número de clones é diretamente proporcional à afinidade, a avaliação da afinidade é feita mediante a posição i , onde a posição $i=1$ corresponde ao indivíduo com maior afinidade, e $i=N$

corresponde ao indivíduo de pior afinidade dentro de subconjunto dos melhores indivíduos selecionados em cada iteração, β é o fator de proporcionalidade.

$$cl = \text{round}\left(\frac{\beta \times N}{i}\right) \quad (6.20)$$

Passo 2: Para cada clone um elemento n_2^* do conjunto das chaves abertas N_2 ($n_2^* \in N_2$) é selecionado aleatoriamente, e é fechado formando um laço, posteriormente mediante processos algébricos na matriz de adjacência e incidência mostrado na seção 2.10 é selecionado o conjunto de chaves $L = [L_m]$ que compõem esse laço. A abertura de uma chave do conjunto L assegura a obtenção de um grafo de forma de árvore, assegurando a condição de radialidade da rede, e a conexão de todas as barras. O processo de controle de mutação é descrito abaixo:

- São selecionados e ordenados os valores da corrente $I = [I_m]$ para cada chave do conjunto $L = [L_m]$, obtidos da configuração anterior, que pertence ao indivíduo antes de se-fazer a mutação.

- A abertura de uma chave do conjunto $L = [L_m]$, é feita segundo a probabilidade dada pela equação (6.21), δ é o fator de proporcionalidade.

$$p_m = \exp\left(-\left(1 - i/(\delta \times N)\right)I_m^*\right) \quad (6.21)$$

- A aplicação de mutações sucessivas é feita segundo a equação (6.22). Neste caso, a partir da segunda mutação a probabilidade de abertura das chaves do conjunto $L_2 = [L_{m2}]$, é a mesma para todas as chaves, α é o fator de proporcionalidade.

$$q_i = \text{round}\left(\exp\left(\alpha \cdot \frac{i}{N}\right) \cdot \text{rand}(1,0)\right) \quad (6.22)$$

Passo 3: O vetor N_1 é atualizado adicionando a chave fechada e retirando a chave aberta, e o vetor N_2 adicionando a chave aberta e retirando a chave fechada. Depois são atualizadas as matrizes de incidência e adjacência mediante as operações matriciais detalhadas na seção 2.7 e 2.8.

O grau de afinidade é estabelecido pela posição “i” onde o anticorpo de maior afinidade é dado para a posição $i=1$, e a menor afinidade para $i=N$, onde N representa o número de indivíduos dos melhores anticorpos selecionados em cada iteração.

A equação (6.20) implica que o número de clones é diretamente proporcional ao grau de afinidade, favorecendo a busca local para os indivíduos de maior afinidade. A equação (6.21) determina a probabilidade de abertura para cada chave de forma inversamente proporcional à corrente quando $(1 - i/(\delta \times N)) > 1$ e diretamente proporcional quando $(1 - i/(\delta \times N)) < 1$, isto implica para indivíduos com maior afinidade as chaves com corrente menor tem maior probabilidade de abertura, implicando pequenas mudanças na configuração favorecendo a busca local. Para indivíduos com menor grau de afinidade, as chaves com maior corrente têm maior probabilidade de abertura implicando grandes câmbios na configuração favorecendo a busca global ou exploração. A equação (6.22) estabelece o número de mutações sucessivas de forma inversamente proporcional ao grau de afinidade, favorecendo a busca global quando o grau de afinidade é pequeno.

Os fatores δ e α das equações (6.21) e (6.22) são selecionados de forma a sintonizar a busca local e a exploração, para um alto grau de afinidade o câmbio na configuração é pequena e não há mutações sucessivas, para um pequeno grau de afinidade o câmbio na configuração dada pela equação (6.21) é grande e admite probabilidade de mutação sucessiva (normalmente até 2 o 3 mutações sucessivas) implicando grande mudança na configuração e mantendo a diversidade da população, que é uma das metáforas do algoritmo baseado em Sistemas Imunológicos Artificiais.

6.5.3. Exemplo de Processo de Clonagem – Hipermutação Proposta

A Figura 52 apresenta o sistema teste de 14 barras. O processo de clonagem é feito de acordo à equação (6.20). A mutação de cada indivíduo depende de sua afinidade. São apresentados 2 casos extremos: alta afinidade ($i=1$) pelo anticorpo dado por $N_2^1 = [9, 11, 16]$ e baixa afinidade dado pelo anticorpo representado pelo anticorpo $N_2^{10} = [11, 14, 10]$, onde a relação de proporcionalidade é contínua entre esses casos. O processo de mutação é explicado para cada caso como segue:

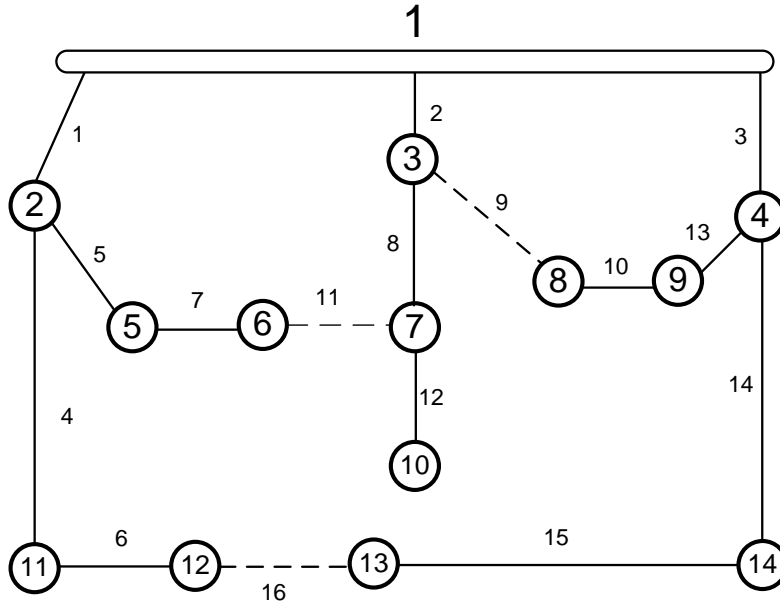


Figura 52: Sistema Teste de 14 barras - Configuração Inicial $N_2^1 = [9, 11, 16]$.

Alta afinidade dado por $N_2^1 = [9, 11, 16]$

O anticorpo dado por $N_2^1 = [9, 11, 16]$ tem alta afinidade, de acordo ao fluxo de potência prévio os valores das correntes é dado por $I = [I_1 \dots I_m \dots I_{16}]$, para cada barra m . Um elemento de N_2^1 é selecionado aleatoriamente (por exemplo a chave 11), e é fechada, criando o anel dado por $L = [1 \ 2 \ 5 \ 7 \ 8 \ 11]$. As correntes prévias do anel estão dadas por $I = [I_{11} \ I_7 \ I_5 \ I_8 \ I_2 \ I_1]$ ordenado de menor a maior ($I_{11} = 0$). É aplicada a equação (6.21) obtendo a probabilidade de abertura de cada chave do loop dado por $\rho^1 = [\rho_7 \ \rho_5 \ \rho_8 \ \rho_2 \ \rho_1 \ \rho_{11}]$, ordenado de maior a menor, onde $\rho_{11} = 0$ para evitar abrir a mesma chave que foi fechada. Depois é aplicado o sorteio e aberta a chave selecionada por exemplo a chave 7, a configuração obtida é representada na Figura 53. Pode-se observar que a configuração muda levemente.

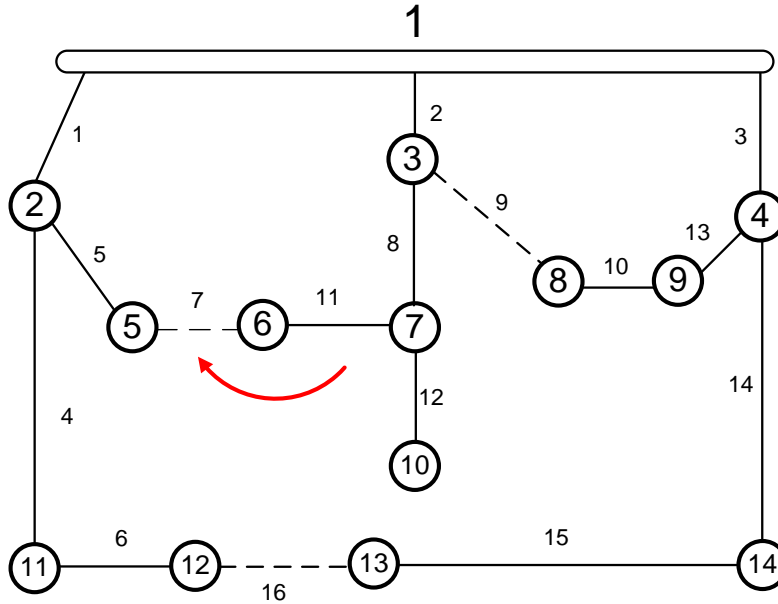


Figura 53: Mutação Leve – Alta Afinidade. $N_2^1 = [9, 11, 16] \Rightarrow N_2^{1*} = [9, 7, 16]$

Baixa afinidade dado por $N_2^{10} = [11, 14, 10]$

De acordo ao fluxo de potência e à avaliação da função objetivo, o indivíduo dado por $N_2^{10} = [11, 14, 10]$ tem baixa afinidade. É selecionado uma destas chaves por exemplo a chave 14 formando o anel dado por $L=[1 \ 4 \ 6 \ 16 \ 15 \ 14 \ 3]$. A corrente previa de cada barra é dada por $[I_{14} \ I_{15} \ I_{16} \ I_3 \ I_6 \ I_4 \ I_1]$ ordenada de menor a maior ($I_{14} = 0$). A equação (6.21) é aplicada com $i=10$, $N=10$, e é obtida a probabilidade de abertura de cada chave $\rho^1 = [\rho_1 \ \rho_4 \ \rho_6 \ \rho_3 \ \rho_{16} \ \rho_{15} \ \rho_{14}]$, ($\rho_{14} = 0$). Com a aplicação da probabilidade é selecionada por sorteio um elemento de L, por exemplo a chave 6, e a configuração nova é dada pelo vetor $N_2^{10*} = [11, 6, 10]$ mostrada na Figura 54, neste caso para baixa afinidade corresponde uma grande mudança na configuração.

Aplicando a equação (6.22) é obtida uma mutação sucessiva neste caso aplicado a N_2^{10*} , a mutação sucessiva é feita fechando de forma aleatória uma chave de N_2^{10*} , fazendo a abertura de uma chave do anel correspondente, de forma aleatória, desta maneira é obtida a configuração dada pelo vetor $N_2^{10**} = [5, 6, 10]$ apresentada na Figura 55.

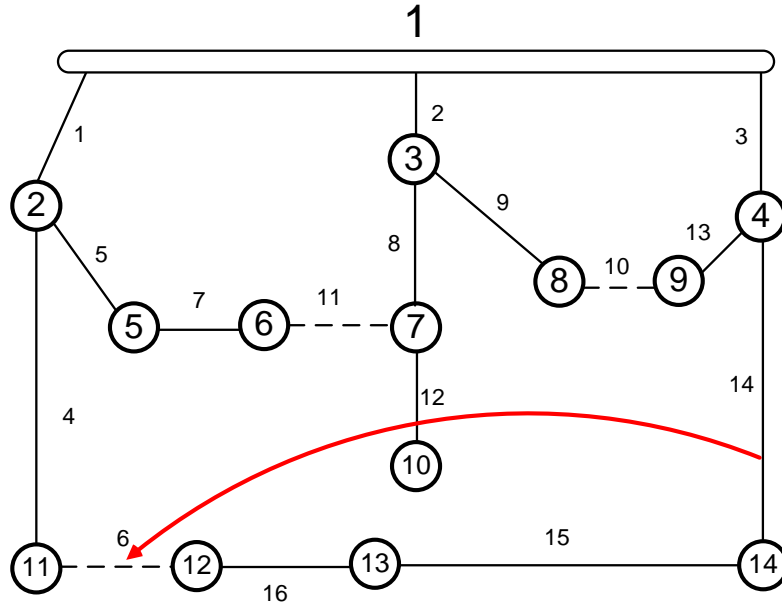


Figura 54: Mutação Forte – Baixa Afinidade $N_2^{10} = [11, 14, 10] \Rightarrow N_2^{10*} = [11, 6, 10]$

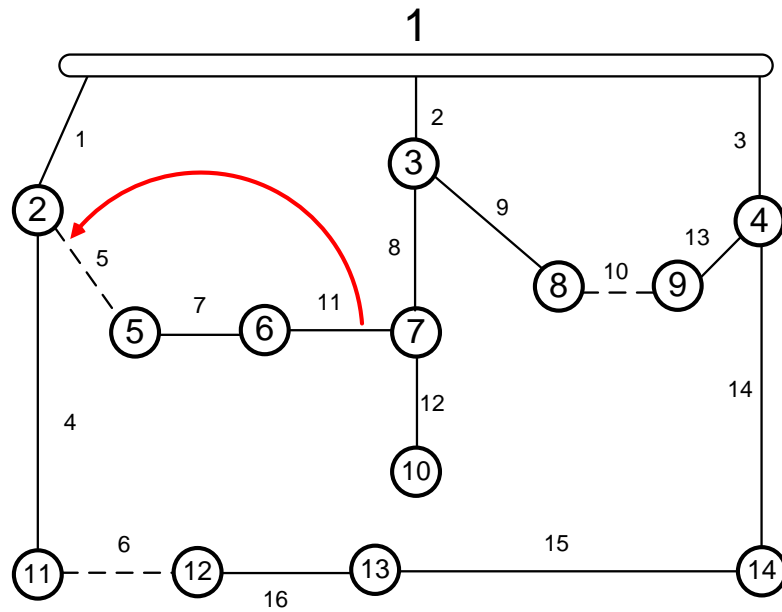


Figura 55: Mutação Sucessiva   Mutação Forte $N_2^{10*} = [11, 6, 10] \Rightarrow N_2^{10**} = [5, 6, 10]$

Em síntese, para anticorpos com *alta afinidade*   feita a abertura duma chave com *corrente pequena* do anel correspondente, obtendo uma pequena variação na configuração,

consequentemente uma pequena variação na afinidade do anticorpo, além disso esta operação implica na avaliação do anticorpo, um cálculo de fluxo de potência com pequeno custo computacional, devido a que a configuração obtida não tem sobrecarga, implicando a rápida convergência no algoritmo de fluxo de potência, e favorecendo a busca local.

Para *baixa afinidade* do anticorpo, a abertura de uma chave com *grande corrente* e a aplicação de *mutações sucessivas* implicam grande mudança na configuração, favorecendo a busca global ou exploração no espaço de soluções.

Esta estratégia não requer grande esforço computacional adicional, devido a que os dados são obtidos de cada avaliação da função objetivo dado pelo fluxo de potência calculado em cada iteração, e as equações envolvidas são muito simples.

