

MAURO LÚCIO FERREIRA DE AMORIM

OTIMIZAÇÃO DE ATENDIMENTOS DE EMERGÊNCIA EM  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em  
Computação da Universidade Federal Fluminense, como  
requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de  
concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência.

Orientadores:

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho

Niterói  
2010

XXXX Amorim, Mauro Lúcio Ferreira de  
Otimização de Atendimentos de Emergência em Redes de Distribuição de  
Energia Elétrica / Mauro Lúcio Ferreira de Amorim. – Niterói, RJ: UFF/IC,  
2010.  
XXX f.

Orientadores: Julio Cesar Stacchini de Souza e Milton Brown Do Couto Filho.  
Dissertação (Computação Científica e Sistemas de Potência) - Universidade  
Federal Fluminense, 2010.

1. XXX  
XXX  
XXX  
XXXX. XXXX

CDD xxxxxx

MAURO LÚCIO FERREIRA DE AMORIM

OTIMIZAÇÃO DE ATENDIMENTOS DE EMERGÊNCIA EM  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência.

Aprovada em 08 de Julho de 2010.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D. Sc. – Orientador  
UFF – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc. – Orientador  
UFF – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Edwin Benito Mitacc Meza, D. Sc.  
UFF – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Vitor Hugo Ferreira, D. Sc.  
UFF – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Antônio Carlos Zambroni de Souza, Ph. D.  
UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

Dedico à minha família.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar amparo e coragem nos momentos mais difíceis e cruciais da minha vida.

À minha família, pelo incentivo e apoio para que eu concluísse esse trabalho.

Aos meus orientadores, pela paciência frente à necessidade de conciliação da minha vida acadêmica e profissional e pela instrução e direcionamento desse trabalho.

## RESUMO

---

A principal missão das empresas de distribuição de energia elétrica é proporcionar ao consumidor um fornecimento de energia contínuo e com qualidade. Neste contexto, as atividades de operação e manutenção do sistema de distribuição contribuem de forma significativa para o alcance do nível desejado de satisfação dos clientes. Além do aspecto de atendimento das expectativas dos consumidores, as empresas distribuidoras de energia têm que cumprir as exigências da regulação específica do setor elétrico, estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O número de ocorrências de defeitos em um sistema de distribuição de baixa tensão (BT) está diretamente relacionado às condições climáticas, sendo influenciado fortemente pelas altas temperaturas, as quais contribuem para o surgimento de problemas de mau contato nas conexões dos ramais dos clientes e desconexão ou defeitos em unidades transformadoras devido ao aumento do consumo. A alocação de equipes de emergência deve considerar uma série de fatores, tais como, o número de ocorrências, a quantidade de equipes de campo, o tipo de cada ocorrência (cliente isolado ou unidade transformadora), a duração das ocorrências, as localizações das ocorrências e os posicionamentos das equipes. O atendente de BT deve distribuir as ocorrências entre as equipes de forma a minimizar o tempo médio de atendimento, a quantidade de clientes sem energia e o tempo de interrupção no fornecimento de energia. Esta tarefa não é simples, pois envolve a identificação do tipo de ocorrência, a verificação do endereço onde deve ser realizado o atendimento, a priorização do atendimento, a determinação de uma rota adequada, o envio das ocorrências para as equipes de emergência, o auxílio às equipes para a localização dos endereços, o recebimento dos resultados dos atendimentos e as finalizações das ocorrências no sistema. Este trabalho apresenta uma metodologia baseada em técnicas de formação de agrupamentos e no emprego de metaheurísticas, para o auxílio à alocação de equipes de emergência, otimizando as rotas das equipes, indicando a seqüência de atendimento e qual o efeito que a solução proposta terá nos indicadores de tempo de atendimento e de qualidade de suprimento utilizados pela ANEEL. Testes empregando alguns dados reais, referentes a um sistema de distribuição real, são utilizados para ilustrar a metodologia proposta.

**Palavras-chave:** Distribuição de Energia Elétrica, Otimização, Manutenção de Emergência em Redes de Distribuição.

## ABSTRACT

---

The main goal of power distribution utilities is to supply energy to consumers without interruptions and with a high quality of service. In such a context, aiming to meet consumers' expectations, distribution system operation and maintenance play an important role. Besides attending consumers' expectations, distribution utilities in Brazil have also to observe specific regulatory requirements from the Brazilian electrical energy regulatory agency (ANEEL). The number of fault occurrences in a low voltage distribution system (LV) is directly related to climatic conditions, being strongly influenced by high temperatures, which contribute to failures in the connection of consumers to the main feeder and to failures in transformer units (or their disconnection due to excessive load increase). The allocation of emergency maintenance personnel must consider many factors, such as: the number of occurrences, the number of maintenance teams, the characteristic of each occurrence (e.g. isolated costumers, disconnected transformer units, etc.), the duration and location of each occurrence, as well as the current location of maintenance teams in the field. For a given set of occurrences, the LV attendee must schedule the maintenance teams in order to minimize the mean time to repair failures, the quantity of disconnected consumers and the total time of energy interruption. Scheduling emergency maintenance teams is not an easy task, as it requires the identification of the type of occurrences and their corresponding locations, the establishment of priorities, the determination of an adequate route for the teams in the field, the definition of which occurrences will be handled by each team and the finalization of each scheduled occurrence based on the results informed by emergency maintenance teams. This work presents a methodology based on clustering techniques and metaheuristics to support the maintenance teams schedule task, aiming to optimize the routes of each team, indicating the sequence in which each occurrence will be handled and evaluating the effect that the proposed solution will have on indexes employed by ANEEL to evaluate the quality of energy supply and the time to recover energy supply to the customers. Tests with some real data, from a real distribution system, are employed to illustrate the proposed methodology.

