

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

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

**RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
RADIAIS UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS.**

RICARDO FRANCISCO ALONSO CARDOZO

Itajubá, Maio de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

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

RICARDO FRANCISCO ALONSO CARDOZO

**RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
RADIAIS UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS.**

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

Co-orientador: Prof. Dr. Benedito Isaías de Lima Lopes

Maio de 2015

ITAJUBÁ – MG

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

RICARDO FRANCISCO ALONSO CARDOZO

RECONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
RADIAIS UTILIZANDO SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS.

Dissertação aprovada por banca examinadora em 6 de Maio de 2015, 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 (Co-Orientador)

Prof. Dr. Anderson Rodrigo de Queiroz (UNIFEI)

Prof. Dr. Ronaldo Rossi (UNESP/GUA)

Itajubá 2015

*Dedicado a meus amados pais Pedro e Leli,
meus irmãos, à memória de Don Lorenzo e
Agustín, e muito especialmente a minha
querida companheira de toda jornada, minha
amada esposa Fátima e a meus pequenos
filhos Ricardo Isaias e Abigail.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS por sobre todas as coisas, ELE com sua graça divina iluminou meu caminho para superar as adversidades e alcançar este fim.

A meus Pais por ter dedicado a vida inteira a formar a seus filhos.

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá, aos Diretivos e o Corpo Docente pela oportunidade.

Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni, pelo apoio e confiança, pela amizade, pelas orientações para contribuir com a minha formação e por todas as atenções para comigo.

Ao MSc. Eng. Denisson Oliveira pelo apoio incondicional e pela amizade.

Aos meus queridos colegas Carolina e Oscar pelo estímulo de sempre.

A meus colegas e companheiros da ANDE pelo apoio e por torcer para alcançar este momento.

A Itaipu – Binacional pelo auxílio financeiro durante a execução deste trabalho.

À cidade de Itajubá e o povo Brasileiro.

Agradeço especialmente a minha esposa Fátima, pela compreensão, paciência e pelo apoio sentimental em estes anos.

Un pueblo sólo es libre por voluntad de
espíritu colectivo, y por nadie más que por él
mismo puede ser liberado.

(Augusto Roa Bastos)

*There is a driving force more powerful than
steam, electricity and nuclear power: the will.*

(Albert Einstein)

RESUMO

A redução de perdas de energia é uma meta das concessionárias de energia elétrica. Reconfiguração do sistema de distribuição é uma das ferramentas disponíveis para realizá-lo, como também alocação de bancos de capacitores, reforço nas instalações elétricas como, por exemplo, aumento da bitola dos cabos, utilização de materiais com menores perdas, etc. Comparativamente a reconfiguração da rede pode ser feita quase de imediato, enquanto que as demais alternativas requerem de planejamento adequado, e maiores investimentos. Em ambientes regulatórios manter índices de continuidade de serviço dentro de limites adequados, também pode ser um objetivo a considerar.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia de reconfiguração de redes de distribuição do tipo radial com recursos. O sistema em estudo tem certas particularidades a serem abordadas. Uma destas particularidades é o desequilíbrio presente, devido, como será visto mais adiante, a setores com circuitos monofásicos e também cargas monofásicas alocadas em ramos ou setores trifásicos.

O problema abordado, portanto, é um problema matemático de otimização, cujos objetivos podem ser então, minimizar as perdas elétricas mantendo níveis aceitáveis de tensão, maximizar o equilíbrio de demanda de alimentadores pertencentes a uma mesma subestação e/ou melhorar o índice de desempenho ou continuidade (e.g. SAIFI, SAIDI) o qual é reflexo da confiabilidade do sistema.

Para a procura de uma configuração ótima, o estudo utilizará uma metodologia heurística baseada nos Sistemas Imunológicos Artificiais que demonstrou ser uma ferramenta muito eficiente em diversos problemas como fluxo ótimo, reconhecimento de padrões e solução de problemas de otimização em geral. A rede será representada topologicamente através de Grafos, uma vez que, de acordo com a bibliografia consultada, esta representação é de muita utilidade no auxílio da avaliação das funções e equações. Considerando a característica radial do Sistema de Distribuição, será procurada uma metodologia adequada e eficiente para cálculo de perdas, índices, etc.

Finalmente, é proposta uma metodologia baseada na Dominância de Pareto combinada com a teoria de Sistemas Imunológicos Artificiais para a procura da solução de um problema multiobjetivo.

Palavras-chave: Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição; Sistemas Imunológicos Artificiais; Sistemas de Distribuição.

ABSTRACT

Power loss reduction is a goal of the electric companies. The distribution system reconfiguration is one of the tools available to accomplish it, as well as allocation of capacitor banks, reinforcement of electrical installations such as increased cable gauge, use of materials with lower losses, etc. In comparison, network reconfiguration can be done almost immediately, while the other alternatives require proper planning, and major investments. In regulatory environments to maintain service continuity indexes within appropriate limits can also be a goal to consider.

This work proposes a methodology for reconfiguration of radial distribution networks with resources. The system under study has certain characteristics to be addressed. One of these characteristics is the load imbalance between phases due, single-phase type networks, but also to single-phase loads allocated in three-phase branches.

Therefore, the problem addressed is a mathematical optimization one, which objectives is to minimize electrical losses maintaining acceptable voltage levels, to maximize demand balance of substations feeders and/or improve the performance or continuity Index (e.g. SAIFI, SAIDI) which reflect the system reliability.

In order to search for an optimal configuration, the study uses a heuristic methodology based on Artificial Immune Systems, which proved to be a very effective tool in many problems such as: optimal power flow, pattern recognition and solution of several optimization problems. The distribution network will be represented topologically through graphs. This representation is very useful to help the evaluation of the functions and equations. A proper and efficient methodology will be used for calculating power losses, indexes and consideration of radial characteristic.

Finally, it is proposed a methodology based on Pareto Dominance combined with Artificial Immune Systems, in order to search for the multiobjective problem solutions.

Key-words: *Electric Distribution Systems Reconfiguration; Artificial Immune Systems; Distribution Systems.*

SUMARIO.

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPIGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
Lista de abreviações e siglas.	xiv
Lista de símbolos	xv
1. Introdução.	1
1.1. Revisão bibliográfica.....	2
1.2. Motivação.....	4
2. Fluxo de Potência.	6
2.1. Método da soma de potência:	10
2.2. Método da Soma de Correntes.....	12
2.3. Modelos de Cargas	15
2.3.1. Modelo ZIP exponencial:	15
2.3.2. Modelo ZIP polinomial.	16
2.3.3. Rateio da demanda dos alimentadores nas cargas.....	17
3. Representação do Sistema de Distribuição Radial através de Grafos.	20
3.1. Grafos.....	20
Definições:	21
3.2. Árvores:.....	21
3.3. Floresta.....	22
3.4. Matriz de Incidência de Elementos.....	23
3.5. Matriz de Adjacências e Matriz de Alcance.	25
3.6. Lista de Adjacência.	27
3.7. Algoritmo de Prim (Chartrand et.al., 2004).	28
4. Indicadores de Continuidade do Serviço.	29
4.1. Definições.	30
4.2. FEP.....	31
4.3. DEP.....	31
4.4. Metodologia de Cálculo.	32
5. Sistemas Imunológicos Artificiais.....	35
5.1. O Sistema Imunológico	35
5.2. Uma Breve História:	36
5.3. Anatomia do Sistema Imunológico.....	37

5.3.1.	Os órgãos linfóides e suas funções incluem:.....	37
5.3.2.	Linfócitos	38
5.3.3.	Fagócitos, granulócitos e seus derivados.	39
5.3.4.	Processo de Proteção Imunológico.	39
5.4.	Sistema Imunológico Artificial.....	41
5.4.1.	Características do Sistema Imune.	41
5.5.	O princípio de Seleção Clonal.	42
5.6.	Otimização baseada no Algoritmo de Seleção Clonal.	44
5.7.	Estado do Arte dos SIA – Aplicações.....	45
6.	Otimização Multiobjetivo baseados em Sistemas Imunológicos Artificiais.	49
6.1.	Dominância de Pareto:	49
6.2.	Solução Ótima de Pareto/ Solução Não dominada.....	49
6.2.1.	Conjunto ótimo de Pareto.	49
6.2.2.	Frente de Pareto.....	50
6.2.3.	Esquema de atribuição de afinidade.	50
6.2.4.	Conjunto de Pareto:	51
7.	Reconfiguração dos Sistemas Elétricos de Distribuição Radial.....	53
7.1.	Considerações.....	53
7.1.1.	Codificação	53
7.1.2.	Otimização Monoobjetivo.	55
7.1.3.	Otimização Multiobjetivo / Cálculo do fitness	55
8.	Resultados.	57
8.1.	Problema Monoobjetivo.	57
8.1.1.	Sistema teste 14-barras e Análise de sensibilidade	57
8.1.2.	Características do Sistema Elétrico de Distribuição em estudo - O caso Paraguaio.....	60
8.1.3.	Sistema Alimentador de 23 [kV] CBO-01.....	61
8.1.4.	Sistema de Distribuição do Micro centro da Cidade de Encarnação	63
8.2.	Problema Multiobjetivo.....	66
8.2.1.	Sistema teste 14-barras	66
8.2.2.	Sistema Alimentador de 23kV CBO-01.....	67
8.2.3.	Sistema de Distribuição do Micro centro da Cidade de Encarnação:.....	68
9.	Conclusões.	71
9.1.	Temas para trabalhos futuros.....	73
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	75
	APÊNDICE.....	81
A.	Modelo de linhas – Determinação dos parâmetros de linha.....	81
a.	Equações de Carson (KERSTING, 2001).....	81

b.	Admitância Shunt.....	83
c.	Linhas aéreas convencionais e protegidas com retorno por terra e com cabo de guarda.....	85
d.	Linhas aéreas monofásicas convencionais.....	89
e.	Cabos subterrâneos.....	90
f.	Modelo de Linhas de Distribuição.....	93
	ANEXOS.....	94
A.	Alimentador de 23kv CBO-1.....	94
a.	Diagrama de linha.....	94
b.	Dados de linha.....	95
c.	Tipo de cabos:	96
d.	Demanda dos Nós.....	96
e.	Taxa de Falha.....	97
B.	Sistema de Distribuição do Microcentro da Cidade de Encarnação.....	98
a.	Diagrama de linha.....	98
b.	Dados de linha.....	99
c.	Tipo de cabos:	100
d.	Demanda dos Nós.....	101
e.	Taxa de Falha.....	104
C.	Parâmetro de Cabos.....	105
a.	Linhas Convencionais.....	105
b.	Linhas Protegidas.....	105
c.	Linhas Monofásicas.....	106
d.	Cabos Subterrâneos.....	106

Lista de Figuras.

Figura 1: Método de varredura iterativo.....	7
Figura 2: Esquema de Nó Típico.....	10
Figura 3: Fluxograma do método de soma de potência.	11
Figura 4: Diagrama de fluxo do algoritmo proposto.....	13
Figura 5: Distribuição de Cargas no alimentador.	18
Figura 6: Grafo não Orientado e Grafo Orientado.....	21
Figura 7: Exemplo de um Sistema Elétrico de Distribuição representado por um Grafo.....	22
Figura 8: Diagrama Unifilar do Sistema Trifásico e seu correspondente.....	23
Figura 9: Sistema Teste de 14 barras (MENDOZA, et. al., 2006).	24
Figura 10: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.....	25
Figura 11: Sistema Teste (Cálculo de FEP) e seu Grafo correspondente.....	33
Figura 12: Matriz de Alcance R.	33
Figura 13: Estrutura multi camadas do Sistema Imune (CASTRO et.al., 1999).....	38
Figura 14: Processo de Imunidade Adaptativa (CASTRO et.al., 1999).....	40
Figura 15: Princípio de Seleção Clonal (CASTRO et.al., 1999).....	43
Figura 16: Fluxograma do Algoritmo de Seleção Clonal.	44
Figura 17: Procedimento de atualização do Conjunto P de Pareto.	52
Figura 18: Fluxograma de SIA aplicado em MOP	52
Figura 19: Floresta (rede de distribuição) gerada segundo a Tabela 6 (ALONSO et.al., 2014).	54
Figura 20: Grafo da Configuração Inicial Sistema 14 barras.....	57
Figura 21: Tempo VS combinações de parâmetros Sistema 14 barras.	58
Figura 22: Grafo da Configuração Ótima Sistema 14 barras.	59
Figura 23: Evolução da Redução das Perdas durante o processo iterativo para o Sistema de 14 barras.	59
Figura 24: Tempo VS combinações de parâmetros CBO-01.....	61
Figura 25: Grafos da Configuração inicial (esquerda) e configuração ótima (direita) do alimentador 23kV CBO-01.	62
Figura 26: Evolução da Redução das Perdas durante o processo iterativo para o Sistema de 23[kV]: CBO-01.....	63
Figura 27: Evolução da Redução das Perdas durante o processo iterativo para o Sistema do Micro Centro de Encarnação	64
Figura 28: Grafos da Configuração inicial (esquerda) e configuração ótima (direita) do Micro Centro de Encarnação.	65
Figura 29: Frente de Pareto de Soluções do Sistema de 14 barras.....	66
Figura 30: Frente de Pareto de Soluções do Sistema Alimentador de 23[kV] CBO-01	67
Figura 31: Frente de Pareto de Soluções do Sistema Micro Centro de Encarnação.....	70

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores Típicos de parâmetros do modelo ZIP exponencial.....	16
Tabela 2: Matriz de Incidência Nodal.	24
Tabela 3: Matriz de Adjacências do grafo da figura 10.	25
Tabela 4: Matriz de Alcance do grafo da Figura 10.	26
Tabela 5: Lista de Adjacências do Grafo da figura 10.....	27
Tabela 6: Pesos para o Sistema 14-Bus (ALONSO et.al., 2014)	54
Tabela 7: Chaves e posições correspondentes à Frente de Pareto da Figura 29.....	67
Tabela 8: Chaves e posições correspondentes ao Frente de Pareto da Figura 30.....	68
Tabela 9: Comparativo entre a Condição Inicial e as soluções do FP.....	68
Tabela 10: Comparativo entre a Condição Inicial e as soluções do FP.....	69

Lista de abreviações e siglas.

Ab	Anticorpo
ADN	Ácido Desoxirribonucléico
AG	Algoritmo Genético.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BD	Base de Dados
CAISFLO	<i>Co-Evolutionary Immunological System</i>
DEP	Duração Equivalente de Potência Interrompida
DMS	<i>Distribution Management System</i>
FEP	Frequência Equivalente de Potência Interrompida
fp	fator de potência
GIS	<i>Geographic Information System</i>
IA	Inteligência Artificial.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IVBV	<i>Inverse Initial-Value, Boundary-Value</i>
MOP	<i>Multi Objective Problem</i>
NA	Chave Normalmente Aberta
NF	Chave Normalmente Fechada
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PV	Barra PV o barra de geração
RNA	Redes Neurais Artificiais
SGIDE	Sistema de Informação Integral de Distribuição
SI	Sistema Imunológico
SIA	Sistema Imunológico Artificial
SIV	Sistema Imunológico dos Vertebrados
RMG	Raio Médio Geométrico.
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
VDS	<i>Virus Detection System</i>
ZIP	Modelo de carga estático polinomial.

Lista de símbolos

$*$	Conjugado
A	Amper
V	Tensão
Ω	Ohm
W	Watt
λ	taxa de falha
f	frequência
ρ	resistividade do solo
μF	micro Faradio
ω	frequência angular da rede
μS	micro Siemens

Capítulo 1

1. Introdução.

Nos sistemas de distribuição tem sido motivo de estudo a otimização na configuração operativa da rede. Desde a perspectiva do usuário, o fornecimento da energia elétrica com qualidade é a principal tarefa das concessionárias com o menor custo possível. Neste sentido falar de qualidade na prestação do serviço, refere-se tanto à qualidade do suprimento da tensão, como também à continuidade do mesmo. Continuidade do serviço refere-se ao número de interrupções do serviço ocorridas num período de observação e também ao intervalo de tempo nesse período de observação em que o serviço não é fornecido. Esta é função da taxa de falha dos setores ou ramos, e a influência destes ramos sobre todo o alimentador. Esta influência dos setores com maior ou menor taxa de falha depende da topologia da rede. A cada segmento ou ramo é atribuído uma taxa de falta, a qualidade de suprimento (indicadores de desempenho) é medida através de indicadores de qualidade da prestação de serviços (e.g. SAIFI e SAIDI).

Fornecer energia elétrica com qualidade de tensão significa que o perfil de tensão fornecido é senoidal, e a frequência e magnitude estão dentro dos parâmetros estabelecidos pelos procedimentos de rede (Modulo 8 – PRODIST). A redução de perdas é um objetivo procurado pelas concessionárias para minimizar custos operativos e está relacionada com a eficiência do serviço.

Então, os principais objetivos da otimização da configuração estão na redução de perdas e no suprimento da energia com perfil adequado de tensão, assim como restabelecer o serviço em caso de contingência com a maior rapidez mantendo a rede com alto grau de confiabilidade.

Este trabalho aborda um problema multiobjetivo: a reconfiguração da rede como estratégia de planejamento de curto prazo, fazendo um gerenciamento da rede para redução de perdas com melhoria no desempenho e equilíbrio de cargas. Esta estratégia será a procura de uma configuração radial obtida mediante a mudança das posições das chaves NA e NF como o objetivo de:

- i. Minimizar as perdas.
 - ii. Manter a radialidade.
 - iii. Obter uma configuração balanceada de carga entre os alimentadores em estudo.
-

- iv. Não violar os limites de Tensão.

Tratando-se de uma Rede de Distribuição é necessária a utilização de métodos não convencionais de cálculos de fluxo de potência, principalmente devido a problemas de convergência em redes com relação elevada de r/x . Também os problemas de desequilíbrio característicos destes sistemas estão presentes, sendo também um problema a ser abordado neste trabalho.

1.1. Revisão bibliográfica.

Vários autores propõem diferentes aproximações para resolver o problema de reconfiguração, por exemplo, em (BERNADON, et.al. 2010) é apresentada uma nova ferramenta Fuzzy multi critério para reconfiguração de redes de distribuição que inclui análise de perdas de sistemas de subtransmissão. Em (KAGAN, et.al. 1998) conjuntos Fuzzy são utilizados para tratar aspectos referentes a imprecisões, incertezas e subjetividades inerentes ao problema. Neste caso para a análise de alternativas de reconfiguração de um Sistema de Distribuição de energia elétrica quando da ocorrência de um defeito num ponto qualquer da rede.

Algoritmos bio-inspirados têm sido amplamente utilizados também neste tipo de problema. Em (BENTO, et.al. 2008) é apresentada uma metodologia para resolução de problemas de configuração de redes de distribuição, com aplicação à minimização de perdas elétricas. O método utiliza um Algoritmo Genético (AG) básico e algumas de suas variantes para seus operadores genéticos: seleção, cruzamento e mutação. Neste trabalho, o principal objetivo é 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, uniforme e uniforme com controle estatístico) e controle dinâmico sobre a probabilidade de mutação aplicada aos indivíduos da população.

Em (CEBRIAN, et.al. 2010), é feita uma análise similar à metodologia anterior, considerando índices de qualidade de energia como interrupções de longa duração e perturbações devido a afundamentos de tensão, estimados por meio do método de simulação Monte Carlo para uma dada configuração.

Estes Algoritmos Genéticos (AG) que utilizam operadores de cruzamento, mutação, etc., precisam de uma codificação que seja eficiente na hora de obter uma configuração viável, i.e. uma rede que conserve a radialidade. Em (CARRENO, et.al. 2008), é proposta uma codificação eficiente de modo a preservar esta característica. Em (RAMOS, et.al. 2005) o

modelo da rede de distribuição (malhada, no entanto operativamente radial) é feito baseado no conceito *path-to-node* (caminho para o nó), conseguindo assim uma eficiente codificação para os operadores do AG.

A heurística baseada no Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) é explorada em (POLYELTON, 2010), na procura de uma solução ao caso de reconfiguração multiobjetivo, minimizando perdas e considerando aspetos de continuidade e qualidade do Serviço. A mesma metodologia é explorada em (JEON, et.al. 2002). Esta técnica é particularmente útil para problemas de otimização combinatorial de grande escala, permitindo evitar mínimos locais e ajustes na função de custo.

Em (XU, et.al. 2009) é proposto um algoritmo de Busca Tabu baseado em GIS (*Geographic Information Systems*). Nesta metodologia a rede de distribuição é modelada como uma rede geométrica. Todas as instalações do sistema de distribuição elétrica, incluindo as barras, ramos, interruptores e transformadores foram resumidos em arestas e nós. A Pesquisa (ou Busca) Tabu é uma meta-heurística e um procedimento adaptativo auxiliar, que guia um algoritmo de busca local (ou por vizinhanças) na exploração contínua dentro de um espaço de busca. A partir de uma solução inicial, tenta avançar para outra solução (melhor que a anterior) na sua vizinhança até que se satisfaça um determinado critério de parada.

Em (BABU, et.al. 2010) uma técnica de reconfiguração baseada no Método de Eliminação de Anéis é proposto. Esta técnica explora alternativas de configuração sem que estas apresentem anéis e verifica em cada passo melhoras na tensão e redução de perdas.

Também foram exploradas outras metodologias híbridas como em (LIU, et.al. 2010), que combina Otimização por Enxame de Partículas Binária, Otimização por Enxame de Partículas Inteira, Sistemas Multi-agente, e Mecanismo de Autoaprendizagem. Em (SCHMIDT, et.al. 2008) o Método de Newton é utilizado com uma variante do método de busca inteira conhecido na literatura como Branch and Bound (HILLIER et.al., 1997) que foi implementado como um algoritmo de procura em profundidade complementado com retrocesso na árvore de busca. Em (HONG, et.al. 2005) propõe-se um novo método que integra a Programação Multiobjetivo Fuzzy e o Algoritmo Genético para a determinação da configuração ótima da rede nos Sistemas de Distribuição. Neste estudo, os Números de Pruffer asseguram a estrutura radial da rede de Distribuição.

Também é possível aplicar Técnicas de otimização de grafos, por meio dos algoritmos de Dijkstra (caminhos mínimos), Kruskal (árvore geradora mínima), como em (SUDHAKAR, et.al. 2011).

Existe, além destas ferramentas utilizadas na procura de soluções para problemas complexos, uma heurística baseada nos sistemas imunológicos dos vertebrados denominada “Sistemas Imunológicos Artificiais”. Esta heurística vem sendo aplicada a problemas no setor elétrico. A área de Despacho Econômico de Geração em Sistemas de Potência é uma das aplicações (RAHMAN et.al. 2004). Busca-se satisfazer a demanda com mínimo custo. Através da evolução genética, os anticorpos (Despacho) com afinidade elevada são produzidos e torna-se a solução. Os resultados da simulação revelam que a técnica desenvolvida é de fácil implementação, converge dentro de um tempo de execução aceitável, com uma solução altamente ótima para o despacho econômico com um custo mínimo de geração.

No âmbito da distribuição, foram desenvolvidos trabalhos que exploram, por exemplo, a identificação de falhas por meio do SIA (XU, et.al. 2006).

Em (OLIVEIRA, et.al. 2012) é desenvolvida uma metodologia de otimização do sistema de recarga de veículos elétricos e híbridos recarregáveis em um esquema organizado de recarga. Este trabalho utiliza a metodologia baseada no SIA com o objetivo de minimizar as perdas no sistema melhorando as condições operativas da rede, instalando bancos de capacitores para garantir níveis de tensão apropriados durante todas as horas em que a recarga é permitida.

1.2. Motivação.

Conforme visto na seção anterior muitos pesquisadores têm investigado o problema de reconfiguração ótima. Destes trabalhos de pesquisa as heurísticas bio-inspiradas têm sido as mais exitosas e mais utilizadas nos últimos tempos, em particular em problemas de configuração ótima de redes de distribuição, que é tipicamente um problema de programação inteira não linear.

Destaca-se a heurística baseada em Sistemas Imunológicos Artificiais, utilizada em problemas de Otimização na área energética. Não há referência que esta ferramenta seja ainda utilizada a este tipo de problemas de Configuração Ótima de Redes de Distribuição.

Baseado nesta inovadora ferramenta e nos resultados auspiciosos obtidos, o presente trabalho propõe uma heurística baseada em Sistemas Imunológicos Artificiais para otimizar a configuração da rede de distribuição sem violar limites e condições operativas, reduzindo perdas e maximizando condições de confiabilidade e índices de desempenho, como também obter balanceamento das cargas dos alimentadores.

Assim, este trabalho visa contribuir no estudo do tema e apresenta uma solução inovadora para a o problema em questão.

Capítulo 2

2. Fluxo de Potência.

Métodos convencionais de fluxo de potência para sistemas de transmissão como Newton-Raphson, Newton-Rapshon desacoplado rápido e outros, em geral não são adequados para sistemas de distribuição, devido à necessidade de fatoração de matrizes exigida por esses métodos, sendo que tais matrizes associadas a estes sistemas são mal condicionadas e a quantidade de barras é grande. A alta relação r/x , alto número de cargas distribuídas e partes da rede com alta impedância associados a trechos de baixa impedância, são responsáveis por este mau condicionamento. Tais características fazem com que as técnicas comumente utilizadas para solução do fluxo de potência apresentem desempenho limitado e dificuldades de convergência.

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

Existem métodos específicos para sistemas de distribuição que são eficientes, pois exploram a natureza radial destes sistemas de distribuição.

Os primeiros métodos propostos para solução de problemas de fluxo de potência em sistemas de distribuição foram baseados em métodos de varredura de rede. Estes métodos aproveitam a natureza radial dos sistemas de distribuição, pois nestes existe um caminho desde a fonte até a barra (SRINIVAS, 2000).

Em 1967, o primeiro trabalho apresentando a técnica de varredura inversa-direta (*backward-forward*) foi escrito por Berg. A partir de então, pode-se considerar os outros métodos propostos versões mais refinadas desta técnica, com diversas variações. O algoritmo geral consiste em dois passos básicos. A varredura inversa (*backward*) é realizada a partir das barras terminais até o nó fonte, percorrendo toda a rede, realizando a soma de correntes ou de potências. O passo de varredura direta (*forward*) é realizado em seguida, a partir da barra fonte até as barras terminais, atualizando as tensões nodais.

Os métodos de varredura direto-inversa são:

- Método da soma de potência.
- Método da soma de corrente.
- Método da soma de impedância.

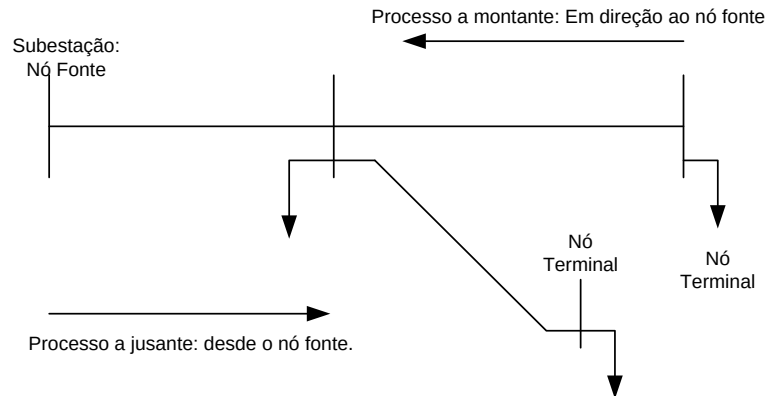


Figura 1: Método de varredura iterativo.

Uma variante destes métodos é apresentada por (SHIRMOHAMMADI et. al., 1988), e consiste num método de solução do fluxo de potência trifásico para a análise em tempo real de sistemas de distribuição, baseado no método de compensação com ênfase na modelagem de cargas distribuídas e desbalanceadas, reguladores de tensão e capacitores com chaveamento automático. O método aqui proposto leva em conta estas questões ao mesmo tempo em que mantém uma alta velocidade de execução necessária para aplicação em tempo real.

Primeiramente é aplicado o método de varredura direta – inversa mostrado anteriormente, dividindo os nós do sistema em níveis hierárquicos diferentes de acordo com a ordem dos mesmos a partir do nó fonte. Após a fase de varredura direta, é necessário simular os efeitos dos laços através da injeção de correntes nas duas extremidades dos mesmos.

Estas correntes são calculadas aplicando a técnica de compensação e uma matriz de impedância, cujo elemento da diagonal principal de cada submatriz é igual ao somatório da impedância da seção, e os elementos fora da diagonal principal serão não nulos apenas quando dois laços formados compartilharem seções comuns na linha. O processo se repete até que uma tolerância seja atingida.

Outros métodos como em (CHEN, et. al. 1991) utilizam uma fatoração triangular com ordenação ótima da matriz admitância $\mathbf{Y}$ (Método de Gauss de Impedância Zbus implícita), o qual não só toma as vantagens da esparsidade dos sistemas de equações como também tem uma boa convergência em problemas de distribuição. Uma modelagem detalhada dos

componentes da rede é necessária para a representação por fase do sistema. Um programa para análises generalizado, com uma série de características foi desenvolvido para simulações de grande escala.

O método de Gauss com matriz de impedância Z utiliza a matriz admitância Y bifatorada e injeções de corrente equivalentes para solucionar as equações de rede. A convergência do método depende em alto grau do número de barras com tensão constante, barras PV. Se a única barra com tensão especificada do sistema for a de referência, a taxa de convergência é comparável ao do método de Newton-Raphson (CHEN et.al., 1991).

O método de Gauss é baseado no princípio de superposição aplicado às tensões das barras do sistema, onde cada tensão é a soma de uma componente da fonte e outra da injeção de corrente. As cargas, capacitores, reatores e geração distribuída são modelados como fontes ou sumidouros de corrente.

Pelo princípio da superposição, apenas um tipo de fonte é considerado por vez ao calcular as tensões. Quando se considera o nó swing, as demais fontes de corrente são desconectadas. Esta componente representa a tensão do sistema em vazio. Depois, aterrando este nó, considera-se a contribuição das demais fontes de corrente, calculada de forma iterativa (CHEN et. al., 1991).

Existem metodologias que utilizam o método de Newton-Raphson adaptados às condições mencionadas no presente trabalho. Por exemplo, em (ABDEL-AKHER et.al., 2005) é descrito um método alternativo para cálculo de Fluxo de Potência em redes com desequilíbrio utilizando componentes de sequência que poderia ser utilizado em redes de distribuição. A questão do mau condicionamento da matriz Jacobiana pela elevada relação r/x deve ser observada para a solução do problema.