O algoritmo representa de forma muito ótima a resposta da imunização adaptativa do organismo ante a presença de um antígeno (Ag), onde as operações de **mutação** e **clonagem** são realizadas utilizando o critério de **diversificação** e **intensificação**, incrementando o critério de intensificação aos indivíduos mais afins e o critério de diversificação aos indivíduos menos afins, desta maneira é realizada uma busca muito mais eficiente procurando o ótimo global.

CAPÍTULO 7

7. Resultados

7.1 Sistemas Testes

O Algoritmo Proposto **EAIS** foi simulado nos sistemas testes de 14,33, 84, 136 barras para o análise mono-objetivo de redução de perdas. O método proposto foi comparado com o algoritmo CLONALG (denominado **AIS**) desenvolvido de forma similar à [2] e [1] sem mutações com proporcionalidade às correntes dos ramos, e também são comparados com outros algoritmos de referências da bibliografia consultada quanto aos resultados obtidos, as comparações são feitas para o caso mono-objetivo de redução de perdas, e uma vez validado o algoritmo e simulado para o caso multiobjetivo com demanda constante e demanda variável.

No sistema de 14 barras os resultados são os mesmos que a literatura consultada e não contribuem à análise da eficácia do algoritmo por ser muito simples. Se apresentam os resultados dos sistemas testes de 33,84 e 136 barras.

7.1.1. Sistemas Teste de 33 barras

Foram realizadas 10 simulações no sistema de 33 barras, os resultados são apresentados na Tabela 7, e são comparados com o algoritmo **AIS** e as referências: [3], [22], [5], [38], e outros. A convergência do algoritmo proposto **EAIS** é mostrada na Figura 56 e a convergência do algoritmo **AIS** na Figura 57. Os resultados obtidos são os ótimos de acordo à literatura, em um menor tempo e quantidade de iterações em comparação com o algoritmo **AIS**. Os valores das constantes utilizadas são: $\beta = 0.5$, $N = 30$, $\alpha = 1$, $\delta = 0.66$. O máximo número de iterações utilizado como critério de convergência é de 20.

Tabela 7: Resultados de Sistema de 33 barras. Redução de Perdas.

Ref.	Chave Abertas	Perdas [kW]	Tempo Converg.	Iterações
Inicial	33-34-35-36-37	202,68		
AIS	7-9-14-32-37	139,55	1 pu	8,1
EAIS	7-9-14-32-37	139,55	0,52 pu	4,4
Referencias consultadas	7-9-14-32-37	139,55		

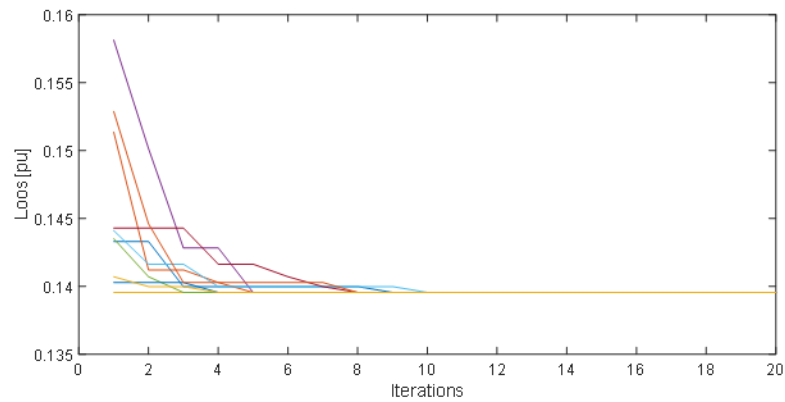


Figura 56: Convergência de sistema de 33 barras. Algoritmo EAIS.

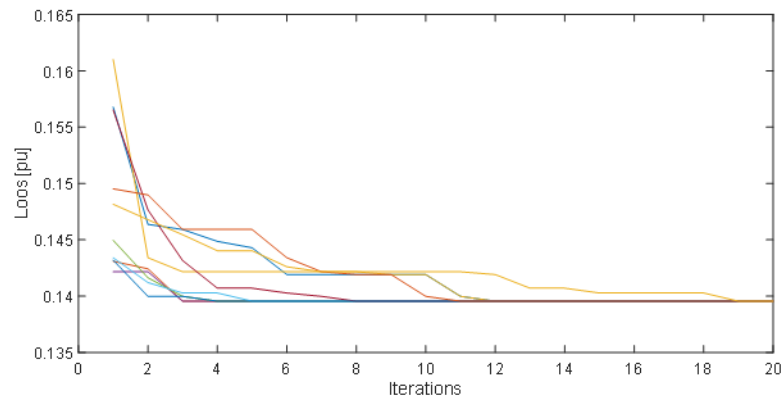


Figura 57: Convergência de sistema de 33 barras. Algoritmo AIS.

7.1.2. Sistemas Teste de 84 barras

Foram realizadas 10 simulações no sistema de 84 barras, os resultados são apresentados na Tabela 8, e são comparados com o algoritmo AIS e as referências: [3], [39] e [40]. A convergência do algoritmo proposto **EAIS** é mostrada na **Figura 58** e a convergência do algoritmo **AIS** na **Figura 59**. Os resultados obtidos são os ótimos de acordo a literatura, em um menor tempo e quantidade de iterações em comparação ao algoritmo **AIS**. Os valores das constantes utilizadas são: $\beta = 0,5$, $N = 40$, $\alpha = 0,5$, $\delta = 0,8$. O máximo número de iterações utilizado como critério de convergência é de 30.

Tabela 8: Resultados de Sistema de 84 barras. Redução de Perdas.

Ref.	Chave Abertas	Perdas [kW]	Tempo Converg.	Iterações
Inicial	84-.....-96	531,90		
AIS	7-13-34-39-42-55-62-72- 83-86-89-90-92	469,88	1 pu	20,5
EAIS	IDEM	469,88	0,4 pu	5,8
Referencias consultadas	IDEM	469,88	-----	-----

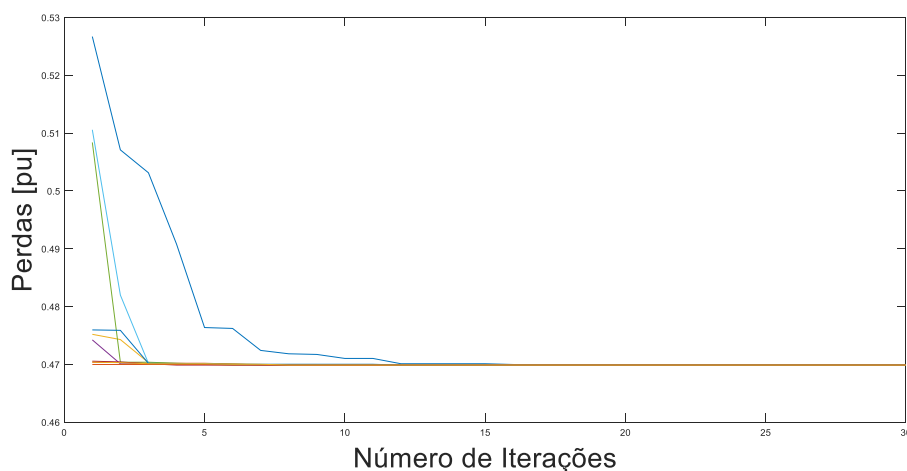


Figura 58: Convergência de sistema de 84 barras. Algoritmo EAIS.

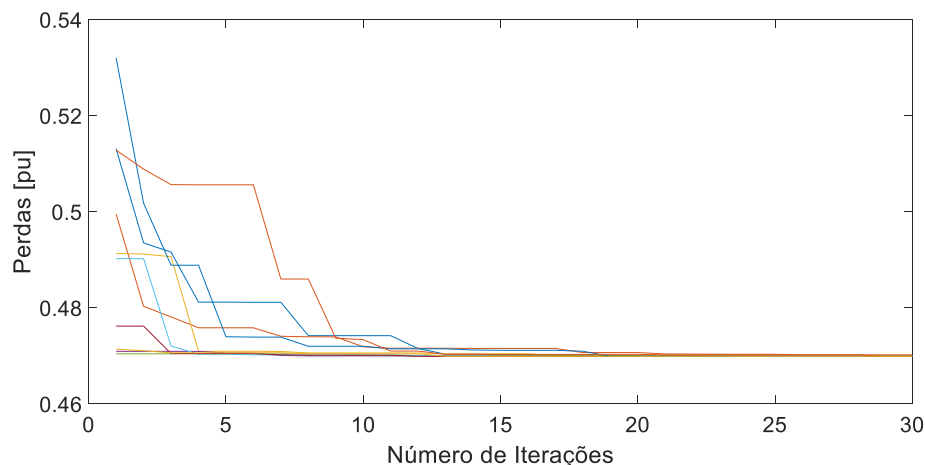


Figura 59: Convergência de sistema de 84 barras. Algoritmo AIS.

7.1.3. Sistemas Teste de 136 barras

Foram realizadas 10 simulações no sistema de 136 barras, o resultado da média é apresentado na Tabela 9, é comparado com o algoritmo AIS e as referências [3], [39] e [40]. A convergência do algoritmo proposto **EAIS** é mostrada na Figura 60 e a convergência do algoritmo **AIS** na Figura 61. Os resultados obtidos são os ótimos de acordo à literatura, em um menor tempo e quantidade de iterações em comparação com o algoritmo **AIS**. Os valores utilizados são: $\beta = 0,3$, $N = 50$, $\alpha = 2$, $\delta = 0,8$. O máximo número de iterações utilizado como critério de convergência é de 100.

Tabela 9: Resultados de Sistema de 136 barras. Redução de Perdas.

Ref.	Chave Abertas	Perdas [kW]	Tempo Converg.	Iterações
Inicial	136-..... - 156	320,3		
AIS	7-35-51-90-96-106-118- 126-135-	280,19	1 pu	68
EAIS	IDEM	280,19	0,42 pu	31
Outras Referencias	IDEM	280,19	-----	-----

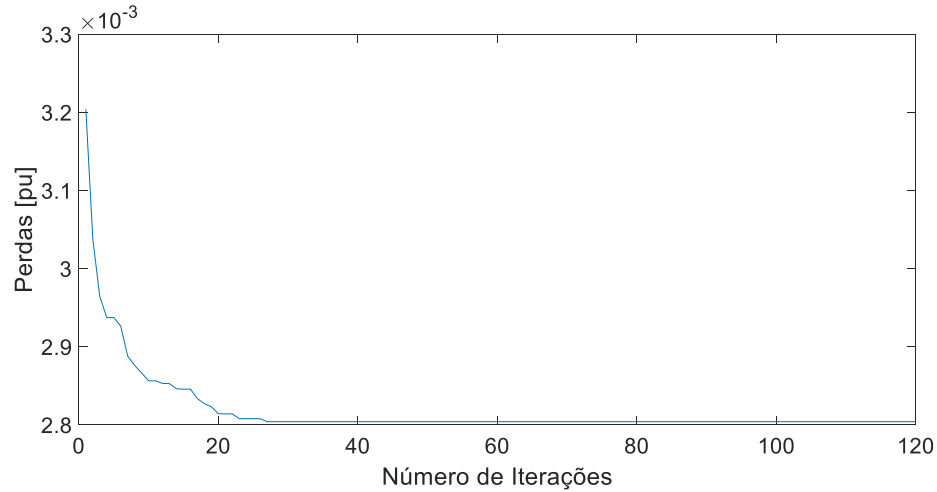


Figura 60: Convergência de sistema de 136 barras. Algoritmo EAIS.

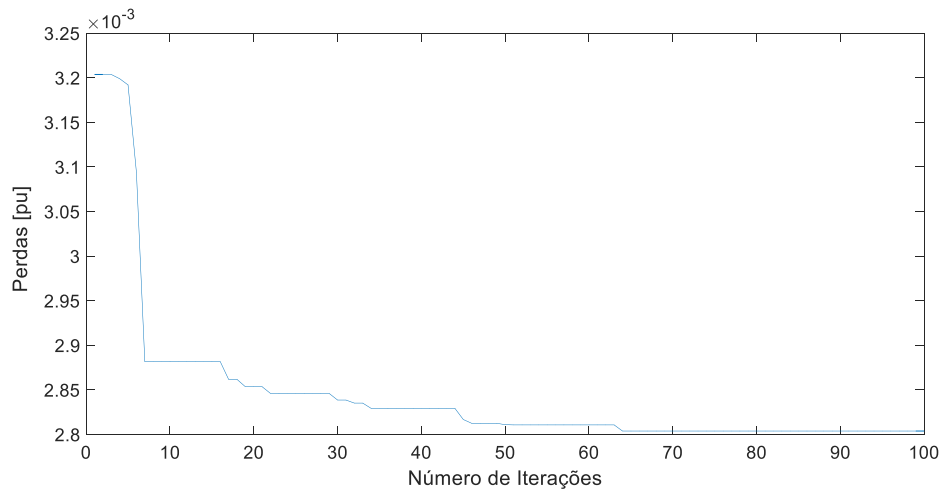


Figura 61: Convergência de sistema de 136 barras. Algoritmo AIS.

7.2. Sistema Real do Microcentro de Encarnação

A cidade de Encarnação está situada a 360 km ao sul de Assunção - Capital do Paraguai. É uma importante cidade com características residências e comerciais. A rede em questão corresponde a três alimentadores de 23 kV da subestação, as demandas consideradas são indicadas na Tabela 13 para os alimentadores ENC1, ENC2 e ENC3 e FP médio igual a 0,92, com respectivos horários para uma configuração de contingência (sobrecarregada) que é a consideração inicial para a abordagem de reconfiguração.

A rede (ver anexo B) possui 91 chaves, 76 setores e 206 barras de carga. Pode-se considerar esse sistema como de grande porte. Este sistema foi escolhido pela diversidade de instalações presentes, diversos tipos de condutores e cargas mono e trifásicas.

Foram realizadas simulações considerando com demanda constante para a obtenção da configuração ótima para o problema mono-objetivo de redução de perdas e para o problema multiobjetivo, os resultados são apresentados na Tabela 10, e na Tabela 11. Tabela 11, a convergência pode-se observar na Figura 62 para o caso mono-objetivo e na Figura 63 para o abordagem multiobjetivo. Na Figura 64 se apresenta a configuração ótima obtida com a representação de grafo da rede elétrica.

Posteriormente foi realizado a abordagem com demanda variável propondo configurações constantes nos horários de 00:00- 7:00, 07:00- 16:00 e 16:00 -00:00 hs., ou seja, tres trocas de configuração diária. Os resultados podem ser estendidos a outros períodos de tempo considerados, ou inclusive para a abordagem da quantidade ótima de trocas de configuração. Os resultados são apresentados nas figuras 65 a 71 e nas tabelas 12 a 15. Pode-se observar uma redução importante em perdas de energia em relação ao ótimo com demanda média e configuração fixa na Tabela 15 de 296 kWh, o que justifica plenamente este tipo de estudo para planejamento de operação, as outras funções objetivos também são otimizadas de forma simultânea, pode ser visto a redução de perdas na Figura 69 e Figura 70, o balanço das correntes na Figura 68 e a melhora dos níveis de tensão na Figura 71. Os valores utilizados são: $\beta = 0,3$, $N = 50$, $\alpha = 2$, $\delta = 0,8$. O máximo número de iterações utilizado como critério de convergência é de 50.