**Keywords:** Electrical Energy Distribution, Optimization, Emergency Maintenance in Distribution Networks.

# SUMÁRIO

---

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xiii
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 REVISÃO DA LITERATURA .....	2
1.3 OBJETIVOS .....	5
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
CAPÍTULO 2 .....	6
DESPACHO DE OCORRÊNCIAS EMERGENCIAIS .....	6
2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	6
2.2 PRINCIPAIS DIFICULDADES PARA O DESPACHO .....	11
2.3 IMPORTÂNCIA DO DESPACHO .....	12
2.4 CONCLUSÕES .....	14
CAPÍTULO 3 .....	15
TÉCNICAS DE AGRUPAMENTO E ALGORITMOS GENÉTICOS .....	15
3.1 INTRODUÇÃO .....	15
3.2 ALGORITMOS DE AGRUPAMENTO .....	16
3.2.1 Similaridade .....	17
3.2.2 Métricas .....	19
3.2.3 Validação .....	21
3.3 ALGORITMO K-MEANS .....	23
3.4 ALGORITMOS GENÉTICOS .....	25
3.4.1 Elementos de um algoritmo genético .....	29
3.4.2 Representação da Solução .....	29
3.4.2.1 Função de Aptidão .....	30
3.4.2.2 População inicial .....	31
3.4.2.3 Método de seleção .....	31
3.4.2.4 Operadores Genéticos .....	33
3.4.2.5 Parâmetros genéticos .....	37
CAPÍTULO 4 .....	39
METODOLOGIA PROPOSTA .....	39
4.1 INTRODUÇÃO .....	39
4.2 FILTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS DE OCORRÊNCIAS .....	41



4.3	DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS.....	43
4.4	OTIMIZAÇÃO DE ROTAS .....	46
4.4.1	População inicial .....	47
4.4.2	Evolução .....	51
4.4.3	Cálculo da aptidão .....	55
4.5	ATUALIZAÇÃO DO DESPACHO DAS EQUIPES .....	59
CAPÍTULO 5.....		61
SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....		61
5.1	INTRODUÇÃO.....	61
5.2	TESTE 1 – AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS .....	63
5.2.1	Descrição .....	63
5.2.2	Critério A - Resultados .....	67
5.2.3	Critério B - Resultados .....	68
5.2.4	Critério C - Resultados .....	70
5.2.5	Resultados Globais .....	72
5.3	TESTE 2 – APROVEITAMENTO DE EQUIPES OCIOSAS .....	75
5.3.1	Descrição .....	75
5.3.2	Resultados.....	76
5.3.3	Comparação – Despacho único x Redespacho com aproveitamento de equipes ociosas .....	78
5.4	TESTE 3 – ENTRADA EM SERVIÇO DE EQUIPE ADICIONAL .....	80
5.4.1	Descrição .....	80
5.4.2	Resultados – Estratégia A x Estratégia B .....	81
5.5	TESTE 4 – ACÚMULO DE NOVAS OCORRÊNCIAS.....	83
5.5.1	Descrição .....	83
5.5.2	Resultados – Critério 1 x Critério 2.....	85
CAPÍTULO 6.....		86
CONCLUSÕES .....		86
6.1	CONCLUSÕES SOBRE O TRABALHO .....	86
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		89

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 2.1 – Fluxograma típico de atendimento de ocorrências de BT .....	8
Figura 3.1 – Grade em um conjunto de dados bidimensional .....	18
Figura 3.2 – Dendograma .....	19
Figura 3.3 – Funcionamento do algoritmo <i>k-means</i> .....	24
Figura 3.4 – Ciclo de um algoritmo genético .....	26
Figura 3.5 – Desenvolvimento e funcionamento de um algoritmo genético .....	28
Figura 3.6 – Método de seleção da roleta .....	32
Figura 3.7 – Operação de cruzamento em um ponto .....	35
Figura 3.8 – Operação de mutação .....	36
Figura 4.1 – Fluxograma de atendimento de ocorrências de BT.....	40
Figura 4.2 – Informações de entrada .....	42
Figura 4.3 – Formação dos grupos .....	43
Figura 4.4 – Condição de paradas do algoritmo de agrupamento .....	45
Figura 4.5 – Obtenção da rota otimizada .....	46
Figura 4.6 – Geração de uma população inicial .....	48
Figura 4.7 – Formação dos indivíduos da população .....	50
Figura 4.8 – Indivíduo de um indivíduo .....	50
Figura 4.9 – Indivíduo <i>i</i> .....	50
Figura 4.10 – Formação da população inicial .....	51
Figura 4.11 – Formação da nova população .....	52
Figura 4.12 – Probabilidade de cada indivíduo ser escolhido .....	53
Figura 4.13 – Operação de cruzamento .....	54
Figura 4.14 – Operação de mutação .....	55
Figura 4.15 – Indivíduo <i>k</i> .....	56
Figura 5.1 – Distribuição espacial das ocorrências .....	66
Figura 5.2 – Grupos de ocorrências .....	66
Figura 5.3 – Rotas de atendimento para o Critério A .....	68
Figura 5.4 – Rotas de atendimento para o Critério B .....	70
Figura 5.5 – Rotas de atendimento para o Critério C .....	71
Figura 5.6 – Restabelecimento dos clientes ao longo do tempo .....	73
Figura 5.7 – Rotas de atendimento para o Teste 2 .....	77

Figura 5.8 – Restabelecimento dos clientes ao longo do tempo .....	79
Figura 5.9 – Restabelecimento dos clientes ao longo do tempo .....	82

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 3.1 – Principais métricas de distância entre dois pontos .....	20
Tabela 5.1 – Dados das ocorrências .....	65
Tabela 5.2 – Resultados para o Critério A .....	67
Tabela 5.3 – Sequência de atendimento para o Critério A .....	67
Tabela 5.4 – Resultados para o Critério B .....	69
Tabela 5.5 – Sequência de atendimento para o Critério B .....	69
Tabela 5.6 – Resultados para o Critério C .....	70
Tabela 5.7 – Sequência de atendimento para o Critério C .....	71
Tabela 5.8 – Resumo dos resultados por critério .....	72
Tabela 5.9 – Tempos de restabelecimento dos clientes .....	74
Tabela 5.10 – Resumo dos resultados de TMAE e CHI .....	74
Tabela 5.11 – <i>Status</i> de atendimento das ocorrências após o despacho inicial .....	75
Tabela 5.12 – <i>Status</i> de atendimento das ocorrências após o primeiro redespacho .....	76
Tabela 5.13 – Resultados do Teste 2 .....	76
Tabela 5.14 – Sequência de atendimento para o Teste 2 .....	77
Tabela 5.15 – Resultados despacho único x redespacho .....	78
Tabela 5.16 – Quantificação dos indicadores TMAE e CHI .....	79
Tabela 5.17 – Resultados Estratégia A x Estratégia B .....	81
Tabela 5.18 – Quantificação dos indicadores TMAE e CHI .....	82
Tabela 5.19 – Dados das novas ocorrências .....	84
Tabela 5.20 – Quantificação dos indicadores TMAE e CHI .....	85