Em (ABDEL-AKHER et.al., 2008) é apresentado um novo método para análise de sistemas de distribuição com desequilíbrio. Neste método, uma rede de distribuição desequilibrada é composta por: 1) uma rede trifásica principal e 2) ramos com redes monofásicas e bifásicas laterais. O método propõe resolver a rede principal baseado no método desacoplado para rede positiva, negativa e de sequência zero. As redes laterais são resolvidas pelo método de varredura. O método envolve três principais passos. Primeiramente, em componentes de fase, a varredura inversa é executada para calcular uma injeção equivalente de corrente para cada ramo lateral desequilibrado. No passo seguinte, a rede trifásica principal é resolvida em componentes de sequência. O método de Newton-Raphson padrão e o desacoplado rápido são utilizados para resolver as componentes de

sequência positiva, enquanto que as redes de sequência negativa e zero são representadas por duas equações de tensão nodais. Finalmente, em componentes de fase, o passo de varredura direta é realizado para atualizar as tensões nas laterais desequilibradas. Estes três passos são repetidos até alcançar a convergência. Características da rede de distribuição como acoplamento de linha, reguladores de tensão, nós PV, banco de capacitores, cargas locais e distribuídas com qualquer tipo de ligação são consideradas.

Com intuito de utilizar técnicas baseadas no método de Newton-Rapson desacoplado rápido e Newton-Rapson tradicional, foram desenvolvidas técnicas que basicamente consistem, em mudar temporariamente o sistema de referência complexo, através de uma rotação dos eixos real e imaginário, de modo que as impedâncias representadas no novo sistema de referência possam ter a relação r/x favorável ao desacoplamento (BARBOSA, 1995).

Uma vez definido o ângulo ϕ , comum a toda rede, todas as impedâncias são alteradas, resultando em uma nova rede. Para que o estado (tensões e ângulos) obtido após a aplicação do método Desacoplado Rápido não se altere, as injeções de potência ativa (P) e reativa (Q) também devem ser modificadas (BARBOSA, 1995).

Desta maneira, aplicando-se a rotação de eixos aos valores especificados de potência ativa e reativa, além das impedâncias, o método Desacoplado Rápido apresenta bom desempenho e fornecerá o mesmo estado (tensões complexas) da rede original. Após a convergência, às grandezas de interesse são aplicadas a rotação em sentido inverso antes da impressão dos resultados (BARBOSA, 1995).

(ARAVINDHABABU et. al. 2011) propuseram um método de solução do fluxo de potência de forma desacoplada baseada nos fluxos de corrente nas linhas em coordenadas retangulares para sistemas de distribuição radiais. Os fluxos de corrente nas linhas e seus valores equivalentes são linearizados em torno de um ponto de operação e transformados em uma matriz constante visando eliminar os elementos da matriz Jacobiana fora da diagonal principal.

Esta transformação permite o desacoplamento do problema do fluxo de potência em dois sub-problemas, P- δ e Q-V, sem nenhuma modificação nas magnitudes de tensão, ângulos e razão x/r . A abordagem é simples e utiliza uma sub-matriz esparsa derivada da matriz Jacobiana, que ao ser fatorada, serve para aplicação tanto na solução do problema P- δ quanto do problema Q-V, sendo solucionada iterativamente de forma similar ao método desacoplado rápido (ARAVINDHABABU et. al., 2011).

i, m	: índices que indicam um ramo qualquer.
k, j	: índices que indicam um nó qualquer.
S_{efk}, S_{efj}	: potência equivalente na fase f vista desde os nós k e j.
S_{cfk}	: carga no nó k da fase f.
S_{sfk}	: potência reativa shunt injetada ao nó k.
S_{pfi}	: perdas de potência na linha i.
M_{gi}	: impedância mutua da fase f com a g na linha i.
M_{hi}	: idem anterior.
Y_{fi}, Y_{fm}	: admitâncias das linhas i e m.
V_{afk}	: tensão do nó intermédio.
V_{nfk}	: tensão do nó k.
I_{fi}, I_{fm}	: correntes na fase f pelas linhas i e m.
I_{gi}, I_{hi}	: correntes na fase g e h da linha i.

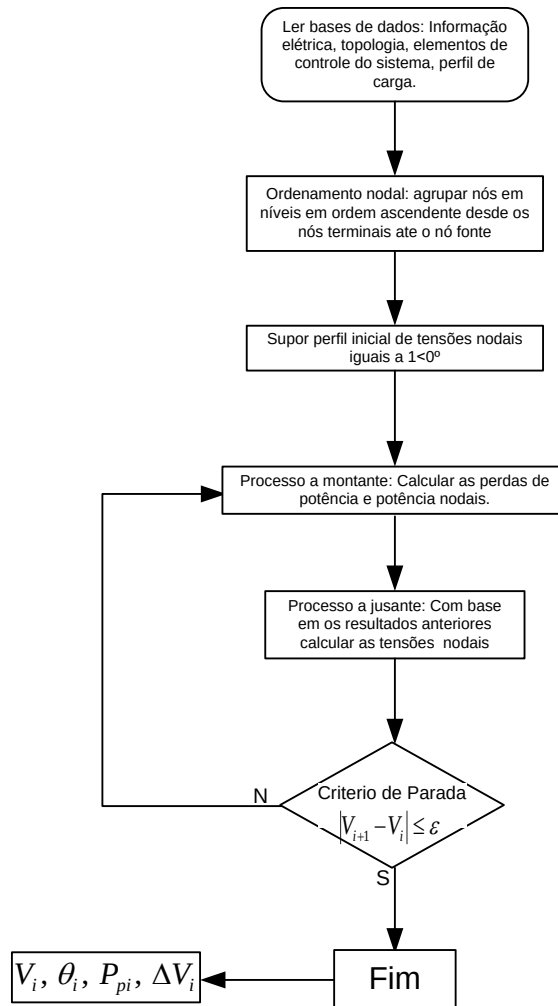


Figura 3: Fluxograma do método de soma de potência.

Na figura 3, V , θ , representam a tensão e ângulo resultantes para um nó qualquer e P_p e ΔV as perdas e quedas de tensão para cada ramo.

2.2. Método da Soma de Correntes.

Em (FARAG et.al., 2011) é proposta uma metodologia baseada na soma de correntes que é descrita a seguir.

O método é baseado na relação entre injeção de corrente nas barras e as correntes nos ramos. Para uma rede radial de distribuição de N barras há $N-1$ linhas e as correntes de ramos podem ser expressa em termos de correntes de barras. Então para um elemento ij que conecta os nós i e j a corrente de barra do nó j é:

$$I_j = I_{ij} - \sum I_{jk(j)} \quad (2.1)$$

Onde $k(j)$ é o conjunto de nós conectado ao nó j . Para a barra de referência a potência não é especificada e a relação entre correntes de barra e ramos são obtidas como uma matriz quadrada não singular. A equação (2.2) apresenta a relação entre as correntes de barra e correntes nos ramos.

$$I_{barras} = KI_{ramos} \quad (2.2)$$

A matriz K é chamada de matriz de incidência de elementos. É uma matriz quadrada não singular de ordem $N-1$. É construída de maneira simples, onde cada linha descreve os elementos incidentes. Os elementos da diagonal principal, $K(j,j)$, são iguais a 1. Para os demais elementos incidentes, entre os nós ' i ' e ' j ', o valor de $K(i,j)$ é igual a -1. Todos os demais elementos são nulos.

Através da utilização da equação (2.2) e após a construção do elemento de incidência da matriz K , podemos obter as correntes de ramo em relação às correntes de injeção nas barras, como mostrado na equação (2.3).

$$I_{ramo} = K^{-1}I_{barra} \quad (2.3)$$

Seja a seguir o fluxograma do cálculo do método proposto:

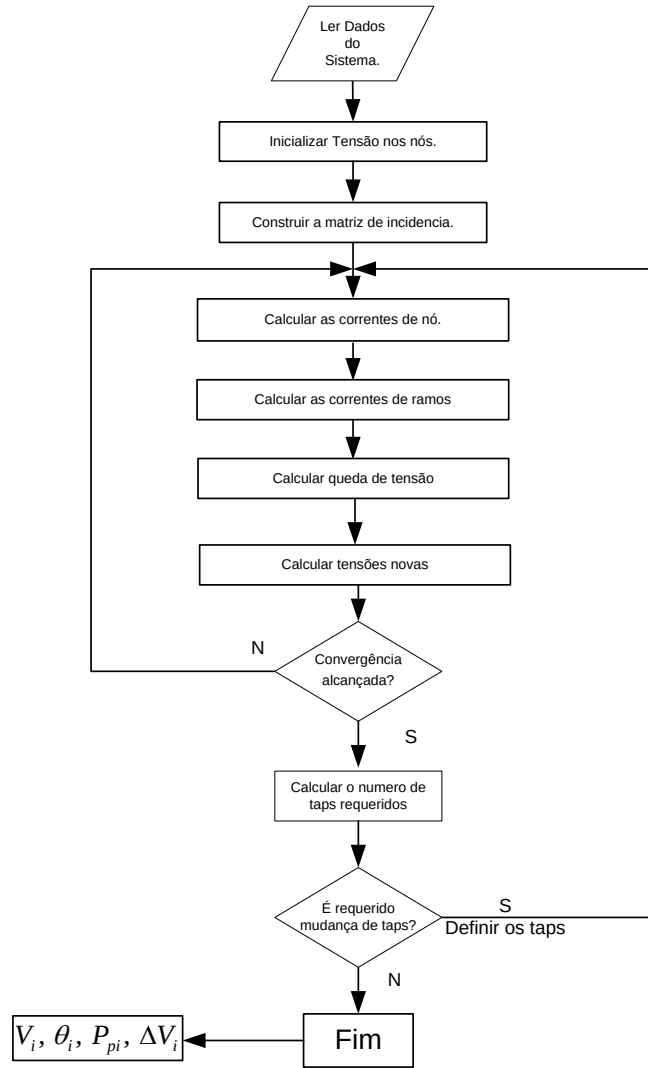


Figura 4: Diagrama de fluxo do algoritmo proposto.

Os passos a seguir são executados:

Passo 1: assumir valores iniciais das magnitudes de todas as tensões de barra iguais a 1.0 p.u., para qualquer fase que se deixa representar, definir o valor da sua tensão igual a 0.

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 $(N_b - 1) \times (N_b - 1)$ e da matriz K_c é $(N_c - 1) \times (N_c - 1)$, onde N_a , N_b e N_c são o número total de barras existentes nas fases a, b e c. As correntes com índice G correspondem às injeções de corrente de geração distribuída.

$$\begin{aligned}
 I_{barra}^a &= I_L^a + I_{sh}^a - I_G^a \\
 I_{barra}^b &= I_L^b + I_{sh}^b - I_G^b \\
 I_{barra}^c &= I_L^c + I_{sh}^c - I_G^c
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

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

$$I_L^{a,b,c} = \frac{\left| (V_{barra}^{a,b,c})^n \right| \times (S_{L,espec}^{a,b,c})^*}{(V_{barra}^{a,b,c})^*} \quad (2.5)$$

$I_{sh}^{a,b,c}$ é a corrente capacitiva shunt calculado segundo:

$$\begin{bmatrix} I_{sh}^a \\ I_{sh}^b \\ I_{sh}^c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{barra}^a \\ V_{barra}^b \\ V_{barra}^c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

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

$$I_G^{a,b,c} = \frac{(P_{g,espec}^{a,b,c} - jQ_{g,espec}^{a,b,c})}{(V_{barra}^{a,b,c})^*} \quad (2.7)$$

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

$$\begin{aligned} I_{ramo}^a &= K_a^{-1} I_{barra}^a \\ I_{ramo}^b &= K_b^{-1} I_{barra}^b \\ I_{ramo}^c &= K_c^{-1} I_{barra}^c \end{aligned} \quad (2.8)$$

Passo 5: as quedas de tensão em cada fase por ramo podem ser expressas por:

$$\begin{bmatrix} V_{ramo_i}^a \\ V_{ramo_i}^b \\ V_{ramo_i}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa_i} & Z_{ab_i} & Z_{ac_i} \\ Z_{ba_i} & Z_{bb_i} & Z_{bc_i} \\ Z_{ca_i} & Z_{cb_i} & Z_{cc_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ramo_i}^a \\ I_{ramo_i}^b \\ I_{ramo_i}^c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Passo 6: calcular as tensões das extremidades do terminal receptor de um ramo em relação às tensões de extremidade de envio utilizando a varredura inversa, então a tensão na barra j é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{barra_j}^a \\ V_{barra_j}^b \\ V_{barra_j}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{barra_i}^a \\ V_{barra_i}^b \\ V_{barra_i}^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{ramo_i}^a \\ V_{ramo_i}^b \\ V_{ramo_i}^c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Passo 7: a diferença absoluta entre as novas tensões de barra e a tensão inicial fornece o *Mismatch* que se compara como o fator de convergência.

Passo 8: Repete-se os passos desde 3 a 7 até alcançar a tolerância de convergência.

Esta metodologia será implementada nos casos em estudo, por ser simples e ajustar-se às características das redes radiais.

2.3. Modelos de Cargas

Em sistemas de distribuição existe uma diversidade de tipos de carga como: motores de indução, iluminação, dispositivos eletrônicos, entre outros.

É comum modelar as cargas pelo modelo ZIP exponencial ou polinomial.

2.3.1. Modelo ZIP exponencial:

O modelo ZIP exponencial é definido por equações de potência ativa e reativa e apresentadas nas equações (2.11) e (2.12)

$$P = \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha p} P_o \quad (2.11)$$

$$Q = \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha q} Q_o \quad (2.12)$$

V_o Tensão de referência.

P_o, Q_o Potência ativa e reativa na tensão de referencia.

$\alpha p, \alpha q$ fator de sensibilidade potência ativa/reativa.

Podem-se observar 3 casos para o modelo exponencial.

$\alpha p = \alpha q = 0$ carga de potência constante, denotada por P.

$\alpha p = \alpha q = 1$ carga de corrente constante, denotada por I.

$\alpha p = \alpha q = 2$ carga de impedância constante, denotada por Z.

Valores típicos dos fatores de sensibilidade de potencia ativa e reativa são mostrados na tabela 1 (SILVA, 2008).

Tabela 1: Valores Típicos de parâmetros do modelo ZIP exponencial.

Componente de Carga	α_p (Potência ativa)	α_q (Potência reativa)
Resistência para aquecimento ambiente	2,00	0,00
Bomba do sistema de aquecimento	0,20	2,50
Bomba de ar condicionado	0,20	2,50
Ar condicionado central	0,20	2,20
Ar condicionado para quartos	0,20	2,50
Aquecedor de água	2,00	0,00
Refrigerador e freezer	0,80	2,50
Lava - louças	1,80	3,50
Máquina de lavar roupas	0,08	1,60
Máquina de secar roupas	2,00	3,30
Lâmpada incandescente	1,54	0,00
Lâmpada fluorescente convencional	2,07	3,21
Lâmpada fluorescente compacta	0,95 – 1,03	0,31 – 0,46
Pequenos motores industriais	0,10	0,60
Grandes motores industriais	0,06	0,50
Bomba de água para irrigação	1,40	1,40

2.3.2. Modelo ZIP polinomial.

O modelo ZIP exponencial é definido por equações de potência ativa e reativa e apresentadas nas equações (2.13) e (2.14)

$$P = P_o \left(a_p + b_p \frac{V}{V_0} + c_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2.13)$$

$$Q = Q_o \left(a_q + b_q \frac{V}{V_0} + c_q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (2.14)$$

a_p, a_q parcela de carga ativa/reativa modelada como potência constante;

b_p, b_q parcela de carga ativa/reativa modelada como corrente constante;

c_p, c_q parcela de carga ativa/reativa modelada como impedância constante;

$$a_p + b_p + c_p = 1; \quad a_q + b_q + c_q = 1.$$

Estes parâmetros podem ser determinados mediante análises e medições (SILVA, 2008).

Por exemplo, costuma-se utilizar os valores típicos dos grupos de consumo industrial e residencial, ou seja:

Carga Industrial: 50% Potência constante e 50% Impedância Constante

Carga Residencial: 75% Impedância Constante e 25% Potência Constante.

2.3.3. Rateio da demanda dos alimentadores nas cargas.

Para realizar o cálculo do Fluxo de Carga é necessário dispor da demanda dos centros ou postos de distribuição de carga. Esta informação pode estar disponível, por exemplo, nos transformadores de distribuição e inclusive nos pontos de medição do usuário. Conhecidos então os usuários conectados a um Transformador de Distribuição, é possível dispor da demanda neste ponto em tempo real.

Mas estas tecnologias de medição (e telemedição) implicam inversões importantes e não sempre estão disponíveis nas concessionárias de distribuição.

Em função desta situação, é necessário estabelecer uma metodologia para estimar a demanda das barras de carga, além dos dados do alimentador e dos elementos da distribuição como: religadores automáticos, reguladores de tensão, etc.

Outra informação relevante é conhecer a que tipo ou grupo de consumo (residencial, industrial, comercial, governamental, etc.) pertence o consumidor ligado a rede e a demanda máxima contratada pelos consumidores. Com esta informação pode-se estimar a demanda do alimentador ou realizar um rateio para assim determinar a demanda nas barras de carga. Porém, esta informação não está sempre disponível. Caso esteja, estes dados são coletados da base de dados comercial da empresa em horário de menor tráfego informático, como o intuito de dispor de casos bases de estudo.

De maneira a aproveitar os dados disponíveis na concessionária, o presente estudo considera a simultaneidade do comportamento das cargas para a área analisada, i.e. é considerada a situação mais crítica sem ter em conta a caracterização nem a sazonalidade das cargas por grupo de consumo e por barra. A demanda máxima dos consumidores exclusivos em média tensão estão disponíveis na base de dados corporativa e são considerados. Estudo mais detalhado com relação à determinação das cargas nodais pode ser feito, mas está fora do alcance do presente trabalho.

A metodologia utilizada é apresentada a seguir: conhecida a **demand do alimentador**, esta deverá ser igual à somatória das demandas das diferentes barras. Outra consideração, é que os fatores de potência (nas barras PQ) são considerados constantes e iguais aos da demanda.

Por outro lado as demandas conhecidas são “bloqueadas”, não participando deste rateio.

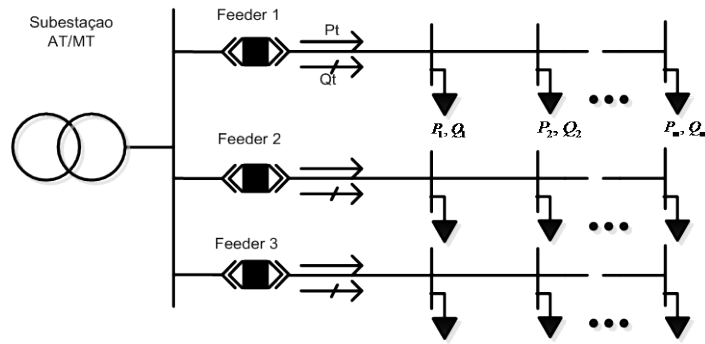


Figura 5: Distribuição de Cargas no alimentador.

Como é mostrado esquematicamente na figura 5, cada carga contribui proporcionalmente a sua potência instalada para a demanda total que poder se previamente conhecida ou estimada.

Então; a partir das equações (2.15) e (2.16) a seguir.

$$P_t = \sum_i^m P_i + \sum_j^n P_{exc-j} \quad (2.15)$$

$$Q_t = \sum_i^m Q_i + \sum_j^n Q_{exc-j} \quad (2.16)$$

onde:

P_t, Q_t é a demanda total do alimentador.

$\sum_i^m P_i, \sum_i^m Q_i$ é a soma das contribuições das cargas em proporção de sua potência instalada.

$\sum_j^n P_{exc-j}, \sum_j^n Q_{exc-j}$ é a demanda total das cargas cuja demanda é conhecida (consumidores exclusivos).

Logo, as contribuições de cada carga podem ser determinadas pelas equações (2.17) e (2.18):

$$P_i = \frac{P_{inst-i}}{\sum_i^m P_{inst-i}} \times P_t' \quad (2.17)$$

$$Q_i = \frac{Q_{inst-i}}{\sum_i^m Q_{inst-i}} \times Q_t' \quad (2.18)$$

onde:

P_{inst-i}, Q_{inst-i} é a potência instalada do nó considerado.

$\sum_i^m P_{inst-i}, \sum_i^m Q_{inst-i}$ é a potência instalada total do alimentador (sem as cargas conhecidas).

P_t', Q_t' é a demanda total do alimentador desconsiderando as demandas conhecidas.

Capítulo 3

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

Para a implementação do fluxo de Carga, a metodologia de reconfiguração e o cálculo dos indicadores de continuidade, precisam de uma ferramenta que possibilite ao computador abstrair a rede de distribuição e, por meio desta lógica, estabelecer uma “álgebra” que simule as modificações na topologia assim como construir redes radiais. Esta ferramenta consiste na chamada Teoria de Grafos, que matematicamente podem ser representados através de matrizes e vetores. Através destas matrizes e operadores matriciais, é possível simular as mudanças de estado das chaves que apresentam alterações na topologia da rede.

A seguir é apresentada definições e algoritmos baseados na teoria dos Grafos utilizadas neste trabalho.

3.1. Grafos.

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 (CHARTRAND et.al., 2004), i.e. um grafo é um par de conjuntos $G=(H,U)$, onde H é o conjunto de vértices, e U é o conjunto de arestas, este último é um conjunto de pares da forma (u,v) tal que $u,v \in H$.

Grafos podem também ser classificados como:

- Grafo não orientado.
- Grafo orientado (ou dígrafo).

No primeiro caso, as arestas não têm uma direção e, por conseguinte, (u, v) e (v, u) apresentam a mesma aresta. Em um grafo não orientado, dois vértices são ditos adjacentes se existe uma aresta que une esses dois vértices. No segundo caso, as arestas têm uma direção definida, assim (u, v) e (v, u) representam arestas diferentes. Um grafo orientado (ou dígrafo) também pode ser fortemente ligado se existe um caminho de qualquer vértice para qualquer outro vértice.

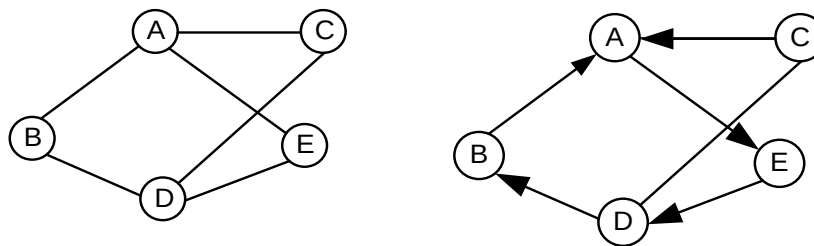


Figura 6: Grafo não Orientado e Grafo Orientado

Definições:

Grafo completo: É um grafo simples onde cada par de nós está conectado por uma aresta.

Subgrafo: em um grafo G é um grafo cujos conjuntos de vértices e arestas são subconjuntos de G .

Caminho: É uma sequência de vértices tal que de cada um dos vértices existe uma aresta para o vértice seguinte. Um caminho é chamado simples se nenhum dos vértices no caminho se repete. O comprimento do caminho é o número de arestas que o caminho usa, contando-se arestas múltiplas vezes. O custo de um caminho num grafo balanceado é a soma dos custos das arestas atravessadas. Dois caminhos são independentes se não tiverem nenhum vértice em comum, exceto o primeiro e o último.

Um grafo é conexo se a partir de qualquer vértice existe um caminho para qualquer outro vértice do grafo.

Um dígrafo $D = (H, E)$ 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.

3.2. Árvores:

Um grafo $G(H, U)$ 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.

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.

Teorema 3: Teorema de Cayley (CHARTRAND et.al., 2004) – 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 .

3.3. 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.

Uma rede elétrica de Distribuição tipicamente radial com recursos se assemelha a esta definição. Na figura 7 pode-se ver que os alimentadores constituem as árvores, e a rede interligada constitui a floresta.

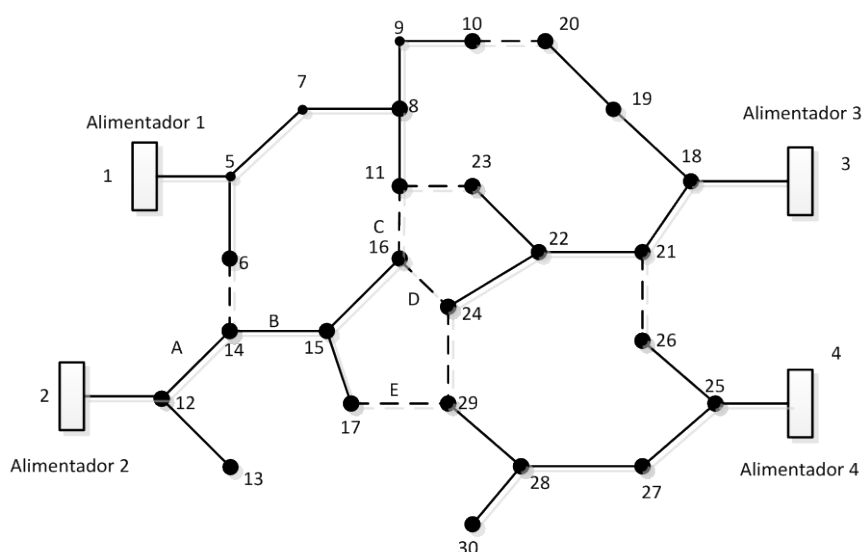


Figura 7: Exemplo de um Sistema Elétrico de Distribuição representado por um Grafo

Nesta representação as arestas constituem as chaves que ligam um ramo com outro. Os nós ou vértices contêm a informação dos ramos como pode ser visto na figura 8. Estas informações são a demanda de cada barra de carga, a bitola e tipo de condutor, reguladores de tensão, etc.

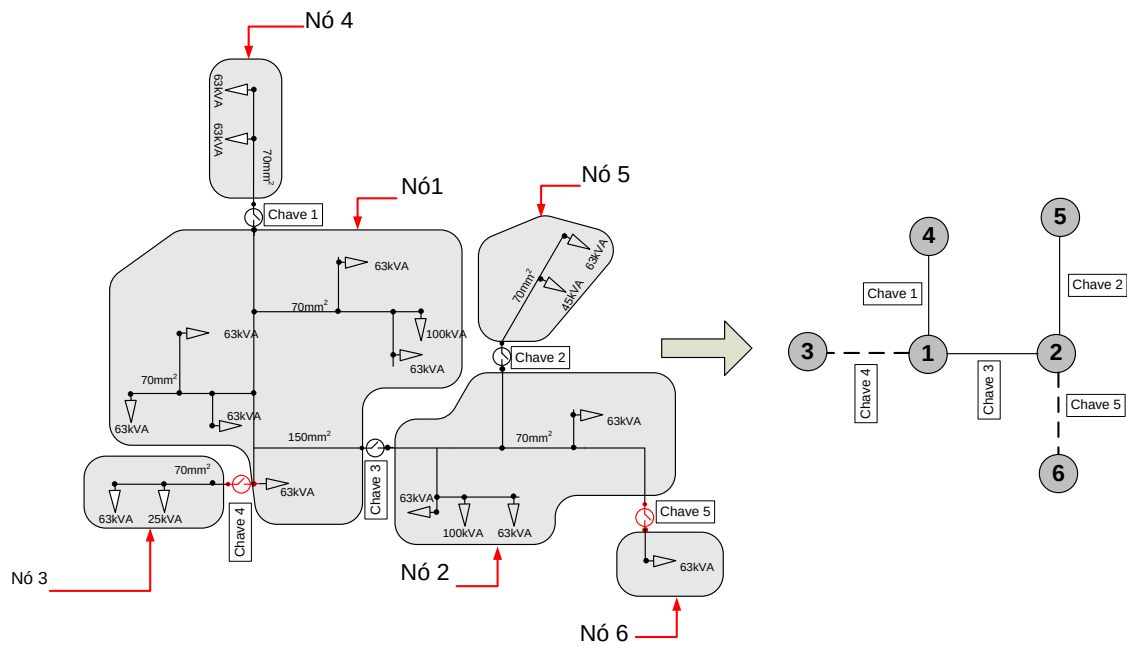


Figura 8: Diagrama Unifilar do Sistema Trifásico e seu correspondente Grafo.

A partir desta representação é possível descrever uma técnica mediante operações matriciais como será visto à frente, que permitirá resolver o fluxo de carga e as demais funções dependentes da topologia da rede.

3.4. Matriz de Incidência de Elementos.

A representação do grafo utilizada para resolver o fluxo de carga consiste em uma matriz quadrada de ordem igual ao número de **nós** presentes na rede de distribuição. Nesta representação (figura 9) um **nó** representa uma barra (Swing, PV ou PQ) e uma aresta representa a linha de interligação entre barras. A construção da matriz correspondente já foi explicada na **Seção 2.2**.

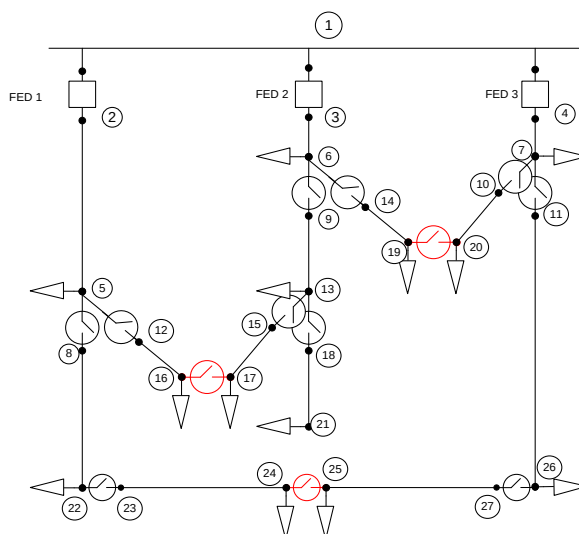


Figura 9: Sistema Teste de 14 barras (MENDOZA, et. al., 2006).