Tabela 10: Resultados de Funções. Otimização com Demanda Constante. Sistema Real.

	Perdas [kW]	Corrente Alim.[A]	Vmin [pu]
Inicial	720	178-297-33	0,9821
EAIS – Redução Perdas	287 (-60,13%)	180-137-183	1,002
EAIS Multiobjetivo	289 (-60%)	168-167-166	1,031

Na Tabela 10 se apresentam os resultados com a abordagem considerando a redução de perdas e a abordagem multiobjetivo, quanto as perdas pode-se perceber que com a abordagem multiobjetivo os valores são praticamente iguais, mas os valores de tensão e balanço de corrente melhoram de maneira significativa. A convergência do algoritmo para redução de perdas é muito mais rápida que para a abordagem multiobjetivo, as iterações são apresentadas nas Figuras 62 e 63, na Tabela 11 tem-se as quantidades de mudanças feitas nas chaves, no enfoque multiobjetivo tem uma operação mais que para a redução de perdas. No entanto, os resultados oferecidos pela abordagem multiobjetivo podem ser considerados muito melhores.

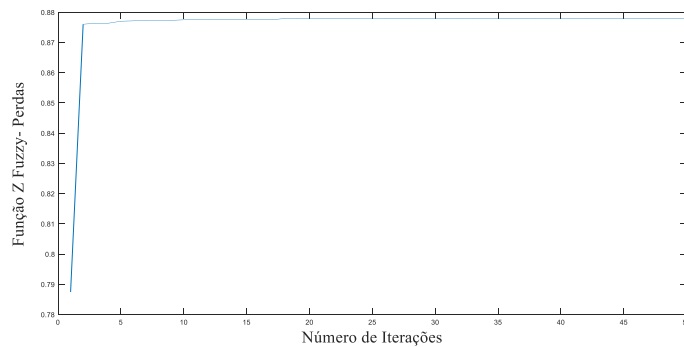


Figura 62: Convergência de sistema Real. Função Objetivo Perdas.

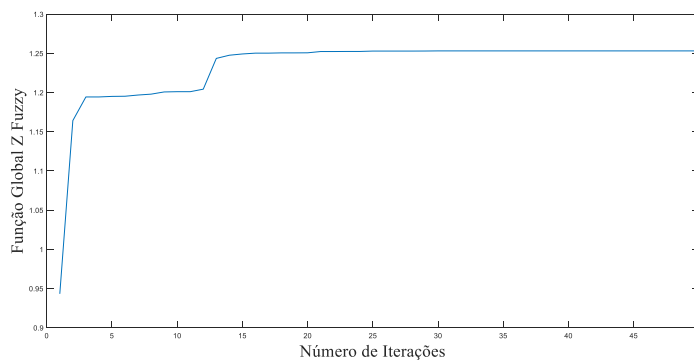


Figura 63: Convergência de sistema Real. Abordagem Multiobjetivo.

Os dados das correntes iniciais dadas nas curvas da Figura 43 e Figura 45 correspondem a uma condição das chaves $N_2^0 = [8, 11, 12, 14, 17, 21, 27, 28, 51, 53, 56, 58, 61, 73, 88]$, mas a posição inicial das chaves para as simulações é mudada de forma a inicializar o algoritmo em uma condição inicial diferente, a condição inicial de configuração é dada pelo vetor $N_2^{0*} = [8, 11, 12, 14, 17, 21, 27, 28, 51, 53, 56, 61, 70, 73, 88]$.

Tabela 11: Chaves Abertas. Otimização com Demanda Constante. Sistema Real.

Condição Inicial	Redução de Perdas	Multiobjetivo
8	8	7
11	11	11
12	12	12
14	14	14
17	21	21
21	25	25
27	28	28
28	50	50
51	55	56
53	61	58
56	71	60
61	76	71
70	77	75
73	81	77
88	91	91
Mudanças	8	9

As chaves abertas estão indicadas em linhas ponteadas e cor azul. A configuração ótima da Figura 64 corresponde à abordagem multiobjetivo, neste caso as funções objetivos utilizadas não são muito contraditórias o que significa que a melhoria de uma função objetivo não implica muito detrimento na outra.

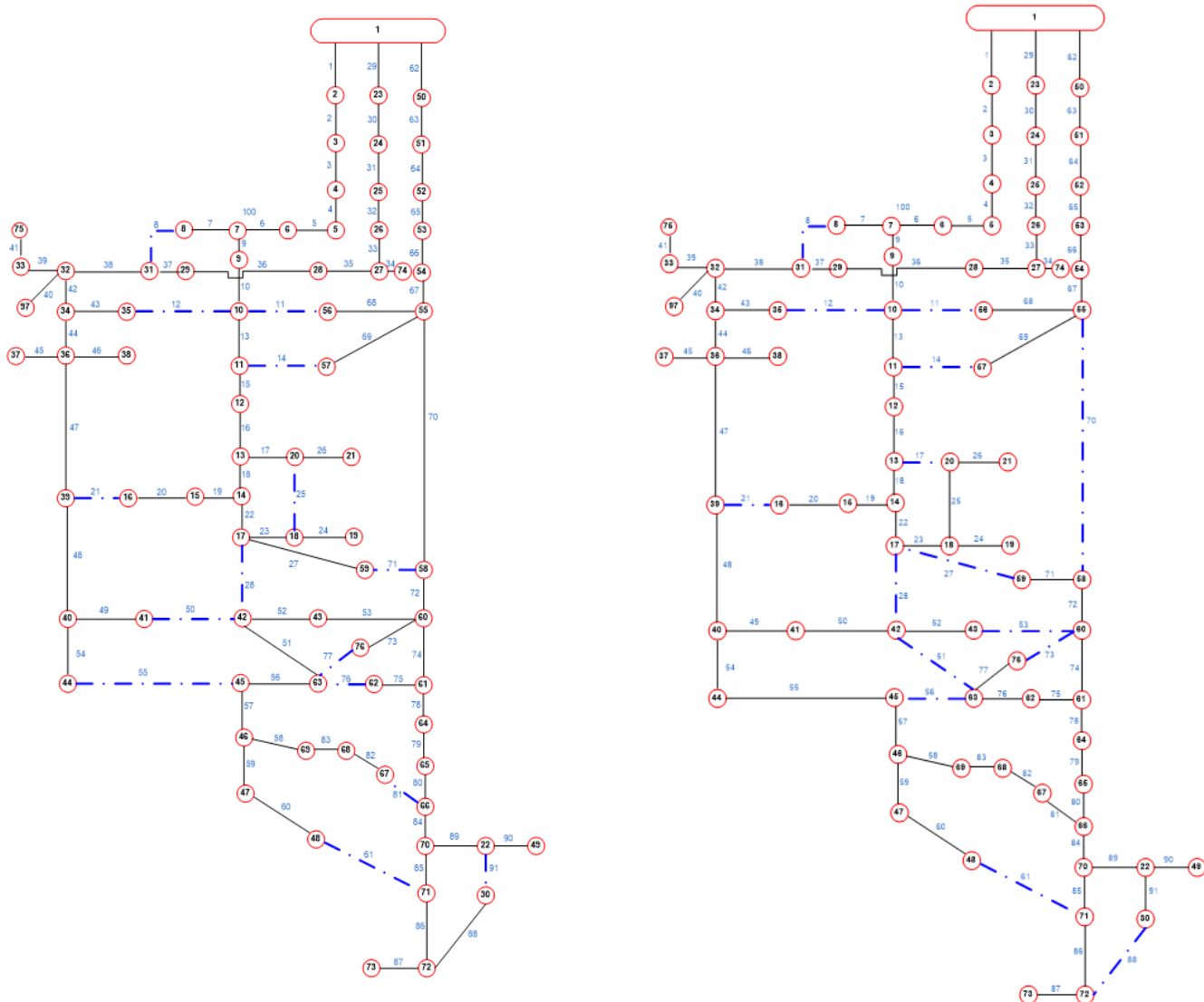


Figura 64: Grafos da Configuração inicial (esquerda) e configuração ótima a demanda constante (direita) do Micro Centro de Encarnação.

As Figuras 65 a 67 representam o processo realizado no algoritmo de otimização com demanda variável, ele é aplicado no intervalo horário detalhado.

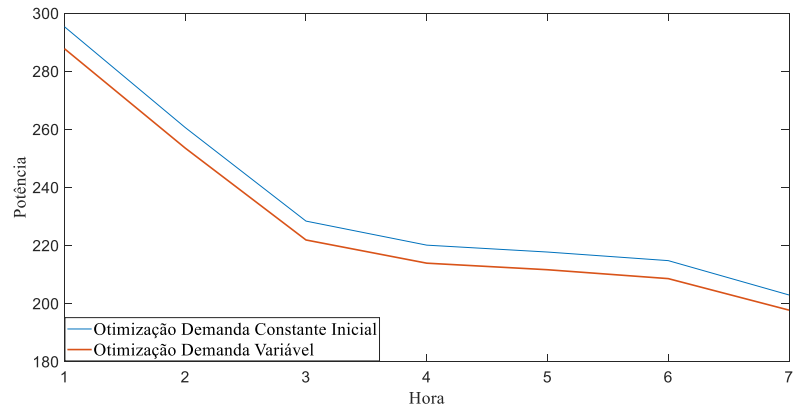


Figura 65: Perdas Eléctricas. Otimização Demanda Variável versus Otimização a Demanda Constante Inicial

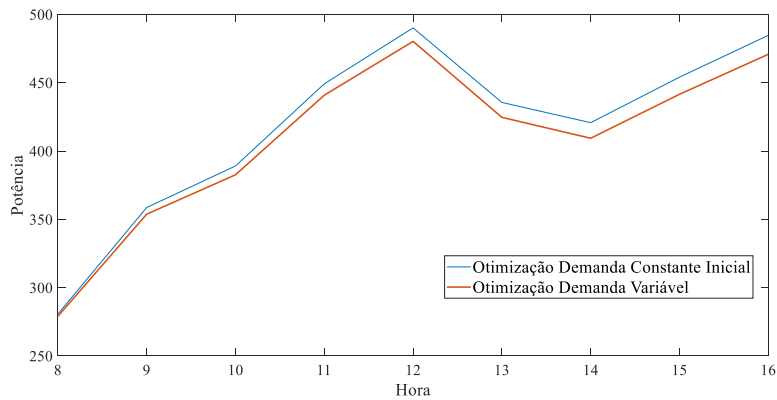


Figura 66: Perdas Eléctricas. Otimização Demanda Variável versus Otimização a Demanda Constante Inicial

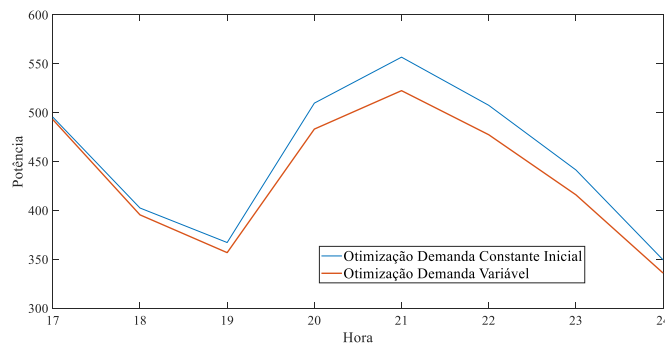


Figura 67: Perdas Eléctricas. Otimização Demanda Variável versus Otimização a Demanda Constante Inicial

Na Tabela 13 pode-se notar que as correntes da configuração inicial são bastantes desequilibradas, essa condição foi selecionada para evitar dependência da condição inicial.

Tabela 12: Chaves Abertas. Otimização com Demanda Variável. Sistema Real.

Chaves Abertas Condição Inicial	Resultado	Resultado Ótimo com Demanda Variável com 3 trocas de		
		00:00 a 07:00	07:00 a 16:00	16:00 a 24:00
8	7	8	8	7
11	12	11	11	11
12	14	12	14	14
14	21	14	21	21
17	25	21	25	22
21	27	25	43	25
27	28	27	49	28
28	52	28	51	43
51	55	50	52	52
53	57	56	56	55
56	59	58	60	60
61	68	60	71	76
70	73	75	75	77
73	76	77	82	81
88	91	91	91	91
Mudanças	9	7	6	7

Tabela 13: Correntes dos alimentadores na condição inicial. Sistema Real.

	Alimentador 1	Alimentador 2	Alimentador 3
01:00	178,37	297,44	33,20
02:00	170,18	277,07	30,44
03:00	161,81	255,78	28,60
04:00	158,31	251,89	27,94
05:00	157,04	251,07	27,74
06:00	157,43	247,99	27,28
07:00	148,00	245,76	27,26
08:00	159,57	304,71	33,88
09:00	163,17	361,26	39,20
10:00	161,71	383,57	41,33
11:00	173,50	414,26	43,78
12:00	180,81	434,46	45,18
13:00	167,07	412,65	41,55
14:00	164,05	405,98	40,18
15:00	165,90	425,50	42,41
16:00	166,00	444,05	44,38
17:00	186,37	428,87	43,01
18:00	189,56	362,39	39,96
19:00	196,49	326,49	38,83
20:00	263,23	349,33	43,68
21:00	286,23	353,14	44,17
22:00	270,83	339,77	42,43
23:00	250,72	320,09	39,28
24:00	204,02	303,51	37,48
Média	186,68	341,54	37,63

Tabela 14: Correntes dos alimentadores. Resultado Ótimo

	Alimentador 1	Alimentador 2	Alimentador 3
01:00	178,34	155,13	168,95
02:00	170,16	146,97	154,96
03:00	161,79	134,13	145,44
04:00	158,29	133,10	142,10
05:00	157,02	133,10	141,13
06:00	157,41	132,05	138,76
07:00	147,99	130,00	138,61
08:00	191,47	131,75	168,04
09:00	201,25	157,79	194,86
10:00	202,16	167,82	205,63
11:00	217,56	183,11	218,13
12:00	227,38	193,78	225,40
13:00	212,34	189,35	207,42
14:00	209,09	188,82	200,70
15:00	212,76	196,28	211,87
16:00	214,65	203,79	221,81
17:00	161,76	242,39	241,29
18:00	160,35	196,01	225,72
19:00	163,39	169,33	220,57
20:00	214,59	176,40	254,75
21:00	232,29	179,52	260,85
22:00	220,09	173,12	249,81
23:00	204,28	165,88	231,24
24:00	167,88	154,63	214,84
Média	189,35	168,09	199,29

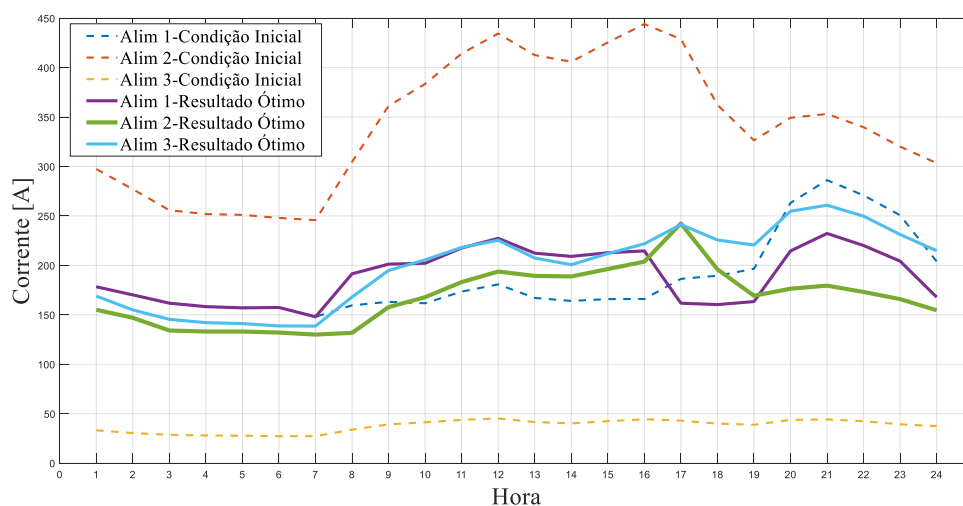


Figura 68: Correntes dos alimentadores. Condição Inicial versus Otimização a Demanda Variável considerando 3 trocas de configuração

Tabela 15: Perdas Elétricas. Configuração Inicial e Otimizada. Sistema Real.