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

---

AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CHI	Cliente Hora Interrompido
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FA	Função de Aptidão
MT	Média Tensão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SGD	Sistema de Gestão da Distribuição
TMAE	Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências de Emergência
TMD	Tempo Médio de Deslocamento
TME	Tempo Médio de Execução
TMP	Tempo Médio de Preparação das Equipes de Atendimento de Emergência

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A principal missão das empresas de distribuição de energia elétrica é proporcionar ao cliente um fornecimento de energia contínuo e com qualidade. Neste contexto, as atividades de operação e manutenção do sistema de distribuição contribuem de forma significativa para o alcance do nível desejado de satisfação dos clientes. Além do aspecto de atendimento às expectativas dos consumidores, as distribuidoras de energia têm que cumprir as exigências da regulação específica do setor elétrico, estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A ANEEL estabelece indicadores para o acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras, em relação à qualidade dos serviços prestados e da energia fornecida, tais como:

- DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), o qual indica o número médio de horas, num determinado período, que cada unidade consumidora de um conjunto ficou sem energia.
- TMAE (Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais), o qual indica o tempo médio para atendimento de uma ocorrência emergencial.

Os aspectos econômicos também devem ser considerados, pois, de forma simplista, o quanto antes a empresa restabelecer a energia para os seus clientes, melhor, já que enquanto o fornecimento estiver interrompido a empresa deixa de faturar. A solução buscada envolve a eficiência das equipes de atendimento das emergências a fim de manter níveis de qualidade desejados.

Um sistema de distribuição atende a clientes alimentados com tensões que variam de 127 V a 138 kV. Neste trabalho serão consideradas as demandas de atendimentos de emergência de baixa tensão (BT – 127, 220 e 380V), ou seja, ocorrências que envolvem

clientes isolados (residenciais, comerciais, etc) e grupos de clientes supridos por transformadores de zona (transformadores instalados em postes, câmaras subterrâneas, sobre pedestais, etc). Em alguns momentos, para exemplificar as situações descritas neste trabalho, serão utilizados dados da Light Serviços de Eletricidade S.A., empresa concessionária de energia responsável pelo abastecimento da capital do estado do Rio de Janeiro, de algumas cidades da região metropolitana e do interior do estado, que atende aproximadamente 4 milhões clientes.

O atendimento das ocorrências emergenciais está diretamente ligado à expertise de uma empresa em receber e despachar as solicitações de reparos para as equipes de emergência. dessa forma, o centro de operação, responsável pela distribuição das ocorrências para as equipes de emergência, deve atuar visando minimizar o tempo de atendimento e a quantidade de clientes interrompidos, priorizando os atendimentos de forma adequada.

Este trabalho propõe o desenvolvimento e a avaliação de uma ferramenta computacional para otimizar o despacho das ocorrências para as equipes de emergência, fornecendo subsídios para a tomada de decisão em um centro de operação, de forma a melhorar os tempos de atendimento e os indicadores de desempenho de uma empresa.

## **1.2 REVISÃO DA LITERATURA**

Segundo [Form05], as instituições públicas e privadas envolvidas no planejamento e organização da distribuição espacial das atividades humanas, têm buscado otimizar as diversas tarefas visando um atendimento mais ágil aos clientes. A grande concentração da população em áreas urbanas é uma das razões que tem aumentado a necessidade de se investir em planejamento e modelagens para uma distribuição adequada de serviços urbanos de infraestrutura básica, e.g. escolas, hospitais, postos de saúde, correios, serviços emergenciais, etc.

[Cunh00] relata que o primeiro problema de roteamento estudado foi o do Caixeiro Viajante, cuja solução consiste no roteiro de menor distância total percorrida, devendo cada cidade ser visitada apenas uma vez. Para [Cunh00], os problemas de roteamento de veículos, em diversas situações, podem ser considerados como problemas de múltiplos

caixeiros viajantes com restrições suplementares de capacidade, bem como de outras relacionadas diretamente a cada aplicação.

De acordo com [Ste00], o tratamento dado aos problemas de roteamento de veículos é bastante diversificado, variando não apenas nos algoritmos utilizados, mas também no tipo de tratamento dado às particularidades de cada problema. Em seu trabalho é abordado o problema do roteamento no transporte escolar onde são descritas algumas técnicas de pesquisa operacional visando a sua solução.

Para [Silv07] uma das dificuldades para a modelagem e solução de um problema de roteamento está relacionada com a grande quantidade de parâmetros que podem influenciar no tipo de problema. Neste contexto, a visão sistêmica do processo é fundamental para se identificar, classificar e modelar corretamente o problema, levando-se em conta suas características mais relevantes e assim propor uma estratégia de solução adequada. Na mesma linha, [Brej06] utiliza o enfoque sistêmico para viabilizar o entendimento, análise e classificação dos problemas de roteamento de veículos, os quais pertencem a uma categoria de problemas de natureza combinatória, sendo a maioria deles NP-completo (classe de complexidade computacional).

[Cost05] propõe a utilização do algoritmo das p-mediana capacitado e de algoritmos genéticos a fim de determinar agrupamentos de clientes de uma concessionária de energia elétrica, que possibilitem uma melhor distribuição das tarefas entre as equipes de atendimento de ocorrências comerciais (ligações novas, cortes de clientes, etc) visando à diminuição dos tempos de execução dos serviços e conclui que o método proposto apresenta melhores resultados que o procedimento manual utilizado pela empresa. Esta Dissertação e a referência [Cost05] diferenciam-se em diversos aspectos, sendo o principal ligado à determinação da rota, pois, em [Cost05] é proposta a formação de setores de atendimentos (agrupamentos de clientes) e o roteamento é feito com base nas posições dos agrupamentos e não nas posições das ocorrências. No presente trabalho são geradas rotas a partir dos dados das ocorrências emergenciais, sendo consideradas as coordenadas individuais de cada ocorrência e não uma posição relativa de um grupo de clientes.

[Form05] em seu trabalho faz uma análise de diversas técnicas de pesquisa operacional, visando a obtenção de uma solução quase ótima, através de métodos exatos, heurísticos e metaheurísticos para o problema de distribuição de produtos da indústria avícola, o qual envolve a localização de facilidades e o roteamento dos veículos.