Esta mesma técnica é utilizada para construir as matrizes que serão utilizadas no processo de otimização, por exemplo, para construir a população inicial de “florestas”, para obter uma nova configuração por meio da abertura e fechamento de chaves e para determinar os índices de desempenho, etc. A diferença do fluxo de carga, em esta representação, o nó corresponde aos ramos da rede e as arestas correspondem às chaves seccionadoras situadas entre estes ramos.

Por exemplo, para a figura 10 a **Matriz de Incidência de Elementos** correspondente é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Matriz de Incidência Nodal.

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

Como pode ser visto, os elementos $A(6,7)$, $A(8,9)$ e $A(12,13)$ 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.

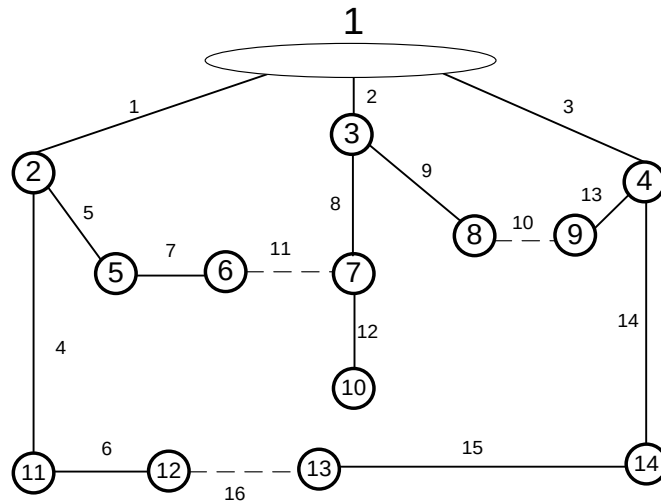


Figura 10: Grafo do Sistema Teste de 14 barras.

3.5. 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 10, 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, caso contrário.

A representação correspondente ao grafo da figura 10 leva à seguinte matriz apresentada na Tabela 3:

Tabela 3: Matriz de Adjacências do grafo da figura 10.

[illegible][illegible]

Um resultado interessante acontece ao multiplicar esta matriz mostrada na Tabela 3, k vezes.

$$A^k = A \times A \times \dots \times A \text{ (} k \text{ vezes)} \quad (3.1)$$

Antes se continuar, é dada algumas definições em relação a isto.

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.

Com estas definições é possível definir a equação (3.2). O resultado desta 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**.

$$R = I + \sum_{i=2}^n A^{i-1} \quad (3.2)$$

Para o grafo da figura 10, a **Matriz de Alcance** correspondente é apresentada na tabela 4:

Tabela 4: Matriz de Alcance do grafo da Figura 10.

		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	1	1

É possível observar nesta matriz (Tabela 4) que, por exemplo, desde o **nó** 1 são alcançados todos os nós do grafo da figura 10, por outro lado, do **nó** 2 os nós alcançados serão os nós: 5,6,11 e 12 em concordância com dito grafo.

Esta mesma matriz pode ser encontrada por meio da inversa da **Matriz de Incidência de Elementos (Seção 3.4)** por meio da equação (3.3), a seguir:

$$R = (A)^{-1} \quad (3.3)$$

Onde a Matriz A é montada pela metodologia indicada na **Seção 2.2**.

3.6. 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 tupla de dois nós, um indicando o nó de origem e o outro o nó destino do arco correspondente.

Para o grafo da figura 10, a Lista de Adjacência correspondente é apresentada na tabela 5.

Tabela 5: Lista de Adjacências do Grafo da figura 10

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	

3.7. Algoritmo de Prim (Chartrand et.al., 2004).

O algoritmo de Prim é um algoritmo em teoria de grafos que procura uma árvore geradora mínima para um grafo ponderado conectado (com pesos nas arestas). 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 (CHARTRAND et.al., 2004). 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 só um vértice, ate cobrir todos os vértices. Estes passos são descritos a seguir:

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

Este algoritmo é utilizado para gerar a população inicial, ou seja, como será visto mais adiante, para gerar os **anticorpos de primeira geração**. Neste passo, são atribuídos pesos aleatoriamente, então a árvore (Anticorpo) é gerada aleatoriamente ao mesmo tempo que garante-se a radialidade de cada Anticorpo de Primeira Geração.

Também a mesma ferramenta é utilizada em auxílio dos diferentes algoritmos computacionais, com o objetivo de garantir as condições de radialidade das redes de distribuição, e deste jeito melhorar o desempenho do Algoritmo de Procura da Solução Ótima.

Capítulo 4

4. Indicadores de Continuidade do Serviço.

A tendência de reduzir custos nas empresas Concessionárias de Distribuição pode levar á precariedade do serviço; por tal motivo, Agências Reguladoras estabelecem os padrões e metas para os indicadores de continuidade que devem ser seguidos pelas distribuidoras, bem como a forma de pagamento das multas a serem aplicadas nos casos de violação dos limites previamente estabelecidos. Geralmente estes limites têm relação com a frequência e a duração das interrupções.

No Brasil, a regulamentação vigente é definida pela Resolução Normativa No. 24, publicada pela ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, em 27 de Janeiro de 2000.

No caso do Paraguai por enquanto não existe ainda ambiente regulatório, mas o antecedente mais imediato é um contrato de gestão com o Estado Paraguaio. Se bem este contrato não é punitivo, estabelece metas e limites para os indicadores de continuidade de serviço (entre outros parâmetros como indicadores econômicos, comerciais, etc.) e são utilizados para medir o desempenho da empresa, fazer um seguimento da gestão dos gerentes, etc.

Estes padrões de indicadores obrigam ás empresas distribuidoras a avaliar seus sistemas de forma preditiva, buscando identificar os pontos mais susceptíveis a falhas e as melhores alternativas para reforço e expansão de sua rede. Assim também uma configuração adequada da rede pode contribuir e melhorar o desempenho da rede de distribuição.

As considerações sobre a radialidade dos sistemas de distribuição, apresentadas até agora, permitem avaliar os índices de confiabilidade (através de indicadores de frequência e duração de interrupção de conjunto) por meio de uma técnica analítica. Esta técnica é apresentada em este capítulo.

Com a consideração destes indicadores este trabalho pretende contribuir e estabelecer uma metodologia multiobjetiva que busque: a redução de perdas elétricas juntamente com a procura da melhoria dos indicadores de desempenho (indicadores de conjunto).

4.1. Definições.

Indicadores individuais:

FIC: corresponde ao número médio de interrupções por ano sofridas pelas unidades consumidoras alimentadas a partir do ponto de carga “i”. Assim tem-se a equação (4.1):

$$FIC_i = \lambda_i \quad (4.1)$$

λ_i corresponde à quantidade de vezes que o consumidor i fica sem serviço.

DIC: corresponde ao total de horas por ano durante as quais os consumidores conectados ao ponto de consumo “i” ficam interrompidos. Assim tem-se a equação (4.2):

$$DIC_i = U_i \quad (4.2)$$

U_i corresponde ao tempo que o consumidor i fica sem serviço.

Indicadores de conjunto:

FEC: indica o número médio de interrupções por ano sofridas pelas unidades consumidoras de um determinado conjunto. Assim tem-se a equação (4.3):

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Np} \lambda_i C_i}{CC} \quad (4.3)$$

onde:

C_i é o número de unidades consumidoras no ponto de carga i.

CC é o número total de unidades consumidoras do conjunto.

Np é o número de pontos de carga do conjunto.

DEC: de forma semelhante, o DEC indica o número médio de horas por ano que cada unidade consumidora de um conjunto fica interrompida. Assim tem-se a equação (4.4):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Np} U_i C_i}{CC} \quad (4.4)$$

Interrupção de longa duração: Toda interrupção do sistema elétrico com duração maior ou igual a três minutos.

No caso Paraguaio a unidade consumidora está representada pela potência instalada do transformador de distribuição. O número total de unidades consumidoras é, portanto, a somatória das potências instaladas dos transformadores de distribuição da área considerada, que pode ser um alimentador, uma Subestação, ou uma Região. No Paraguai existem as Regiões: Metropolitano, Chaco, Norte, Leste, Sul e Centro. Não existe ainda maior informação sobre a quantidade, tipo e demanda de consumidores associada a um determinado transformador de distribuição, como consequência ainda não é possível a determinação dos índices por cliente (individuais). Esta disponibilidade de informação esta sujeita à

implementação do **Sistema de Informação Integral de Distribuição (SGIDE)**, que está na etapa de chamada à Licitação Internacional. Por enquanto a metodologia de cálculo que será utilizada neste trabalho é a mesma para qualquer tipo de unidade consumidora, portanto, é valido para qualquer tipo de concessionária.

4.2. FEP.

Definição: é o número de interrupções equivalente da potência instalada no nível de distribuição de 23[kV] em um período de tempo considerado. Este é dado pela equação (4.5):

$$FEP = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{P_t} \quad (4.5)$$

onde:

P_i é a soma da potência em kVA dos transformadores de distribuição afetados pela interrupção “i”.

P_t é a Potência total instalada no alimentador, centro de distribuição ou sistema, segundo seja o caso em estudo.

N é o número total de interrupções durante o tempo considerado.

4.3. DEP.

Definição: é a duração de interrupção equivalente da potência instalada em 23[kV] em um período de tempo considerado.

Este é dado pela equação (4.6):

$$DEP = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i \times t_i)}{P_t} \quad (4.6)$$

onde:

t_i é o tempo de duração da interrupção “i” em horas, que afeta a potência P_i (só são consideradas as interrupções de longa duração).

Observação: como visto na seção anterior, para o caso em estudo a unidade consumidora esta representada pela potência instalada, mas a metodologia seguirá sendo valida se é considerado o número de clientes ou consumidores reais. No Brasil o índice de conjunto considerado no procedimento de rede é o FEC e o DEC.

4.4. Metodologia de Cálculo.

Este trabalho propõe considerar também a redução das perdas elétricas e melhorar o indicador FEP. O indicador DEP é semelhante ao FEP, por tanto não contribui para a metodologia multiobjetivo, e não será considerado. As taxas de falha dos ramos dos alimentadores são conhecidas e serão utilizadas para determinar o índice FEP (desempenho futuro).

Este estudo está motivado no fato de que a mudança de ramos ou setores de um alimentador sobre outros alimentadores pode melhorar o desempenho global do sistema considerado, i.e., uma nova configuração topológica terá um valor diferente do FEP devido à interação dos diferentes ramos no desempenho dos alimentadores do sistema. A procura de uma configuração topológica em que o valor deste indicador seja menor pode, então, ser possível.

As taxas de falha são determinadas para um período de um ano, e são obtidas do Sistema de Informação Geográfica (GIS-*SmallWorld*) por meio de um módulo computacional deste sistema, onde são armazenados numa **base de dados relacional** os eventos de longa e curta duração por ramo ou setor no período de tempo considerado.

Em seguida será descrito uma metodologia semelhante á desenvolvida em (COSTA, 2011), e será abordado um algoritmo de cálculo do indicador FEP.

São considerados três tipos de elementos de separação de circuitos:

- 1) Chave Seccionadora: não tem possibilidade de isolar a falta. Sua função é simplesmente ligar ou desligar ramos ou setores.
- 2) Seccionador Fusível: tem possibilidade de isolar a falta. Nós à montante não ficam fora de serviço por faltas que ocorrem à jusante deste fusível.
- 3) Religador Automático: tem possibilidade de isolar a falta e possuir automatismo. Estes dispositivos podem ser comandados desde o Centro de Controle remotamente. Idêntico ao dispositivo anterior estes permitem manter em serviço os nós localizados à montante do religador diante de faltas localizadas à jusante destes.

Na figura 11, um pequeno sistema fictício é apresentado. Este sistema possui um interruptor, quatro chaves, um fusível, e dois religadores. Também possui oito ramos ou setores. O correspondente grafo está representado nesta mesma figura. A chave 8 está aberta. Se estiver fechada, o sistema teria um loop.

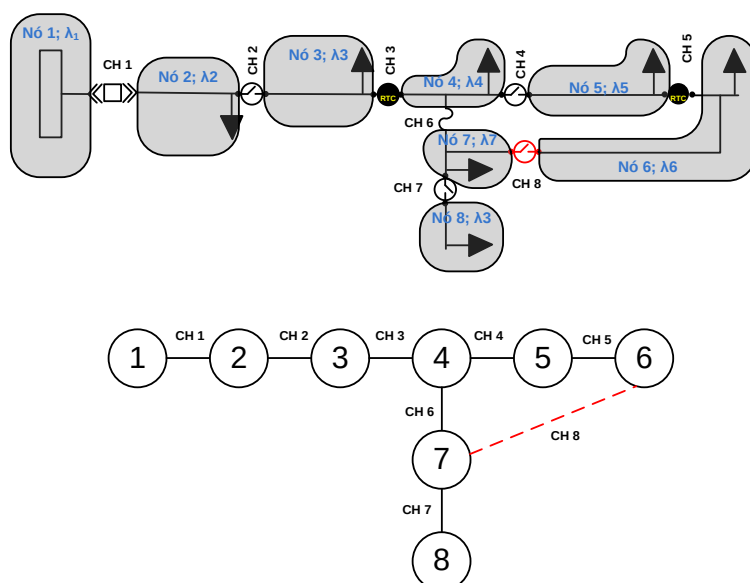


Figura 11: Sistema Teste (Cálculo de FEP) e seu Grafo correspondente.

Com base no Grafo é possível montar uma matriz lógico estrutural de falhas. Nesta matriz, a cada fila associa-se uma falha de um nó determinado e a coluna aos nós que são “alcançados” por esta falha. Nesta matriz o valor “1” indica que o nó Y (coluna) é alcançado pela falha do Nó X (na fila X). O caso contrário é representado por “0”.

A figura 12 representa a matriz de alcance do sistema fictício da figura 11.

		Nós alcançados							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Nós com falha	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	0	1	1	1	1	1	1	1
	3	0	1	1	1	1	1	1	1
	4	0	0	0	1	1	1	1	1
	5	0	0	0	1	1	1	1	1
	6	0	0	0	0	0	1	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	1	1
	8	0	0	0	0	0	0	1	1

Figura 12: Matriz de Alcance R.

Segundo a matriz da figura 12 e as equações (4.3) e (4.5) o valor do FEP estaria dado por:

$$FEP = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 P_1 \\ \lambda_2 P_2 \\ \lambda_3 P_3 \\ \lambda_4 P_4 \\ \lambda_5 P_5 \\ \lambda_6 P_6 \\ \lambda_7 P_7 \\ \lambda_8 P_8 \end{bmatrix}$$

Com isto o FEP pode ser reescrito da seguinte forma, equação (4.7):

$$FEP = \frac{\sum_{j=1}^N (\sum_{i=1}^N \lambda_i \times P_i \times R(j, i))}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (4.7)$$

onde:

λ_i é a taxa de falha do Nó i.

$R(j, i)$ é o elemento (j,i) da matriz de alcance R.

Esta equação (4.7) é utilizada no desenvolvimento do algoritmo computacional para determinar o indicador. A matriz R deste exemplo não considera a probabilidade de não operação da proteção. Se estiver prevista esta possibilidade, deve-se incluir na Matriz “R” os valores de probabilidade de não atuação. A equação (4.7) continua sendo valida neste caso.

No seguinte capítulo são apresentadas as definições e princípios do funcionamento do algoritmo baseado nos sistemas imunológicos artificiais.

Capítulo 5

5. Sistemas Imunológicos Artificiais.

O Sistema Imunológico Artificial (SIA) é um algoritmo evolucionário, técnica de Inteligência Artificial, inspirado no Sistema Imunológico dos Vertebrados (SIV) devido à robustez deste último no que concerne a sua eficiência no combate aos ataques sofridos por um organismo. Este sistema funciona de forma descentralizada, paralela e adaptativa, características desejáveis no ambiente voltado à solução de problemas complexos comuns, no campo da Inteligência Artificial.

5.1. O 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.

Sem este SI, a morte devido a uma infecção é inevitável. Os mecanismos de SI reconhecem uma variedade quase ilimitada de células e substâncias infecciosas exógenas, conhecidos como elementos não próprios, distinguindo-as daquelas células nativas não infecciosas, conhecidas como moléculas próprias. Quando o elemento patógeno (elemento infeccioso externo) entra no corpo o SI é mobilizado para a eliminação deste agente. O sistema é capaz de lembrar cada infecção, tal que em uma segunda exposição o mesmo patógeno é eliminado sem mais dificuldade.

Há dois sistemas inter-relacionados para que o corpo identifique um material externo:

- O Sistema Imunológico Inato
- O Sistema Imunológico Adaptativo

O Sistema Imunológico Inato é chamado assim porque o corpo nasce com a habilidade de reconhecer certos micróbios e imediatamente os destrói. 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, confrontando-os durante toda a vida. A imunidade adaptativa permite ao organismo reconhecer e responder a qualquer micróbio, mesmo aquele que nunca foi um invasor anteriormente.

5.2. Uma Breve História:

A Imunologia é uma ciência relativamente nova, cuja origem é creditada a Edward Jenner há 200 anos, que notou que as ordenhadoras que se recuperavam da varíola bovina jamais contraíam varíola humana, uma variedade mais grave da doença. Com base nessa observação, ele injetou o material de uma pústula de varíola bovina no braço de um menino de 8 anos. Quando, mais tarde esse menino foi intencionalmente inoculado com o vírus da varíola humana, a doença não se desenvolveu. O tratado de Jenner sobre vacinação (do latim *vaccinus*, das vacas) foi publicado em 1798 (CASTRO et.al., 1999).

No século XIX, Robert Koch provou que as doenças infecciosas eram causadas por micro-organismos patogênicos, cada um dos quais era responsável por uma determinada patologia. Posteriormente, Louis Pasteur na década dos 1880 desenvolveu com sucesso as vacinas anti-rábica 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 (CASTRO et.al., 1999).

No início de 1900, Jules Bordet e Karl Landsteiner trouxeram à discussão a noção de especificidade imunológica. Foi mostrado que o sistema imunológico é 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, 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. Anatomia do Sistema Imunológico.

Os tecidos e órgãos que compõem o sistema imunológico são distribuídos por todo o corpo. Eles são conhecidos como órgãos linfóides, uma vez que estão relacionados com a produção, crescimento e desenvolvimento dos linfócitos, os leucócitos que compõem a parte principal do dispositivo do sistema imunológico. Nos órgãos linfóides, os linfócitos interagem com importantes células não linfóides, seja durante o processo de maturação ou durante o início da resposta imune. Os órgãos linfóides podem ser divididos em primários (ou central), responsável pela produção de linfócitos novos e secundários (ou periférico), onde os repertórios de linfócitos atendem o universo antigênico (CASTRO et.al., 1999).

5.3.1. Os órgãos linfóides e suas funções incluem:

Amígdalas e adenóides: linfonodos especializadas que contêm células imunológicas que protegem o corpo contra os invasores do sistema respiratório;

Vasos linfáticos: constituem uma rede de canais que transportam a linfa (fluido que transporta as células linfáticas e antígenos exógenos) para os órgãos do sistema imunológico e de sangue;

Medula óssea: tecido mole contido na parte interior dos ossos longos, responsáveis pela geração das células imunológicas;

Linfonodos: Atuam como locais de convergência dos vasos linfáticos, onde cada nó armazena células imunes, incluindo células B e T (local onde a resposta imune adaptativa tem lugar);

Timo: algumas células migram para o timo, a partir da medula óssea, onde se multiplicam e amadurecem, transformando-se em células T, capazes de produzir uma resposta imune;

Baço: local onde os leucócitos destroem os organismos que invadem o fluxo de sangue;

Apêndice e placas de Peyer: gânglios linfáticos especializados que contêm as células imunitárias destinadas a proteger o sistema digestivo.

A arquitetura do sistema imunológico é intrinsecamente multicamadas, com defesas espalhados em vários níveis (figura 13). As camadas de proteção podem ser divididas da seguinte forma:

- Barreiras impostas em nível físico: a nossa pele funciona como um escudo para proteção do corpo contra invasores sejam maléficos ou não.
- Barreiras fisiológicas: fluidos tais como suor, saliva e lágrimas contêm enzimas destrutivas.
- Imunidade inata e Sistema imune adaptativo.

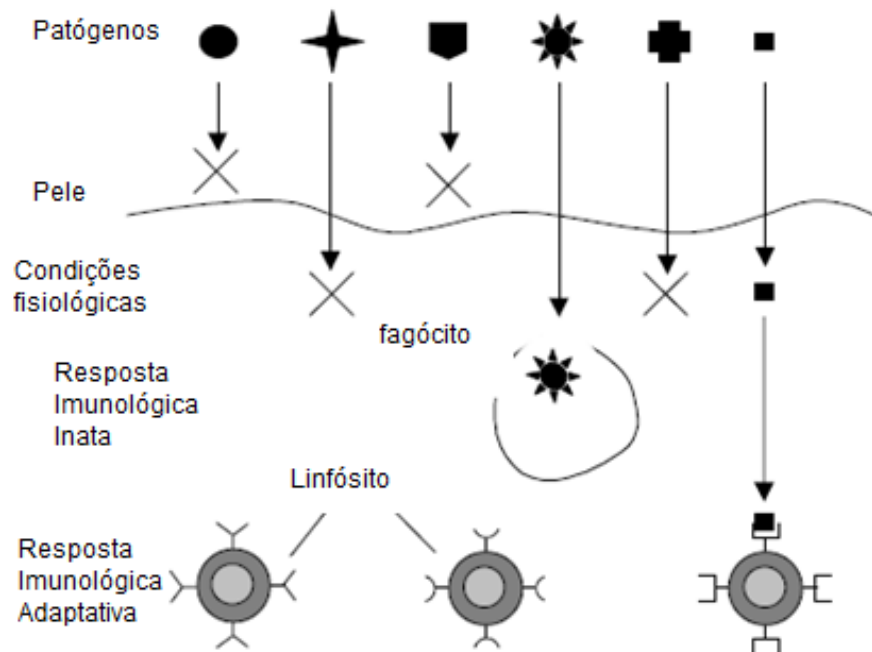


Figura 13: Estrutura multi camadas do Sistema Imune (CASTRO et.al., 1999).

O sistema imune é composto por uma grande variedade de células originadas na medula óssea. Algumas são responsáveis pela defesa geral e outras são treinadas para combater específicos patógenos.

5.3.2. Linfócitos

São pequenos leucócitos que possuem a maior responsabilidade no sistema imune. Há de dois tipos: B e T.

Células B e anticorpos:

A principal função destas células B inclui a produção e secreção de Anticorpos como resposta a proteínas exógenas como bactérias, vírus ou tumores. Cada célula B é programada para produzir um anticorpo específico.

Células T e linfocinas:

As células T são chamadas assim por que maduram no Timo. A sua função inclui a regulação da ação de outras células diretamente e atacar as células hospedeiras infectadas. Os linfócitos T podem ser subdivididos em três subclasses: As células T auxiliares (Th), as células T citotóxicas (assassinas) e células T supressoras.

As Th estão essencialmente na ativação das células B, outras células T, macrófagos e células assassinas naturais.

As células T assassinas, ou T citotóxicas são capazes de eliminar invasores microbiais, vírus ou células cancerosas.

As células T supressoras são vitais na manutenção da resposta imune, sua função é a inibição da ação de outras células imunes.

As células T trabalham primariamente, por secreção de substâncias, conhecidas como citosinas, ou, mais especificamente linfocinas e seus derivados as monocinas produzidas por monócitos e macrófagos.

Células assassinas naturais

As células assassinas naturais constituem outro tipo de linfócitos letais. Tal como as células T assassinas, elas contêm grânulos cheios com produtos químicos poderosos. Elas são designadas assassinas naturais porque, ao contrário das células T assassinas, eles não precisam de reconhecer um antígeno específico antes de eles começarem a agir.

5.3.3. Fagócitos, granulócitos e seus derivados.

Os fagócitos, comedores de células, são os glóbulos brancos capazes de ingerir e digerir micro-organismos e partículas antigênicas. Alguns fagócitos também têm a capacidade para apresentar antígenos a linfócitos, sendo assim chamadas células apresentadoras de antígeno.

5.3.4. Processo de Proteção Imunológico.

O nosso corpo é protegido por um exército diversificado de células e moléculas que trabalham em conjunto, em que a meta final de todas as respostas imunes é um antígeno, que é geralmente uma molécula externa a partir de uma bactéria ou outro invasor.

Células especializadas que apresentam antígenos, como macrófagos, percorrem o corpo, ingerindo e digerindo os antígenos que eles encontram e fragmentando-os em peptídeos antigênicos. Pedacos destes peptídeos são unidos às moléculas de complexos de histocompatibilidade - MHC, e são exibidas na superfície da célula. Outros glóbulos brancos, chamadas células T, têm moléculas receptoras que permitem que cada um deles reconheça

uma combinação de peptídeo - MHC diferente. Células T ativadas por reconhecimento dividem e secretam linfócinas, ou sinais químicos, que mobilizam outros componentes do sistema imune. Os linfócitos B, que também têm moléculas receptoras de uma especificidade única na sua superfície, respondem a estes sinais. Ao contrário dos receptores de células T, as células B podem reconhecer partes de antígenos livres em solução, sem moléculas de MHC. Quando ativados, as células B dividem e diferenciam em células do plasma que segregam proteínas de anticorpos, que são formas solúveis dos seus receptores. Ao ligar aos antígenos que encontram, os anticorpos podem neutralizá-los ou precipitar a sua destruição por enzimas do complemento ou por eliminação celular. Algumas células T e B tornam-se células de memória que persistem na circulação e aumentam a disponibilidade do sistema imunitário para eliminar o mesmo antígeno, se ela se apresentar no futuro. Uma vez que os genes de anticorpos em células B sofrem mutação e edição, a resposta do anticorpo melhora depois de repetidas imunizações, este fenômeno é conhecido como maturação de afinidade (CASTRO et.al., 1999).

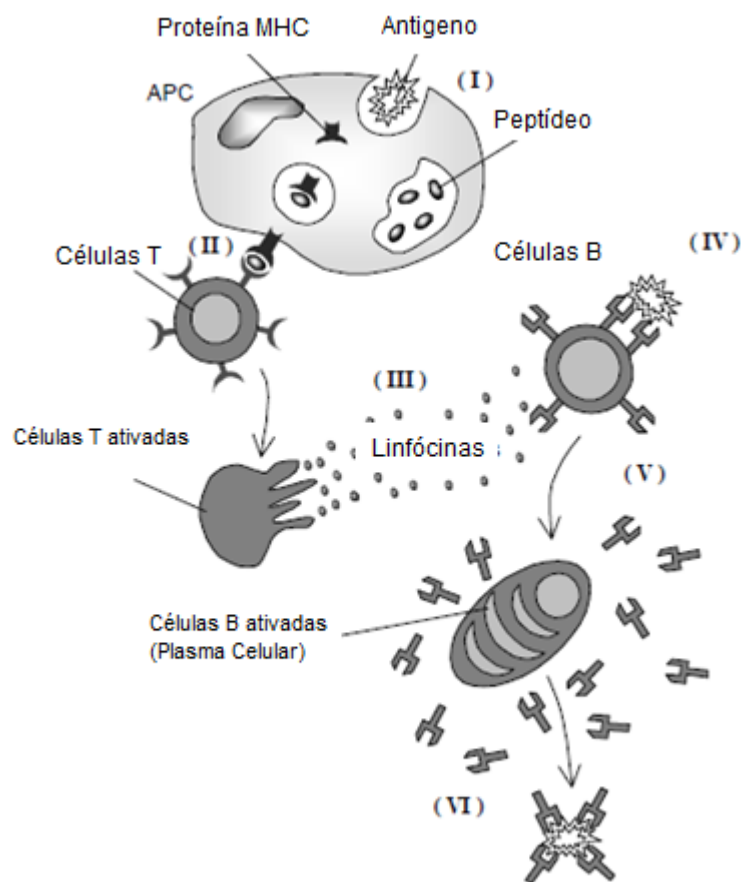


Figura 14: Processo de Imunidade Adaptativa (CASTRO et.al., 1999).

5.4. Sistema Imunológico Artificial.

Os sistemas imunológicos artificiais são sistemas adaptativos, inspirados na teoria da imunologia e funções, princípios e modelos observados no sistema imunológico, os quais são aplicados para solucionar problemas. Uma das características mais marcantes destes sistemas é a robustez, expressa em uma tolerância às perturbações em componentes individuais, que podem realizar tarefas complexas quando agem em conjunto (CASTRO et.al., 1999).

5.4.1. Características do Sistema Imune.

Aprendizagem: o sistema imune é capaz de aprender das experiências, e com isto ele sabe como atacar os corpos estranhos. Este mecanismo multiplica as células boas que atacam as más para poder preservar a integridade do sistema.

Memória: é um mecanismo que mantém um registro do que fez dano ao sistema, isto é, o sistema tem a capacidade de lembrar quem foi o que o atacou e manter um registro da célula que o destrói, podendo clonar depois esta célula para voltar a atacar o corpo estranho.

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.

Coestimulação: 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. Embora não sejam eliminados, alguns 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 vivos.

5.5. 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 idéia que só aquelas células que reconhecem os antígenos proliferam; desta maneira são selecionadas aquelas que têm a capacidade de reconhecer. A seleção clonal opera nas células B e T.

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, e,
- 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 é 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 inicia-se 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 à 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 (CASTRO et.al., 1999; CASTRO et.al., 2002).

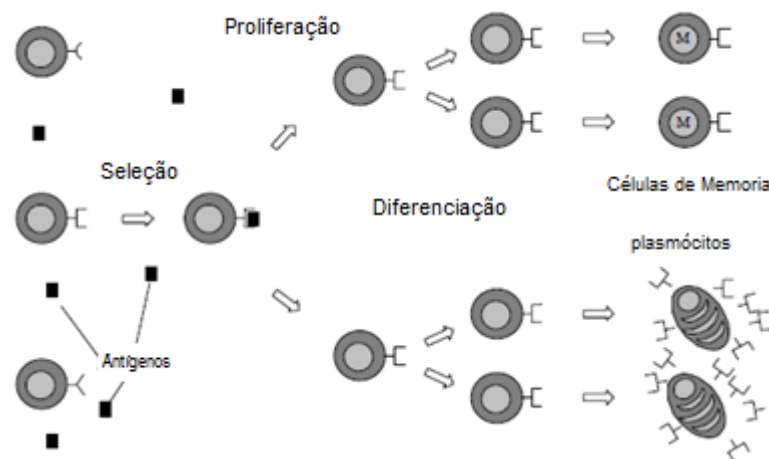


Figura 15: Princípio de Seleção Clonal (CASTRO et.al., 1999).