Hora	Condição Inicial	Otimização 1: a demanda constante igual à média	Otimização 2: a demanda Variável
01:00	718,94	295,18	287,72
02:00	619,09	259,92	253,48
03:00	537,86	227,41	221,83
04:00	517,21	219,22	213,84
05:00	511,63	216,9	211,58
06:00	499,53	213,7	208,52
07:00	485,81	202,74	197,67
08:00	728,30	284,56	279,08
09:00	983,72	366,47	353,78
10:00	1094,39	399,06	382,59
11:00	1261,22	460,62	440,87
12:00	1372,53	502,5	480,26
13:00	1198,67	446,59	424,64
14:00	1143,90	431,05	409,34
15:00	1260,21	466,35	441,52
16:00	1371,52	499,13	470,78
17:00	1308,24	496,06	492,96
18:00	1031,72	399,24	395,50
19:00	915,83	361,52	356,86
20:00	1176,86	496,63	483,18
21:00	1238,47	541,03	522,47
22:00	1134,73	493,55	477,42
23:00	983,32	429,82	415,98
24:00	839,70	342,22	335,99
Perdas Totais	22.933,401 kWh	9.051,47 kWh	8.757,86 kWh
Redução referida á Condição Inicial		- 13.881,5 kWh 60.58%	-14.175,54 kWh 61.8%
Referida á Otimização 1			- 293,61 kWh 3.14 %

Os resultados obtidos foram satisfatórios, na Tabela 15 e na Figura 70 conferem um valor de perdas de energia em torno de 293,62 kWh menor a um valor ótimo calculado considerando a demanda média do período determinado de 24 horas, que possibilita considerar as três trocas de configuração propostas nesse período de tempo.

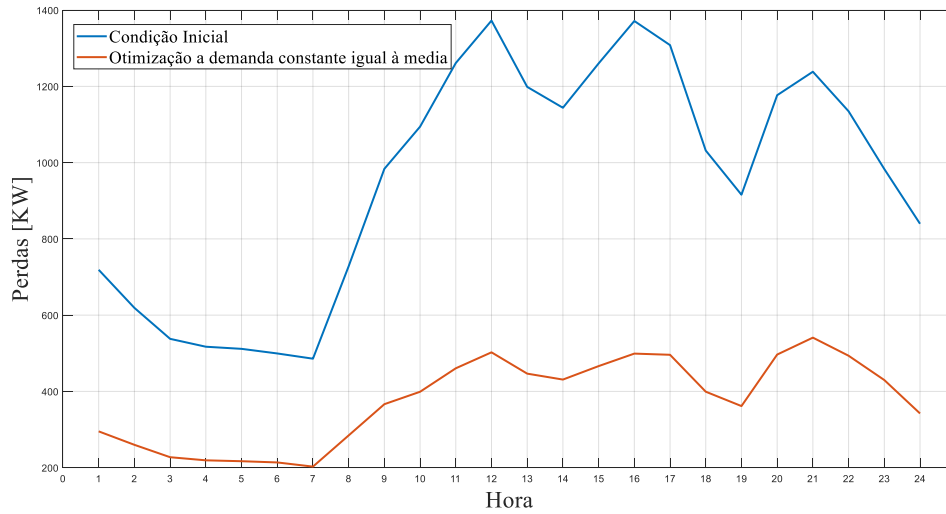


Figura 69: Perdas Elétricas. Condição Inicial versus Otimização a Demanda Media

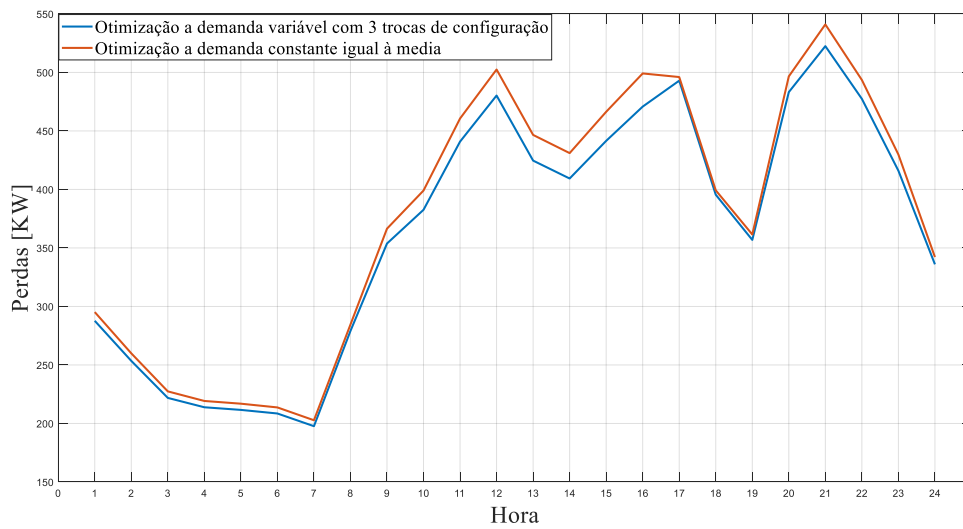


Figura 70: Perdas Elétricas. Otimização a Demanda Media Constante versus Otimização a Demanda Variável com 3 trocas de configuração

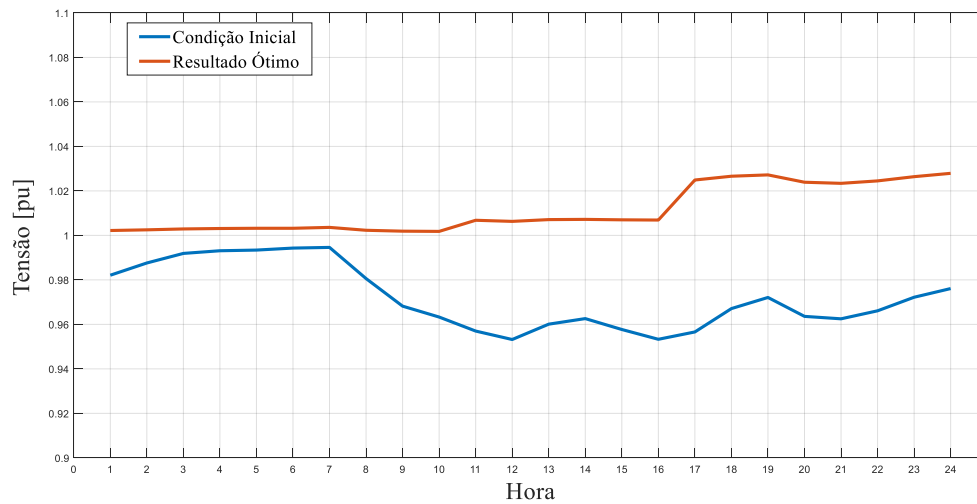


Figura 71: Tensão Extremas nas barras. Condição inicial versus Otimização a Demanda Variável com 3 trocas de configuração

Com relação aos resultados das tensões podem ser vistos na Figura 71 os valores extremos das tensões nas barras no período de tempo considerado, são comparados os valores da configuração inicial e os resultados ótimos com 3 configurações propostas, além de estar dentro do intervalo estabelecido (que é uma restrição da formulação do problema), os valores ótimos estão próximos do valor nominal, melhorando substancialmente a qualidade do serviço.

CAPÍTULO 8

8. Conclusões

Os fatores econômicos e ecológicos levam às empresas concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica à necessidade de garantir a qualidade de energia elétrica ao menor custo possível, os recursos tecnológicos existentes apontam cada vez mais a esse fim. Além disso os órgãos de regulação do setor elétrico atingem essa finalidade mediante a aplicação de penalidades quanto a qualidade e confiabilidade do serviço elétrico. Uma das ações de controle nos sistemas de distribuição que contribui a este propósito é a Reconfiguração de Redes de Distribuição, e fundamentalmente uma das ações de relação custo-benefício mais ótima.

A Reconfiguração de Redes de Distribuição é um problema multiobjetivo de programação não linear inteira e combinatória, onde os métodos tradicionais não são de utilidade na busca de uma solução ótima. As abordagens heurísticas e metaheurísticas são as mais utilizadas na procura de soluções. A aplicação de ações em tempo real e considerações de curva de carga exigem à ferramenta garantir elevada robustez e baixo custo computacional para ser utilizada na tomada de decisões em tempo real, a tendência é a implementação em uma rede automatizada, com operações a serem executadas pelo DMS (*Distribution Management System*) do SCADA no Centro de Controle sem a intervenção direta humana (ou com intervenção de supervisão), mediante o acionamento de chaves automáticas, e com a metáfora das Redes Inteligentes (*Smart Grid*).

Com estas considerações foi desenvolvida uma ferramenta baseada em Sistemas Imunológicos Artificiais, que demonstrou ser muito efetiva na busca de mínimos globais na bibliografia consultada, também foi utilizado a Teoria de Grafos nos cálculos de fluxo de potência e para a obtenção das configurações mediante uma álgebra linear que permite estabelecer configurações viáveis da rede mediante operações algébricas matriciais, além de permitir as modificações da rede de forma controlada. Desta maneira é reduzido notavelmente o custo computacional no processo de cálculo, garantindo resultados viáveis.

O trabalho consistiu no desenvolvimento de um algoritmo chamado EAIS (Enhanced Artificial Immune Systems), basicamente um algoritmo baseado em Sistemas Imunológicos

Artificiais, com uma mutação especializada para sistemas elétricos de distribuição fundamentada em uma probabilidade de mutações proporcionais às correntes nas chaves com o propósito de controlar as variações de configuração e associado ao controle da população de clonagem e mutações sucessivas com o objetivo de procurar a solução potenciando a metáfora dos sistemas imunológicos principalmente quanto a profundidade de busca, a diversidade e a capacidade de adaptação, desta maneira é obtido uma ferramenta mais inteligente, reduzindo o espaço de busca e o custo computacional, com ajuda também de operações baseadas em Teoria de Grafos.

O algoritmo foi simulado em sistemas testes de 33, 84 e 136 barras para otimização mono-objetivo de redução de perdas elétricas, e comparado com outro algoritmo baseado em AIS e outras referências, demonstrando resultados ótimos quanto a solução encontrada e ao custo computacional. Além disso, a ferramenta foi utilizada na solução do problema de otimização multiobjetivo para redução de perdas, balanço de corrente e redução de desvio da tensão com respeito à nominal, mediante a aplicação da lógica fuzzy para a redução do problema multiobjetivo a um problema mono-objetivo com uma só função global fuzzy, esta metodologia é utilizada em outros trabalhos encontrados na bibliografia e comprovado sua eficácia e simplicidade. A seleção das funções objetivos foram feitas como um caso particular, podem ser selecionadas de acordo à necessidade do problema ou da empresa concessionária, a metodologia tem a vantagem da simplicidade quanto a tomada de decisão em tempo real devido a que oferece uma só solução como ótima ao contrario que a abordagem baseado em Frente de Pareto que oferece um conjunto de soluções, e também tem a vantagem da flexibilidade de ajustar os pesos de cada função objetivo de acordo às características de sistema, a necessidade das empresas e a experiência do operador de sistema.

A ferramenta foi simulada para o problema multiobjetivo num sistema real de grande porte correspondente à Rede do Micro Centro da cidade de Encarnação, obtendo resultados satisfatórios com demanda constante. Posteriormente foi abordado o problema com demanda variável mediante aplicação da curva de carga diária e a adaptação do algoritmo EAIS, propondo 3 trocas de configuração diárias. Os resultados obtidos foram satisfatórios, a consideração da curva de carga torna a solução mais ideal e mais próxima da realidade da operação real de um sistema elétrico. O problema de demanda variável precisa de muita

eficiência no custo computacional devido às quantidades de cálculos de fluxo de potência que são necessárias para a avaliação das funções objetivos, porém o algoritmo proposto é ideal para a busca da solução ótima de Reconfiguração de Redes de Distribuição em uma situação real onde a variação de carga é fundamental para a tomada de decisões.

Finalmente, este trabalho demonstrou que por meio do planejamento de curto prazo é factível otimizar os custos de operação e a qualidade das variáveis elétricas sem realizar investimentos importantes na rede elétrica. O custo da reconfiguração corresponde unicamente a operações de chaveamento, que são realizadas automaticamente (chaves telecomandas) ou manualmente por meio de pessoal de campo da concessionária de distribuição, além disso este trabalho contribui ao estado da arte dos algoritmos baseados em Sistemas Imunológicos Artificiais aplicados em Reconfiguração de Distribuição, fazendo inovações importantes quanto ao processo de clonagem-hipermutação e aplicação multiobjetivo com Lógica Fuzzy.

8.1 . Temas para Trabalhos Futuros

- **Alocação Otimiza de Chaves Automáticas:** O presente trabalho considera todas as chaves como operáveis, para possibilitar uma reconfiguração horária mais viável é necessário prever a automação da operação, neste caso a alocação ótima destas chaves pode ser abordada como um problema de otimização, e um dos critérios de busca pode ser a operação ótima para utilização em reconfiguração diária considerando a curva de carga.