[Steio6] sugere uma metodologia utilizando um modelo matemático de programação inteira e o algoritmo de Floyd (obtem caminhos mínimos entre pares de nós de um grafo), os quais permitem determinar de forma otimizada o dimensionamento de equipes de atendimento para uma agência regional e o despacho otimizado destas aos locais das ocorrências emergenciais e comerciais na rede elétrica. As principais diferenças entre esta Dissertação e a referência [Steio6] estão nas penalizações aplicadas às equipes ao traçar as rotas (referentes ao despreparo da equipe para efetuar o atendimento, como exemplo, a falta de equipamento adequado), além do roteamento ser efetuado a partir de rotas de leituras pré-definidas (agrupamentos de clientes), ou seja, as ocorrências fazem parte de agrupamentos (em seu trabalho são 48), os quais são tomados como a posição relativa da ocorrência. No presente trabalho apenas as ocorrências emergenciais são tratadas, logo todas equipes estão aptas ao atendimento (não há penalizações para inadequação da equipe) e as ocorrências são consideradas de forma independente, podendo em uma primeira distribuição fazer parte de um grupo e em uma redistribuição serem atribuídas a outro grupo, para que a partir da formação do grupo seja efetuado o roteamento com as posições de cada ocorrência e não com a posição relativa do grupo.

[Ribe01] apresenta um programa para otimizar o sistema de coleta da Empresa de Correios e Telégrafos do Rio de Janeiro, através do roteamento dos veículos. O referido programa utiliza a heurística de ganho baseando-se no algoritmo de Clarke & Wright.

[Znam00] propõe a utilização de uma heurística de inserção paralela aliada a uma etapa de melhoria de rota por meio de métodos de busca local, visando a solução do problema de roteamento e programação para transporte de idosos e portadores de necessidades especiais por veículos de pequena capacidade. Segundo [Znam00], a idéia principal de uma heurística de inserção paralela é a ordenação das solicitações de atendimento por um critério de horário, inserindo-as, de acordo com ordem adotada, nas rotas que resultem em menor acréscimo de custo.

Conforme apresentado nessa seção o problema de roteamento de veículos se aplica a uma grande gama de setores, inclusive ao de energia elétrica, mais especificamente para atender emergências em redes de distribuição.

### **1.3 OBJETIVOS**

Esta Dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia, com base em técnicas de mineração de dados e heurísticas, para a determinação de rotas otimizadas, visando o atendimento emergencial de ocorrências em um sistema de distribuição de energia elétrica. A aplicação da metodologia proposta será ilustrada através de uma ferramenta computacional que possa auxiliar na atividade de atendimentos de emergenciais, proporcionando melhoria na qualidade dos atendimentos, refletidas na redução dos custos operacionais, no atendimento às exigências da regulação específica do setor elétrico e no aumento da satisfação dos clientes.

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, conforme descrito a seguir:

O capítulo 1 encerra uma breve introdução sobre o tema, revisão da literatura, apresentação dos objetivos e a exposição da estrutura da Dissertação;

O capítulo 2 apresenta a descrição do problema, ressaltando as principais dificuldades e a possibilidade de solução através da automação e conseqüente otimização do despacho de ocorrências;

O capítulo 3 discorre sobre a técnica de agrupamento e a heurística utilizada como base para a solução do problema;

O capítulo 4 expõe de forma detalhada as diversas etapas da metodologia proposta;

No capítulo 5 são descritas as simulações realizadas e os resultados obtidos são apresentados e discutidos;

O capítulo 6 trata das conclusões do trabalho e apresenta propostas para a sua continuidade.

## CAPÍTULO 2

### DESPACHO DE OCORRÊNCIAS EMERGENCIAIS

---

#### 2.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Quando falta energia elétrica em residências ou estabelecimentos comerciais, normalmente, a primeira providência tomada pelo consumidor é entrar em contato com a concessionária de energia. Neste contato com o cliente, geralmente, o operador do *call center* da empresa, segue um roteiro para tentar identificar, de forma imediata, a causa da falta de energia. O cliente é orientado a fazer uma inspeção simples em suas instalações, verificando se existem disjuntores desarmados, fusíveis queimados e até mesmo lâmpadas queimadas. Entretanto, existe grande dificuldade em convencer o cliente a inspecionar suas instalações, devido ao receio das pessoas de ocorrer acidentes. Esse procedimento inicial busca evitar o deslocamento de equipes de campo, que ao chegar ao local constatam a existência de um problema interno nas instalações do cliente (improcedência de reclamação). Caso o cliente não se disponha a verificar suas instalações ou não constata nenhum problema interno, o operador do *call center* efetua o registro da reclamação no sistema de gestão da distribuição (SGD), sendo esse registro remetido ao centro de operação, para que seja enviada uma equipe a fim de efetuar o atendimento.

O número de ocorrências em um sistema de distribuição de BT está diretamente relacionado às condições climáticas, sendo influenciado fortemente pelas altas temperaturas, as quais contribuem para o surgimento de problemas de mau contato nas conexões dos ramais dos clientes e desarmes ou queimas de unidades transformadoras devido ao aumento do consumo. Além do calor, as fortes chuvas com rajadas de vento fazem com que o número de ocorrências cresça assustadoramente. Neste contexto fica evidenciada a sazonalidade do número de ocorrências, que normalmente, na região Sudeste, tem seu pico no período de dezembro a março reduzindo-se de abril a outubro, como se observa nos dados da Light referentes ao ano de 2009, de acordo com os dados de [RMOE09] foram verificadas em média 1120 ocorrências diárias para o primeiro período e 960 para o segundo período.

A distribuição das ocorrências para as equipes realizarem os atendimentos deve considerar uma série de fatores, tais como, o número de ocorrências, a quantidade de equipes de campo, o tipo de cada ocorrência (cliente isolado ou unidade transformadora – descritos a seguir), os tempos de duração das ocorrências, as localizações das ocorrências (endereços) e os posicionamentos das equipes. As ocorrências do tipo cliente isolado correspondem às solicitações de atendimentos de anormalidades no sistema de distribuição que atingem apenas uma unidade consumidora. Já as ocorrências do tipo unidade transformadora ou zona, correspondem às solicitações de atendimentos de anormalidades no sistema de distribuição que atingem diversos clientes simultaneamente. O centro de operação deve distribuir as ocorrências entre as equipes de forma a minimizar o Tempo Médio de Atendimento (TMAE) e o valor do Cliente Hora Interrompido (CHI), o qual corresponde ao produto entre o número de clientes envolvidos em uma ocorrência e o número de horas de interrupção da referida ocorrência. Este último indicador é utilizado especificamente pela empresa Light e não faz parte da gama de indicadores de desempenho proposta pela ANEEL, mas está diretamente relacionado ao DEC, logo o mesmo será utilizado ao longo deste trabalho.