5.6. Otimização baseada no Algoritmo de Seleção Clonal.

O algoritmo de seleção clonal representa uma implementação computacional (CORTES, 2004) do princípio de seleção clonal responsável por 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 a ser otimizada) e os anticorpos com uma alta afinidade 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.

Diagrama de fluxo do Algoritmo de Seleção Clonal.

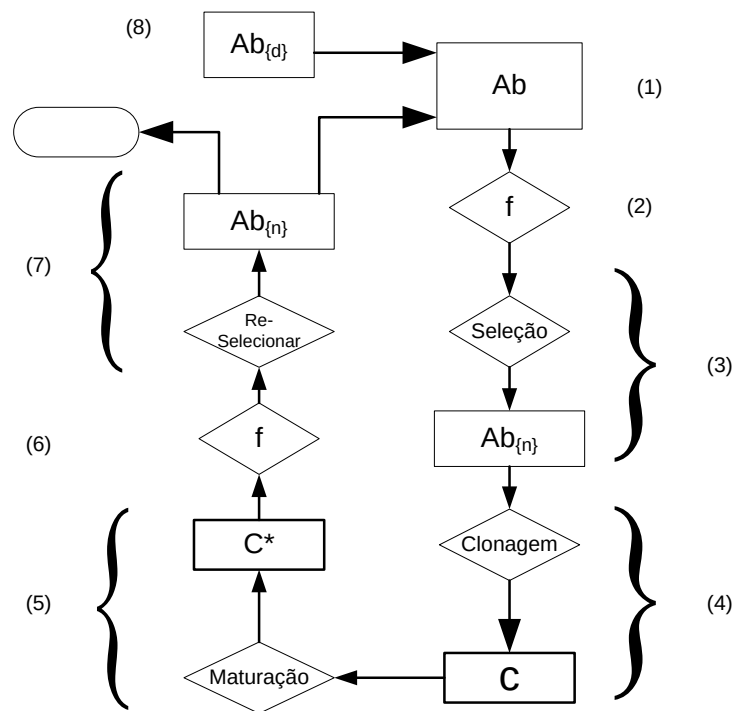


Figura 16: Fluxograma do Algoritmo de Seleção Clonal.

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 $\mathbf{f}$ que obtém sua afinidade com todos os N anticorpos.
3. Selecionar os $\mathbf{n}$ anticorpos com a afinidade mais alta para formar o novo conjunto de anticorpos.
4. Os $\mathbf{n}$ 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 for melhor que o atual.
8. Finalmente são substituídos os “ $\mathbf{d}$ ” piores indivíduos da população de anticorpos com os melhores que geraram depois do processo de clonagem e mutação.

5.7. Estado do Arte dos SIA – Aplicações.

Os Sistemas Imunológicos Artificiais têm sido utilizados em varias áreas de estudo, com especial ênfase nas áreas de reconhecimento de padrões, seguridade, e mesmo otimizações de problemas matemáticos complexos.

Em (QUEZADA et.al., 2006) é apresentada a solução do problema do caixeiro viajante utilizando os SIA. Neste trabalho é proposto programar um algoritmo baseado no modelo da seleção clonal, comparando os resultados obtidos com outras heurísticas.

Em (DEL DUCCA, 2010) esta ferramenta é utilizada na extração de informação (*data mining*). Visando sempre a maior precisão nos resultados do processo de extração de informações, cada vez mais autores têm-se dedicado em estudar e desenvolver algoritmos e ferramentas utilizando conceitos já consagrados, como Redes Neurais, Algoritmos Genéticos (AG), entre outros. Uma dessas técnicas que ganhou bastante destaque e tem uso bastante difundido na área de Inteligência Artificial (IA) e de mineração de dados é a Lógica Fuzzy, pois ela trabalha com variáveis linguísticas assemelhando-se ao modo humano de raciocínio, que facilita na hora da tomada de decisão. Este trabalho tem como objetivo o

desenvolvimento e análise de uma ferramenta de mineração de dados baseada no algoritmo CAISFLO (*Co-Evolutionary Immunological System*) e sua validação utilizando bases de dados de domínio público, comparando-se os resultados obtidos com outras abordagens disponíveis.

Em (VERMAAS, 2009) é proposto o algoritmo 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.

Por inferência, verificou-se que os melhores resultados foram obtidos quando se aplicou 30 gerações, 30 anticorpos e 30 clones. Quantidades pequenas de gerações, anticorpos e clones resultaram em processo mais rápido, porém em resultados insatisfatórios. Quantidades grandes tornaram o processo demorado, além de não provocar melhorias sensíveis nos resultados.

O sistema imunológico também tem sido utilizado na solução de complexos problemas numéricos como em (KARR et.al., 2004). O aumento de poder de computação trouxe um renovado interesse em resolver problemas como inversa de valor-inicial e condições de contorno (inverso IVBV), e no desenvolvimento de robustos e eficientes métodos computacionais adequadas para sua solução.

(KARR et.al., 2004) utiliza os SIA para resolver uma classe muito difícil de problemas: problemas inversos IVBV (*inverse initial-value, boundary-value*). Os resultados indicam que os SIA têm um grande potencial para servir como um sistema de vigilância em complexos problemas de variação no tempo. Este estudo preliminar indica que os esforços adicionais para efetivamente utilizar e aperfeiçoar esta abordagem no domínio de problemas inversos IVBV são garantidos.

Em (QING-HUA et.al., 2008) é projetado um sistema de diagnóstico de falhas baseado em Sistema Imunológico Artificial combinando algoritmo de seleção negativa e parâmetro de não dimensão. Esta aplicação permite a procura de falhas das unidades e previne o acontecimento de acidente vicioso de equipamentos, bem como também problemas ocultos, e serve para reduzir tempos desnecessários de serviço, além de economizar os custos.

De acordo com o resultado da simulação de diagnóstico da unidade de falha baseado em SIA, a avançada natureza, praticidade, validade e regularidade da idéia está provado.

Os SIA têm sido utilizados em várias áreas da computação, principalmente na área de proteção, segurança e *clustering*. Em (CHAO et.al., 2009) um sistema de detecção de Vírus (VDS) baseado no Sistema Imune Artificial (seleção Clonal) é proposto.

Em (MA et.al., 2009) o algoritmo SIA – Mecânica Quântica foi proposto para agrupamento de dados (*data clustering*), baseado na Teoria da Mecânica Quântica a partir do paradigma do Sistema Imune Artificial. Este algoritmo utiliza o aprendizagem, memória, e o mecanismo de supressão de rede da rede artificial imune para tentar otimizar amostras de dados. Ao mesmo tempo, com o objetivo de revelar adequadamente a interação de antígenos e anticorpos de memória, é adicionada informação de tipo de dados de anticorpos de memória. Assim, os anticorpos de memória podem preferencialmente aprender e memorizar as características do mesmo tipo de antígenos. Desta forma, a precisão da classificação do algoritmo pode ser melhorada.

Além disso, os resultados experimentais mostram que a precisão deste algoritmo é mais elevada do que aqueles SIA tradicional.

Na área dos **sistemas elétricos de potência** o SIA tem sido utilizado com provada eficácia em vários problemas de Otimização como em (ABDUL, 2010). Neste trabalho o SIA é implementado como uma técnica de otimização para determinar o peso ideal dos neurônios no RNA (Redes Neurais Artificiais) com o objetivo de minimizar o erro de saída.

RNA é uma ferramenta computacional inspirada na rede de neurônios do sistema nervoso biológico. É uma rede consistindo de matrizes de neurônios artificiais ligadas entre si com diferentes pesos de conexão. Os estados dos neurônios, assim como os pesos das conexões entre elas evoluem de acordo com determinadas regras de aprendizagem. Em outras palavras, as redes neurais são ferramentas de modelagem estatística não – lineares que podem ser usadas para encontrar a relação entre entrada e saída ou para encontrar padrões em vasto banco de dados.

O algoritmo de aprendizagem proposto foi utilizado para prever a demanda de curto prazo ou demanda horária de energia elétrica.

Na área de Despacho Econômico de Geração em Sistemas de Potência tem sido também uma das aplicações do SIA como em (RAHMAN et.al., 2004). Neste trabalho satisfazer a demanda com mínimo custo é o foco. Através da evolução genética, os anticorpos

(Despacho) com afinidade elevada são produzidos e torna-se a solução. Os resultados da simulação revelam que a técnica desenvolvida é fácil de implementar, convergiu dentro de um tempo de execução aceitável, com uma solução altamente ótima para o despacho econômico com um custo mínimo de geração.

No âmbito da distribuição, foram desenvolvidos trabalhos que exploram, por exemplo, a identificação de falhas em redes de distribuição por meio dos SIA (XU et.al., 2006).

Em (BARBOSA et.al., 2008) O método proposto para resolver problemas de fluxo de potência acrescenta ao SIA o vetor gradiente. O conceito é utilizado para avaliar as informações durante o processo de hipermutação, aumentando o número de gerações e clones, o que, conseqüentemente, acelera o processo de convergência e reduz o tempo computacional.

Em (OLIVEIRA, et.al., 2012) é desenvolvido uma metodologia de Otimização do Sistema de Recarga de veículos elétricos e híbridos recarregáveis num esquema organizado de recarga. Este trabalho utiliza a Metodologia do SIA 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.

Capítulo 6

6. Otimização Multiobjetivo baseados em Sistemas Imunológicos Artificiais.

Em (CHUN-HUA et.al., 2009) é apresentada uma proposta de aplicação dos SIA nos problemas multiobjetivo. A proposta é muito interessante já que pode estender a metodologia a problemas de recomposição e reconfiguração onde são importantes as análises de mais de um objetivo.

Segundo a proposta, a metodologia está baseada na Dominância de Pareto. A seguir são apresentadas algumas definições a respeito.

6.1. Dominância de Pareto:

Um vetor $u = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ é dito que domina o 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 $u \preceq v$.

6.2. Solução Ótima de Pareto/ Solução Não dominada.

$x_u \in \Omega$ variável de decisão é dito solução de Pareto ou solução não dominada se e 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 $u = f(x_u \in \Omega) = (u_1, u_2, \dots, u_k), t(P^*)$, tem – se a equação (6.1),

$$\forall i \in (1, 2, \dots, k) f_i(x_u) \leq f_i(x_v) \wedge \exists i \in (1, 2, \dots, k) f_i(x_u) < f_i(x_v) \quad (6.1)$$

6.2.1. Conjunto ótimo de Pareto.

Para um dado MOP (*Multi Objective Problem*) $f(x)$, o Conjunto Ótimo de Pareto (P^*), é definido pela equação (6.2)

$$P^* = \{x \in \Omega | \neg \exists x' \in \Omega, f(x') \preceq f(x)\} \quad (6.2)$$

6.2.2. Frente de Pareto

Para uma MOP $f(x)$ e um Conjunto Ótimo de Pareto P^* , a frente de Pareto FP^* é definido pela equação (6.3)

$$FP^* = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x) | x \in P^*\} \quad (6.3)$$

6.2.3. Esquema de atribuição de afinidade.

A afinidade de cada anticorpo indica o nível de correspondência entre anticorpos e antígenos. É uma condição especial para MOP de calcular a afinidade de cada anticorpo, por existirem várias funções objetivo independentes que necessitam ser satisfeitas simultaneamente.

Uma nova abordagem combinada é desenvolvida para incorporar múltiplos objetivos em uma função que pode representar as características de cada função objetivo. Dois métodos são envolvidos na abordagem combinada: Método de ponderação aleatória e método de ponderação adaptativo (CHUN-HUA et.al., 2009).

Método de Ponderação aleatória: Pode manter a diversidade de anticorpos e melhorar a sua capacidade de reconhecer e eliminar mais tipos de antígenos que outros métodos. A pesquisa é guiada em varias direções ao mesmo tempo que faz com que as soluções de Pareto obtidas possam distribuir ampla e uniformemente a frente Pareto em uma grande região.

$$z = \sum_{k=1}^m w_k f_k(x) \quad (6.4)$$

$$w_k = r_k / (\sum_{j=1}^m r_j), \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (6.5)$$

onde r_k é um número aleatório não negativo, m é o número de funções objetivos, $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ é um vetor aleatório de dimensão m , z é a afinidade de algum anticorpo.

Embora o método de ponderação aleatório possa manter a diversidade de anticorpos, não pode produzir anticorpos que tenham afinidades elevadas.

Método de Ponderação adaptativa: torna melhor a utilização da informação de anticorpos em curso e ajusta o peso correspondente a cada função objetivo

independentemente, pode deixar o anticorpo adquirir elevada afinidade e reconhecer antígeno rapidamente, as equações deste método são a (6.6) e a (6.7)

$$z^+ = \{z_1^{max}, z_2^{max}, \dots, z_m^{max}\} \quad (6.6)$$

$$z^- = \{z_1^{min}, z_2^{min}, \dots, z_m^{min}\} \quad (6.7)$$

onde, z_k^{max} e z_k^{min} são o máximo e mínimo valor da k-ésima função objetivo na população atual. A z^+ e z^- são o máximo e mínimo ponto, através da qual um mini-hiperplano é definido incluindo todas as soluções na geração atual. A afinidade é calculada pela equação (6.8)

$$z = \sum_{k=1}^m v_k (z_k - z_k^{min}) = \sum_{k=1}^m (z_k - z_k^{min}) / (z_k^{max} - z_k^{min}) \quad (6.8)$$

Dependendo dos anticorpos iniciais e grandemente dos anticorpos atuais, este método tende a convergir para soluções locais não dominadas e não é fácil de preservar a diversidade dos anticorpos.

No início e no meio de iterações, a afinidade é calculada pela ponderação aleatória, para que possa manter a diversidade de anticorpos e deixar a evolução do sistema imunitário, no final da evolução, a afinidade é calculada pelo método de ponderação adaptativa que pode produzir anticorpos e adquirir alto nível de correspondência com antígenos rapidamente. Assim, o esquema de alocação de afinidade combinado é útil para manter a diversidade dos anticorpos e adquirir valor elevado de correspondência entre antígenos e anticorpos.

6.2.4. Conjunto de Pareto:

Em (CHUN-HUA et.al., 2009) propõe-se criar e manter o conjunto de Pareto. Depois de um repertório a ser inicializado antes da iteração, da solução ótima de Pareto no repertório, são selecionados de acordo com a definição 6.2.1 e 6.2.2 e copiados no Conjunto de Pareto P; depois de executar a hipermutação em G2, formando G3, é substituído G4 por G3, se forma a nova população G. G e P são colocados juntos para construir um conjunto temporário GP. As soluções ótimas de Pareto no GP são escolhidas de acordo com as definições 6.2.1 e 6.2.2, e

alocadas em P1. As soluções em P são substituídas pelas soluções em P1. As soluções em P são todas não dominadas em relação ao conjunto GP.

O máximo tamanho possível do conjunto P é $N_{\max}$. Se o tamanho de P1 (N_{cur}) é maior do que $N_{\max}$, a distância euclidiana d_i entre cada solução e outras são calculadas. A mais curta d_i de cada anticorpo é comparada, e os $N_{\text{cur}} - N_{\max}$ anticorpos com a menor distância euclidiana são apagados de P1. A distância d_i é calculado pela seguinte equação:

$$d_i = \min_j \left(\sum_{t=1}^m |f_t^i(x) - f_t^j(x)| \right), i, j = 1, \dots, N \quad (6.9)$$

onde: f_t é a t-ésima função objetivo, m é o número de funções objetivo e N é o número de soluções do ultimo conjunto de Pareto.

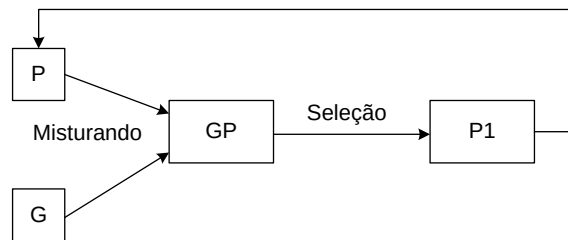


Figura 17: Procedimento de atualização do Conjunto P de Pareto.

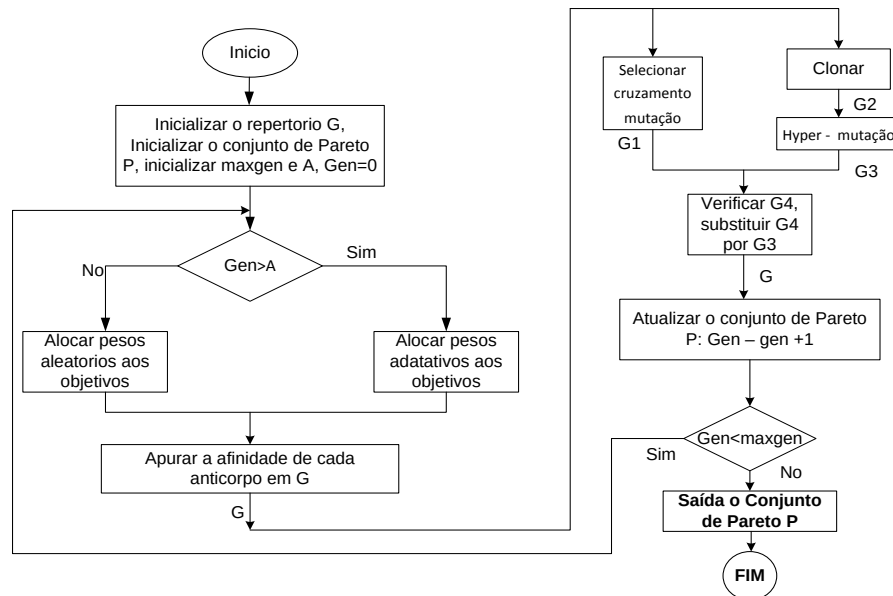


Figura 18: Fluxograma de SIA aplicado em MOP

Capítulo 7

7. Reconfiguração dos Sistemas Elétricos de Distribuição Radial.

7.1. Considerações.

7.1.1. Codificação

Uma das grandes dificuldades destes tipos de problemas é a definição ou codificação da população inicial, i.e., como encontrar ou construir uma população com alto grau de qualidade, de modo a otimizar o uso de recursos computacionais.

A qualidade desta população tem relação com sua diversidade e que esta população mantenha as características de radialidade das redes de distribuição.

O modo mais simples de codificar, nestes casos, o anticorpo, é por meio da codificação binária, num vetor de comprimento igual ao número de chaves do sistema. Neste vetor cada posição corresponde a uma e só uma chave, o vetor binário é apresentado pela equação (6.9)

$$X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]^T \quad (6.9)$$

Na equação 6.9, x_i é o indicador do estado da chave i , se o estado é 0 a chave esta aberta e 1 se a chave está fechada. A população inicial pode ser obtida gerando aleatoriamente vetores de dimensão N contendo zeros e uns. O problema aqui é que não há controle sobre a radialidade do sistema, produzindo uma alta ineficiência, tendo-se que verificar primeiramente a radialidade para realizar a obtenção das funções objetivo.

Para solucionar estes problemas foram propostas várias metodologias como, por exemplo, os números de Prüfer (HONG et.al., 2005) e o método do predecessor (SCARAMUTTI, 1999). Em ambos os casos ainda não há controle sobre a radialidade durante a construção dos indivíduos da população e é necessária a correção prévia antes de se obter as funções objetivo.

Como já apresentado, o algoritmo de Prim é utilizado para construir esta população inicial. Deste modo é obtida uma população inicial com alto grau de qualidade, descartando desde o princípio condições de ilhamento e anel.

Por exemplo, a seguinte tabela gera o grafo da figura 19. Os valores dos parâmetros do sistema correspondem à referência (MENDOZA, et.al., 2006).

Tabela 6: Pesos para o Sistema 14-Bus (ALONSO et.al., 2014)

Aresta	Peso	Aresta	Peso
1	0.4018	9	0.9027
2	0.0760	10	0.9448
3	0.2399	11	0.4909
4	0.1233	12	0.4893
5	0.1839	13	0.3377
6	0.2400	14	0.9001
7	0.4173	15	0.3692
8	0.0497	16	0.1112

Cada anticorpo tem um conjunto aleatório de pesos (nas arestas), de modo que a variedade e a qualidade na geração da população inicial são asseguradas.

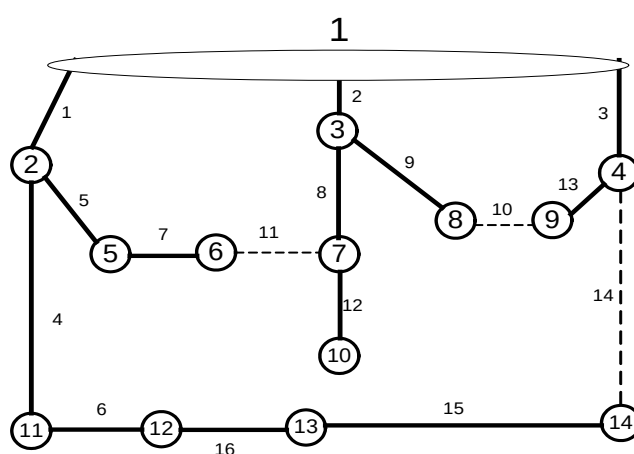


Figura 19: Floresta (rede de distribuição) gerada segundo a Tabela 6 (ALONSO et.al., 2014).

Em (CARRENO et.al., 2008) é apresentada uma metodologia de recombinação com o propósito de preservar a estrutura radial do Sistema de Distribuição. Semelhante a esta metodologia é proposto um mecanismo neste trabalho. Os Sistemas Imunológicos Artificiais não utilizam este operador (recombinação), em seu lugar é utilizada a hiperpermutação. Basicamente isto envolve mudanças aleatórias no estado das chaves. O operador de mutação toma aleatoriamente alguma chave e a submete à possibilidade de mudança de estado com uma probabilidade inversa à afinidade do correspondente anticorpo. Logo, a topologia obtida é analisada e eventualmente corrigida para manter o modo radial e evitar também isolamento de nós. Se um anel aparece, uma chave (do anel) é aberta aleatoriamente para manter a radialidade (sem deixar nenhum nó em ilha), ou em caso de isolamento a chave mais próxima à ilha é fechada sempre que isto não derive num anel.

7.1.2. Otimização Monoobjetivo.

Primeiramente para validar o modelo foi considerado um sistema com um único objetivo: reduzir perdas. Violações de tensão e carregamento de cabos são penalizadas de modo que estes resultados não sejam incluídos na solução.

Critério de Parada.

Incorpora-se dois critérios de parada para o caso de otimização monoobjetivo:

1. **Tolerância de erro** $\leq 1E-5$ (diferença entre uma solução e a seguinte): esta tolerância tem-se que manter pelo menos depois de 5 gerações. Esta consideração é feita de modo a evitar um truncamento cedo no processo de otimização e assim dar uma oportunidade adicional na busca de melhores soluções.
2. **Número de iterações**: sempre que a tolerância de erro não seja alcançada o processo iterativo acaba quando o número de iterações é alcançada.

7.1.3. Otimização Multiobjetivo / Cálculo do fitness

Para atribuir a afinidade é considerada o índice de dominância. Segundo este índice e as Regras de Pareto as soluções não dominadas terão melhor índice possível. No entanto para manter a diversidade de soluções, soluções não dominadas são consideradas até completar as dez melhores (dez melhores índices de dominância).

O fitness é calculado pela seguinte equação (7.1)

$$fitness = 1 - \frac{ID}{N - 1} \quad (7.1)$$

onde ID (índice de dominância) é obtido aplicando as regras de Dominância de Pareto, N é o número de soluções (anticorpos). Se o fitness é igual a um (ID=0, isto significa que no há melhor solução do que a atual), a solução é denominada Solução não Dominada.

De acordo como o texto apresentado, o problema de otimizar é formulado com a equação (7.2):

$$\min \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^l R_n I_n^2 \\ \sum_{i=1}^m \frac{P_i}{P_t} \end{array} \right\} \quad (7.2)$$

s.a.:

- Nível de Tensão nodal: $V_{\min} \leq V_m \leq V_{\max}$;

- $V_{\min} = 0.9 \text{ pu}$ e $V_{\max} = 1.05 \text{ pu}$
- Limite de carga do alimentador: $\text{Amp}_n \leq \text{Amp}_{n-\max}$
- Topologia radial
- Sem ilhamento.

onde:

n : Número da barra
l : Máximo Número de Barras.
Vm: Tensão Nodal no nó m.
Amp: Ampacidade, capacidade máxima de corrente.
Pi: Potência Interrompida “i”.
Pt: Potência total do Sistema.
m: Número total de interrupções.

Critério de Parada.

No caso multiobjetivo, o critério de parada é diretamente o número de iterações. No final das iterações é apresentado à Frente de Pareto.

Capítulo 8

8. Resultados.

8.1. Problema Monoobjetivo.

8.1.1. Sistema teste 14-barras e Análise de sensibilidade

O sistema de 14 barras (MENDOZA, et.al., 2006) foi utilizado para testar os algoritmos e para análise de sensibilidade, ou seja, para verificar como é que os resultados e o desempenho do algoritmo variam. Desse modo é possível orientar que valores dos parâmetros são adequados para que o algoritmo seja eficiente. A figura 20 corresponde à configuração inicial do sistema.

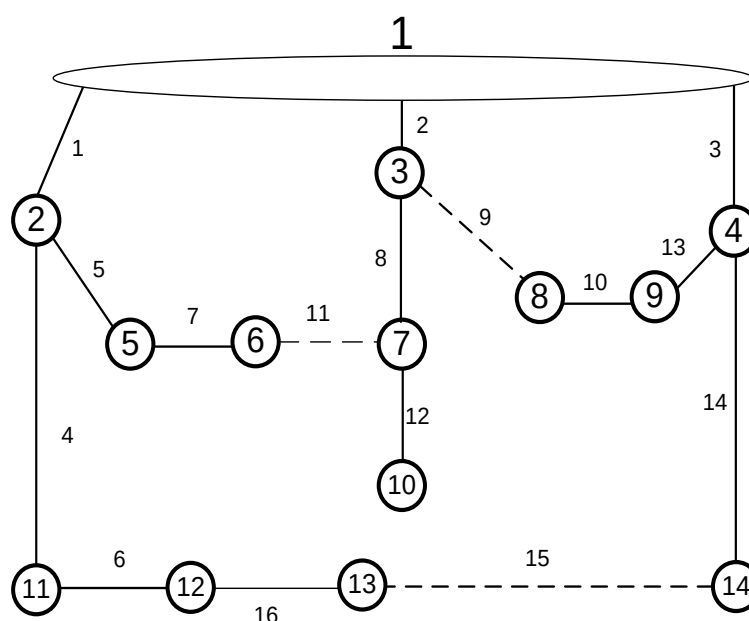


Figura 20: Grafo da Configuração Inicial Sistema 14 barras.

Para procurar ou inferir uma boa combinação de parâmetros foram feitos cálculos variando:

1. Tamanho da população inicial (em “steps” de 10 anticorpos até 40).
2. Número máximo de iterações (em “steps” de 10 até 40).
3. Quantidade de clones por anticorpo mais afim (em “steps” de 2 até 20).

Os resultados são resumidos na seguinte figura 21, a seguir

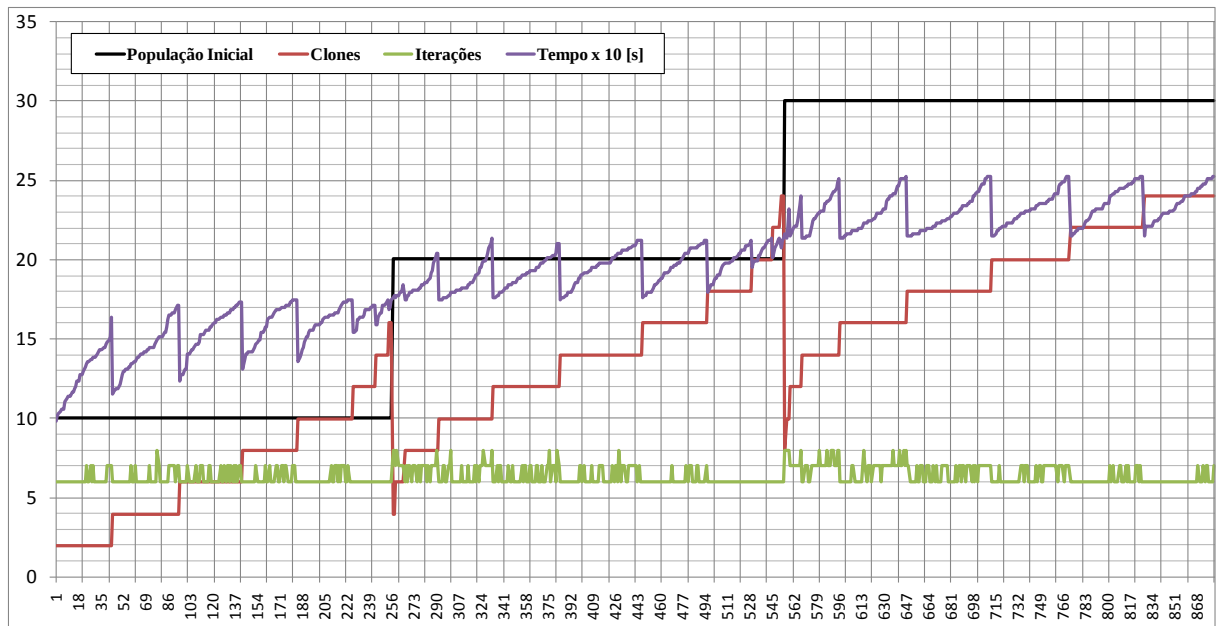


Figura 21: Tempo VS combinações de parâmetros Sistema 14 barras.

Na figura 21 pode-se observar a combinação de parâmetros para o valor máximo de redução de perdas obtidas (igual a 4,94 %). As iterações não superam 8, os clones alcançam um máximo de 24 e a população inicial alcança 30. Pode-se observar que na medida em que aumentam os valores dos clones e a população inicial também aumenta o tempo computacional, sem que o valor ótimo varie. Então tomar valores médios será suficiente para ter uma razoável expectativa de se alcançar a configuração ótima esperada. O tempo computacional se bem é irrelevante, pode ser considerado como critério de desempate, neste caso é considerado uma combinação de parâmetros próximos ao tempo médio, i.e.:

1. Pelo menos 20 anticorpos na população inicial (~110% na base de número de chaves).
2. Não menos de 14 clones (~90% na base de número de chaves).
3. Não menos de 10 iterações (~55% na base de número de chaves).