- **Otimização da quantidade ótima de operações diárias:** O presente trabalho considera 3 trocas de configurações diárias, assumidas e feitas de acordo com referências consultadas, mas não há justificativa do ponto de vista da otimização sobre qual é o número ótimo de operações que devem ser realizadas. Este problema pode ser abordado como uma otimização multiobjetivo, onde o espaço de busca é expandido exponencialmente para cada hora de programação, este problema pode ser abordado mediante uma adaptação da modelagem matemática usando o algoritmo proposto.

- **Recomposição de Redes de Distribuição após falta:** logo após a ocorrência de uma falta, é localizada a mesma por uma metodologia dada (informes do Call Center, sinais de falta de chaves automáticas, algoritmos de identificação de falta, etc.) surge a necessidade de fazer a reposição do serviço elétrico aos usuários que se encontram fora da zona de falta,

para fazer um restabelecimento do serviço deve ser feito em quantidades otimizadas de operações onde o maior número de usuários deve estar conectado no mínimo tempo possível, ao menor custo possível, e com a qualidade ótima quanto as variáveis elétricas e salvando as condições de restrição do sistema elétrico quanto a limites de tensão e sobrecarga da rede. Este problema de otimização pode ser abordado mediante a metodologia proposta neste trabalho fazendo modificações quanto à modelagem matemático.

- **Planejamento da Rede:** O planejamento geral da rede quanto a alocação e dimensionamento ótimo dos equipamentos de distribuição: reguladores de tensão, banco de capacitores, chaves, e a linhas elétricas com suas características correspondentes, bitola do condutor, com seus respectivos custos, é possível abordar mediante um modelagem baseado na Teoria de Grafos e as decisões baseadas nas técnicas desenvolvidas em reconfiguração de sistemas elétricos fundamentadas na ferramenta proposta, para esse propósito é necessário adaptar o modelo de forma a que as variáveis de controle sejam tomadas de decisões para a instalação e dimensionamento dos equipes nas redes no ponto determinado ou das linhas no setor determinado, e não só o fechamento o abertura das chaves, nesse caso o espaço de soluções possivelmente será muito mais grande, portanto os algoritmos mais especializados como o proposto neste trabalho terão maior importância para esses tipos de aplicações.

Referencias.

- [1] D. Q. O. a. A. C. Z. d. S. F. R. Alonso, «Artificial Immune Systems Optimization Approach for Multiobjective Distribution System Reconfiguration,» *F. R. Alonso, D. Q. Oliveira and A. C. Zambroni de Souza, "Artificial Immune Systems Optimization Approach for IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, nº 2, pp. 840-847, 2015.
- [2] E. J. O. e. a. Leonardo W. De Oliveira, «Artificial Immune Systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 56, pp. 64-74, 2014.
- [3] R. R. J. F. F. Simeone S.F. Souza, «Artificial immune networks Copt-aiNet and Opt-aiNet applied to the reconfiguration problem of radial electrical distribution,» *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 304-312, 2015.
- [4] E. P. BENTO y N. KAGAN, «Algoritmos Genéticos e Variantes na Solução de Problemas de Redes de Distribuição,» *SBA Automação & Controle*, vol. 19, pp. 302-315, 2008. .
- [5] X.-D. L. X.-Y. W. B. Z. Dong-Li Duan, «Reconfiguration of distribution network for loss reduction and reliabilityimprovement based on an enhanced genetic algorithm,» *Electrical Power and Energy Systems*,, pp. 88-95, 2015.
- [6] K. S. Hiroyuki Mori, «A Multi-Objective Meta-Heuristic Method for Distribution Network Optimization,» de *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Paris, 2010.
- [7] A. Z. d. S. L. D. D.Q. Oliveira, «Optimal plug-in hybrid electric vehicles recharge in distribution power systems,» *Electric Power Systems Research*, pp. 77-85, 2013.
- [8] D. P. L. Aggelos S. Bouhouras, «Influence of load alterations to optimal network configuration for loss reduction,» *Electric Power Systems Research*, pp. 17-27, 2012.
- [9] D. S. X. D. Gaowang Li, «Multiobjective Distribution Network Reconfiguration Considering the Charging Load of PHEV,» *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, vol. 19, nº 5, 2013.
- [10] R. R. Prajapati K., «A novel method for distribution system reconfiguration including static load models and daily load curve,» de *2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, Sharjah, United Arab Emirates, 2011.
- [11] R. R. J. P. J. T. S. Simone S.F. Souza, «Artificial immune algorithm applied to distribution system reconfiguration with variable demand,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 82, p. 561–568, 2016.
- [12] E. K. L. R. J. W. Norman L. Biggs, *Graph Theory 1736-1936*, New York: Oxford University Press, 1976.

- [13] G. L. L. CHARTRAND, *Graphs & Digraphs*, ; “Graphs & Digraphs,” Editora CRC Press, 2004., 2004.
- [14] R. Alonso, *RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS*, Minas Gerais. Brasil: Universidade Federal de Itajubá, 2.015.
- [15] R. BROADWATER, A. CHANDRASEKARAM, C. HUDDLESTON y A. H. KHAN, «Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems,» *Electric Power System Research*, vol. 14, nº 1988..
- [16] E. E.-S. e. a. Hany E. Farag, «A generalized power flow analysis for distribution systems with high penetration of distributed generation,» *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1499-1506, 2011.
- [17] P. P. Cruz, *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingeniería*, México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México, 2010.
- [18] L. A. Zadeh, «Fuzzy Sets,» *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-352, 1965.
- [19] E. Mandani, «Application of Fuzzy Algorithms for Control Simple Dynamic Plant,» *Proc. IEE*, pp. 1585-1588, 1974.
- [20] L. C. S. Rocha, *MÉTODO DA PONDERAÇÃO ENTRÓPICA PARA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO ROBUSTA DE MODELOS DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA, ITAJUBA : UNIFEI - Tesse de Doutorado em Ciências em Engenharia de Produção*, 2017.
- [21] H. W.-D. W. & C.-S. L. Hong-Zhong, «A coordination method for fuzzy multi-objective optimization of system reliability,» *Journal Of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 16, nº 3, pp. 213-220, 2005.
- [22] R. H. A. K. A. Saffar, «A new fuzzy optimal reconfiguration of distribution systems for loss reduction and load balancing using ant colony search-based algorithm,» *Applied Soft Computing*, vol. 11, p. 4021–4028, 2011.
- [23] Y. Huang, «Enhanced genetic algorithm-based fuzzy multi-objective approach to distribution network reconfiguration,» *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib*, vol. 5, pp. 615-620, 2002..
- [24] N. K. Juan Carlos Cebrian, «Reconfiguration of distribution networks to minimize loss and disruption costs,» *Electric Power Systems Research*, vol. 80, p. 53–62, 2010.
- [25] CASTRO, L. N. DE; VON ZUBEN, F. J., *Artificial Immune Systems: Part I – Basic Theory and Applications*, Technical Report DCA-RT 01/99, UNICAMP, 1999.
- [26] D. CORTEZ R., *Un Sistema Inmune Artificial para resolver el problema del Job Shop Scheduling*, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2.004.

- [27] F. P. D. F. P. D. L. S. E. C. S. R. QUEZADA A., «Sistema Inmune Artificial para resolver el problema Del Agente Viajero,» de *Segundo Congreso Estatal - La Investigación en el PosGrado*, México, 2006.
- [28] Vermaas, Luiz Lenarth Gabriel, *Aprendizado Supervisionado de Sistemas de Inferencia FUZZY aplicado em veículos inteligentes*, Itajubá, Minas Gerais: Dissertação Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica-UNIFEI, 2010.
- [29] J. R. DEL DUCCA C., *Implementação de uma Abordagem de Extração e Otimização de Regras Fuzzy Utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais*, Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- [30] R. A. T. Y. CHAO, «A Virus Detection System Based on Artificial Immune System,» de *International Conference on Computational Intelligence and Security*, 2009.
- [31] M. B. A. A. R. T. K. ABDUL HAMID, «Short Term Load Forecasting Using an Artificial Neural Network Trained by Artificial Immune System Learning Algorithm,» de *12th International Conference on Computer Modeling and Simulation*, 2010.
- [32] T. K. A. ., Z. RAHMAN y W. N. W. ABDULLAH, «Artificial – immun – based for solving economic dispatch in Power system,» de *Power and Energy Conference – PECon*, 2004.
- [33] C. M. XU L. y J. T. S. L. TIMMIS, «On the Investigation of Artificial Immune System on Imbalanced Data Classification for Power Distribution System Fault Cause Identification,» de *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Vancouver. Canadá, 2006.
- [34] D. S. F. D. L. OLIVEIRA y A. L. B. DE SOUZA, «Electric and Plug-in Hybrid Vehicles Recharge in Distribution Power Systems,» de *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Italia, 2012.
- [35] L. N. D. CASTRO y F. J. VON ZUBEN, «Learning and optimization using the clonal selection principle.,» *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 239-251, 2002.
- [36] Abdollah Kavousi-Fard and Taher Niknam, «Optimal Distribution Feeder Reconfiguration for Reliability Improvement Considering Uncertainty,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, pp. 1344-1353, 2014.
- [37] J. Timmis y C. Edmonds, «A Comment on Opt-AiNET: An Immune Network Algorithm for Optimisation, Lecture Notes in Computer Science,» *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 308-317, 2004..
- [38] W. H. KERSTING, *Distribution System Modeling and Analysis*, CRC Press , 2001.
- [39] J. C. C. a. N. Kagan, «Reconfiguration of distribution networks to minimize loss and disruption costs using genetic algorithms,» *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 80, pp. 53-62, 2010.
- [40] S. J. F. d. L. Zhechao Li, «Determination of the Optimal Switching Frequency for Distribution System Reconfiguration,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, nº 4, pp. 2060-2069,

2017.

- [41] a. J. R. M. Hamed Ahmadi, «Distribution System Optimization Based on a Linear Power-Flow Formulation,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, nº 1, pp. 25-33, 2015.
- [42] K. S. a. K. B. H. Mori, «A multi-objective meta-heuristic method for distribution network optimization,» de *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Paris, 2010.
- [43] A. K.-F. a. T. Niknam, «Optimal Distribution Feeder Reconfiguration for Reliability Improvement Considering Uncertainty,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 29, nº 3, pp. 1344-1353, 2014.
- [44] L. L. G. Vermaas, *APRENDIZADO SUPERVISIONADO DE SISTEMAS DE INFERÊNCIA FUZZY APLICADOS EM VEÍCULOS INTELIGENTES*.
- [45] J. S. Z. F. J. V. d. C. S. L. N. de Souza, «An immune evolutionary algorithm for multiple rearrangements of gene expression data,» *Genetic Programming and Evolvable Machines*, vol. 5, p. 157–179, 2004.

ANEXOS

A. Dados de Sistema Teste de 84 Barras

Tabela A-1: Dados de Ramos de Sistema Teste de 84 barras.

Ramo	De	Para	R(ohm)	X (ohm)	Ramo	De	Para	R(ohm)	X	Ramo	De	Para	R(ohm)	X
1	1	2	0,1944	0,6624	33	33	34	0,0262	0,0538	65	1	66	0,0486	0,1656
2	2	3	0,2096	0,4304	34	34	35	0,1703	0,3497	66	66	67	0,1703	0,3497
3	3	4	0,2358	0,4842	35	35	36	0,0524	0,1076	67	67	68	0,1215	0,4140
4	4	5	0,0917	0,1883	36	36	37	0,4978	1,0222	68	68	69	0,2187	0,7452
5	5	6	0,2096	0,4304	37	37	38	0,0393	0,0807	69	69	70	0,0486	0,1656
6	6	7	0,0393	0,0807	38	38	39	0,0393	0,0807	70	70	71	0,0729	0,2484
7	7	8	0,0405	0,1380	39	39	40	0,0786	0,1614	71	71	72	0,0567	0,1932
8	8	9	0,1048	0,2152	40	40	41	0,2096	0,4304	72	72	73	0,0262	0,0528
9	8	10	0,2358	0,4842	41	39	42	0,1965	0,4035	73	1	74	0,3240	1,1040
10	8	11	0,1048	0,2152	42	42	43	0,2096	0,4304	74	74	75	0,0324	0,1104
11	1	12	0,0786	0,1614	43	1	44	0,0486	0,1656	75	75	76	0,0567	0,1932
12	12	13	0,3406	0,6944	44	44	45	0,0393	0,0807	76	76	77	0,0486	0,1656
13	13	14	0,0262	0,0538	45	45	46	0,1310	0,2690	77	1	78	0,2511	0,8556
14	13	15	0,0786	0,1614	46	46	47	0,2358	0,4842	78	78	79	0,1296	0,4416
15	1	16	0,1134	0,3864	47	1	48	0,2430	0,8280	79	79	80	0,0486	0,1656
16	16	17	0,0524	0,1076	48	48	49	0,0655	0,1345	80	80	81	0,1310	0,2640
17	17	18	0,0524	0,1076	49	49	50	0,0655	0,1345	81	81	82	0,1310	0,2640
18	18	19	0,1572	0,3228	50	50	51	0,0393	0,0807	82	82	83	0,0917	0,1883
19	19	20	0,0393	0,0807	51	51	52	0,0786	0,1614	83	83	84	0,3144	0,6456
20	20	21	0,1703	0,3497	52	52	53	0,0393	0,0807	84	6	56	0,1310	0,2690
21	21	22	0,2358	0,4842	53	53	54	0,0786	0,1614	85	8	61	0,1310	0,2690
22	22	23	0,1572	0,3228	54	54	55	0,0524	0,1076	86	12	44	0,1310	0,2690
23	22	24	0,1965	0,4035	55	55	56	0,1310	0,2690	87	13	73	0,3406	0,6994
24	24	25	0,1310	0,2690	56	1	57	0,2268	0,7728	88	14	77	0,4585	0,9415
25	1	26	0,0567	0,1932	57	57	58	0,5371	1,1029	89	15	19	0,5371	1,0824
26	26	27	0,1048	0,2152	58	58	59	0,0524	0,1076	90	17	27	0,0917	0,1883
27	27	28	0,2489	0,5111	59	59	60	0,0405	0,1380	91	21	84	0,0786	0,1614
28	28	29	0,0486	0,1656	60	60	61	0,0393	0,0807	92	29	33	0,0524	0,1076
29	29	30	0,1310	0,2690	61	61	62	0,0262	0,0538	93	30	40	0,0786	0,1614
30	1	31	0,1965	0,3960	62	62	63	0,1048	0,2152	94	35	47	0,0262	0,0538
31	31	32	0,1310	0,2690	63	63	64	0,2358	0,4842	95	41	43	0,1965	0,4035
32	32	33	0,1310	0,2690	64	64	65	0,0243	0,0828	96	54	65	0,0393	0,0807