Para que se tenha o despacho ou distribuição adequada das ocorrências é necessário que os profissionais que atuam no despacho tenham um prévio conhecimento da região geográfica onde estão atuando, ou seja, além do treinamento sobre os procedimentos operacionais, há a necessidade de um longo tempo de adaptação à área geográfica de atuação. Dessa forma fica difícil o deslocamento de profissionais entre áreas, pois, o profissional que atua na área A terá grandes dificuldades em para trabalhar na área B por não conhecê-la geograficamente.

A chamada crise na BT, grande número de ocorrências devido à temporais, vendavais e/ou elevação demasiada da temperatura, é outro fator complicador no processo de despacho de ocorrências, pois, tem-se grandes números de ocorrências e de equipes de emergência, o que dificulta o gerenciamento das mesmas. Aparentemente a solução para a crise parece óbvia e fácil: aumentar o número de profissionais de despacho. Entretanto, esbarra-se nos fatores econômicos, simplesmente pela impossibilidade de se manter os profissionais em sobreaviso, aguardando o surgimento da crise, além disso, não é possível prorrogar indefinidamente a jornada de trabalho dos profissionais do setor. Normalmente uma crise na BT demora alguns dias para ser debelada.

A tarefa de distribuir as ocorrências não é simples, pois envolve a identificação do tipo de ocorrência, a verificação do endereço, a priorização do atendimento, a

determinação de uma rota adequada, o envio das ocorrências para as equipes de emergência, o auxílio às equipes para a localização dos endereços, o recebimento dos resultados dos atendimentos e as finalizações das ocorrências no sistema. Normalmente, são diversas telas de aplicativos acessadas, contatos telefônicos com as equipes de campo e com clientes (a fim de evitar atendimentos improcedentes), além do atendimento de demandas especiais que são os casos ligados à ouvidoria ou a outras fontes, os quais devem ser priorizados e surgem externamente ao *call center*.

A Figura 2.1 ilustra um fluxograma típico de atendimento de ocorrências de BT.

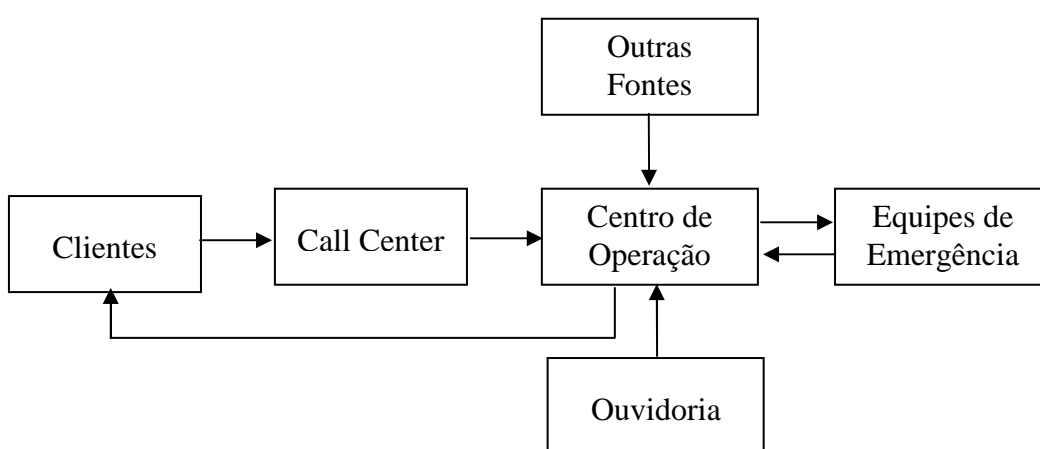


Figura 2.1 – Fluxograma típico de atendimento das ocorrências de BT

De acordo com os procedimentos de distribuição, PRODIST, que em seu módulo oito trata da qualidade do fornecimento de energia elétrica, [PROD10] “a distribuidora deverá dispor de sistemas ou mecanismos de atendimentos emergenciais, acessíveis aos consumidores, para que estes apresentem suas reclamações quanto a problemas relacionados ao serviço de distribuição de energia elétrica, sem prejuízo do emprego de outras formas de sensoriamento automático da rede” e ainda “o atendimento às ocorrências emergenciais deverá ser supervisionado, avaliado e controlado por meio de indicadores que expressem os valores vinculados a conjuntos de unidades consumidoras”. Ainda em [PROD10], a ANEEL estabelece quatro indicadores de tempo de atendimento referente às ocorrências emergenciais, descritos abaixo:

- TMP (Tempo Médio de Preparação das Equipes de Atendimento de Emergência) que indica a eficiência dos meios de comunicação, dimensionamento das equipes e

dos fluxos de informação do Centro de Operação. O TMP é calculado através da expressão (2.1).

$$TMP = \frac{\sum_{i=1}^n TP_i}{n} \quad (2.1)$$

Onde:

$TP_i \rightarrow$  corresponde ao tempo de preparação da equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos.

$n \rightarrow$  número de ocorrências emergenciais verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado.

- TMD (Tempo Médio de Deslocamento) que indica a eficiência da localização geográfica das equipes de manutenção e operação, sendo obtido através da expressão (2.2).

$$TMD = \frac{\sum_{i=1}^n TD_i}{n} \quad (2.2)$$

Onde:

$TD \rightarrow$  corresponde ao tempo de deslocamento da equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos.

$n \rightarrow$  número de ocorrências emergenciais verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado.

- TME (Tempo Médio de Execução) refere-se à eficiência do restabelecimento do sistema de distribuição pelas equipes de manutenção e operação e é obtido através da expressão (2.3).

$$TME = \frac{\sum_{i=1}^n TE_i}{n} \quad (2.3)$$

Onde:

$TE \rightarrow$  corresponde ao tempo de execução do serviço pela equipe de atendimento de emergência para cada ocorrência emergencial, expresso em minutos.

$n \rightarrow$  número de ocorrências emergenciais verificadas no conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado.