Com esses valores de referência é obtida a seguinte configuração ótima:

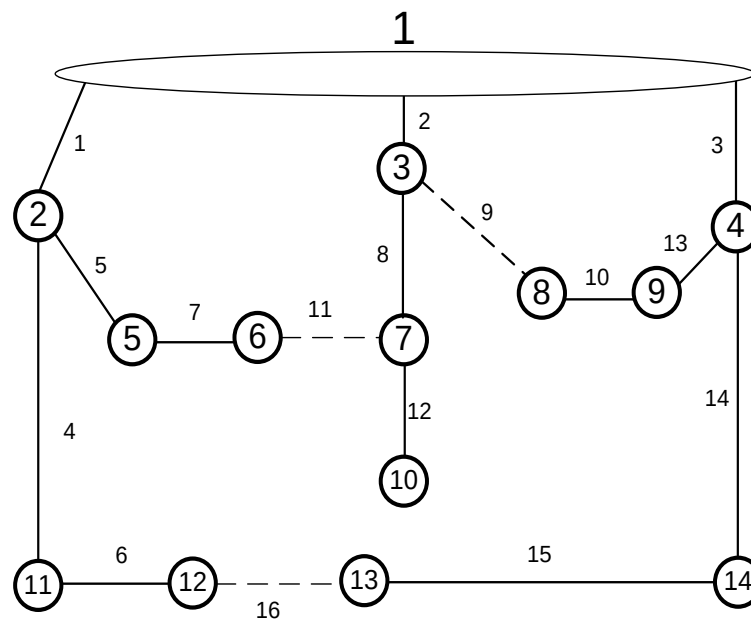


Figura 22: Grafo da Configuração Ótima Sistema 14 barras.

As linhas tracejadas correspondem às chaves abertas. No processo de reconfiguração as perdas totais diminuíram em 4,94 % (66kW). Com esta seleção dos parâmetros foi alcançada uma convergência rápida e adequada.

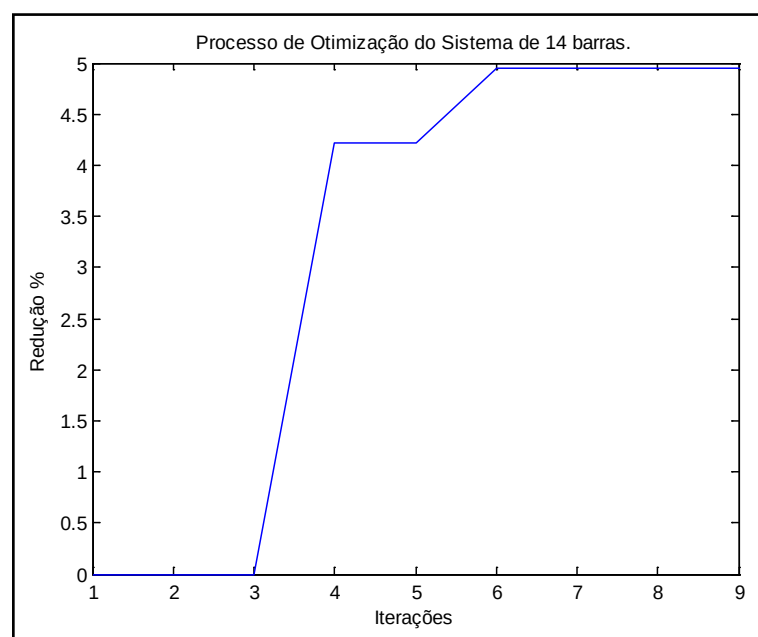


Figura 23: Evolução da Redução das Perdas durante o processo iterativo para o Sistema de 14 barras.

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

O Sistema Elétrico de Distribuição do Paraguai é formado por alimentadores de 23[kV] de tensão fase-fase. Estes alimentadores em geral, podem ter uma combinação de linhas áreas (linhas convencionais ou protegidas) e linhas subterrâneas. A topologia destas redes inclui ramais trifásicos e monofásicos. O caso em estudo real corresponde a uma rede de distribuição radial com recursos. A característica radial principalmente se deve ao conjunto de proteção por reles que restringe a função de sobrecorrente e à quantidade de ramificações o que limita a possibilidade de seletividade de outras funções de proteção. Em consequência, não é possível praticar paralelismo entre alimentadores de maneira permanente, embora possa ser praticado o paralelismo durante um breve tempo de maneira a transferir cargas (sem cortes), mas posteriormente deve-se voltar à radialidade da rede. Outra limitação é a falta de padrão nas potências dos transformadores, o que impede atender as condições de paralelismo entre subestações, em alguns casos inclusive em uma mesma subestação que possui vários transformadores.

Redes de Distribuição do tipo Urbano.

Redes urbanas geralmente possuem linhas trifásicas e quase em nenhum caso estão presentes redes ou transformadores de distribuição monofásicos.

Com a mudança de tecnologia, os grandes centros de consumo de energia têm sido beneficiados pela instalação de chaves automáticas que operam em forma telecomandada desde o centro de controle de distribuição. Estes equipamentos podem também apresentar certos tipos de automatismo, ou seja, por exemplo, em face da ocorrência de uma falha na rede, é possível a identificação dos setores em falha, podendo ser isolado tais setores por meio de funções de religamento.

As redes destes centros de consumo estão compostas geralmente por tipos de linha mais confiáveis como, por exemplo, redes subterrâneas e, principalmente, por linhas protegidas. Este tipo de estrutura vem substituindo as redes aéreas convencionais e representa um custo intermediário entre estes e as linhas subterrâneas.

Redes de Distribuição do tipo Rural.

As redes de distribuição das áreas rurais estão caracterizadas pela existência de alimentadores de importante distância, chegando a alguns casos até 200 km no ramal principal. Outra característica é o desequilíbrio entre as demandas das fases, devido principalmente aos ramais monofásicos e aos transformadores monofásicos em ramais

trifásicos. O tipo de linha presente é geralmente convencional aérea com, geralmente, poucos recursos. Para manter os níveis adequados de tensão em linhas com estas características são instalados reguladores de tensão (geralmente reversíveis) em alguns setores. De modo a garantir a disponibilidade do suprimento (i.e. índices de continuidade de serviço adequados), são instalados em setores com alta taxa de falha: religadores automáticos e seccionalizadores mono e trifásico.

Estes tipos de rede ainda possuem escasso automatismo, porém já existem projetos para instalar tecnologias no futuro.

8.1.3. Sistema Alimentador de 23 [kV] CBO-01.

O caso em estudo corresponde a um alimentador típico da área urbana e também rural. Áreas rurais têm transformadores de distribuição monofásicos e também ramais monofásicos. Devido a isto, estes alimentadores apresentam desequilíbrios importantes nas correntes das fases. Este alimentador possui 74 barras de carga, 18 chaves, 15 ramais e vários anéis (abertos) como recurso. Este alimentador é um de três alimentadores da subestação Coronel Bogado, que fornece de energia elétrica a uma pequena população de 22.000 pessoas, sendo a demanda média utilizada no teste de 98 A por fase com um fator de potência média de 0,92. O diagrama unifilar e dados deste alimentador podem ser encontrados no Anexo A.

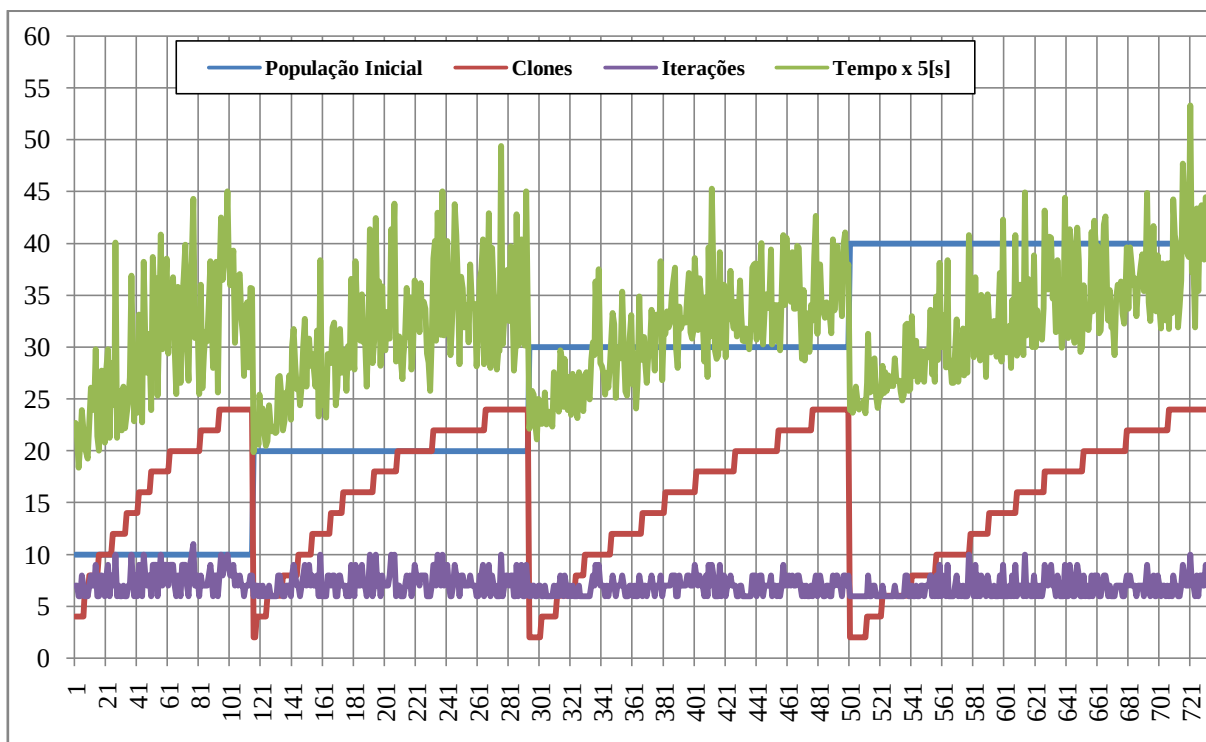


Figura 24: Tempo VS combinações de parâmetros CBO-01.

Uma análise semelhante (sistema de 14 barras) pode ser utilizada para estudar as combinações de parâmetros mais adequadas. Por um lado, segundo a figura 24, até combinações pouco conservadoras levam o método à convergência num valor ótimo, mas assegurar que o valor seja alcançado é uma questão de compromisso. Atendendo a isto, conforme a análise feita, a combinação mais exitosa (moda) têm sido aquela em que se utilizou 20 anticorpos na população inicial e 22 clones (valores próximos em porcentagem ao caso anterior). Isto pode ser resumido do seguinte modo:

1. Pelo menos 20 anticorpos na população inicial (~110% na base de número de chaves).
2. Não menos de 22 clones (~120% na base de número de chaves).
3. Não menos de 10 iterações (~55% na base de número de chaves).

É importante assinalar que o algoritmo limita a 5 a quantidade de vezes que a solução pode permanecer dentro de um entorno em relação à solução anterior, logo, o algoritmo considera que a solução ótima foi alcançada. Sem esta restrição as iterações podem aumentar e o número de clones diminuir, invertendo a quantidade de clones e iterações necessárias para ter suficiente confiança na procura da solução ótima.

A partir dos os resultados da análise anterior é, então efetuada a otimização. Os resultados mostram (figura 25) que, por meio da mudança de três chaves na nova configuração, as perdas são reduzidas em **6.14% (6.8 kW)**.

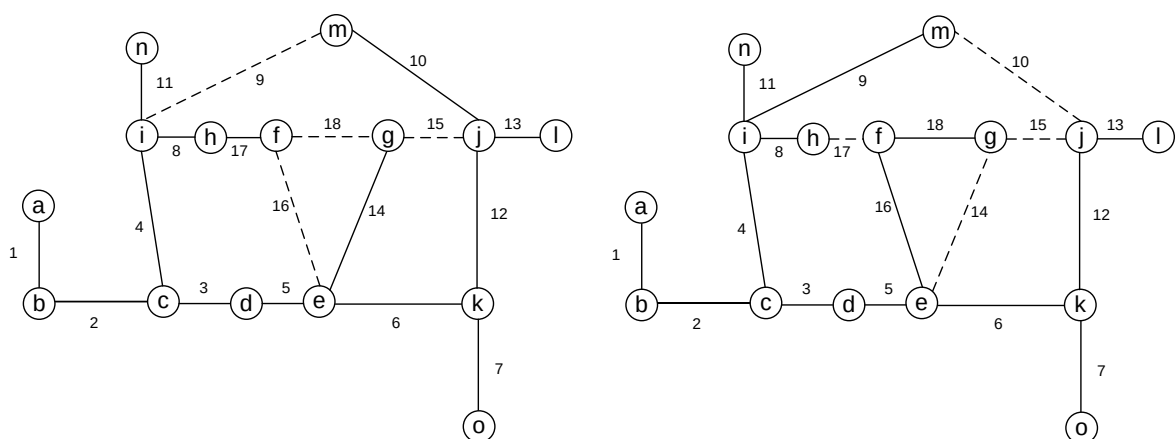


Figura 25: Grafos da Configuração inicial (esquerda) e configuração ótima (direita) do alimentador 23kV CBO-01.

Na figura 26 observa-se como mudaram as soluções até alcançar a solução ótima.

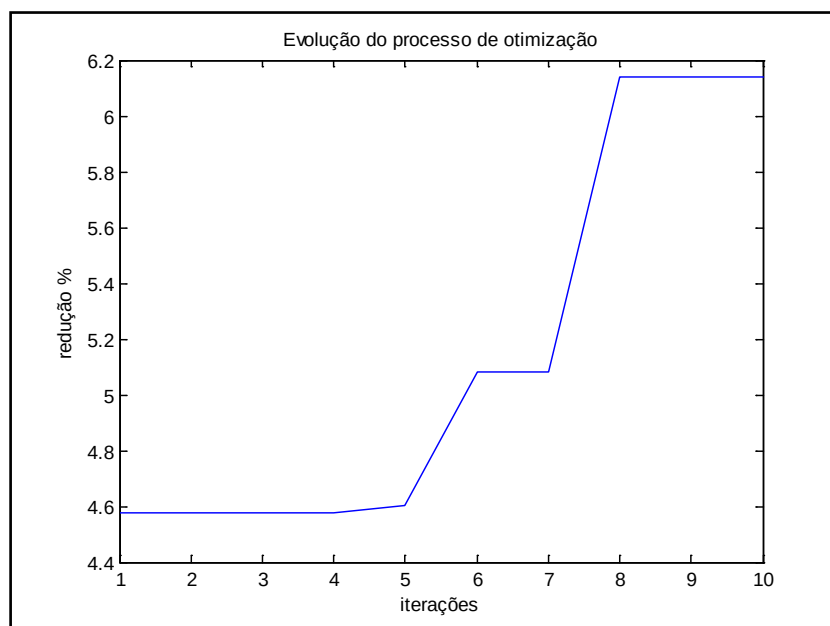


Figura 26: Evolução da Redução das Perdas durante o processo iterativo para o Sistema de 23[kV]: CBO-01.

8.1.4. Sistema de Distribuição do Micro centro da Cidade de Encarnação

A Cidade de Encarnação está situada a 360 km ao sul de Assunção - Capital do Paraguai. É um importante centro comercial na divisa com a República Argentina; há uns anos também vem sendo reconhecida como cidade turística pelas infraestruturas desenvolvidas como compensação pelo território inundado pela Central Hidrelétrica de Yacyreta, que inclui praias de rios e vários complexos e atrativos. A rede em questão corresponde a 3 alimentadores de 23[kV] da subestação Encarnação e fornece energia a uma população de 118.000 habitantes segundo o censo 2011. Para os cálculos foram utilizadas as seguintes demandas (média) dos alimentadores:

1. ENC 1: 83,7 [A] fp: 0,92.
2. ENC 2: 137,5 [A] fp: 0,92.
3. ENC 3: 137,8 [A] fp: 0,92.

A rede (ver anexo B) possui 91 chaves, 76 setores e 206 barras de carga. Podemos 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.

Os valores dos parâmetros foram escolhidos utilizando os critérios anteriores, i.e.:

1. 100 anticorpos na população inicial (~110% na base de número de chaves).
2. 100 clones.
3. 25 iterações.

Com esses parâmetros foi obtida uma redução de **6,9391 % (27,3 kW)** em total das perdas do sistema em relação à condição inicial. A figura 27 mostra a evolução da redução (em porcentagem) das perdas conforme são executadas as iterações. O tempo computacional, por enquanto, é considerável (21 min.), podendo reduzir o tempo (reduzindo os valores dos parâmetros) e obter melhorias (redução de perdas), mas não da ordem do resultado obtido. O planejamento da operação diária pode ser feita com suficiente antecipação, então não é determinante a questão do tempo computacional e pode-se considerar que os resultados são satisfatórios (considerando inclusive o tempo computacional utilizado) com os parâmetros escolhidos.

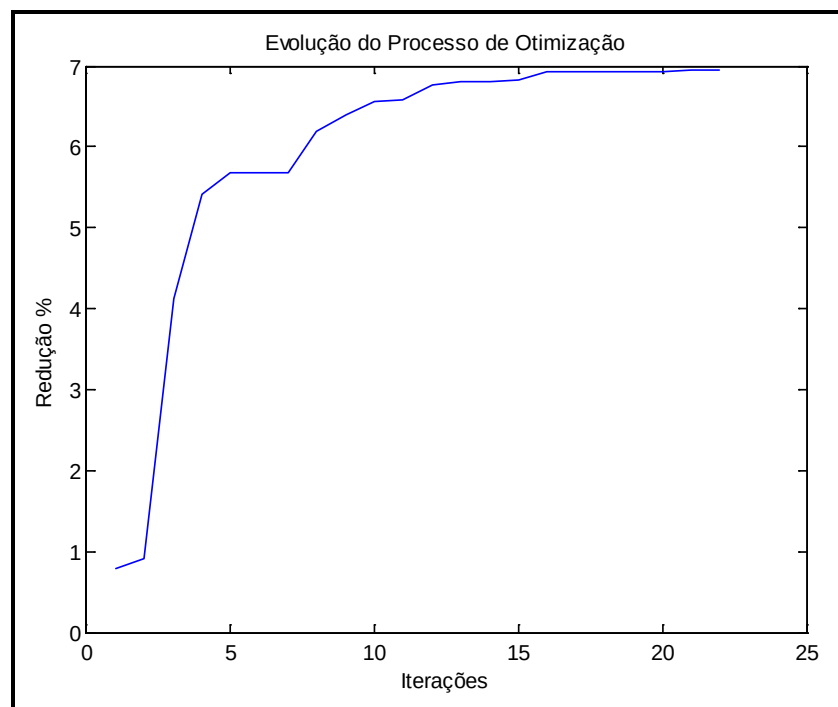


Figura 27: Evolução da Redução das Perdas durante o processo iterativo para o Sistema do Micro Centro de Encarnação

Torna-se interessante observar como o SIA procura a melhoria do resultado em cada iteração, o que demonstra a eficiência do algoritmo.

No total houve 14 mudanças de posição de chaves de aberta para fechada e vice-versa (figura 28). Os dados dos alimentadores estão no Anexo B. Linhas tracejadas indicam chaves abertas.

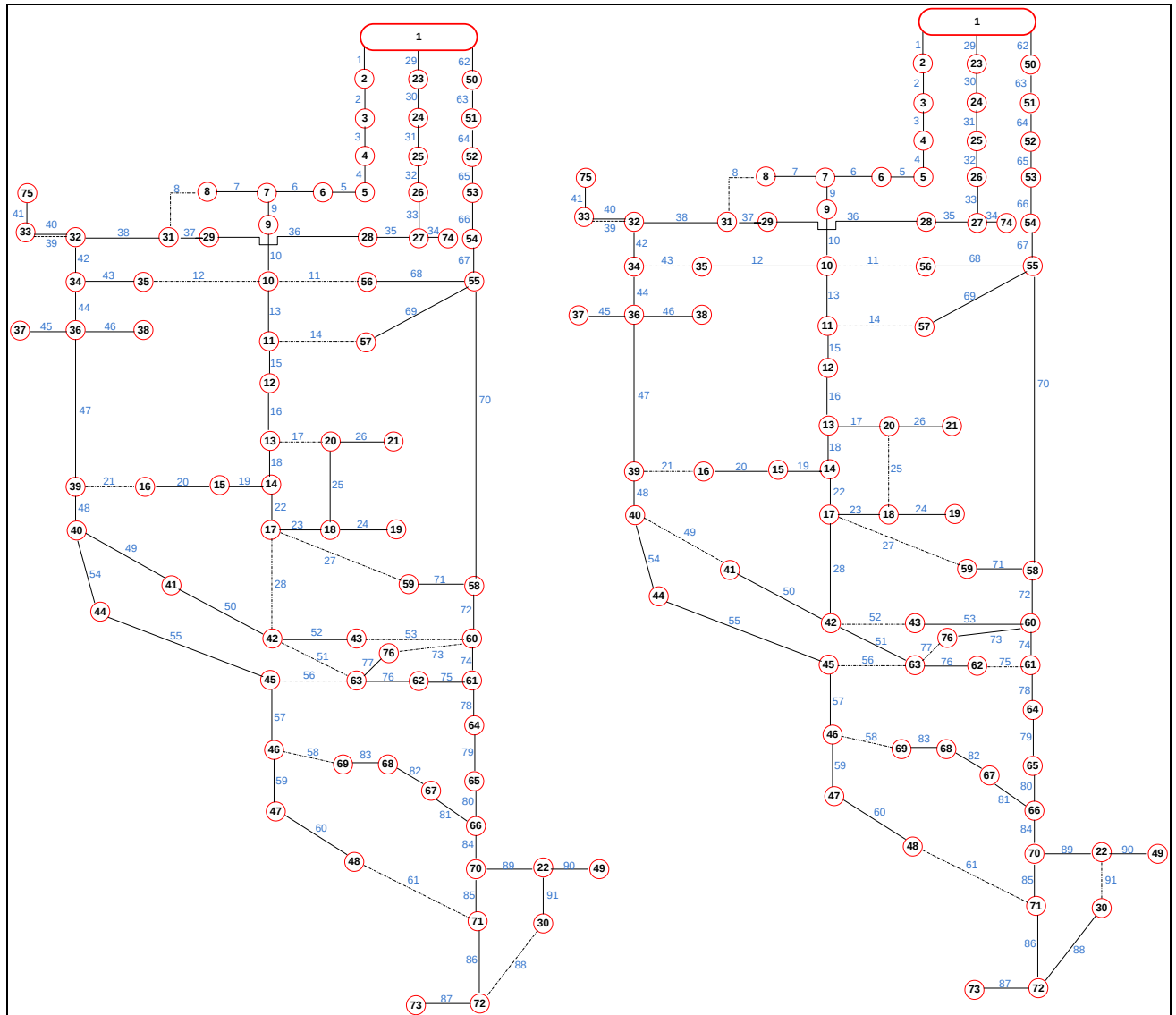


Figura 28: Grafos da Configuração inicial (esquerda) e configuração ótima (direita) do Micro Centro de Encarnação.

8.2. Problema Multiobjetivo.

8.2.1. Sistema teste 14-barras

Para o teste foram utilizadas algumas variações nos parâmetros que foram utilizados no caso monoobjetivo. Em particular o número de iterações, com o intuito de abordar a variedade de soluções. O número de iterações foi aumentado até alcançar o dobro do caso monoobjetivo com o objetivo de assegurar soluções ótimas. Neste caso não é possível utilizar a tolerância de erro entre soluções como critério de parada.

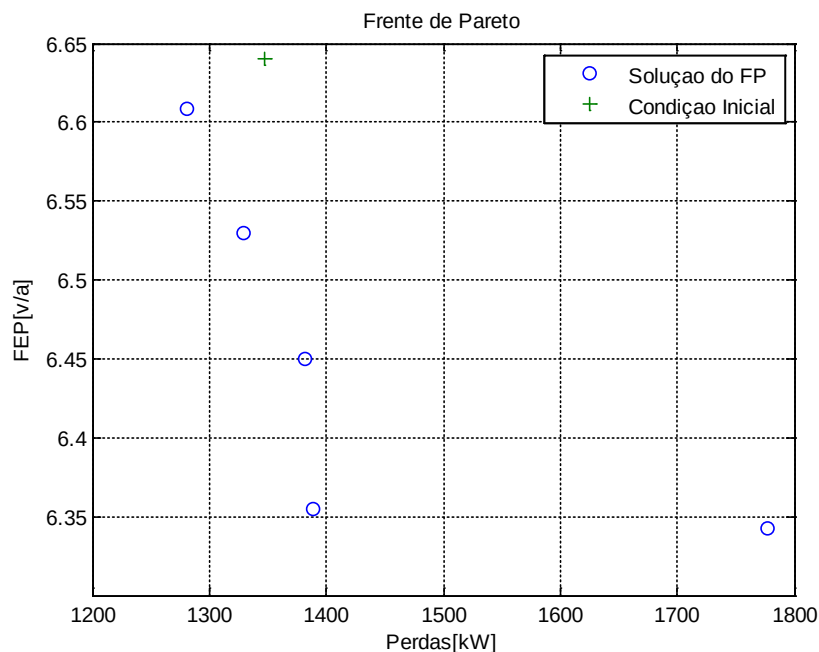


Figura 29: Frente de Pareto de Soluções do Sistema de 14 barras.

A figura 29 mostra como o SIA alcançou melhorias em relação ao melhor anticorpo da população inicial, isto indica que o SIA conseguiu evoluir para soluções não dominadas. A frente de Pareto inicial (população inicial de anticorpos) corresponde a os pontos indicados com cruz verde, e a frente de Pareto final esta indicado com círculos azuis.

A Tabela 7 mostra os Anticorpos da Frente de Pareto. Pode-se notar que uma das soluções da Frente de Pareto corresponde ao caso monoobjetivo o que permite dizer que a metodologia também reproduz a solução do caso anterior.

Tabela 7: Chaves e posições correspondentes à Frente de Pareto da Figura 29.

Nº de Chave					
NF	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	3
	4	4	4	4	4
	5	5	5	6	5
	6	6	6	7	6
	7	7	8	8	8
	8	8	10	10	10
	9	10	11	11	11
	10	12	12	12	12
	12	13	13	13	13
	14	14	14	14	14
	15	15	15	16	16
NA	11	9	7	5	7
	13	11	9	9	9
	16	16	16	15	15

8.2.2. Sistema Alimentador de 23kV CBO-01.

Identicamente ao Sistema de 14 barras foram utilizados parâmetros similares ao caso monoobjetivo, mas com o dobro de iterações.

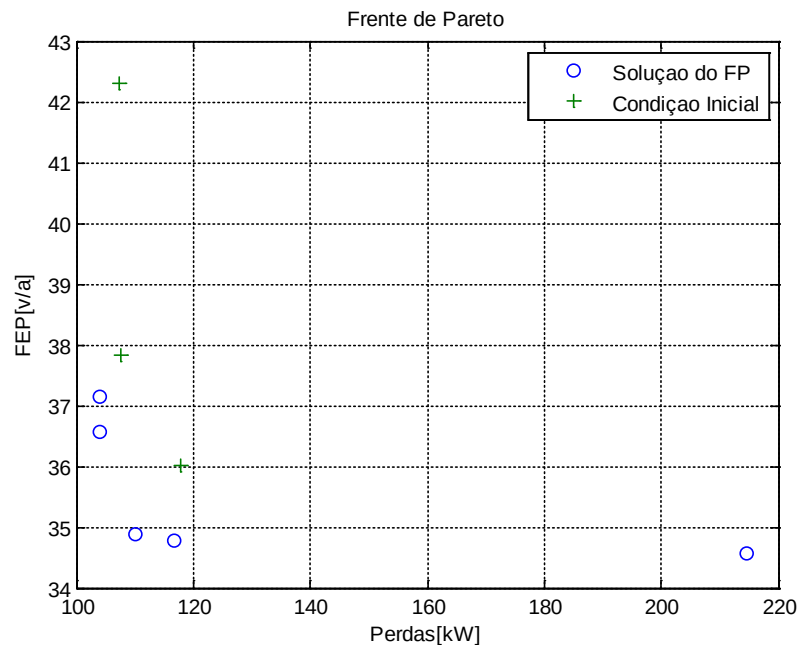


Figura 30: Frente de Pareto de Soluções do Sistema Alimentador de 23[kV] CBO-01

Neste sistema mais complexo (Alimentador de 23[kV] CBO-01) fica ainda mais claro como as soluções evoluem para um “ótimo” conforme as regras de Pareto. Observa-se como aparece também a solução correspondente ao caso monoobjetivo.

Tabela 8: Chaves e posições correspondentes ao Frente de Pareto da Figura 30.

		Nº de Chave				
NF	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2
	3	3	3	3	4	4
	4	4	4	4	5	5
	5	5	5	5	6	6
	6	6	6	6	7	7
	7	7	7	7	9	9
	9	9	9	8	10	10
	11	11	11	9	11	11
	12	12	12	11	12	12
	13	13	13	12	13	13
	14	15	16	13	14	14
	17	17	17	16	17	17
	18	18	18	18	18	18
NA	8	8	8	10	3	3
	10	10	10	14	8	8
	15	14	14	15	15	15
	16	16	15	17	16	16

Tabela 9: Comparativo entre a Condição Inicial e as soluções do FP.

Frente de Pareto		
Redução %	FEP [v/ano]	Perdas [kW]
0,52	34,88	110,19
(5,45)	34,79	116,81
6,14	36,57	103,98
6,14	37,16	103,97
(93,75)	34,57	214,63
(93,75)	34,57	214,63
Condição Inicial	40,46	110,78

Segundo a Tabela 9, há 3 soluções nas quais tem-se melhorado as perdas e 3 soluções onde tem-se piorado. Nas 6 soluções vê-se melhoria no índice de continuidade (FEP). Então, corresponde a uma decisão gerencial do que priorizar: se as perdas ou índice de continuidade.

8.2.3. Sistema de Distribuição do Micro centro da Cidade de Encarnação:

O Sistema do Micro Centro da Cidade de Encarnação como dito anteriormente é um sistema de grande porte. Isto coloca a prova a efetividade do algoritmo, devido à grande quantidade de chaves e circuitos presentes no sistema. Neste caso os parâmetros escolhidos para realizar o teste foram:

1. 100 anticorpos na população inicial (~110% na base de número de chaves).
2. 50 clones.
3. 100 iterações.