Tabela A-2 : Dados de Barras de Sistema Teste de 84 Barras

BARR	Pd(kW)	Qd(kVA)	Qbc(kVA)	BARR	Pd(kW)	Qd(kVA)	Qbc(kVA)	BARR	Pd(kW)	Qd(kVA)	Qbc(kVA)
1	0	0	1	29	1800	1300	29	57	0	0	57
2	0	0	2	30	200	120	30	58	30	20	58
3	100	50	3	31	0	0	31	59	600	420	59
4	300	200	4	32	1800	1600	32	60	0	0	60
5	350	250	5	33	200	150	33	61	20	10	61
6	220	100	6	34	200	100	34	62	20	10	62
7	1100	800	7	35	800	600	35	63	200	130	63
8	400	320	8	36	100	60	36	64	300	240	64
9	300	200	9	37	100	60	37	65	300	200	65
10	300	230	10	38	20	10	38	66	0	0	66
11	300	260	11	39	20	10	39	67	50	30	67
12	0	0	12	40	20	10	40	68	0	0	68
13	1200	800	13	41	20	10	41	69	400	360	69
14	800	600	14	42	200	160	42	70	0	0	70
15	700	500	15	43	50	30	43	71	0	0	71
16	0	0	16	44	0	0	44	72	2000	1500	72
17	300	150	17	45	30	20	45	73	200	150	73
18	500	350	18	46	800	700	46	74	0	0	74
19	700	400	19	47	200	150	47	75	0	0	75
20	1200	1000	20	48	0	0	48	76	1200	950	76
21	300	300	21	49	0	0	49	77	300	180	77
22	400	350	22	50	0	0	50	78	0	0	78
23	50	20	23	51	200	160	51	79	400	360	79
24	50	20	24	52	800	600	52	80	2000	1300	80
25	50	10	25	53	500	300	53	81	200	140	81
26	50	30	26	54	500	350	54	82	500	360	82
27	100	60	27	55	500	300	55	83	100	30	83
28	100	70	28	56	200	80	56	84	400	360	84

B. Dados de Sistema Teste de 136 Barras

Tabela A-3: Dados de Barras de Sistema Teste de 136 Barras

BARR	Pd(k)	Qd(kVA)	Qbc(kVA)	BARR	Pd(k)	Qd(kVA)	Qbc(kVA)	BARR	Pd(kW)	Qd(kVA)	Qbc(kVA)
1	0	0	0	47	458,55	194,388	0	93	87,312	37,013	0
2	0	0	0	48	262,96	111,473	0	94	0	0	0
3	47,78	19,009	0	49	235,76	99,942	0	95	74,001	31,37	0
4	42,551	16,929	0	50	0	0	0	96	232,05	98,369	0
5	87,022	34,622	0	51	109,21	46,298	0	97	141,819	60,119	0
6	311,31	123,855	0	52	0	0	0	98	0	0	0
7	148,86	59,228	0	53	72,809	30,865	0	99	76,449	32,408	0
8	238,67	94,956	0	54	258,47	109,57	0	100	0	0	0
9	62,299	24,786	0	55	69,169	29,322	0	101	51,322	21,756	0
10	124,59	49,571	0	56	21,843	9,26	0	102	59,874	25,381	0
11	140,17	55,768	0	57	0	0	0	103	9,065	3,843	0
12	116,81	46,474	0	58	20,527	8,702	0	104	2,092	0,887	0
13	249,20	99,145	0	59	150,54	63,819	0	105	16,735	7,094	0
14	291,44	115,952	0	60	220,68	93,552	0	106	1506,52	638,634	0
15	303,72	120,835	0	61	92,384	39,163	0	107	313,023	132,694	0
16	215,39	85,695	0	62	0	0	0	108	79,831	33,842	0
17	198,58	79,007	0	63	226,69	96,098	0	109	51,322	21,756	0
18	0	0	0	64	0	0	0	110	0	0	0
19	0	0	0	65	294,01	116,974	0	111	202,435	85,815	0
20	0	0	0	66	83,015	33,028	0	112	60,823	25,784	0
21	30,127	14,729	0	67	83,015	33,028	0	113	45,618	19,338	0
22	230,97	112,92	0	68	103,77	41,285	0	114	0	0	0
23	60,256	29,458	0	69	176,40	70,184	0	115	157,07	66,584	0
24	230,97	112,92	0	70	83,015	33,028	0	116	0	0	0
25	120,50	58,915	0	71	217,91	86,698	0	117	250,148	106,041	0
26	0	0	0	72	23,294	9,267	0	118	0	0	0
27	56,981	27,857	0	73	5,075	2,019	0	119	69,809	29,593	0
28	364,66	178,281	0	74	72,638	28,899	0	120	32,072	13,596	0
29	0	0	0	75	405,99	161,5235	0	121	61,084	25,894	0
30	124,64	60,939	0	76	0	0	0	122	0	0	0
31	56,981	27,857	0	77	100,18	42,468	0	123	94,622	46,26	0
32	0	0	0	78	142,52	60,417	0	124	49,858	24,375	0
33	85,473	41,787	0	79	96,042	40,713	0	125	123,164	60,214	0
34	0	0	0	80	300,45	127,366	0	126	78,35	38,304	0
35	396,73	193,96	0	81	141,23	59,873	0	127	145,475	71,121	0
36	0	0	0	82	279,84	118,631	0	128	21,369	10,447	0
37	181,15	88,563	0	83	87,312	37,013	0	129	74,789	36,564	0
38	242,17	118,395	0	84	243,84	103,371	0	130	227,926	111,431	0
39	75,316	36,821	0	85	247,75	105,025	0	131	35,614	17,411	0
40	0	0	0	86	0	0	0	132	249,295	121,877	0
41	1,254	0,531	0	87	89,878	38,101	0	133	316,722	154,842	0
42	6,274	2,66	0	88	1137,2	482,108	0	134	333,817	163,199	0
43	0	0	0	89	458,33	194,296	0	135	249,295	121,877	0
44	117,88	49,971	0	90	385,19	163,29	0	136	0	0	0
45	62,668	26,566	0	91	0	0	0				0
46	172,28	73,034	0	92	79,608	33,747	0				0

Tabela A-4: Dados de Ramos de Sistema Teste de 136 barras.

Ramo	De	Para	R(ohm)	X	Ramo	De	Para	R(ohm)	X	Ramo	De	Para	R(ohm)	X
1	1	2	0.33205	0.76653	55	55	56	0.02064	0.04764	109	109	110	0.54019	0.28415
2	2	3	0.00188	0.00433	56	53	57	0.10881	0.25118	110	108	111	0.0455	0.05911
3	3	4	0.22324	0.51535	57	57	58	0.25588	0.1346	111	111	112	0.47385	0.24926
4	4	5	0.09943	0.22953	58	58	59	0.41699	0.21934	112	112	113	0.86241	0.45364
5	5	6	0.15571	0.35945	59	59	60	0.50228	0.26421	113	113	114	0.56862	0.29911
6	6	7	0.16321	0.37677	60	60	61	0.3317	0.17448	114	109	115	0.77711	0.40878
7	7	8	0.11444	0.26417	61	61	62	0.20849	0.10967	115	115	116	1.08038	0.5683
8	7	9	0.05675	0.05666	62	48	63	0.13882	0.32047	116	110	117	1.09933	0.57827
9	9	10	0.52124	0.27418	63	1	64	0.0075	0.01732	117	117	118	0.47385	0.24926
10	9	11	0.10877	0.1086	64	64	65	0.27014	0.62362	118	105	119	0.32267	0.74488
11	11	12	0.39803	0.20937	65	65	66	0.3827	0.88346	119	119	120	0.14633	0.33779
12	11	13	0.91744	0.31469	66	66	67	0.33018	0.7622	120	120	121	0.12382	0.28583
13	11	14	0.11823	0.11805	67	67	68	0.3283	0.75787	121	1	122	0.01126	0.02598
14	14	15	0.50228	0.26421	68	68	69	0.17072	0.39409	122	122	123	0.6491	1.49842
15	14	16	0.05675	0.05666	69	69	70	0.55914	0.29412	123	123	124	0.04502	0.10394
16	16	17	0.29379	0.15454	70	69	71	0.05816	0.13425	124	124	125	0.5264	0.18056
17	1	18	0.33205	0.76653	71	71	72	0.7013	0.3689	125	124	126	0.02064	0.04764
18	18	19	0.00188	0.00433	72	72	73	1.02352	0.53839	126	126	127	0.53071	0.27917
19	19	20	0.22324	0.51535	73	71	74	0.06754	0.15591	127	126	128	0.09755	0.2252
20	20	21	0.10881	0.25118	74	74	75	1.32352	0.45397	128	128	129	0.11819	0.27283
21	21	22	0.71078	0.37388	75	1	76	0.01126	0.02598	129	128	130	0.13882	0.32047
22	21	23	0.18197	0.42008	76	76	77	0.72976	1.68464	130	130	131	0.04315	0.09961
23	23	24	0.30326	0.15952	77	77	78	0.22512	0.51968	131	131	132	0.09192	0.2122
24	23	25	0.02439	0.0563	78	78	79	0.20824	0.48071	132	132	133	0.16134	0.37244
25	25	26	0.04502	0.10394	79	79	80	0.0469	0.10827	133	133	134	0.37832	0.37775
26	26	27	0.01876	0.04331	80	80	81	0.6195	0.61857	134	134	135	0.39724	0.39664
27	27	28	0.11823	0.11805	81	81	82	0.34049	0.33998	135	135	136	0.2932	0.29276
28	28	29	0.02365	0.02361	82	82	83	0.56862	0.29911	136	8	74	0.13132	0.30315
29	29	30	0.18954	0.0997	83	82	84	0.10877	0.1086	137	10	25	0.26536	0.13958
30	30	31	0.39803	0.20937	84	84	85	0.56862	0.29911	138	16	84	0.14187	0.14166
31	29	32	0.05675	0.05666	85	1	86	0.01126	0.02598	139	39	136	0.08512	0.08499
32	32	33	0.09477	0.04985	86	86	87	0.41835	0.96575	140	26	52	0.04502	0.10394
33	33	34	0.41699	0.21934	87	87	88	0.10499	0.13641	141	51	97	0.14187	0.14166
34	34	35	0.11372	0.05982	88	87	89	0.43898	1.01338	142	56	99	0.14187	0.14166
35	32	36	0.07566	0.07555	89	89	90	0.0752	0.02579	143	63	121	0.0394	0.09094
36	36	37	0.3696	0.19442	90	90	91	0.07692	0.17756	144	67	80	0.12944	0.29882
37	37	38	0.26536	0.13958	91	91	92	0.33205	0.76653	145	80	132	0.01688	0.03898
38	36	39	0.05675	0.05666	92	92	93	0.08442	0.19488	146	85	136	0.3317	0.17448
39	1	40	0.33205	0.76653	93	93	94	0.1332	0.30748	147	92	105	0.14187	0.14166
40	40	41	0.11819	0.27283	94	94	95	0.2932	0.29276	148	91	130	0.07692	0.17756
41	41	42	2.96288	1.01628	95	95	96	0.21753	0.21721	149	91	104	0.07692	0.17756
42	41	43	0.00188	0.00433	96	96	97	0.26482	0.26443	150	93	105	0.07692	0.17756
43	43	44	0.06941	0.16024	97	94	98	0.10318	0.23819	151	93	133	0.07692	0.17756
44	44	45	0.81502	0.42872	98	98	99	0.13507	0.31181	152	97	121	0.26482	0.26443
45	44	46	0.06378	0.14724	99	1	100	0.00938	0.02165	153	111	48	0.49696	0.64567
46	46	47	0.13132	0.30315	100	100	101	0.16884	0.38976	154	127	77	0.17059	0.08973
47	47	48	0.06191	0.14291	101	101	102	0.11819	0.27283	155	129	78	0.05253	0.12126
48	48	49	0.11444	0.26417	102	102	103	2.28608	0.78414	156	136	99	0.2932	0.29276
49	49	50	0.28374	0.28331	103	102	104	0.45587	1.05236					
50	50	51	0.28374	0.28331	104	104	105	0.696	1.60669					
51	49	52	0.04502	0.10394	105	105	106	0.45774	1.05669					
52	52	53	0.02626	0.06063	106	106	107	0.20298	0.26373					
53	53	54	0.06003	0.13858	107	107	108	0.21348	0.27737					
54	54	55	0.03002	0.06929	108	108	109	0.54967	0.28914					

Ramo	De	Para	R(ohm)	X (ohm)	Ramo	De	Para	R(ohm)	X (ohm)	Ramo	De	Para	R(ohm)	X (ohm)
133	133	134	0.37832	0.37775	141	51	97	0.14187	0.14166	149	91	104	0.07692	0.17756
134	134	135	0.39724	0.39664	142	56	99	0.14187	0.14166	150	93	105	0.07692	0.17756
135	135	136	0.2932	0.29276	143	63	121	0.0394	0.09094	151	93	133	0.07692	0.17756
136	8	74	0.13132	0.30315	144	67	80	0.12944	0.29882	152	97	121	0.26482	0.26443
137	10	25	0.26536	0.13958	145	80	132	0.01688	0.03898	153	111	48	0.49696	0.64567
138	16	84	0.14187	0.14166	146	85	136	0.3317	0.17448	154	127	77	0.17059	0.08973
139	39	136	0.08512	0.08499	147	92	105	0.14187	0.14166	155	129	78	0.05253	0.12126
140	26	52	0.04502	0.10394	148	91	130	0.07692	0.17756	156	136	99	0.2932	0.29276
133	133	134	0.37832	0.37775	141	51	97	0.14187	0.14166					
134	134	135	0.39724	0.39664	142	56	99	0.14187	0.14166					

C. Dados de Sistema Real de Encarnação

Tabela A-5: Dados de Ramos de Sistema Real de Encarnação.