- TMAE (Tempo Médio de Atendimento a Ocorrências Emergenciais), resultante do somatório dos três indicadores anteriores, (2.4), indica o tempo médio para atendimento de emergência.

$$TMAE = TMP + TMD + TME \quad (2.4)$$

O valor de CHI (cliente hora interrompido) de uma ocorrência é calculado através da expressão (2.5).

$$CHI = nc \cdot ti \quad (2.5)$$

Onde:

$nc \rightarrow$  corresponde ao número de clientes envolvidos na ocorrência.

$ti \rightarrow$  corresponde ao tempo de interrupção do fornecimento de energia para os clientes.

A proposição de uma metodologia e a consequente adoção de uma ferramenta computacional que otimize as rotas das equipes de emergência, indicando a seqüência de atendimento pode influenciar diretamente o TMAE e o CHI, conforme será observado nos Capítulos IV e V. De uma maneira geral, as ocorrências de unidades transformadoras deverão ser atendidas primeiro, em virtude de envolverem maior número de clientes interrompidos. Entretanto, há de se considerar o tempo de interrupção do cliente isolado, pois este tipo de ocorrência contribui de forma igual a uma ocorrência de unidade transformadora para a composição do TMAE, ou seja, não importa o número de clientes envolvidos na ocorrência.

## 2.2 PRINCIPAIS DIFICULDADES PARA O DESPACHO

Como já mencionado o processo de despacho de ocorrências ou alocação de equipes para o atendimento, passa pelas etapas de identificação do tipo de ocorrência (cliente isolado ou unidade transformadora), agrupamento das ocorrências mais próximas entre si, determinação da rota de atendimento, distribuição para as equipes de emergência, acompanhamento da evolução dos atendimentos, recepção dos resultados dos atendimentos e encerramento das ocorrências.

Com base na descrição acima pode-se apontar as principais dificuldades para que o profissional do Centro de Operação desenvolva sua atividade de forma eficiente, conforme abaixo:

- Seleção das ocorrências mais próximas entre si: há necessidade de verificação dos endereços das ocorrências para que se formem os grupos, exigindo ainda do profissional um prévio conhecimento da área para a formação dos agrupamentos;
- Determinação das rotas para o atendimento: mais uma vez nesta etapa é necessário um conhecimento prévio da área para a determinação de uma boa seqüência de atendimento, além da priorização das ocorrências de unidades transformadoras (identificá-las e priorizá-las), o que pode ser ainda mais penoso quando existir um grande número de ocorrências;
- Distribuição das ocorrências para as equipes: demanda um considerável tempo nos contatos com as equipes;
- Acompanhamento da evolução do atendimento de cada equipe: há a necessidade de contatos periódicos com as equipes para saber se estão terminando os seus atendimentos ou se já estão ociosas;
- Redistribuição das ocorrências por alterações nas condições do atendimento: Caso uma equipe fique ociosa, ou uma equipe adicional inicie sua jornada, ou o sistema receba mais um número considerável de ocorrências;



- Recepção dos resultados: o profissional deve receber os resultados dos atendimentos para efetuar os encerramentos, neste momento ele volta sua atenção para uma única equipe até a obtenção e registro dos serviços executados.

O processo de atendimento seria significativamente facilitado, se o profissional já tivesse em mãos a relação das ocorrências que deveriam ser distribuídas para cada equipe, bem como as respectivas seqüências de atendimento (rotas); assim ele teria mais tempo para efetuar o acompanhamento das equipes e os encerramentos das ocorrências com qualidade (haveria tempo para fazer uma crítica sobre o resultado recebido e o tipo de problema apontado na ocorrência).

Resumindo, as principais dificuldades estão basicamente na exigência do prévio conhecimento da área (para agrupar e roteirizar adequadamente as ocorrências) e no cumprimento das exigências de tempo de atendimento e produtividade das equipes de campo (não deixar equipe ociosa).

## **2.3 IMPORTÂNCIA DO DESPACHO**

A busca por melhorias de processos deve ser constante, para tanto é necessário investir na capacitação da mão de obra diretamente envolvida nos processos, bem como usar a tecnologia disponível ou pesquisar novas soluções. Em especial, o processo de alocação de ocorrências para as equipes de emergência ou o despacho de ocorrências oferece um nicho interessante de pesquisa e para o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na realização das tarefas ou até mesmo a total automatização do processo.

Existem diversos fatores que motivam as empresas a buscarem alternativas para aprimorar os atendimentos das ocorrências, dentre os quais destacam-se:

- Atendimento das exigências regulatórias: a ANEEL estabelece indicadores para o acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras, em relação à qualidade dos serviços prestados e da energia fornecida. Caso não sejam atendidos os requisitos mínimos exigidos pela agência, a empresa fica sujeita a multas e/ou se vê obrigada a ressarcir os clientes pelo fornecimento de energia inadequado;

- Perda de receita devido às interrupções: o fornecimento de energia deve ser restabelecido o quanto antes, pois, com o cliente interrompido as empresas deixam de ganhar com a venda da energia.
- Rendimento das equipes: A distribuição inadequada das ocorrências para equipes de emergência influencia diretamente o rendimento das mesmas, ou seja, se a seqüência de atendimento fosse definida de forma a otimizar as rotas, as equipes poderiam atender mais ocorrências. Da mesma forma, se o atendente despendesse menor tempo para distribuir as ocorrências pelas equipes e determinar as melhores rotas, ele teria mais tempo para efetuar um encerramento correto e mais detalhado das ocorrências (o encerramento consiste na inserção dos horários, tipos de serviços realizados e observações sobre o atendimento prestado pela equipe de emergência);
- Satisfação do cliente: o atendimento do cliente de forma mais rápida influencia diretamente a sua percepção da qualidade da prestação de serviços das empresas.

As dificuldades apontadas na Seção 2.2 serão tratadas de forma a eliminá-las ou pelo menos reduzi-las, através da utilização da metodologia proposta neste trabalho. A existência de uma ferramenta que defina as rotas de atendimentos das equipes reduz a necessidade do profissional de despacho conhecer a região geográfica em que está trabalhando, bem como evita que uma ocorrência prioritária seja esquecida em meio a tantas outras a serem atendidas. A otimização do processo de despacho viabiliza ainda, o aumento da produtividade das equipes de emergência, possibilitando o atendimento das exigências regulatórias.