A tabela 10 mostra os resultados obtidos. Neste caso a Frente de Pareto é composta por 13 Soluções Não Dominadas. Destas soluções, 9 apresentam melhorias nas perdas, e todas elas apresentam melhores índices de continuidade.

Tabela 10: Comparativo entre a Condição Inicial e as soluções do FP.

Frente de Pareto		
Redução %	FEP [v/ano]	Perdas [kW]
6,26	2,52	368,78
6,86	2,54	366,43
5,11	2,50	373,32
6,71	2,53	367,03
7,24	2,55	364,94
7,17	2,54	365,24
7,59	2,56	363,55
7,40	2,56	364,32
1,38	2,48	388,00
(0,68)	2,47	396,12
(0,19)	2,48	394,19
(31,48)	2,44	517,27
(29,21)	2,48	508,34
Condição Inicial	2,86	393,42

Outra questão interessante está como em partindo de poucas soluções não dominadas o algoritmo alcançou as soluções da frente de Pareto, como pode ser visto na figura 31. Isto é sinal da capacidade de busca do SIA e é apropriada para este tipo de problema combinatório.

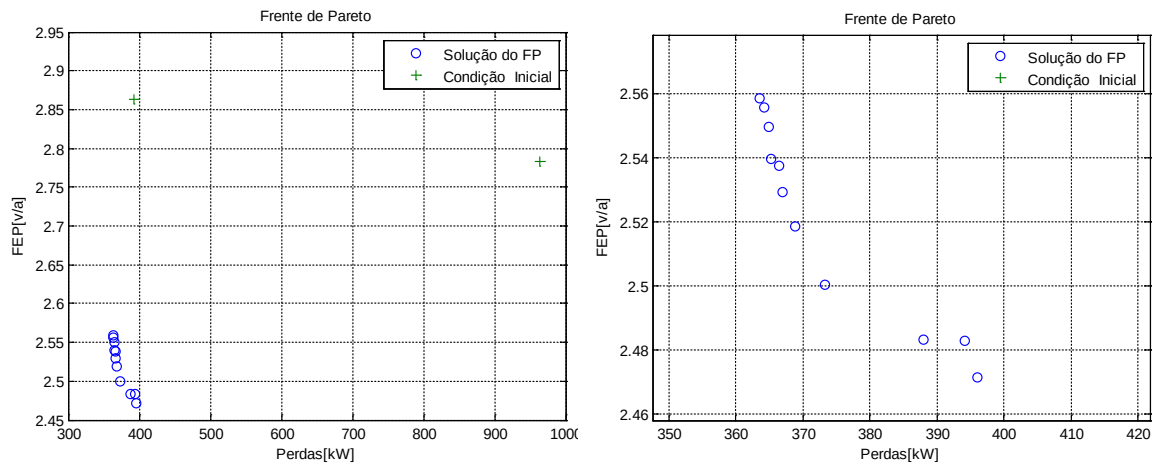


Figura 31: Frente de Pareto de Soluções do Sistema Micro Centro de Encarnação.

Na figura 31 como o caso anterior, a frente de Pareto inicial (população inicial de anticorpos) corresponde a os pontos indicados com cruz verde, e a frente de Pareto final esta indicado com círculos azuis. A figura da direita é uma ampliação da frente mostrado na figura da esquerda.

Outra questão importante é que o algoritmo alcançou soluções levemente melhores em relação às perdas comparado com o caso monoobjetivo. Este fato se deve a que, no caso Multiobjetivo, o único critério de parada considerado é o número de iterações. Isto permite maiores oportunidades de melhoria dos objetivos, mas consome tempo computacional que pode ser economizado com o critério utilizado no caso monoobjetivo. O inconveniente com dito critério é que se corre o risco de perder boas ou melhores soluções devido a uma convergência prematura.

Capítulo 9

9. Conclusões.

A economia atual e as mudanças do setor elétrico levam às concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica a otimizar recursos de modo a tornar mais eficiente a rede sob responsabilidade e assim maximizar resultados econômicos. Neste plano, reduzir perdas é um dos objetivos. Outra questão de relevância é que a operação da rede de distribuição deve manter níveis adequados de confiabilidade e continuidade do serviço, sendo esta uma exigência dos órgãos de regulação com aplicação de penalidades se os níveis permitidos são ultrapassados. Portanto, o problema não é simplesmente reduzir perdas, já que uma mudança da topologia da rede elétrica pode trazer problemas de continuidade pela interação de ramos com maiores taxas de falhas e ramos com menores taxas.

Os avanços da tecnologia tornaram a rede de distribuição mais inteligente, com técnicas que permitem encontrar a configuração ótima e que podem ser utilizadas na programação diária, até mesmo na programação horária. Se a rede é suficientemente automatizada, estas operações podem ser executadas pelo DMS (*Distribution Management System*) do SCADA no Centro de Controle sem a intervenção direta humana. Os chaveamentos, neste caso, poderão ser feitos por meio de chaves automáticas.

Uma limitação importante destes estudos é o conhecimento da carga a considerar no momento dos cálculos de fluxo de potência. O presente trabalho considera que essa informação é conhecida ou pode ser estimada. No entanto, na data atual, essa informação é disponível em Sistemas de Gestão Integral de Distribuição na Base de Dados (BD) Comercial, por meio de medições em tempo real, na base de dados históricos, etc., podendo serem compiladas e utilizadas no processo de cálculo. Geralmente as consultas à BD do sistema comercial são feitas em horário de menor transação eletrônica, devido ao esforço exigido dos servidores computacionais.

A Reconfiguração de Redes de Distribuição é um problema multiobjetivo de programação não linear, N-dimensional (dependente da complexidade da rede) e, em geral, métodos tradicionais não são de utilidade na busca de uma solução ótima. Heurísticas, no entanto, apresentam uma alternativa na procura de soluções como no caso em estudo. Os Sistemas Imunológicos Artificiais demonstram ser uma ferramenta muito efetiva na busca de mínimos globais. Mas como o algoritmo usa transições probabilísticas e não regras

determinísticas, em realidade a efectividade desta tecnica depende do correcto ajuste dos parâmetros o que aumentará a “probabilidade” de encontrar este mimimo global.

Os Sistemas Imunológicos Artificiais têm sido utilizados na área de Engenharia Elétrica com sucesso segundo as referências apresentadas. Uma questão notável é a reduzida quantidade de parâmetros necessários para obter bons resultados, somado a isto a simplicidade dos operadores. A rigor, só é necessário um operador, reduzindo sensivelmente a complexidade do algoritmo. Além disto, a implementação multiobjetivo por meio das Regras de Pareto, fornecem resultados interessantes, com um conjunto de soluções que podem ser escolhidas em concordância com a política de operação da concessionária. Neste caso a empresa pode privilegiar redução de perdas elétricas ou redução de valor do indicador de continuidade ou ainda programar uma solução intermediária, em relação à condição inicial.

A estratégia de otimização é baseada na mudança do estado das chaves seccionadoras e o universo de possíveis soluções varia exponencialmente com o número de chaves. Neste universo só um pequeno conjunto de indivíduos ou anticorpos pode-se qualificar como provável solução. Técnicas heurísticas ou meta heurísticas como AG, Colônia de formigas ao igual que os SIA, utilizam um conjunto de indivíduos conhecido como população inicial. Esta população inicial corresponde a um ponto de partida destes algoritmos e são gerados por processos aleatórios. A eficiência na procura de uma configuração ótima depende de como são gerados os indivíduos desta população, neste caso, como são gerados os anticorpos de primeira geração. A restrição sobre a radialidade das redes de distribuição leva a descartar anticorpos com anéis ou ilhamento. Estas restrições são satisfeitas com a técnica desenvolvida neste trabalho (baseada no Algoritmo de Prim), o qual é um importante aporte ao estado de arte do problema. Não foi encontrada referência na qual dito algoritmo seja utilizada na geração da população inicial.

A metodologia é aplicada em três sistemas: um sistema teste (MENDOZA, et.al., 2006) e dois sistemas reais. O sistema do alimentador de 23[kV] CBO-01 e do Micro Centro da cidade de Encarnação correspondem a sistemas de grande porte. Em todos os casos, encontro-se uma configuração melhor do que a inicial, o que com certeza prova que a metodologia é válida.

Das combinações de parâmetros analisados, os resultados apresentam melhoria comparativa em função ao tamanho dos clones e iterações. Isto é consistente com as características dos sistemas imunológicos dos vertebrados, pelo qual, a expansão clonal e a

expansão somática permitem a geração de células imunes de alta afinidade. Como resultado das análises de sensibilidade realizadas, resulta vantajoso primeiramente escolher uma quantidade de clones adequada (suficientemente grande) e logo o tamanho das iterações pode ser mais conservador. Com isto, é obtida a maturação da afinidade como consequência da edição e mutação dos anticorpos logo de repetidas iterações.

A eleição de clones e iterações grandes torna o processo demorado, mas as sensíveis melhorias nos resultados justifica essa escolha. O tempo computacional não é relevante já que as reconfigurações podem ser feitas com suficiente antecipação.

Finalmente, este trabalho demonstrou que por meio do planejamento de curto prazo é factível reduzir principalmente perdas 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.

9.1. Temas para trabalhos futuros.

Programação Diário-horária utilizando a Curva de Carga Estimada: o presente trabalho considera um estado determinado (fixo) de demanda, a mesma metodologia pode ser estendida utilizando a Previsão de Demanda (por exemplo, estimada por meio de redes neurais artificiais) para a programação da rede do dia seguinte. Para este trabalho é importante considerar computação paralela para realizar os cálculos devido à quantidade de esforço computacional pode ser importante. Isto não deve ser problema, já que os centros de controle dispõem de infraestrutura necessária e os cálculos poderão ser feitos em horário de menor tráfego informático.

Alocação Otimizada de Chaves Automáticas: o custo das chaves automáticas e a implementação da comunicação entre estas e os concentradores de distribuição, limitam a extensão do uso destes equipamentos em toda a rede por questões econômicas e financeiras das Concessionárias de Energia. Até agora o custo de operação não foi levado em conta nem a instalação e manutenção das chaves automáticas, portanto, uma metodologia que minimize o custo relacionado com a instalação das chaves automáticas, que maximize a operabilidade da rede, que reduza a indisponibilidade da rede (DEC – Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora) e minimize os custos operativos pode ser implementada.

Combinar os resultados de reconfiguração incluindo alocação de banco de capacitores e reguladores de tensão: a mesma metodologia de reconfiguração pode ser combinada com uma metodologia de alocação ótima de banco de capacitores e reguladores de tensão com o intuito de melhorar os níveis de tensão e reduzir as perdas.

Recomposição de Redes de Distribuição após falta: logo após a ocorrência de uma falta, e 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 avaliar se: restabelecer o sistema, isolando a falta e transferindo a carga do alimentador afetado para outros alimentadores, ou simplesmente aguardar que a falta seja eliminada com a reparação dos ramos afetados, para logo, energizar o circuito afetado. Em muitos casos nem toda a carga pode ser restabelecida, isto se deve à capacidade dos circuitos vizinhos limitados pela bitola do condutor, pela corrente de *pick up* do disjuntor à montante e mesmo pelas condições desfavoráveis de tensão que pousam acontecer como consequência da mudança da topologia da rede. Utilizando uma metodologia semelhante ao atual trabalho é viável estabelecer uma ferramenta que leve em conta estas restrições e procure uma sequência de operações para restituir a maior quantidade de ramos do circuito afetado no menor tempo possível e sem violar os limites estabelecidos. A configuração de emergência resultante do algoritmo deve permitir isolamento do ramo com falta ou mais ramos inclusive.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ABDEL-AKHER, M.; NOR, K. M.; ABDUL RASHID, A. H.; “Improved Three-Phase Power-Flow Methods Using Sequence Components,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005.

ABDEL-AKHER, M.; NOR, K. M.; ABDUL RASHID, A. H. “Development of Unbalanced Three-Phase Distribution Power Flow Analysis Using Sequence and Phase Components,” 12th International Middle-East Power System Conference MEPCON, Aswan, Egypt, 2008.

ABDUL HAMID, M. B.; ABDUL RAHMAN, T. K.; “Short Term Load Forecasting Using an Artificial Neural Network Trained by Artificial Immune System Learning Algorithm,” 12th International Conference on Computer Modeling and Simulation, Cambridge United Kingdom, 2010.

ALONSO F. R., OLIVEIRA D. Q., DE SOUZA A. C. Z.; LOPES, B.I.L. “Distribution System Reconfiguration Using Artificial Immune Systems,” North American Power Symposium (NAPS), Pullman – WA, 2014.

ALONSO F. R., OLIVEIRA D. Q., ZAMBRONI, A. C.; “Artificial Immune Systems Optimization Approach for Multiobjective Distribution System Reconfiguration ,” IEEE Transactions on Power Systems, vol.30, pp. 840-847, 2015.

ARAVINDHABABU, P.; ASHOKKUMAR, R.; “A robust decoupled power flow for distribution systems”. Energy Conversion and Management, No. 52, pp. 1930-1933, 2011.

BABU R., P.; VANAMALI, M. P. R.; KUMAR, M. P. V. V. R.; SAI HEMACHANDRA, V.; "Network Reconfiguration in Distribution Systems Using L-E Method," 2010 Annual IEEE India Conference (INDICON 2010), pp. 1-4, Kolkata, India 2010.

BARBOSA, D. S., A.; “Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição: Aplicações Práticas,” Dissertação (Mestrado) Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, Dezembro 1995.

BARBOSA, D. A.; HONÓRIO, L. M.; LEITE DA SILVA A. M.; “Sistema Imunológico Artificial orientado via gradiente para resolver problemas de fluxo de potência,” XVII CBA Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora, MG/Brasil 2008.

BENTO, E. P.; KAGAN, N.; "Algoritmos Genéticos e Variantes na Solução de Problemas de Redes de Distribuição," SBA Automação & Controle, vol. 19, no. pp. 302-315, 2008.

BERNADON, D. P.; GARCIA, V. J.; FERREIRA, A. S. Q.; CUNHA, L. N.; "Multicriteria Distribution Network Reconfiguration Considering Subtransmission Analysis," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2684-2691, 2010.

BROADWATER, R.P.; CHANDRASEKARAM, A.; HUDDLESTON, C.T.; KHAN, A. H.; "Power Flow Analysis of Unbalanced Multiphase Radial Distribution Systems", ElectricPower System Research, vol. 14, 1988.

CARRENO, E. M., ROMERO, R.; PADILHA-FELTRIN, A.; "An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 4, pp. 1542-1551, 2008.

CASTRO, L. N. DE; VON ZUBEN, F. J.; "Artificial Immune Systems: Part I – Basic Theory and Applications," Technical Report, DCA-RT 01/99, UNICAMP, Brasil, 1999.

CASTRO, L. N. DE; VON ZUBEN, F. J.; "Learning and optimization using the clonal selection principle," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 3, no. pp. 239-251, 2002.

CHAO, R.; TAN, Y.;"A Virus Detection System Based on Artificial Immune System," International Conference on Computational Intelligence and Security, Beijing China, 2009.

CHARTRAND, G., LESNIAK, L.; "Graphs & Digraphs," Editora CRC Press, 2004.

CHEN, T. H.; CHEN, M.S.; HWANG, K. J.; KOTAS, P; CHEBLI, E. A.; "A Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp. 1146-1152, 1991.

CHUN-HUA L.; XIN-JAN Z.; WAN-QI H.; GUANG-YI C.; "A novel Multi-Objective Optimization Algorithm Base on Artificial Immune System," Fifth International Conference on Natural Computation, Tianjin, China, 2009.

CORTES R., D.; "Un Sistema Inmune Artificial para resolver el problema del Job Shop Scheduling," Dissertação (Mestrado) - Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México D.F., 2004.

COSTA, J. G. C.; "Notas de Aula de Confiabilidade de Sistemas Elétricos," Instituto de Sistemas Elétricos e Energia – ISEE – UNIFEI, Itajubá, MG/Brasil, 2011.

DEL DUCCA C., J. R.; "Implementação de uma Abordagem de Extração e Otimização de Regras Fuzzy Utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais," Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, MG/Brasil. 2010.

FARAG, H. E.; EL-SAADANY, E. F.; EL SHATSHAT, R.; ZIDAN, A.; "A generalized power flow analysis for distribution system with high penetration of distributed generation," Electric Power Systems Research, vol. 81, no. pp. 1499-1506, 2011.

GOMES, R. B.; "Resolução do problema de fluxo de carga para redes de distribuição utilizando o método desacoplado rápido com rotação automática de eixos," Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP/Brasil, 2006.

HILLIER F. S.; LIEBERMAN G. J.; "Introduction to operations research," New York: McGraw-Hill, 1997

HONG, Y. Y.; HO, S. Y.; "Determination of Network Configuration Considering Multiobjective in Distribution Systems Using Genetic Algorithms," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, pp. 1062-1069, 2005.

JEON, Y.J.; KIM J.C.; KIM, J. O.; SHIN, J. R.; LEE, K. Y.; "An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. pp. 1070-1078, 2002.

KAGAN N.; DE OLIVEIRA, C. C. B.; "Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Através de Ferramenta para Solução de Problemas de decisão com Múltiplos Objetivos e Incertezas," SBA Controle & Automação, vol. 9, no. pp. 18-30, 1998.

KARR, C. L.; BANERJEE, A. ; MISHRA P.; "Solving an Inverse Partial Differential Equation for a Two Dimensional Heat Conduction Problem with Oscillating Boundary

Conditions Using an Artificial Immune System,” International Conference on Machine Learning and Applications, Alabama USA. 2004

KERSTING, W. H.; “Distribution System Modeling and Analysis,” CRC Press 1st Edition, 2001.

OLIVEIRA, D.Q.; SANTOS, F.A.O.; DELBONI L.N.F; DE SOUZA, A.C.Z.; LOPEZ, B.I.L. ;“Electric and Plug-in Hybrid Vehicles Recharge in Distribution Power Systems,” 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering – Itália, 2012.

LIU, Q.; LI, C.; "A Novel Hybrid Multiagent-based Particle Swarm Optimization for Distribution Network Reconfiguration," in Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp. 1-5, Chengdu, China, 2010.

MA, L.; ZHANG, Z.; ZHOU, X.; WANG, J.; “A Novel Classification Method based on Artificial Immune System and Quantum Mechanics Theory,” International Conference on Computational Intelligence and Security, Beijing China, 2009.

MENDOZA J.; LÓPEZ R.; MORALES D.; LÓPEZ E.; DESSANTE P.; MORAGA R.; "Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms with Restricted Population and Addressed Operators: Real Application," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 948-954, 2006.

MUÑOZ, C. M.; “Flujo de Potencia Trifásico para Sistemas de Distribución,” Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil), Pontifícia Universidad Católica de Chile, 1989.

POLYELTON, A. C.; “Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando restrições de qualidade e continuidade do fornecimento,” Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Maranhão, 2010.

QING-HUA, Z.; LONG-QIU, S.; YA-SHE, Z.; HONG-FANG, L.; YU-ZHEN, F.,” Design of Unit Fault Diagnosis System Software Based on Artificial Immune System,” International Conference on Computer Science and Software Engineering, Wuhan, China, 2008.

QUEZADA A., F.; PADILLA D., F.; PONCE DE LEÓN S., E.; CEBALLOS S., R.; "Sistema Inmune Artificial para resolver el problema Del Agente Viajero," Segundo Congreso Estatal - La Investigación en el PosGrado,". Universidad Autónoma de Aguascalientes, México. 2006.

RAMOS, E. E. ; EXPÓSITO, A. G.; SANTOS, J. R.; IBORRA, F. L.; "Path-Based Distribution Network Modeling: Application to Reconfiguration for Loss Reduction," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. pp. 556-564, 2005.

RAHMAN, T. K. A. ; YASIN, Z.M. ; ABDULLAH, W. N. W.; "Artificial – immun – based for solving economic dispatch in Power system," Power and Energy Conference – PECon, 2004.

SCARAMUTTI, J.; "*Aplicação de Algoritmos Genéticos no Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição*", Masters Dissertation: Federal University of Santa Catarina, Brazil, 1999.

SCHMIDT, H. P.; CABEZAS, A. M. G.; KAGAN, N.; GOUVÊA, M. R.; AGOZZINI, P.; "Reconfiguración de sistemas de distribución utilizando el Método de Newton en formulaciones cuadráticas," IEEE Latin America Transactions, vol. 6, no. 2, pp. 162-169, 2008.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X.; "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks". IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 753-762, maio 1988.

SILVA N., M.; "Modelagem de Carga em Sistemas de Energia Elétrica: Modelo Matemático e sua Validação com Testes de Campo," Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora MG/Brasil, Agosto 2008.

SRINIVAS, M.S.; "Distribution Load Flows: A brief review". In: Proc. of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol 2, pp. 942-945, Singapore, 2000.

SUDHAKAR, T.D.; SRINIVAS, K. N.; "Power System Restoration Based On Kruskal's Algorithm," International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, Tamilnadu, India, 2011.

VERMAAS, L. L. G.; HONÓRIO, L. M.; FREIRE, M.; BARBOSA, D.;" Learning Fuzzy Systems by a Co-Evolutionary Artificial-Immune-Based Algorithm," 8th International Workshop, WILF 2009, pp. 312-319, Palermo, Italia, 2009.

XU, L.; CHOW, M.; TIMMIS, J.; TAYLOR; L. S. ; WATKINS, A.; "On the Investigation of Artificial Immune System on Imbalanced Data Classification for Power Distribution System Fault Cause Identification," IEEE Congress on Evolutionary Computation – Vancouver, BC, Canadá, 2006.

XU, X.; WANG, C.; FENG, X. "A Tabu Search Approach for Distribution Network Reconfiguration Based on GIS," in International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA), Wuhan, China, 2009.

APÊNDICE.

A. Modelo de linhas – Determinação dos parâmetros de linha.

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.

Nesta seção são tratadas as equações para a determinação das impedâncias séries e *shunt* como também as impedâncias mútuas usadas na determinação da matriz de impedância primitiva e na determinação do fluxo de potência.

a. Equações de Carson (KERSTING, 2001).

As equações de Carson consideram a influência do retorno por terra na definição dos parâmetros de uma *linha desequilibrada*. Estas equações são referidas à figura A.1, e são enumeradas de (A.1) a (A.6) a seguir:

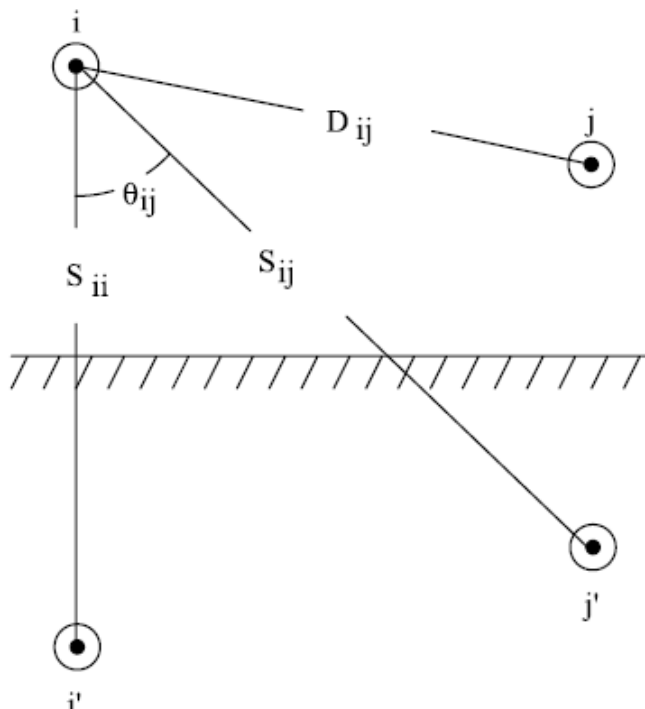


Figura A. 1: Condutores e imagens (KERSTING, 2001).

Impedância própria do condutor i:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 4\omega P_{ii}G + j \left(X_i + 2\omega G \cdot \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4\omega Q_{ii}G \right) \Omega/km \quad (A.1)$$

Indutância mútua entre o condutor i e j:

$$\hat{z}_{ij} = 4\omega P_{ij}G + j \left(2\omega G \cdot \ln \frac{S_{ij}}{RD_{ij}} + 4\omega Q_{ij}G \right) \Omega/km \quad (A.2)$$

onde:

$\hat{z}_{ii}$	é a impedância do condutor em	Ω/km
$\hat{z}_{ij}$	é a impedância mutua entre o condutor i e j em	Ω/km
r_i	resistência do condutor i em	Ω/km
$\omega = 2\pi f$	frequência angular do sistema.	
G	$= 0.1052225483 \times 10^{-3}$	Ω/km
RD_i	raio do condutor i em	m.
GMR_i	Raio Médio Geométrico do condutor i em	m.
f	frequência.	
ρ	resistividade da terra em	$\Omega \cdot m$
D_{ij}	distância entre condutores i e j em	m.
S_{ij}	distância entre condutores i e a imagem j em	m.
θ_{ij}	ângulo entre um par de linhas desde o condutor i sua imagem e á imagem do condutor j.	

$$X_i = 2\omega G \cdot \ln \frac{RD_i}{GMR_i} \Omega/km \quad (A.3)$$

$$P_{ij} = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cos(\theta_{ij}) + \frac{k_{ij}^2}{16} \cos(2\theta_{ij}) \cdot \left(0.6728 + \ln \frac{2}{k_{ij}} \right) \quad (A.4)$$

$$Q_{ij} = -0.0386 + \frac{1}{2} \ln \frac{2}{k_{ij}} + \frac{1}{3\sqrt{2}} k_{ij} \cos(\theta_{ij}) \quad (A.5)$$

$$k_{ij} = 8.565 \times 10^{-4} S_{ij} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (A.6)$$

Matriz de Impedância Primitiva

As equações (A.1) e (A.2) são utilizadas para a determinação dos elementos de uma Ncond x Ncond matriz de impedância primitiva.

A matriz primitiva para um sistema trifásico com m neutros tem a forma apresentada em (A.7).

$$[\hat{Z}] = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \hat{Z}_{an1} & \hat{Z}_{an2} & \hat{Z}_{anm} \\ \hat{Z}_{bn1} & \hat{Z}_{bn2} & \hat{Z}_{bnm} \\ \hat{Z}_{cn1} & \hat{Z}_{cn2} & \hat{Z}_{cnm} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{Z}_{n1a} & \hat{Z}_{n1b} & \hat{Z}_{n1c} \\ \hat{Z}_{n2a} & \hat{Z}_{n2b} & \hat{Z}_{n2c} \\ \hat{Z}_{nma} & \hat{Z}_{nmb} & \hat{Z}_{nmc} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \hat{Z}_{n1n1} & \hat{Z}_{n1n2} & \hat{Z}_{n1nm} \\ \hat{Z}_{n2n1} & \hat{Z}_{n2n2} & \hat{Z}_{n2nm} \\ \hat{Z}_{nmn1} & \hat{Z}_{nmn2} & \hat{Z}_{nmnm} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (A.7)$$

Em forma particionada, a Equação A.7 torna-se a equação (A.8).

$$[\hat{Z}_{primitive}] = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (A.8)$$

b. Admitância Shunt.

A admitância shunt de uma linha consiste de uma condutância e uma susceptância capacitiva. A condutância é usualmente ignorada porque esta é muito pequena comparada à susceptância capacitiva. A capacitância de uma linha é o resultado da diferença de potencial entre dois condutores. Um condutor carregado cria um campo elétrico que emana do centro para fora (KERSTING, 2001). Linhas equipotenciais surgem e são concêntricas ao condutor carregado, como é mostrado na figura A.2. Nesta figura a diferença de potencial entre dois pontos (P_1 e P_2) é o resultado do campo elétrico do condutor carregado. Quando a diferença de potencial entre dois pontos é conhecida, a capacitância pode ser determinada. Se houver outros condutores carregados nas proximidades, a diferença de potencial entre os dois pontos será uma função da distância aos outros condutores e a carga de cada condutor. O princípio da superposição é usado para calcular a queda de tensão total entre dois pontos, e em seguida, a capacitância resultante entre os pontos. Os pontos podem ser pontos no espaço, a superfície de dois condutores, ou a superfície de um condutor e a terra (KERSTING, 2001).

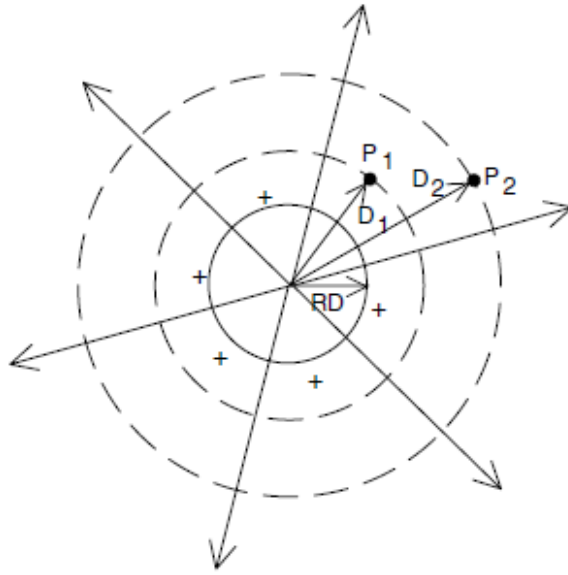


Figura A. 2: Campo elétrico de um condutor carregado.

Para a obtenção das capacidades da linha aérea o procedimento seguido resume-se em:

Montagem da matriz [P], dos coeficientes de potencial de Maxwell, cujos termos são apresentados nas equações (A.9) e (A.10):

$$P_{ii} = K \ln \left[\frac{D_{ii'}}{r_i} \right] \quad (\text{A.9})$$

$$P_{ij} = K \ln \left[\frac{D_{ij'}}{D_{ij}} \right] \quad i \neq j \quad (\text{A.10})$$

onde:

$$K = 2 \times c^2 \times 10^{-4} = 18 \frac{km}{uF}$$

C é a velocidade da luz, em km/s.

$D_{ij'}$ é a distância entre o centro do condutor i e o centro da imagem j' do condutor j .

$D_{ii'}$ é a distância entre o centro do condutor i e sua imagem i' .

r_i é o raio do condutor i .