Num.	De	Para	Comp.	Tipo	Num.	De	Para	Comp.	Tipo	Num.	De	Para	Comp.	Tipo
1	1	2	0,01	200	31	31	32	1,00	308	61	61	62	0,21	302
2	2	3	1,00	306	32	30	33	0,03	302	62	61	63	0,08	302
3	3	4	0,06	400	33	33	34	1,00	302	63	63	64	1,00	307
4	4	5	1,00	306	34	30	35	0,03	302	64	61	91	0,07	400
5	5	6	0,30	400	35	35	36	1,00	200	65	91	92	0,05	400
6	6	7	1,00	306	36	36	37	0,10	200	66	92	93	1,00	306
7	7	8	1,03	200	37	37	38	0,06	302	67	93	94	0,04	400
8	8	9	1,00	306	38	38	39	1,00	302	68	94	95	0,00	302
9	9	10	0,45	400	39	37	40	0,08	302	69	95	96	1,00	306
10	10	11	1,00	306	40	40	41	0,07	400	70	96	97	0,04	302
11	11	12	0,35	400	41	41	42	1,00	400	71	97	98	0,04	302
12	12	13	0,11	400	42	42	43	0,03	306	72	98	99	0,14	302
13	12	24	0,09	302	43	43	44	1,00	308	73	99	100	1,00	306
14	13	14	1,00	306	44	44	45	0,15	302	74	100	101	0,09	302
15	14	15	0,03	400	45	45	46	0,08	302	75	101	102	0,11	302
16	15	16	0,03	400	46	45	47	0,12	302	76	101	103	0,06	302
17	16	17	1,00	306	47	47	48	0,06	200	77	103	104	0,21	302
18	17	18	0,18	400	48	48	49	0,09	200	78	104	105	0,02	302
19	18	19	0,12	400	49	45	50	0,04	302	79	105	106	1,00	307
20	19	20	1,00	308	50	50	51	0,08	302	80	107	106	0,02	400
21	20	21	0,09	400	51	51	52	0,11	302	81	101	108	0,08	302
22	19	22	0,23	400	52	43	53	0,05	400	82	108	109	0,16	200
23	22	23	1,00	307	53	53	54	0,02	400	83	94	110	0,01	400
24	15	25	0,04	400	54	54	55	1,00	306	84	110	111	1,00	306
25	25	26	1,00	306	55	55	56	0,09	400	85	111	90	0,12	400
26	26	27	0,11	400	56	56	57	1,00	308	86	90	112	1,00	308
27	27	28	0,12	400	57	57	58	0,09	302	87	112	113	0,22	302
28	28	29	1,00	306	58	56	59	0,17	400	88	113	114	0,07	302
29	29	30	0,03	400	59	59	60	0,07	400	89	90	89	0,04	302
30	30	31	0,03	400	60	60	61	0,02	400	90	89	88	1,00	306

Num.	De	Para	Comp.	Tipo	Num.	De	Para	Comp.	Tipo	Num.	De	Para	Comp.	Tipo
91	88	81	0,11	302	135	133	134	0,49	400	179	173	174	0,14	302
92	81	82	0,13	302	136	134	135	0,06	400	180	156	175	0,04	400
93	81	83	0,14	302	137	135	136	1,00	306	181	175	176	1,00	306
94	83	84	0,13	302	138	136	137	0,03	400	182	176	177	0,01	400
95	83	85	0,08	302	139	137	138	0,04	400	183	177	178	0,06	400
96	85	86	1,00	306	140	138	139	0,15	400	184	178	179	0,06	400
97	86	87	0,03	302	141	139	140	1,00	306	185	179	180	0,04	400
98	81	80	0,12	302	142	140	520	0,00	400	186	179	181	0,02	400
99	80	77	0,01	302	143	137	141	0,06	400	187	181	182	1,00	306
100	77	78	1,00	308	144	141	142	1,00	306	188	182	183	0,05	400
101	78	79	0,21	302	145	142	143	0,00	400	189	183	184	0,05	400
102	77	76	0,05	302	146	143	144	0,09	400	190	184	185	0,12	400
103	76	75	1,00	306	147	144	146	0,43	400	191	185	186	0,24	400
104	75	65	0,12	302	148	146	147	1,00	306	192	186	187	0,04	400
105	65	66	0,09	302	149	147	148	0,02	400	193	187	188	0,10	400
106	66	67	1,00	306	150	148	149	0,21	400	194	186	189	0,03	400
107	67	510	0,13	302	151	149	150	0,11	400	195	189	34	0,10	400
108	65	68	0,04	302	152	150	151	0,08	400	196	179	190	0,10	400
109	68	69	0,05	302	153	151	152	0,02	400	197	190	191	1,00	306
110	69	70	0,17	302	154	152	153	1,00	306	198	191	192	0,04	400
111	70	71	0,07	302	155	153	522	0,06	400	199	192	193	1,00	308
112	70	72	1,00	308	156	522	23	0,03	400	200	193	194	0,02	400
113	72	73	0,13	302	157	522	154	0,06	400	201	194	195	0,19	400
114	73	74	0,08	302	158	154	155	1,00	306	202	195	196	0,09	400
115	65	64	0,07	302	159	155	156	0,02	400	203	196	197	0,03	400
116	90	115	0,09	400	160	156	157	0,04	400	204	196	198	0,11	400
117	115	116	0,08	400	161	157	158	1,00	307	205	192	199	0,03	400
118	116	117	0,08	302	162	156	159	0,07	400	206	199	200	0,03	400
119	116	118	0,08	302	163	159	160	1,00	306	207	200	201	0,01	400
120	116	119	0,13	400	164	160	161	0,30	400	208	200	202	1,00	308
121	119	120	0,04	301	165	161	162	1,00	308	209	202	203	0,24	400
122	120	121	1,00	307	166	162	163	0,13	400	210	203	204	0,05	400
123	119	122	0,07	301	167	163	164	0,13	301	211	204	205	0,05	400
124	122	123	0,09	301	168	164	165	0,05	301	212	204	206	1,00	308
125	119	124	0,13	400	169	165	158	0,09	301	213	206	207	0,09	400
126	124	125	1,00	307	170	165	166	0,11	301	214	200	208	0,05	400
127	1	126	0,01	200	171	166	167	1,00	306	215	208	209	0,10	400
128	126	127	1,00	306	172	167	521	0,00	400	216	209	210	1,00	308
129	127	128	0,04	400	173	163	168	0,02	400	217	210	211	0,14	400
130	128	129	1,00	306	174	168	169	0,09	400	218	211	212	0,11	400
131	129	130	0,31	400	175	169	170	0,19	301	219	211	213	0,08	400
132	130	131	1,00	306	176	170	171	0,08	302	220	213	214	0,05	400
133	131	132	1,03	200	177	171	172	0,26	302	221	214	215	1,00	306
134	132	133	1,00	306	178	170	173	0,20	302	222	215	216	0,13	400

Num.	De	Para	Comp.	Tipo	Num.	De	Para	Comp.	Tipo	Num.	De	Para	Comp.	Tipo
223	209	511	0,15	400	267	251	252	0,13	400	311	293	294	0,08	302
224	511	512	0,03	400	268	252	253	0,03	400	312	294	295	0,10	302
225	512	513	0,07	400	269	253	254	0,04	400	313	293	296	0,16	302
226	511	514	1,00	308	270	252	255	0,02	400	314	296	297	0,09	302
227	514	515	0,05	400	271	255	256	0,12	400	315	296	298	0,12	302
228	515	516	0,05	400	272	256	257	0,06	400	316	298	299	0,06	302
229	209	217	0,13	400	273	257	258	0,10	400	317	298	300	0,29	302
230	217	218	0,13	400	274	258	259	1,00	306	318	300	301	1,00	308
231	217	219	0,04	400	275	259	260	0,01	400	319	301	302	0,21	302
232	219	220	0,03	400	276	260	125	0,03	400	320	300	303	0,06	302
233	220	221	0,05	400	277	260	261	0,03	400	321	303	304	1,00	306
234	221	222	0,14	400	278	261	393	1,00	307	322	304	305	0,06	302
235	222	223	1,00	306	279	260	262	0,03	400	323	305	306	1,00	308
236	223	224	0,08	400	280	262	263	1,00	306	324	306	307	0,07	302
237	224	225	0,06	400	281	263	264	0,10	400	325	305	308	0,15	302
238	217	226	0,04	400	282	264	265	0,15	400	326	308	309	0,22	302
239	226	227	0,06	400	283	265	266	0,14	400	327	309	310	0,17	302
240	227	228	0,02	400	284	266	267	1,00	307	328	310	311	1,00	307
241	228	229	0,06	400	285	240	268	0,17	302	329	1	312	0,01	200
242	229	230	0,29	400	286	268	269	0,05	302	330	312	313	1,00	306
243	228	231	0,06	400	287	269	270	1,00	306	331	313	314	0,05	400
244	231	232	0,08	400	288	270	271	0,13	302	332	314	315	1,00	306
245	232	233	0,09	400	289	271	272	0,15	302	333	315	316	0,22	400
246	232	234	0,07	400	290	272	273	0,05	302	334	316	317	0,10	400
247	228	235	0,13	400	291	273	275	0,06	302	335	317	318	1,00	306
248	235	236	1,00	306	292	273	276	0,15	302	336	318	319	0,94	200
249	236	107	0,03	400	293	276	277	1,00	308	337	319	320	1,00	306
250	107	237	0,03	400	294	277	278	0,13	302	338	320	321	0,24	400
251	107	145	0,04	400	295	276	279	0,02	302	339	321	322	1,00	308
252	237	274	1,00	306	296	279	280	0,16	302	340	322	323	0,15	302
253	274	238	0,08	400	297	280	281	1,00	306	341	321	324	0,12	400
254	238	239	0,02	400	298	281	517	0,11	302	342	324	325	1,00	308
255	239	240	0,17	400	299	517	282	1,00	307	343	325	326	0,19	302
256	240	241	0,03	400	300	281	283	0,09	302	344	326	327	0,12	302
257	241	242	0,03	400	301	283	284	0,33	302	345	327	328	0,04	302
258	240	243	0,10	400	302	284	285	1,00	306	346	328	329	0,30	302
259	243	244	1,00	306	303	285	286	0,01	302	347	328	330	0,07	302
260	244	245	0,04	400	304	286	287	0,05	302	348	330	331	0,04	302
261	245	246	0,04	400	305	287	288	0,06	302	349	324	332	0,18	400
262	245	247	0,14	400	306	286	289	0,03	302	350	332	333	0,07	400
263	247	248	1,00	308	307	289	290	1,00	307	351	333	334	1,00	306
264	248	249	0,11	400	308	286	291	0,07	302	352	334	335	0,02	400
265	247	250	0,17	400	309	291	292	1,00	306	353	335	336	1,00	306
266	250	251	1,00	308	310	292	293	0,07	302	354	336	337	0,13	400

Num.	De	Para	Comp. Less	Tipo	Num.	De	Para	Comp. Less	Tipo	Num.	De	Para	Comp. Less	Tipo
355	337	338	0,01	400	399	399	400	0,12	400	443	414	418	0,23	302
356	338	339	1,00	306	400	400	397	0,11	302	444	418	419	0,03	302
357	339	340	0,02	400	401	397	396	1,00	306	445	418	420	0,14	302
358	340	341	0,12	400	402	396	395	0,03	302	446	420	421	0,03	302
359	341	342	1,00	308	403	395	381	0,06	302	447	421	422	1,00	306
360	342	343	0,11	400	404	381	380	1,00	308	448	422	423	0,07	302
361	343	344	0,16	400	405	380	377	0,19	302	449	423	424	0,07	302
362	341	345	0,07	400	406	381	382	0,08	302	450	423	425	0,06	302
363	345	346	0,09	400	407	382	394	0,13	302	451	425	426	0,06	302
364	346	347	0,07	400	408	382	383	0,03	302	452	426	427	1,00	306
365	347	32	0,05	400	409	383	384	0,07	302	453	427	428	0,16	302
366	337	348	0,14	400	410	384	385	1,00	308	454	428	429	0,23	302
367	348	349	0,01	302	411	385	386	0,21	301	455	428	430	0,03	302
368	349	350	1,00	306	412	384	387	0,07	301	456	430	431	0,03	302
369	350	351	0,04	302	413	387	388	1,00	306	457	431	432	1,00	306
370	351	352	0,13	302	414	388	389	0,02	301	458	432	290	0,15	302
371	352	353	0,11	302	415	389	390	0,03	301	459	413	433	0,12	400
372	353	354	1,00	308	416	390	376	1,00	306	460	433	434	0,06	400
373	354	355	0,04	302	417	376	518	0,07	301	461	434	435	1,00	306
374	353	356	0,06	302	418	518	519	0,03	301	462	435	436	0,03	400
375	356	39	0,03	302	419	518	379	0,08	301	463	436	437	0,03	400
376	348	357	0,13	400	420	379	378	0,05	301	464	437	438	0,02	400
377	357	358	0,32	400	421	378	375	0,06	301	465	438	439	1,00	306
378	358	359	1,00	306	422	389	391	0,07	301	466	439	440	0,05	400
379	359	360	0,04	400	423	391	282	0,04	301	467	440	441	0,05	302
380	360	361	0,45	400	424	391	392	0,16	301	468	441	311	0,05	302
381	361	362	0,10	400	425	392	393	0,09	301	469	440	442	0,16	400
382	362	363	1,00	308	426	400	401	0,07	400	470	442	443	0,19	302
383	363	364	0,10	302	427	401	402	1,00	306	471	443	444	0,27	302
384	362	365	0,13	400	428	402	403	0,17	400	472	442	445	0,07	400
385	365	366	0,03	400	429	403	404	0,08	400	473	445	446	0,03	400
386	366	367	1,00	306	430	404	405	0,05	400	474	446	447	0,40	302
387	367	368	0,04	400	431	405	406	1,00	306	475	446	448	0,11	400
388	368	369	0,29	400	432	406	407	0,11	400	476	448	449	0,16	302
389	369	121	0,04	400	433	407	408	0,45	400	477	449	450	0,22	302
390	365	370	0,10	400	434	408	409	0,07	400	478	450	451	0,22	302
391	370	371	1,00	306	435	409	410	0,14	400	479	448	452	0,09	400
392	371	372	0,06	400	436	409	411	0,04	400	480	452	453	1,00	306
393	372	267	0,02	400	437	411	412	1,00	306	481	453	454	0,08	400
394	372	373	0,16	400	438	412	413	0,08	400	482	454	455	0,09	400
395	373	374	0,12	302	439	413	414	0,02	302	483	455	456	1,00	308
396	374	375	1,00	307	440	414	415	1,00	308	484	456	457	0,07	302
397	373	398	0,05	400	441	415	416	0,03	302	485	455	458	0,06	302
398	398	399	1,00	306	442	416	417	0,13	302	486	458	459	0,01	302

Num.	De	Para	Comp. Leva	Tipo	Num.	De	Para	Comp. Leva	Tipo	Num.	De	Para	Comp. Leva	Tipo
487	459	460	1,00	306	508	487	488	0,04	302	529	507	508	0,05	302
488	460	461	0,03	302	509	488	489	0,09	302	530	508	509	0,06	302
489	461	462	1,00	308	510	489	490	0,29	302	531	481	480	0,01	302
490	462	463	0,23	302	511	490	491	0,11	302	532	480	479	1,00	306
491	461	464	0,12	302	512	491	492	0,03	302	533	479	478	0,38	302
492	464	465	1,00	308	513	492	493	0,06	302	534	478	476	0,02	302
493	465	466	0,09	302	514	493	494	0,18	302	535	476	477	0,15	302
494	466	467	0,05	302	515	492	495	1,00	308	536	476	475	0,21	302
495	466	468	0,13	302	516	495	496	0,08	302	537	475	474	0,20	302
496	464	469	0,08	302	517	496	497	1,00	308					
497	469	470	0,07	302	518	497	498	0,21	302					
498	470	471	1,00	308	519	498	499	1,00	308					
499	471	472	0,17	302	520	499	500	0,02	400					
500	454	473	0,01	302	521	500	501	1,00	306					
501	473	474	1,00	307	522	501	502	0,02	400					
502	437	482	0,05	302	523	502	503	0,01	400					
503	482	483	1,00	306	524	502	504	0,33	400					
504	483	484	0,05	302	525	502	505	0,06	400					
505	484	485	0,27	302	526	498	481	0,21	302					
506	484	486	0,05	302	527	481	506	0,03	302					
507	486	487	0,26	302	528	506	507	0,18	302					