A massa de dados tratada na tarefa de alocação de ocorrências para as equipes de atendimento de emergência pode ser, em alguns momentos, muito grande o que reforça a necessidade de automatização/otimização de parte ou de todo o processo. Como exemplo, de acordo com os dados da Light em [RMOE09], no ano de 2009 foram registradas aproximadamente 380.000 ocorrências de BT.

## **2.4 CONCLUSÕES**

Pelo exposto neste capítulo, observa-se que o despacho das ocorrências emergenciais para as equipes de campo é uma atividade crítica das empresas de distribuição de energia elétrica, pois, tem influência direta na receita da empresa, no atendimento das exigências regulatórias e na satisfação dos clientes. Logo o aprimoramento na execução dessa atividade, por meio da automação dos processos, pode proporcionar ganhos significativos para as empresas.

## CAPÍTULO 3

# TÉCNICAS DE AGRUPAMENTO E ALGORITMOS GENÉTICOS

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento deste trabalho está pautado na formação de agrupamentos e determinação da melhor seqüência de atendimento das ocorrências. Para tanto, as técnicas utilizadas baseiam-se em mineração de dados e otimização por metaheurísticas.

A mineração de dados, de forma simplificada, consiste em extrair conhecimento de um conjunto de dados com o auxílio de métodos computacionais capazes de revelar padrões, estruturas, tendências, etc. Diferentes métodos podem ser usados em função da natureza dos dados e das informações que se desejam alcançar, como: identificação de aglomerados, geração de resumos e classificação. Como o foco deste trabalho está no agrupamento de dados, baseado na proximidade entre os mesmos, será utilizada uma técnica simples para a formação de agrupamentos, denominada *k-means*.

Segundo [Dias01], a mineração de dados também pode ser definida como a descoberta de informações úteis a partir de um conjunto de dados. Para a obtenção dessas informações, é necessária a utilização de técnicas e tarefas de busca por relacionamentos e padrões existentes entre os dados.

A heurística pode ser definida como toda e qualquer técnica criada para se obter soluções aproximadas de um problema, que não segue um percurso claro, mas se baseia na intuição e nas circunstâncias a fim de gerar conhecimento novo. Dentre as técnicas heurísticas, existem algumas cujo emprego é universal, desde que pequenas modificações sejam efetuadas, as quais são chamadas de metaheurísticas.

De acordo com [Polt07], as metaheurísticas são procedimentos computacionais e matemáticos desenvolvidos com base em outras ciências como a Física, a Biologia, etc. Funcionam como uma estratégia mestra que guia e modifica outras heurísticas a fim de obter soluções adicionais às obtidas através de buscas locais.

[Souz09] define as metaheurísticas como sendo procedimentos destinados a encontrar uma boa solução, eventualmente a ótima, consistindo na aplicação, em cada passo, de uma heurística subordinada, a qual tem que ser modelada para cada problema específico.

O Algoritmo Genético (AG) será a metaheurística utilizada neste trabalho para a obtenção da melhor seqüência de atendimento das ocorrências.

## 3.2 ALGORITMOS DE AGRUPAMENTO

Segundo [Guid08] para o ser humano é natural realizar a tarefa de agrupar objetos por suas similaridades, como, por exemplo, aves, peixes, plantas, etc. Dessa maneira aprendemos a distinguir o que há a nossa volta. De forma análoga, o processo artificial de agrupamento visa separar os dados em grupos que contenham atributos similares, facilitando a compreensão das informações que guardam.

De acordo com [Rabe07], as técnicas de agrupamento são empregadas para dividir os registros de uma base de dados em subconjuntos, de tal forma que os registros que compartilham o conjunto tenham similaridades entre si e sejam distintos dos registros armazenados em outros conjuntos, devendo as medidas de similaridades ser pré-estabelecidas. [Oliv04] ressalta a importância da definição dos critérios de similaridade e dissimilaridade a serem adotados. Nessa linha, [Alve07] afirma que quanto maior for a medida de similaridade, maior será a relação entre os dados, bem como, quanto maior a medida de dissimilaridade, menor será a semelhança entre os dados.

Para [Ribe09], geralmente a tarefa de agrupamento se baseia na escolha de uma partição que maximize um critério, ou seja, é um problema de otimização.

Em uma definição mais formal para o agrupamento, [Hrus03] sugere que um conjunto com  $n$  registros  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , onde  $X_i \in \mathfrak{R}^p$  é um vetor de dimensão  $p$  que pode ser agrupado em  $k$  subconjuntos disjuntos  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ , desde que as seguintes condições sejam respeitadas:

- a) A união dos subconjuntos forma o conjunto original -  $C_1 \cup C_2 \cup C_3 \dots \cup C_k = X$ .

- b) Um registro não pode pertencer a mais de um subconjunto -  $C_i \cap C_j = \{\}, \forall i \neq j, 1 \leq i, \leq k$  e  $1 \leq j \leq k$ .
- c) Cada subconjunto deve ter ao menos um objeto -  $C_i \neq \{\}, \forall i, 1 \leq i \leq k$ .

Segundo [Rabe07], um algoritmo ideal que implementa a tarefa de agrupamento deve ser capaz de lidar com os atributos categóricos, numéricos e ordinais. Quando o algoritmo não atende a estes requisitos é necessário efetuar uma operação de pré-processamento para adequar a representação dos dados às necessidades do algoritmo de mineração de dados.

A adequação dos dados, operação de pré-processamento, consiste basicamente em formatação, reorganização das informações, eliminação de distorções e tratamento da ausência de dados.

[Silv03] cita as características mais importantes para a classificação dos algoritmos de agrupamento, que são o tipo de dados, os parâmetros do algoritmo, o critério de similaridade e os conceitos e fundamentos (e.g. conjuntos nebulosos, estatística, redes neurais, etc).

O algoritmo de agrupamento utilizado neste trabalho é caracterizado como um algoritmo de agrupamento por partição, o qual se encaixa na classificação segundo o critério de similaridade.

### 3.2.1 Similaridade

De acordo com [Guid08], um bom algoritmo de agrupamento caracteriza-se pela produção de classes de alta qualidade, nas quais a similaridade intraclasse é alta e a interclasses é baixa, ou seja, a qualidade está diretamente relacionada ao método utilizado para medir a similaridade entre os pares de objetos.