A matriz [P], dos coeficientes de potencial, que é montada seguindo-se a ordem de numeração dos condutores, é particionada na linha e coluna correspondente ao último cabo de fase; equação (A.11):

$$[P_{\text{primitiva}}] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{ij} & \hat{P}_{in} \\ \hat{P}_{nj} & \hat{P}_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Onde:

$[\hat{P}_{ij}]$ é a submatriz dos cabos de fase:

$[\hat{P}_{nj}] = [\hat{P}_{in}]$ é a submatriz das impedâncias mútuas entre os cabos de fase e os cabos guarda.

$[\hat{P}_{nn}]$ é a submatriz de cabos de guarda.

Calcula-se pela inversão da matriz $[P]$, a matriz $[Y]$ das admitâncias nodais, equação (A.12)

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{ff} & Y_{fg} \\ Y_{gf} & Y_{gg} \end{bmatrix} = j\omega[P]^{-1} \quad (\text{A.12})$$

$[Y_{ff}]$ é a submatriz das admitâncias dos cabos de fase;

$[Y_{fg}] = [Y_{gf}]$ é a submatriz das admitâncias mútuas entre os cabos de fase e os cabos guarda;

$[Y_{gg}]$ é a submatriz das admitâncias dos cabos de guarda.

Assim o equacionamento da linha é:

$$\begin{bmatrix} I_f \\ I_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ff} & Y_{fg} \\ Y_{gf} & Y_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ V_g \end{bmatrix} \quad (\text{A.13})$$

Onde I_f e I_g representam, respectivamente, as submatrizes das correntes nos cabos de fase e de guarda (neutro), e V_f e V_g representam, respectivamente, as submatrizes das tensões nos cabos de fase e nos cabos de guarda.

c. Linhas aéreas convencionais e protegidas com retorno por terra e com cabo de guarda.

Impedância Série:

Para aplicações como no cálculo de fluxo de potência, a matriz primitiva tem que reduzir sua ordem a uma matriz de 3 x 3, consistente em impedâncias próprias e mútuas das três fases. O método padrão para reduzir é a Redução de Kron, a seguir é mostrado a

metodologia utilizada para o cálculo dos parâmetros para os tipos de linha existentes no caso em estudo.

Seja o caso das Linhas Protegidas, pode observar-se na figura A.3 uma configuração de 3 cabos de fase e um cabo de guarda que cumpre também a função de suporte mecânico.

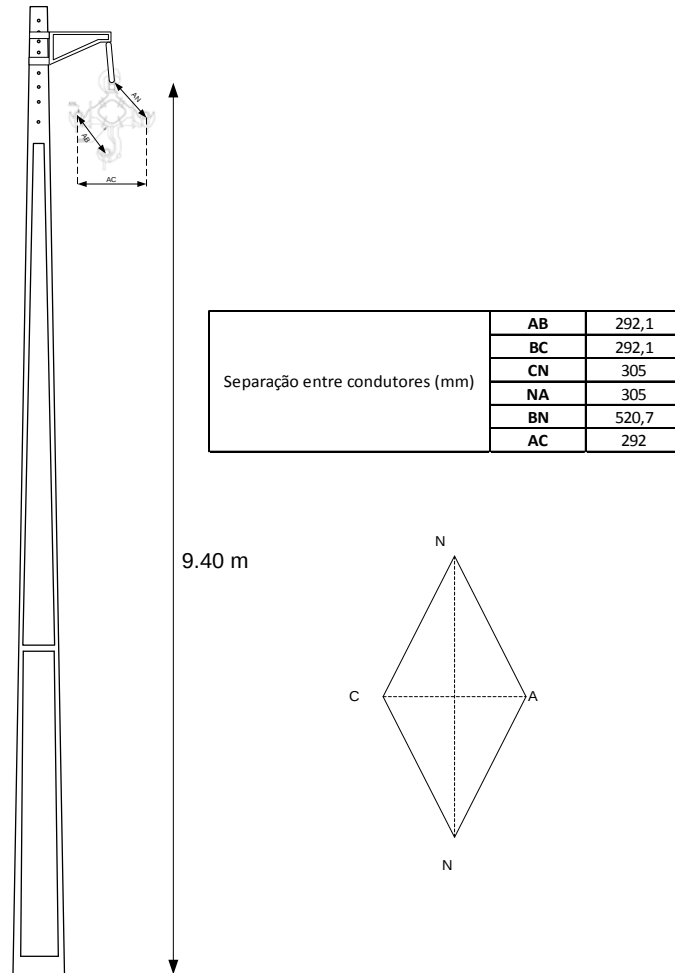


Figura A. 3: Linha Protegida Trifásica

Estes tipos de linhas podem ser representados como mostra a figura A.4, ou seja, uma linha com 4 cabos, um deles sendo o neutro aterrado.

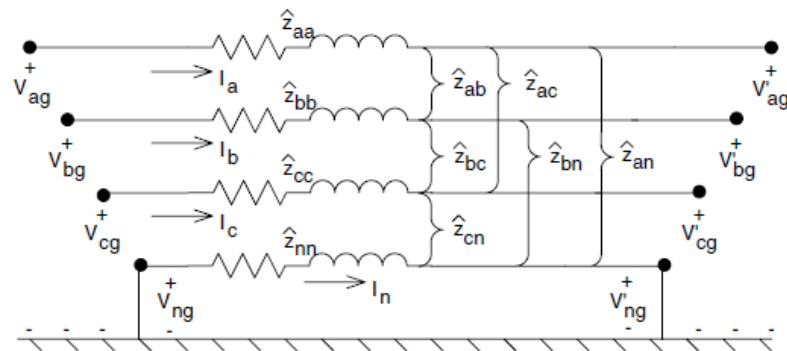


Figura A. 4: Sistema trifásico com neutro aterrado (KERSTING, 2001).

Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões, considerando a matriz primitiva reduzida, tem-se a equação (A.14):

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_{ng}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V'_{abc}] \\ [V'_{ng}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\hat{z}_{ij}] & [\hat{z}_{in}] \\ [\hat{z}_{nj}] & [\hat{z}_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

Já que o neutro está aterrado, as tensões V_{ng} e V'_{ng} são iguais a zero, por tanto:

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + [\hat{z}_{ij}] [I_{abc}] + [\hat{z}_{nn}] [I_n] \quad (\text{A.15})$$

$$[0] = [0] + [\hat{z}_{nj}] [I_{abc}] + [\hat{z}_{nn}] [I_n] \quad (\text{A.16})$$

Das equações A.15 e A.16, chega-se a:

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + ([\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] \cdot [\hat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{z}_{nj}]) [I_{abc}] \quad (\text{A.17})$$

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + [z_{abc}] [I_{abc}] \quad (\text{A.18})$$

onde:

$$[z_{abc}] = [\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] \cdot [\hat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{z}_{nj}] \quad (\text{A.19})$$

A equação (A.19) é a forma final da técnica de redução de Kron. A matriz Z_{abc} é dada pela equação (A.20)

$$[z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{zb} & Z_{zc} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

A impedância entre fases para um alimentador de 3 cabos como na figura A.5, pode ser determinada pela aplicação das equações de Carson com equação (A.20), sem fazer a redução de Kron (KERSTING, 2001). Onde as impedâncias Z_{ij} são obtidas diretamente pelas equações (A.1) e (A.2).

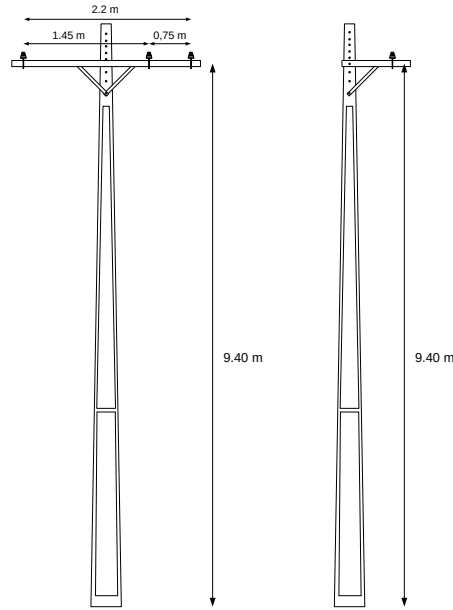


Figura A. 5: Linhas Convencionais Trifásicas e Monofásicas.

Impedância Shunt.

Seja a linha trifásica convencional com retorno por terra (não existem cabos de guarda), a expressão da impedância shunt é dada pelas equações (A.21) e (A.22):

$$[P_{primitiva}] = [P_{ij}] \quad (\text{A.21})$$

$$[Y_{abc}] = j\omega [P_{ij}]^{-1} \quad (\text{A.22})$$

Se a linha é monofásica (por exemplo, para a fase b) fica reduzida à equação (A.23):

$$[Y_{abc}] = j\omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (\text{A.23})$$

No caso da linha trifásica protegida, esta apresenta um cabo de guarda e com tensão deste igual a zero então a matriz equivalente pode ser calculada por meio da redução de Kron, obtendo-se a equação (A.24):

$$[P_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - [\hat{P}_{in}] \cdot [\hat{P}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{P}_{nj}] \quad (\text{A.24})$$

Com um único cabo de guarda a equação (A.24) fornece a relação a seguir, equação (A.25)

$$[P_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - \frac{[\hat{P}_{i4}] \cdot [\hat{P}_{4j}]}{[\hat{P}_{44}]} \quad (\text{A.25})$$

onde $i=1, 2, 3$ e $j=1, 2, 3$

E finalmente; obtém-se a equação A.26:

$$[Y_{abc}] = j\omega[P_{abc}]^{-1} \quad (\text{A.26})$$

d. Linhas aéreas monofásicas convencionais.

Alternativamente às equações de Carson, a impedância de uma linha monofásica com retorno por terra pode ser determinada pelas seguintes expressões:

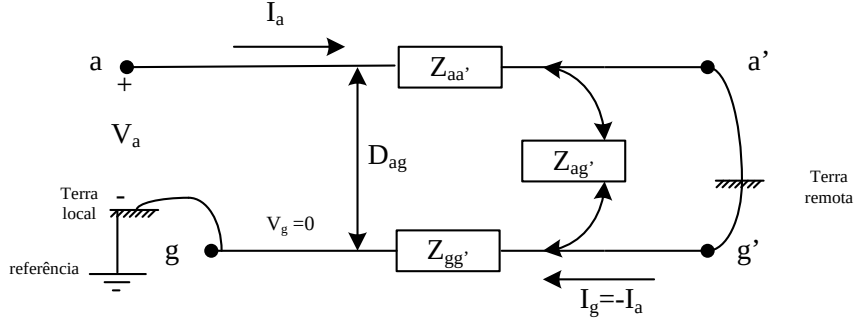


Figura A. 6: Linha monofásica (fase a) com retorno por terra.

Por exemplo, para a linha monofásica conectada na fase **a** (figura A.6), tem-se a equação A.27:

$$Z_{aa} = (r_a + r_g) + j\omega k(L_a + L_g - 2M_{ag}) \quad (\text{A.27})$$

onde:

$$L_a = \ln \frac{2S}{D_{sa}} - 1 \quad (\text{A.28})$$

$$L_g = \ln \frac{2S}{D_{sg}} - 1 \quad (\text{A.29})$$

$$M_{ag} = \ln \frac{2S}{D_{ag}} - 1 \quad (\text{A.30})$$

S é a longitude do condutor a em [m].

Somando as indutâncias tem-se a equação (A.31):

$$L_a + L_g - 2M_{ag} = \ln \frac{D_{ag}^2}{D_{sa} D_{sg}} \quad (\text{A.31})$$

Sabendo que $D_{sg} = 1$, define-se a constante D_e como (A.32):

$$D_e = \frac{D_{ag}^2}{D_{sa}} \quad (\text{A.32})$$

Substituindo as equações A.32 e A.31 na equação A.27; tem-se a equação (A.33):

$$Z_{aa} = (r_a + r_g) + j\omega k \ln \left(\frac{D_e}{D_{sa}} \right) \quad (\text{A.33})$$

Onde D_{sa} é o raio médio geométrico (RMG) do condutor a.

Carson encontrou empiricamente o valor das resistências para calcular o efeito do retorno por terra, como visto anteriormente, mediante estas equações (A.34 e A.35):

$$r_g = 9.869 \times 10^{-4} f \quad \Omega/km \quad (A.34)$$

Sendo f a frequência em Hz. O cálculo da constante D_e é dada por:

$$D_e = 2160 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (A.35)$$

Onde ρ é a resistividade do solo em $[\Omega \cdot m]$.

e. Cabos subterrâneos.

Impedância Série:

Os valores das impedâncias podem ser obtidos por meio da Equação de Carson com redução da matriz de impedância primitiva resultante (Redução de Kron).

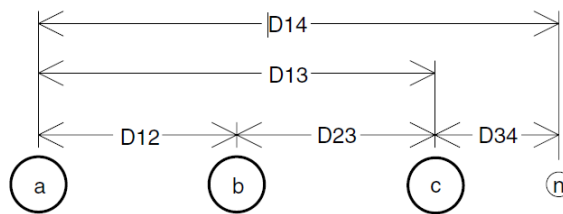


Figura A. 7: Cabo trifásico com neutro adicional (KERSTING, 2001).

Para o caso da figura A.7, pode ser aplicada a mesma metodologia para a determinação das constantes por meio da Matriz Impedância primitiva, que neste caso é de ordem 7x7. Para circuitos sem neutro adicional esta matriz é de 6x6.

A Figura A.8 mostra um dos mais comuns tipos de cabo subterrâneo. A resistência, o RMG do condutor e o equivalente do neutro devem ser conhecidas para usar as equações de Carson.

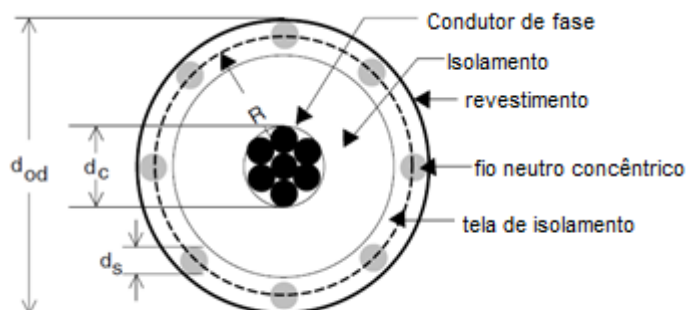


Figura A. 8: Cabo com neutro concêntrico (KERSTING, 2011).

Seja:

dc	diâmetro do condutor.
d_{od}	diâmetro nominal sobre o neutro concêntrico.
d_s	diâmetro do fio do neutro concêntrico.
GMR_c	raio médio geométrico do condutor de fase.
GMR_s	raio médio geométrico do fio do neutro.
r_c	resistência do cabo de fase.
r_s	resistência do neutro concêntrico.
k	número de fios do neutro concêntrico.

Logo, o raio médio geométrico do condutor de fase e do neutro são obtidos com os dados dos cabos geralmente fornecidos pelos fabricantes e das seguintes equações (A.36 a A.38):

$$GMR_{cn} = \sqrt[k]{GMR_s \cdot k \cdot R^{k-1}} \quad [m] \quad (A.36)$$

$$R = \frac{d_{od} - d_s}{24} \quad [m] \quad (A.37)$$

A resistência equivalente do neutro concêntrico é:

$$r_{cn} = \frac{r_s}{k} \quad [\Omega/km] \quad (A.38)$$

Os espaçamentos diferentes entre um neutro concêntrico e os condutores de fase e de outros neutros concêntricos são como segue:

- Neutro concêntrico a seu próprio condutor de fase:
 $D_{ij} = R$
- Neutro concêntrico ao neutro concêntrico adjacente.
 D_{ij} distância de centro a centro do condutor de fase.
- Neutro concêntrico ao condutor de fase adjacente.

$$D_{ij} = \sqrt[k]{D_{nm}^k - R^k} \quad [m]$$

Onde D_{nm} é a distância entre centros dos condutores de fase (figura A.9).

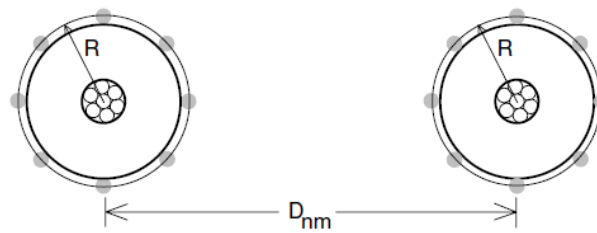


Figura A. 9: Distância entre condutores de fase.

Logo como foi mostrado nos casos de cabos aéreos são calculados os parâmetros utilizando a Equação de Carson. Neste ponto é importante a numeração dos respectivos cabos e neutros presentes.

Por exemplo, para um cabo subterrâneo trifásico com neutro adicional tem-se:

1= condutor de fase #1.

2= condutor de fase #2.

3= condutor de fase #3.

4= condutor neutro #1

5= condutor neutro #2

6= condutor neutro #7

7= condutor neutro adicional (caso presente)

Admitância Shunt.

Os fios concêntricos neutros são aterrados de modo que eles estão todos no mesmo potencial. Por causa da malha, presume-se que o campo criado pela carga sobre a fase será confinado ao limite dos fios concêntricos neutros.

Para o caso da admitância shunt dos cabos subterrâneos com neutro concêntrico, caso mais geral do sistema em estudo tem-se a equação (A.39):

$$Y_{ag} = 0 + j \frac{48,0518}{\ln \frac{R_b}{RD_c} - \frac{1}{k} \ln \frac{k \cdot RD_s}{R_b}} \mu S/km \quad (A.39)$$

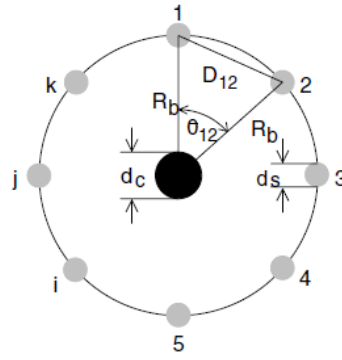


Figura A. 10: Cabo com neutro concêntrico

A admitância de fase para esta linha trifásica subterrânea é dada pela equação (A.40):

$$[Y_{abc}] = \begin{bmatrix} y_{ag} & 0 & 0 \\ 0 & y_{bg} & 0 \\ 0 & 0 & y_{cg} \end{bmatrix} \quad (A.40)$$

f. Modelo de Linhas de Distribuição.

O modelo exato de uma linha trifásica, bifásica ou trifásica, seja aérea ou subterrânea é mostrado na figura A.11. Quando o segmento de linha é bi ou monofásico, algumas das impedâncias ou admitâncias devem ser zero.

Linhas e colunas de zeros na matriz de impedância ou admitâncias, indicam fases ausentes correspondentes às linhas bi e monofásicas, respectivamente.

Portanto, um conjunto de equações pode ser desenvolvido para modelar todos os segmentos de linha aérea e subterrânea. Os valores das impedâncias e admitâncias na figura A.11 representam as impedâncias totais e admitâncias para a linha. Isto é, a matriz de impedância correspondente é multiplicada pelo comprimento do segmento assim também para a matriz de admitâncias.

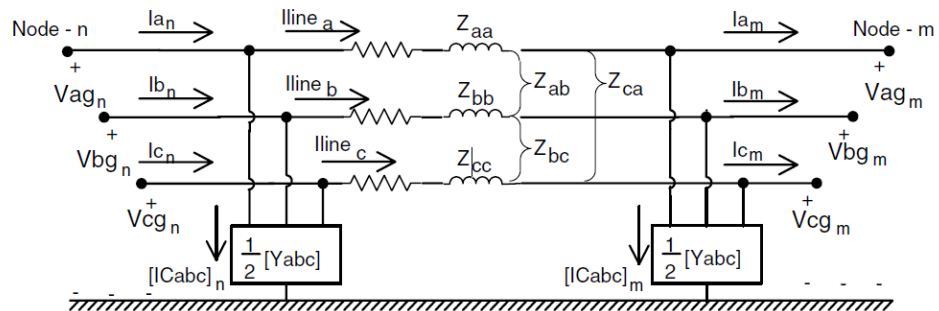
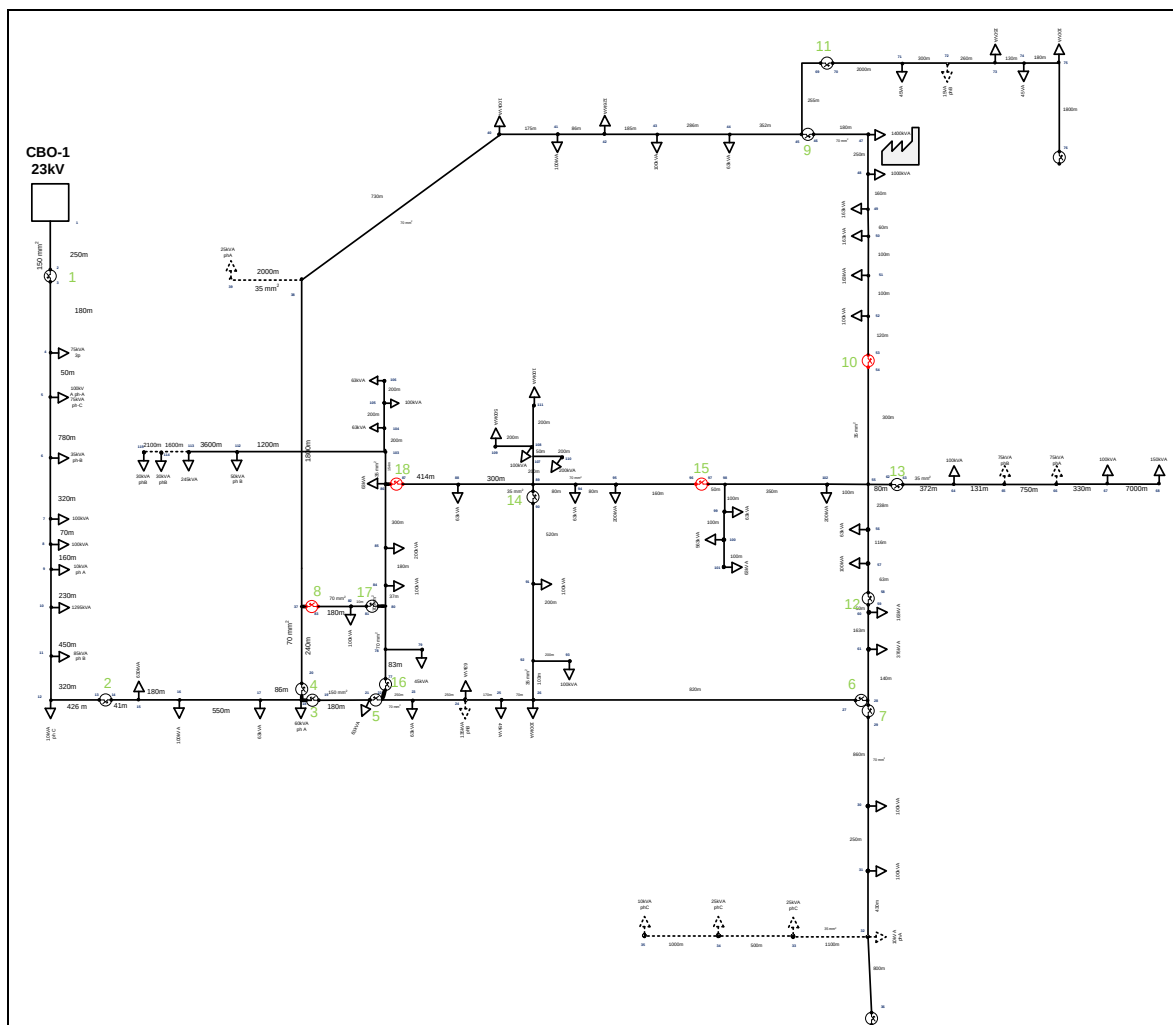


Figura A. 11: Modelo da linha trifásica.

ANEXOS.

A. Alimentador de 23kv CBO-1.

a. Diagrama de linha.



b. Dados de linha.

Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo	Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo	Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo
1	1	2	0,25	300	40	38	40	0,73	301	79	63	64	0,372	302
2	2	3	1	306	41	40	41	0,175	301	80	64	65	0,131	302
3	3	4	0,18	300	42	41	42	0,086	301	81	65	66	0,75	302
4	4	5	0,05	300	43	42	43	0,185	301	82	66	67	0,33	302
5	5	6	0,78	300	44	43	44	0,286	301	83	67	68	7	302
6	6	7	0,32	300	45	44	45	0,352	301	84	26	92	0,103	302
7	7	8	0,07	300	46	45	46	1	306	85	92	93	0,2	302
8	8	9	0,16	300	47	46	47	0,18	301	86	92	91	0,2	302
9	9	10	0,23	300	48	47	48	0,25	301	87	91	90	0,52	302
10	10	11	0,45	300	49	48	49	0,16	301	88	90	89	1	306
11	11	12	0,32	300	50	49	50	0,06	301	89	89	107	0,2	302
12	12	13	0,426	300	51	50	51	0,1	301	90	107	110	0,2	302
13	13	14	1	306	52	51	52	0,1	301	91	107	108	0,05	302
14	14	15	0,041	300	53	52	53	0,12	301	92	108	109	0,2	302
15	15	16	0,18	300	54	53	54	1	307	93	108	111	0,2	302
16	16	17	0,55	300	55	45	69	0,255	301	94	89	88	0,3	302
17	17	18	0,086	300	56	69	70	1	306	95	88	87	0,414	302
18	18	19	1	306	57	70	71	2	301	96	89	94	0,08	301
19	18	20	1	306	58	71	72	0,3	301	97	94	95	0,08	301
20	19	21	0,18	300	59	72	73	0,26	301	98	95	96	0,16	301
21	21	22	1	306	60	73	74	0,13	301	99	96	97	1	307
22	22	23	0,25	301	61	74	75	0,18	301	100	22	77	1	306
23	23	24	0,25	301	62	75	76	1,8	301	101	77	78	0,083	301
24	24	25	0,17	301	63	28	61	0,14	301	102	78	79	0,141	302
25	25	26	0,07	301	64	61	60	0,163	301	103	78	80	0,157	301
26	26	27	0,82	301	65	60	59	0,05	301	104	80	81	1	306
27	27	28	1	306	66	59	58	1	306	105	81	82	0,01	301
28	28	29	1	306	67	58	57	0,063	301	106	82	83	0,18	301
29	29	30	0,86	301	68	57	56	0,116	301	107	80	84	0,037	301
30	30	31	0,25	301	69	56	55	0,238	301	108	84	85	0,18	301
31	31	32	0,43	301	70	55	54	0,3	302	109	85	86	0,3	301
32	32	33	1,1	305	71	55	102	0,1	301	110	86	87	1	307
33	33	34	0,5	305	72	102	98	0,35	301	111	86	103	0,154	302
34	34	35	1	305	73	98	97	0,05	301	112	103	104	0,2	302
35	32	36	0,8	301	74	98	99	0,1	302	113	104	105	0,2	302
36	20	37	0,24	301	75	99	100	0,1	302	114	105	106	0,2	302
37	37	83	1	307	76	100	101	0,1	302	115	103	112	1,2	302
38	37	38	1,8	301	77	55	62	0,8	301	116	112	113	3,6	302
39	38	39	2	303	78	62	63	1	306	117	113	114	1,6	304
										118	114	115	2,1	304

c. Tipo de cabos:

Código	Capacidade [A]	Bitola [mm ²]	Tipo
300	350	150	Trifásico Convencional
301	220	70	Trifásico Convencional
302	120	35	Trifásico Convencional
303,304,305	120	35	Monofásico Convencional
306,307	1000	-	Chave

d. Demanda dos Nós

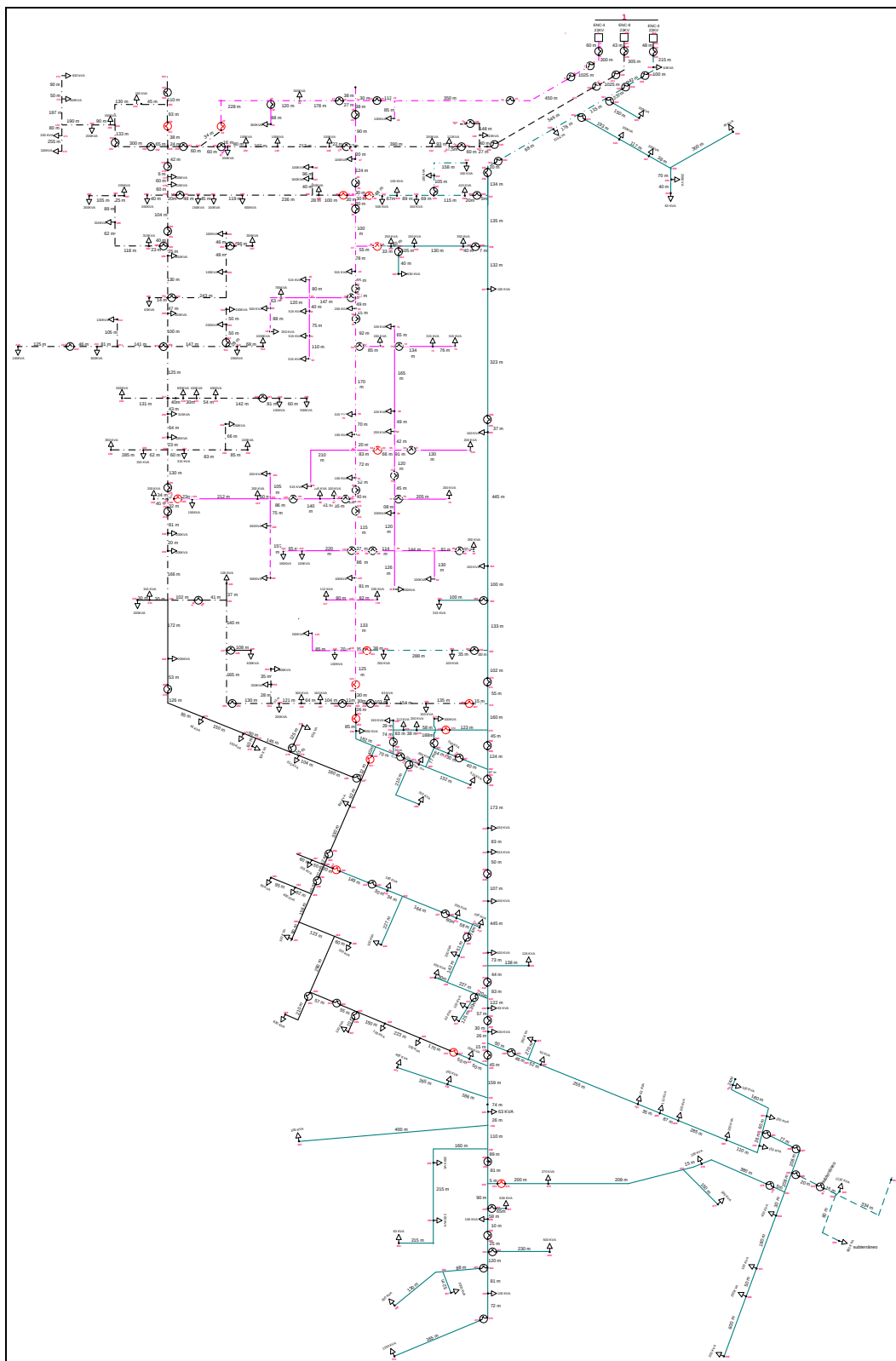
Nó	Fase A		Fase B		Fase C		Nó	Fase A		Fase B		Fa
	PcaY(MW)	QcaY(MVAR)	PcaY(MW)	QcaY(MVAR)	PcaY(MW)	QcaY(MVAR)		PcaY(MW)	QcaY(MVAR)	PcaY(MW)	QcaY(MVAR)	
1	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	0	0	60	0,01643	0,007	0,01573	0,0067	0,01701
3	0	0	0	0	0	0	61	0,03813	0,01624	0,03651	0,01555	0,03949
4	0,00761	0,00324	0,00728	0,0031	0,00788	0,00336	62	0	0	0	0	0
5	0,03042	0,01296	0	0	0,02363	0,01007	63	0	0	0	0	0
6	0	0	0,01019	0,00434	0	0	64	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
7	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	65	0	0	0,02185	0,00931	0
8	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	66	0,02282	0,00972	0	0	0
9	0,00304	0,0013	0	0	0	0	67	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
10	0,13133	0,05595	0,12574	0,05356	0,136	0,05794	68	0,01521	0,00648	0,01456	0,0062	0,01575
11	0	0	0,02476	0,01055	0	0	69	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0,00315	0,00134	70	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	71	0,00456	0,00194	0,00437	0,00186	0,00473
14	0	0	0	0	0	0	72	0	0	0,00437	0,00186	0
15	0,06389	0,02722	0,06117	0,02606	0,06616	0,02819	73	0,01521	0,00648	0,01456	0,0062	0,01575
16	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	74	0,00456	0,00194	0,00437	0,00186	0,00473
17	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662	0,00282	75	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
18	0,01825	0,00778	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	78	0	0	0	0	0
21	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662	0,00282	79	0,00456	0,00194	0,00437	0,00186	0,00473
22	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0
23	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662	0,00282	81	0	0	0	0	0
24	0,00639	0,00272	0,04544	0,01936	0,00662	0,00282	82	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
25	0,00456	0,00194	0,00437	0,00186	0,00473	0,00201	83	0	0	0	0	0
26	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	84	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
27	0	0	0	0	0	0	85	0,02008	0,00855	0,01922	0,00819	0,02079
28	0	0	0	0	0	0	86	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662
29	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0
30	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	88	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662
31	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	89	0	0	0	0	0
32	0,00304	0,0013	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0,00788	0,00336	91	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
34	0	0	0	0	0,00788	0,00336	92	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0,00315	0,00134	93	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
36	0	0	0	0	0	0	94	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662
37	0	0	0	0	0	0	95	0,02008	0,00855	0,01922	0,00819	0,02079
38	0	0	0	0	0	0	96	0	0	0	0	0
39	0,00761	0,00324	0	0	0	0	97	0	0	0	0	0
40	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	98	0	0	0	0	0
41	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	99	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662
42	0,01278	0,00544	0,01223	0,00521	0,01323	0,00564	100	0,0571	0,02432	0,05466	0,02329	0,05913
43	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	101	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662
44	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662	0,00282	102	0,02008	0,00855	0,01922	0,00819	0,02079
45	0	0	0	0	0	0	103	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	104	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662
47	0,14198	0,06048	0,13593	0,05791	0,14703	0,06264	105	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
48	0,10131	0,04316	0,097	0,04132	0,10492	0,04469	106	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662
49	0,01653	0,00704	0,01583	0,00674	0,01712	0,00729	107	0	0	0	0	0
50	0,01643	0,007	0,01573	0,0067	0,01701	0,00725	108	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
51	0,01643	0,007	0,01573	0,0067	0,01701	0,00725	109	0,05071	0,0216	0,04855	0,02068	0,05251
52	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	110	0,02008	0,00855	0,01922	0,00819	0,02079
53	0	0	0	0	0	0	111	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104
54	0	0	0	0	0	0	112	0	0	0,01456	0,0062	0
55	0	0	0	0	0	0	113	0,02485	0,01058	0,02379	0,01013	0,02573
56	0,00639	0,00272	0,00612	0,00261	0,00662	0,00282	114	0	0	0,00874	0,00372	0
57	0,01004	0,00428	0,00961	0,00409	0,0104	0,00443	115	0	0	0,00874	0,00372	0
58	0	0	0	0	0	0						

e. Taxa de Falha.

Nó	Taxa de falha [v/ano]	Carga [MW]
1	0,01	0
2	0,1	1,81
3	0,1	0,853
4	0,3	0,514
5	0,1	0,063
6	0,2	0,543
7	0,3	0,1
8	0,2	0,926
9	0,2	1,226
10	0,3	1,052
11	0,4	0,539
12	0,4	0,5
13	0,5	0,27
14	0,4	2,989
15	0,5	0,355

B. Sistema de Distribuição do Microcentro da Cidade de Encarna  o.

a. Diagrama de linha.



b. Dados de linha.

Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo
1	1	2	0,01	200
2	2	3	1	306
3	3	4	0,06	400
4	4	5	1	306
5	5	6	0,3	400
6	6	7	1	306
7	7	8	1,03	200
8	8	9	1	306
9	9	10	0,45	400
10	10	11	1	306
11	11	12	0,35	400
12	12	13	0,11	400
13	12	24	0,09	302
14	13	14	1	306
15	14	15	0,03	400
16	15	16	0,03	400
17	16	17	1	306
18	17	18	0,18	400
19	18	19	0,12	400
20	19	20	1	308
21	20	21	0,09	400
22	19	22	0,23	400
23	22	23	1	307
24	15	25	0,04	400
25	25	26	1	306
26	26	27	0,11	400
27	27	28	0,12	400
28	28	29	1	306
29	29	30	0,03	400
30	30	31	0,03	400
31	31	32	1	307
32	30	33	0,03	400
33	33	34	1	307
34	30	35	0,03	400
35	35	36	1	306
36	36	37	0,1	400
37	37	38	0,06	302
38	38	39	1	307
39	37	40	0,08	400
40	40	41	0,07	400
41	41	42	1	306
42	42	43	0,03	400
43	43	44	1	308
44	44	45	0,15	302
45	45	46	0,08	302
46	45	47	0,12	302
47	47	48	0,06	200
48	48	49	0,09	200
49	45	50	0,04	302
50	50	51	0,08	302
51	51	52	0,11	302
52	43	53	0,05	400
53	53	54	0,02	400
54	54	55	1	306
55	55	56	0,09	400
56	56	57	1	308
57	57	58	0,09	302
58	56	59	0,17	400
59	59	60	0,07	400
60	60	61	0,02	400

Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo
101	78	79	0,21	302
102	77	76	0,05	302
103	76	75	1	306
104	75	65	0,12	302
105	65	66	0,09	302
106	66	67	1	306
107	67	510	0,13	302
108	65	68	0,04	302
109	68	69	0,05	302
110	69	70	0,17	302
111	70	71	0,07	302
112	70	72	1	308
113	72	73	0,13	302
114	73	74	0,08	302
115	65	64	0,07	302
116	90	115	0,09	400
117	115	116	0,08	400
118	116	117	0,08	302
119	116	118	0,08	302
120	116	119	0,13	400
121	119	120	0,04	301
122	120	121	1	307
123	119	122	0,07	301
124	122	123	0,09	301
125	119	124	0,13	400
126	124	125	1	307
127	1	126	0,01	200
128	126	127	1	306
129	127	128	0,04	400
130	128	129	1	306
131	129	130	0,31	400
132	130	131	1	306
133	131	132	1,03	200
134	132	133	1	306
135	133	134	0,49	400
136	134	135	0,06	400
137	135	136	1	306
138	136	137	0,03	400
139	137	138	0,04	400
140	138	139	0,15	400
141	139	140	1	306
142	140	520	0	400
143	137	141	0,06	400
144	141	142	1	306
145	142	143	0	400
146	143	144	0,09	400
147	144	146	0,43	400
148	146	147	1	306
149	147	148	0,02	400
150	148	149	0,21	400
151	149	150	0,11	400
152	150	151	0,08	400
153	151	152	0,02	400
154	152	153	1	306
155	153	522	0,06	400
156	522	23	0,03	400
157	522	154	0,06	400
158	154	155	1	306
159	155	156	0,02	400
160	156	157	0,04	400

Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo
201	194	195	0,19	400
202	195	196	0,09	400
203	196	197	0,03	400
204	196	198	0,11	400
205	192	199	0,03	400
206	199	200	0,03	400
207	200	201	0,01	400
208	200	202	1	308
209	202	203	0,24	400
210	203	204	0,05	400
211	204	205	0,05	400
212	204	206	1	308
213	206	207	0,09	400
214	200	208	0,05	400
215	208	209	0,1	400
216	209	210	1	308
217	210	211	0,14	400
218	211	212	0,11	400
219	211	213	0,08	400
220	213	214	0,05	400
221	214	215	1	306
222	215	216	0,13	400
223	209	511	0,15	400
224	511	512	0,03	400
225	512	513	0,07	400
226	511	514	1	308
227	514	515	0,05	400
228	515	516	0,05	400
229	209	217	0,13	400
230	217	218	0,13	400
231	217	219	0,04	400
232	219	220	0,03	400
233	220	221	0,05	400
234	221	222	0,14	400
235	222	223	1	306
236	223	224	0,08	400
237	224	225	0,06	400
238	217	226	0,04	400
239	226	227	0,06	400
240	227	228	0,02	400
241	228	229	0,06	400
242	229	230	0,29	400
243	228	231	0,06	400
244	231	232	0,08	400
245	232	233	0,09	400
246	232	234	0,07	400
247	228	235	0,13	400
248	235	236	1	306
249	236	107	0,03	400
250	107	237	0,03	400
251	107	145	0,04	400
252	237	274	1	306
253	274	238	0,08	400
254	238	239	0,02	400
255	239	240	0,17	400
256	240	241	0,03	400
257	241	242	0,03	400
258	240	243	0,1	400
259	243	244	1	306
260	244	245	0,04	400

Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo
301	283	284	0,33	302
302	284	285	1	306
303	285	286	0,01	302
304	286	287	0,05	302
305	287	288	0,06	302
306	286	289	0,03	302
307	289	290	1	307
308	286	291	0,07	302
309	291	292	1	306
310	292	293	0,07	302
311	293	294	0,08	302
312	294	295	0,1	302
313	293	296	0,16	302
314	296	297	0,09	302
315	296	298	0,12	302
316	298	299	0,06	302
317	298	300	0,29	302
318	300	301	1	308
319	301	302	0,21	302
320	300	303	0,06	302
321	303	304	1	306
322	304	305	0,06	302
323	305	306	1	308
324	306	307	0,07	302
325	305	308	0,15	302
326	308	309	0,22	302
327	309	310	0,17	302
328	310	311	1	307
329	1	312	0,01	200
330	312	313	1	306
331	313	314	0,05	400
332	314	315	1	306
333	315	316	0,22	400
334	316	317	0,1	400
335	317	318	1	306
336	318	319	0,94	200
337	319	320	1	306
338	320	321	0,24	400
339	321	322	1	308
340	322	323	0,15	302
341	321	324	0,12	400
342	324	325	1	308
343	325	326	0,19	302
344	326	327	0,12	302
345	327	328	0,04	302
346	328	329	0,3	302
347	328	330	0,07	302
348	330	331	0,04	302
349	324	332	0,18	400
350	332	333	0,07	400
351	333	334	1	306
352	334	335	0,02	400
353	335	336	1	306
354	336	337	0,13	400
355	337	338	0,01	400
356	338	339	1	306
357	339	340	0,02	400
358	340	341	0,12	400
359	341	342	1	308
360	342	343	0,11	400

Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo
401	397	396	1	306
402	396	395	0,03	302
403	395	381	0,06	302
404	381	380	1	308
405	380	377	0,19	302
406	381	382	0,08	302
407	382	394	0,13	302
408	382	383	0,03	302
409	383	384	0,07	302
410	384	385	1	308
411	385	386	0,21	301
412	384	387	0,07	301
413	387	388	1	306
414	388	389	0,02	301
415	389	390	0,03	301
416	390	376	1	306
417	376	518	0,07	301
418	518	519	0,03	301
419	518	379	0,08	301
420	379	378	0,05	301
421	378	375	0,06	301
422	389	391	0,07	301
423	391	282	0,04	301
424	391	392	0,16	301
425	392	393	0,09	301
426	400	401	0,07	400
427	401	402	1	306
428	402	403	0,17	400
429	403	404	0,08	400
430	404	405	0,05	400
431	405	406	1	306
432	406	407	0,11	400
433	407	408	0,45	400
434	408	409	0,07	400
435	409	410	0,14	400
436	409	411	0,04	400
437	411	412	1	306
438	412	413	0,08	400
439	413	414	0,02	302
440	414	415	1	308
441	415	416	0,03	302
442	416	417	0,13	302
443	414	418	0,23	302
444	418	419	0,03	302
445	418	420	0,14	302
446	420	421	0,03	302
447	421	422	1	306
448	422	423	0,07	302
449	423	424	0,07	302
450	423	425	0,06	302
451	425	426	0,06	302
452	426	427	1	306
453	427	428	0,16	302
454	428	429	0,23	302
455	428	430	0,03	302
456	430	431	0,03	302
457	431	432	1	306
458	432	290	0,15	302
459	413	433	0,12	400
460	433	434	0,06	400

Ramo N°	Nó De	Nó Para	Comprimento	Tipo de cabo
501	473	474	1	307
502	437	482	0,05	302
503	482	483	1	306
504	483	484	0,05	302
505	484	485	0,27	302
506	484	486	0,05	302
507	486	487	0,26	302
508	487	488	0,04	302
509	488	489	0,09	302
510	489	490	0,29	302
511	490	491	0,11	302
512	491	492	0,03	302
513	492	493	0,06	302
514	493	494	0,18	302
515	492	495	1	308
516	495	496	0,08	302
517	496	497	1	308
518	497	498	0,21	302
519	498	499	1	308
520	499	500	0,02	400
521	500	501	1	306
522	501	502	0,02	400
523	502	503	0,01	400
524	502	504	0,33	400
525	502	505	0,06	400
526	498	481	0,21	302
527	481	506	0,03	302
528	506	507	0,18	302
529	507	508	0,05	302
530	508	509	0,06	302
531	481	480	0,01	302
532	480	479	1	306
533	479	478	0,38	302
534	478	476	0,02	302
535	476	477	0,15	302
536	476	475	0,21	302
537	475	474	0,2	302

c. Tipo de cabos:

Código	Capacidade [A]	Bitola [mm2]	Tipo
200	350	240	subterrâneo
400	350	-	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

d. Demanda dos Nós

Nó	Fase A		Fase B		Fase C	
	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0
21	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119
22	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0
24	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
25	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0
27	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
28	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0
40	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043
41	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0
46	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043
47	0,06519	0,02777	0,06519	0,02777	0,06519	0,02777
48	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
49	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992
50	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043
51	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043
52	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043
53	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
54	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0
58	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
59	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
60	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
61	0	0	0	0	0	0
62	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043
63	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0
68	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
69	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
70	0	0	0	0	0	0
71	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
72	0	0	0	0	0	0
73	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
74	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
75	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	0	0
77	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0	0
79	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
80	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
81	0	0	0	0	0	0
82	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
83	0	0	0	0	0	0
84	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
85	0	0	0	0	0	0
86	0	0	0	0	0	0
87	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992
88	0	0	0	0	0	0
89	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0
91	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
92	0	0	0	0	0	0
93	0	0	0	0	0	0
94	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0
96	0	0	0	0	0	0
97	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
98	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
99	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0

Nó	Fase A		Fase B		Fase C	
	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)
101	0	0	0	0	0	0
102	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
103	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
104	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
105	0	0	0	0	0	0
106	0	0	0	0	0	0
107	0	0	0	0	0	0
108	0,0759	0,03233	0,0759	0,03233	0,0759	0,03233
109	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
110	0	0	0	0	0	0
111	0	0	0	0	0	0
112	0	0	0	0	0	0
113	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
114	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
115	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
116	0	0	0	0	0	0
117	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444
118	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
119	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
121	0	0	0	0	0	0
122	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
123	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
124	0	0	0	0	0	0
125	0	0	0	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0
127	0	0	0	0	0	0
128	0	0	0	0	0	0
129	0	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0
131	0	0	0	0	0	0
132	0	0	0	0	0	0
133	0	0	0	0	0	0
134	0	0	0	0	0	0
135	0	0	0	0	0	0
136	0	0	0	0	0	0
137	0	0	0	0	0	0
138	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
139	0	0	0	0	0	0
140	0	0	0	0	0	0
141	0	0	0	0	0	0
142	0	0	0	0	0	0
143	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444
144	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
145	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
146	0	0	0	0	0	0
147	0	0	0	0	0	0
148	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
149	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
150	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
151	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
152	0	0	0	0	0	0
153	0	0	0	0	0	0
154	0	0	0	0	0	0
155	0	0	0	0	0	0
156	0	0	0	0	0	0
157	0	0	0	0	0	0
158	0	0	0	0	0	0
159	0	0	0	0	0	0
160	0	0	0	0	0	0
161	0	0	0	0	0	0
162	0	0	0	0	0	0
163	0	0	0	0	0	0
164	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
165	0	0	0	0	0	0
166	0	0	0	0	0	0
167	0	0	0	0	0	0
168	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
169	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
170	0	0	0	0	0	0
171	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
172	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
173	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
174	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499
175	0	0	0	0	0	0
176	0	0	0	0	0	0
177	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
178	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
179	0	0	0	0	0	0
180	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
181	0	0	0	0	0	0
182	0	0	0	0	0	0
183	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
184	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
185	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
186	0	0	0	0	0	0
187	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
188	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
189	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
190	0	0	0	0	0	0
191	0	0	0	0	0	0
192	0	0	0	0	0	0
193	0	0	0	0	0	0
194	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
195	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125

Nº	Fase A		Fase B		Fase C	
	PcaY(MW)	QcaY(MVar)	PcaY(MW)	QcaY(MVar)	PcaY(MW)	QcaY(MVar)
201	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
202	0	0	0	0	0	0
203	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
204	0	0	0	0	0	0
205	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
206	0	0	0	0	0	0
207	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119
208	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
209	0	0	0	0	0	0
210	0	0	0	0	0	0
211	0	0	0	0	0	0
212	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
213	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119
214	0	0	0	0	0	0
215	0	0	0	0	0	0
216	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
217	0	0	0	0	0	0
218	0,02449	0,01043	0,02449	0,01043	0,02449	0,01043
219	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499
220	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
221	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
222	0	0	0	0	0	0
223	0	0	0	0	0	0
224	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
225	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
226	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
227	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
228	0	0	0	0	0	0
229	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
230	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388
231	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
232	0	0	0	0	0	0
233	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
234	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
235	0	0	0	0	0	0
236	0	0	0	0	0	0
237	0	0	0	0	0	0
238	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
239	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
240	0	0	0	0	0	0
241	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
242	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
243	0	0	0	0	0	0
244	0	0	0	0	0	0
245	0	0	0	0	0	0
246	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
247	0	0	0	0	0	0
248	0	0	0	0	0	0
249	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499
250	0	0	0	0	0	0
251	0	0	0	0	0	0
252	0	0	0	0	0	0
253	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
254	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119
255	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
256	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119
257	0,01518	0,00647	0,01518	0,00647	0,01518	0,00647
258	0	0	0	0	0	0
259	0	0	0	0	0	0
260	0	0	0	0	0	0
261	0	0	0	0	0	0
262	0	0	0	0	0	0
263	0	0	0	0	0	0
264	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
265	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
266	0	0	0	0	0	0
267	0	0	0	0	0	0
268	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
269	0	0	0	0	0	0
270	0	0	0	0	0	0
271	0,00419	0,00179	0,00419	0,00179	0,00419	0,00179
272	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
273	0	0	0	0	0	0
274	0	0	0	0	0	0
275	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
276	0	0	0	0	0	0
277	0	0	0	0	0	0
278	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
279	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
280	0	0	0	0	0	0
281	0	0	0	0	0	0
282	0	0	0	0	0	0
283	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587
284	0	0	0	0	0	0
285	0	0	0	0	0	0
286	0	0	0	0	0	0
287	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
288	0	0	0	0	0	0
289	0	0	0	0	0	0
290	0	0	0	0	0	0
291	0	0	0	0	0	0
292	0	0	0	0	0	0
293	0	0	0	0	0	0
294	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587
295	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
296	0	0	0	0	0	0
297	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
298	0	0	0	0	0	0
299	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
300	0	0	0	0	0	0

Nº	Fase A		Fase B		Fase C	
	PcaY(MW)	QcaY(MVar)	PcaY(MW)	QcaY(MVar)	PcaY(MW)	QcaY(MVar)
301	0	0	0	0	0	0
302	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499
303	0	0	0	0	0	0
304	0	0	0	0	0	0
305	0	0	0	0	0	0
306	0	0	0	0	0	0
307	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
308	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
309	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
310	0	0	0	0	0	0
311	0	0	0	0	0	0
312	0	0	0	0	0	0
313	0	0	0	0	0	0
314	0	0	0	0	0	0
315	0	0	0	0	0	0
316	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
317	0	0	0	0	0	0
318	0	0	0	0	0	0
319	0	0	0	0	0	0
320	0	0	0	0	0	0
321	0	0	0	0	0	0
322	0	0	0	0	0	0
323	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
324	0	0	0	0	0	0
325	0	0	0	0	0	0
326	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
327	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
328	0	0	0	0	0	0
329	0,00419	0,00179	0,00419	0,00179	0,00419	0,00179
330	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992
331	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
332	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
333	0	0	0	0	0	0
334	0	0	0	0	0	0
335	0	0	0	0	0	0
336	0	0	0	0	0	0
337	0	0	0	0	0	0
338	0	0	0	0	0	0
339	0	0	0	0	0	0
340	0,03865	0,01646	0,03865	0,01646	0,03865	0,01646
341	0	0	0	0	0	0
342	0	0	0	0	0	0
343	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
344	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
345	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
346	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
347	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
348	0	0	0	0	0	0
349	0	0	0	0	0	0
350	0	0	0	0	0	0
351	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388
352	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
353	0	0	0	0	0	0
354	0	0	0	0	0	0
355	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499
356	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992	0,02328	0,00992
357	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
358	0	0	0	0	0	0
359	0	0	0	0	0	0
360	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
361	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
362	0	0	0	0	0	0
363	0	0	0	0	0	0
364	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
365	0	0	0	0	0	0
366	0	0	0	0	0	0
367	0	0	0	0	0	0
368	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
369	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
370	0	0	0	0	0	0
371	0	0	0	0	0	0
372	0	0	0	0	0	0
373	0	0	0	0	0	0
374	0	0	0	0	0	0
375	0	0	0	0	0	0
376	0	0	0	0	0	0
377	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
378	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
379	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444
380	0	0	0	0	0	0
381	0	0	0	0	0	0
382	0	0	0	0	0	0
383	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
384	0	0	0	0	0	0
385	0	0	0	0	0	0
386	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
387	0	0	0	0	0	0
388	0	0	0	0	0	0
389	0	0	0	0	0	0
390	0	0	0	0	0	0
391	0	0	0	0	0	0
392	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388
393	0	0	0	0	0	0
394	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043	0,04796	0,02043
395	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
396	0	0	0	0	0	0
397	0	0	0	0	0	0
398	0	0	0	0	0	0
399	0	0	0	0	0	0
400	0	0	0	0	0	0

Nº	Fase A		Fase B		Fase C	
	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)
401	0	0	0	0	0	0
402	0	0	0	0	0	0
403	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
404	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125	0,02933	0,0125
405	0	0	0	0	0	0
406	0	0	0	0	0	0
407	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
408	0	0	0	0	0	0
409	0	0	0	0	0	0
410	0,01173	0,005	0,01173	0,005	0,01173	0,005
411	0	0	0	0	0	0
412	0	0	0	0	0	0
413	0	0	0	0	0	0
414	0	0	0	0	0	0
415	0	0	0	0	0	0
416	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
417	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
418	0	0	0	0	0	0
419	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
420	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
421	0	0	0	0	0	0
422	0	0	0	0	0	0
423	0	0	0	0	0	0
424	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
425	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
426	0	0	0	0	0	0
427	0	0	0	0	0	0
428	0	0	0	0	0	0
429	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
430	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
431	0	0	0	0	0	0
432	0	0	0	0	0	0
433	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
434	0	0	0	0	0	0
435	0	0	0	0	0	0
436	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
437	0	0	0	0	0	0
438	0	0	0	0	0	0
439	0	0	0	0	0	0
440	0	0	0	0	0	0
441	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
442	0	0	0	0	0	0
443	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
444	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587
445	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
446	0	0	0	0	0	0
447	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
448	0	0	0	0	0	0
449	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
450	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
451	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
452	0	0	0	0	0	0
453	0	0	0	0	0	0
454	0	0	0	0	0	0
455	0	0	0	0	0	0
456	0	0	0	0	0	0
457	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499
458	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
459	0	0	0	0	0	0
460	0	0	0	0	0	0
461	0	0	0	0	0	0
462	0	0	0	0	0	0
463	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
464	0	0	0	0	0	0
465	0	0	0	0	0	0
466	0	0	0	0	0	0
467	0,09312	0,03967	0,09312	0,03967	0,09312	0,03967
468	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
469	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
470	0	0	0	0	0	0
471	0	0	0	0	0	0
472	0,11641	0,04959	0,11641	0,04959	0,11641	0,04959
473	0	0	0	0	0	0
474	0	0	0	0	0	0
475	0,02514	0,01071	0,02514	0,01071	0,02514	0,01071
476	0	0	0	0	0	0
477	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119	0,02794	0,0119
478	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
479	0	0	0	0	0	0
480	0	0	0	0	0	0
481	0	0	0	0	0	0
482	0	0	0	0	0	0
483	0	0	0	0	0	0
484	0	0	0	0	0	0
485	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388	0,03259	0,01388
486	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
487	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025	0,00587	0,0025
488	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444	0,01043	0,00444
489	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
490	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
491	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
492	0	0	0	0	0	0
493	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
494	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
495	0	0	0	0	0	0
496	0	0	0	0	0	0
497	0	0	0	0	0	0
498	0	0	0	0	0	0
499	0	0	0	0	0	0
500	0	0	0	0	0	0

Nº	Fase A		Fase B		Fase C	
	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)	PcaY(MW)	QcaY(MVAr)
501	0	0	0	0	0	0
502	0	0	0	0	0	0
503	0,10523	0,04483	0,10523	0,04483	0,10523	0,04483
504	0	0	0	0	0	0
505	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499	0,05867	0,02499
506	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587	0,03725	0,01587
507	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397	0,00931	0,00397
508	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
509	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
510	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
511	0	0	0	0	0	0
512	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
513	0,09312	0,03967	0,09312	0,03967	0,09312	0,03967
514	0	0	0	0	0	0
515	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793	0,01862	0,00793
516	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984	0,04656	0,01984
517	0	0	0	0	0	0
518	0	0	0	0	0	0
519	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595	0,01397	0,00595
520	0	0	0	0	0	0
521	0	0	0	0	0	0
522	0	0	0	0	0	0

e. Taxa de Falha.

Nó	Taxa de falha [v/ano]	Carga [kW]
1	0,01	0
2	0,058	0
3	0,29	0
4	0,99	0
5	0,435	0
6	0,529	100
7	0,129	0
8	0,593	800
9	0,226	100
10	0,116	0
11	0,288	515
12	0,786	3710
13	0,775	665
14	0,063	0
15	0,209	200
16	0,693	1865
17	1,173	912
18	0,94	700
19	0,029	250
20	0,781	1030
21	0,126	200
22	3,961	2238
23	0,064	0
24	0,457	0
25	1,536	0
26	0,818	0
27	0,412	315
28	0,78	312
29	0,656	500
30	1,344	670
31	0,229	0
32	0,253	0
33	2,641	1430
34	0,515	615
35	1,067	1450
36	5,025	6131
37	0,187	100
38	0,211	600

Nó	Taxa de falha [v/ano]	Carga [kW]
39	0,159	200
40	0,98	1015
41	1,492	1893
42	0,145	0
43	0,587	213
44	1,438	937
45	0,8	400
46	0,378	315
47	1,847	1093
48	0,896	300
49	0,577	1760
50	0,068	0
51	0,444	63
52	1,329	0
53	2,122	910
54	0,028	0
55	1,038	100
56	0,947	1370
57	0,576	1380
58	1,336	515
59	0,509	300
60	0,561	0
61	0,34	0
62	1,285	1730
63	0,576	350
64	0,432	465
65	1,138	326
66	1,251	626
67	0,367	300
68	0,642	200
69	0,21	0
70	0,171	100
71	2,883	1326
72	0,436	730
73	1,373	3050
74	0,001	0
75	0,002	0
76	0,395	462

C. Parâmetro de Cabos.ⁱ

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 185mm2		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	- 1.1168i	- 0.9560i		
- 1.1168i	3.7287i	- 1.1168i		
- 0.9560i	- 1.1168i	3.9662i		
Dados 70mm2		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 35mm ²		Impedâncias Zii	Admitância Shunt
RMG	0.009106	1.1015 + 0.7305i	2.0532i
Raio	0.012467		
Resistência	1.69818		

d. Cabos Subterrâneos.

Dados 240mm ² 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

ⁱ Os dados das impedâncias estão em ohm/mi