Tabela A-6: Dados de Cabos

Código	Capacidade [A]	Bitola [mm ²]	Tipo
200	350	240	Subterrâneo
400	350	185	Trifásico Protegido
300	350	150	Trifásico Convencional
301	220	70	Trifásico Convencional
302	120	35	Trifásico Convencional
303,304,305	120	35	Monofásico Convencional
306,307,308	1000		Chave
600	1000		Fusível

Tabela A-7: Dados de Barras de Sistema Real de Encarnação correspondentes à fase A, (as fases B e C só diferem em ângulo, 120° e 240°)

Nom	Tipo	V	Ang °	Pga	Qga	ScaY	Nome	Tipo	V	Ang °	Pga	Qga	ScaY
1	3	1.05	0.00	0.00	0.00	0,000	43	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
2	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	44	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
3	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	45	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
4	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	46	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,172
5	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	47	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,233
6	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	48	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,167
7	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	49	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,083
8	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	50	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,172
9	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	51	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,172
10	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	52	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,172
11	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	53	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,067
12	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	54	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
13	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	55	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
14	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	56	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
15	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	57	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
16	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	58	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,050
17	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	59	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,105
18	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,167	60	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,033
19	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	61	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
20	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	62	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,172
21	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,100	63	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
22	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	64	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
23	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	65	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
24	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,033	66	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
25	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	67	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
26	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	68	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,067
27	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,033	69	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,033
28	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	70	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
29	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	71	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,033
30	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	72	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
31	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	73	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,105
32	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	74	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,105
33	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	75	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
34	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	76	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
35	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	77	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
36	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	78	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
37	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	79	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,067
38	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	80	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,067
39	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	81	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
40	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,172	82	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,067
41	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	83	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000
42	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,000	84	0	1,00	0.00	0.00	0.00	0,033

Nom	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY	Nome	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY
85	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	129	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
86	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	130	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
87	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,083	131	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
88	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	132	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
89	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	133	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
90	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	134	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
91	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	135	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
92	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	136	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
93	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	137	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
94	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	138	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105
95	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	139	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
96	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	140	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
97	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	141	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
98	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	142	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
99	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	143	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,037
100	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	144	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
101	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	145	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
102	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	146	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
103	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	147	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
104	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050	148	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
105	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	149	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
106	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	150	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
107	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	151	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
108	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,272	152	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
109	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167	153	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
110	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	154	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
111	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	155	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
112	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	156	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
113	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	157	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
114	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050	158	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
115	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	159	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
116	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	160	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
117	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,037	161	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
118	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	162	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
119	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	163	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
120	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	164	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050
121	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	165	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
122	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	166	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
123	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050	167	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
124	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	168	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050
125	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	169	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
126	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	170	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
127	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	171	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
128	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	172	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033

Nom	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY	Nome	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY
173	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	217	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
174	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,210	218	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,088
175	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	219	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,210
176	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	220	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
177	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	221	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
178	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105	222	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
179	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	223	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
180	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	224	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
181	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	225	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167
182	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	226	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105
183	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050	227	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
184	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	228	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
185	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167	229	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105
186	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	230	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,117
187	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167	231	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105
188	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	232	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
189	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	233	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
190	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	234	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050
191	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	235	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
192	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	236	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
193	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	237	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
194	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105	238	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
195	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105	239	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
196	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	240	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
197	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	241	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105
198	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,100	242	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
199	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	243	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
200	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	244	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
201	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021	245	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
202	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	246	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
203	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	247	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
204	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	248	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
205	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	249	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,210
206	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	250	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
207	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,100	251	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
208	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	252	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
209	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	253	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
210	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	254	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,100
211	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	255	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
212	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	256	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,100
213	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,100	257	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,054
214	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	258	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
215	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	259	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
216	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	260	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000

Nom	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY	Nome	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY
261	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	305	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
262	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	306	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
263	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	307	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
264	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021	308	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
265	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050	309	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
266	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	310	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
267	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	311	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
268	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	312	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
269	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	313	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
270	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	314	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
271	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,015	315	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
272	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	316	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021
273	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	317	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
274	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	318	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
275	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	319	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
276	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	320	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
277	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	321	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
278	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021	322	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
279	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105	323	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
280	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	324	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
281	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	325	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
282	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	326	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
283	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,133	327	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
284	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	328	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
285	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	329	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,015
286	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	330	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,083
287	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105	331	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021
288	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	332	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105
289	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	333	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
290	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	334	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
291	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	335	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
292	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	336	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
293	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	337	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
294	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,133	338	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
295	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021	339	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
296	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	340	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,138
297	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	341	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
298	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	342	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
299	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	343	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
300	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	344	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
301	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	345	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050
302	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,210	346	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
303	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	347	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167
304	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	348	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000

Nom	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY	Nome	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY
349	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	393	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
350	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	394	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,172
351	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,117	395	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
352	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050	396	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
353	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	397	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
354	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	398	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
355	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,210	399	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
356	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,083	400	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
357	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	401	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
358	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	402	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
359	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	403	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050
360	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	404	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105
361	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	405	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
362	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	406	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
363	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	407	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
364	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105	408	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
365	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	409	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
366	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	410	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,042
367	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	411	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
368	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	412	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
369	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	413	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
370	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	414	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
371	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	415	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
372	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	416	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
373	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	417	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021
374	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	418	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
375	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	419	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
376	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	420	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
377	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167	421	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
378	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	422	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
379	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,037	423	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
380	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	424	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
381	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	425	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
382	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	426	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
383	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	427	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
384	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	428	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
385	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	429	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
386	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,105	430	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
387	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	431	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
388	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	432	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
389	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	433	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021
390	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	434	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
391	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	435	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
392	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,117	436	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033

Nom	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY	Nome	Tipo	V	Ang	Pga	Qga	ScaY
437	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	480	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
438	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	481	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
439	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	482	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
440	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	483	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
441	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	484	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
442	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	485	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,117
443	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	486	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021
444	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,133	487	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021
445	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021	488	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,037
446	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	489	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
447	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	490	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
448	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	491	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050
449	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	492	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
450	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	493	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
451	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,021	494	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
452	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	495	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
453	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	496	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
454	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	497	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
455	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	498	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
456	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	499	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
457	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,210	500	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
458	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	501	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
459	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	502	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
460	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	503	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,377
461	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	504	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
462	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	505	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,210
463	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167	506	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,133
464	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	507	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033
465	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	508	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
466	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	509	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
467	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,333	510	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
468	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067	511	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
469	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	512	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
470	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	513	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,333
471	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	514	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
472	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,417	515	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,067
473	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	516	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,167
474	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	517	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
475	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,090	518	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
476	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	519	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,050
477	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,100	520	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
478	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,033	521	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000
479	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000	522	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,000

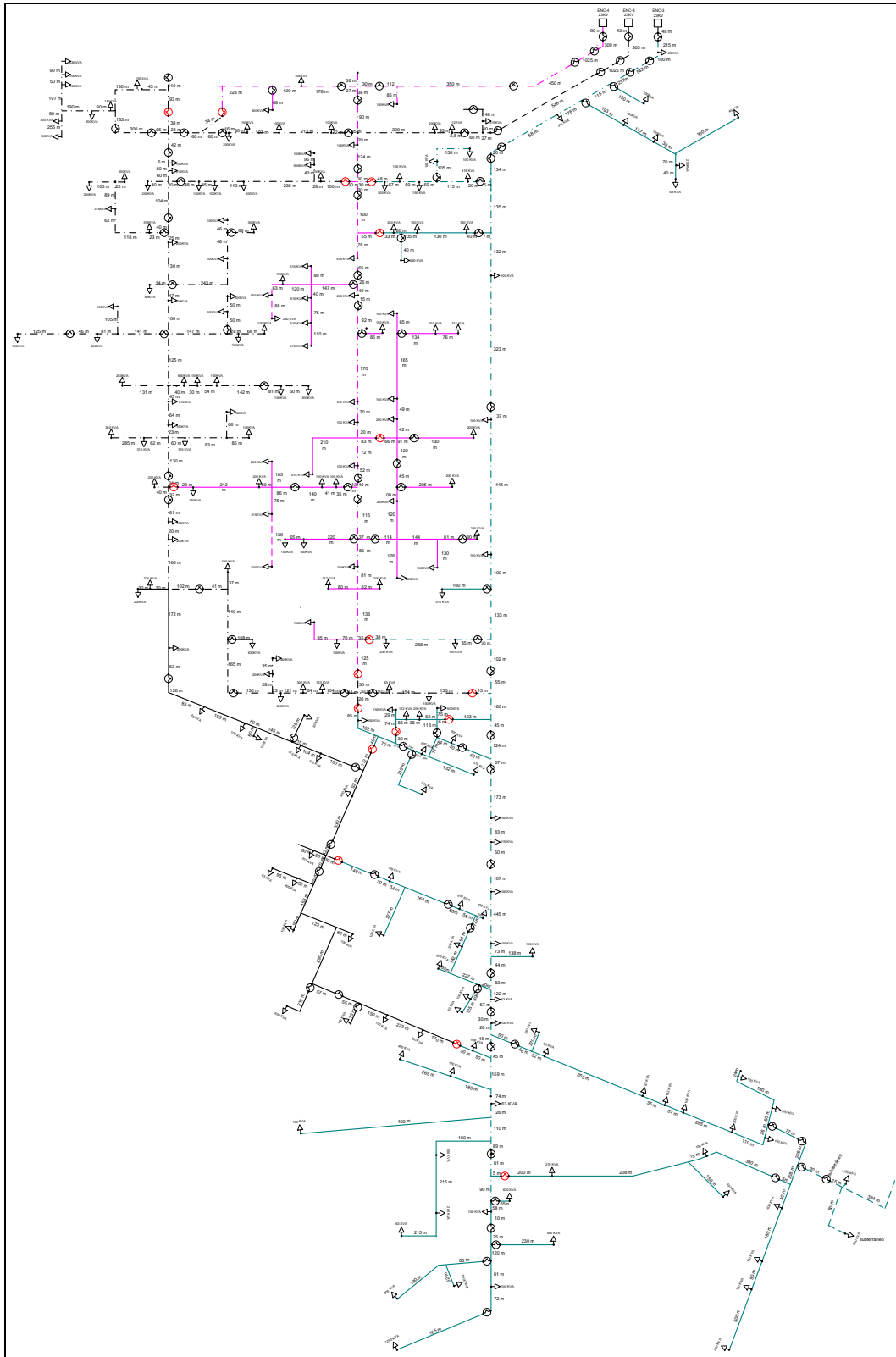


Figura A-1: Diagrama de Sistema Real de Encarnação..

Parâmetro de Cabos (impedâncias estão em ohm/mi).

a. Linhas Convencionais.

Dados 150mm ²		Impedâncias Zii		
RMG	0.020026	0.2924 + 0.6811i	0.0462 + 0.3374i	0.0462 + 0.3112i
Raio	0.02592	0.0462 + 0.3374i	0.2924 + 0.6811i	0.0462 + 0.3788i
Resistência	0.396220	0.0462 + 0.3112i	0.0462 + 0.3788i	0.2924 + 0.6811i
Admitâncias Shunt Yabc				
0 + 2.5898i		0 - 0.6730i		0 - 0.4380i
0 - 0.6730i		0 + 2.8873i		0 - 1.0104i
0 - 0.4380i		0 - 1.0104i		0 + 2.7865i

Dados 70mm ²		Impedâncias Zii		
RMG	0.013425	0.5738 + 0.7063i	0.0462 + 0.3374i	0.0462 + 0.3112i
Raio	0.017717	0.0462 + 0.3374i	0.5738 + 0.7063i	0.0462 + 0.3788i
Resistência	0.849090	0.0462 + 0.3112i	0.0462 + 0.3788i	0.5738 + 0.7063i
Admitâncias Shunt Yabc				
2.4394i		- 0.6079i		- 0.4036i
- 0.6079i		2.6894i		- 0.9022i
- 0.4036i		- 0.9022i		2.6047i

Dados 35mm ²		Impedâncias Zii		
RMG	0.009106	1.1015 + 0.7307i	0.0462 + 0.3374i	0.0462 + 0.3112i
Raio	0.012467	0.0462 + 0.3374i	1.1015 + 0.7307i	0.0462 + 0.3788i
Resistência	1.69818	0.0462 + 0.3112i	0.0462 + 0.3788i	1.1015 + 0.7307i
Admitâncias Shunt Yabc				
2.3159i		- 0.5562i		- 0.3752i
- 0.5562i		2.5308i		- 0.8179i
- 0.3752i		- 0.8179i		2.4580i

b. Linhas Protegidas.

Dados 185 mm2		Impedâncias Zii		
RMG	0.02ft.	0.2528 + 0.4154i	0.0704 + 0.1923i	0.0747 + 0.1723i
Raio	0.027559ft.	0.0704 + 0.1923i	0.2446 + 0.4539i	0.0704 + 0.1923i
Resistência	0.2866	0.0747 + 0.1723i	0.0704 + 0.1923i	0.2528 + 0.4154i
Admitâncias Shunt Yabc				
	3.9662i	3.9662i	3.9662i	
	- 1.1168i	- 1.1168i	- 1.1168i	
	- 0.9560i	- 0.9560i	- 0.9560i	

Dados 70 mm2		Impedâncias Zii		
RMG	0.0130	0.6083 + 0.5090i	0.1271 + 0.2533i	0.1354 + 0.2388i
Raio	0.015487ft.	0.1271 + 0.2533i	0.5923 + 0.5368i	0.1271 + 0.2533i
Resistência	0.761	0.1354 + 0.2388i	0.1271 + 0.2533i	0.6083 + 0.5090i
Admitâncias Shunt Yabc				
	3.4259i	- 0.9227i	- 0.8086i	
	- 0.9227i	3.2520i	- 0.9227i	
	- 0.8086i	- 0.9227i	3.4259i	

c. Linhas Monofásicas.

Dados 35 mm2		Impedâncias Zii	Admitâncias Shunt
RMG	0.009106	1.1015 + 0.7305i	2.0532i
Raio	0.012467.		
Resistência	1.69818		

d. Cabos Subterrâneos

Dados 240mm2 Impedâncias Zii		
0.2993 + 0.1780i	0.0995 - 0.0224i	0.0747 - 0.0386i
0.0995 - 0.0224i	0.2826 + 0.1607i	0.0995 - 0.0224i
0.0747 - 0.0386i	0.0995 - 0.0224i	0.2993 + 0.1780i
Admitâncias Shunt Yabc		
+25.9836i	0	0
0	+25.9836i	0
0	0	+25.9836i