Segundo os critérios de similaridade ou dissimilaridade, [Silv03] expõe a divisão dos algoritmos de agrupamento em quatro classes, quais sejam:

- Agrupamento baseado em grade: algoritmo típico em mineração de dados, cuja característica principal é a subdivisão do espaço em partições menores denominadas células. Os algoritmos quantificam o espaço dentro de um número finito de células e realizam todas as operações de quantificação neste espaço. A Figura 3.1, apresentada por [Silv03], representa um exemplo de grade bidimensional;

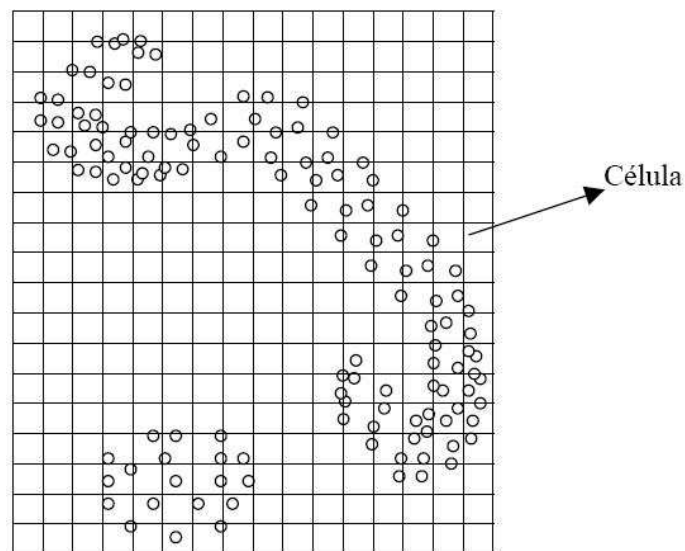


Figura 3.1 – Grade em um conjunto de dados bidimensionais

- Agrupamento baseado em densidade: com base nas condições de densidade os pontos vizinhos de um conjunto de dados são agrupados. Os grupos são caracterizados pelas regiões densas de pontos e separados por regiões de baixa densidade;
- Agrupamento hierárquico: os elementos de um dado conjunto  $X$  são agrupados hierarquicamente em diferentes etapas, formando uma árvore de grupos denominada dendograma. A Figura 3.2 representa um exemplo de dendograma;

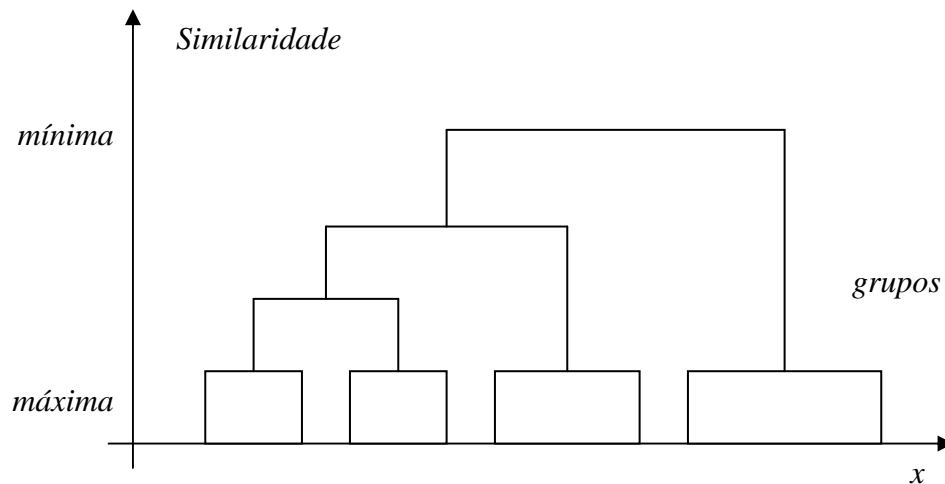


Figura 3.2 – Dendograma

- Agrupamento por partição: através da otimização de uma função objetivo, que enfatiza a estrutura global e local dos dados, é determinada a partição do conjunto de dados. De acordo com [Rabe07], o método de partição permite que os registros em análise sejam movidos de um grupo para outro grupo em diferentes etapas que ocorrem no processamento do algoritmo, na tentativa de buscar de forma direta a divisão aproximadamente ótima dos registros.

De acordo com [Ribe09], um algoritmo de agrupamento pode ser flat, o qual particiona todos os dados em grupos sem organizá-los em uma hierarquia, ou hierárquico o qual organiza os grupos estratificados.

Para [Guid08], os algoritmos de agrupamento nem sempre são facilmente classificados dentro de apenas uma categoria, pois utilizam vários métodos na sua construção. A aplicação das técnicas e métodos disponíveis depende do problema a ser resolvido e da quantidade de dados a ser trabalhada.

### 3.2.2 Métricas

Segundo [Silv03], as métricas proporcionam meios para se definir uma medida de similaridade ou dissimilaridade entre os pontos, pois, possibilitam a quantificação da proximidade ou semelhança dos pontos.



[Silv03] define o espaço métrico considerando um conjunto  $M \neq \emptyset$  e  $d: M \times M \rightarrow \mathfrak{R}_+$ , sendo  $\mathfrak{R}_+$  o conjunto dos números reais positivos, indica-se por  $d(x, y)$  a imagem de um par genérico  $(x, y)$  através da função  $d$ . Diz-se que  $d$  é uma métrica sobre  $M$  se as seguintes condições são verificadas para quaisquer  $x, y, z \in M$ :

$$\begin{aligned}
 (M_1) \quad & d(x, y) = 0 \quad (x = y), \\
 (M_2) \quad & d(x, y) = d(y, x), \\
 (M_3) \quad & d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) \text{ – desigualdade triangular.}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Nestas condições, cada imagem  $d(x, y)$  recebe o nome de distância de  $x$  a  $y$  e o par  $(M, d)$ , onde  $d$  é uma métrica sobre  $M$ , de espaço métrico. Cada objeto de um espaço métrico será sempre referido como ponto desse espaço, seja ele um ponto em si mesmo, ou um número, ou ainda uma função ou um vetor.

Segundo [Alve07], a Tabela 3.1 apresenta as principais métricas utilizadas para a determinação da distância entre dois pontos, considerando  $x = (x_1, \dots, x_p)$  e  $y = (y_1, \dots, y_p)$  pontos arbitrários do  $\mathfrak{R}^p$ .

Tabela 3.1 – Principais métricas de distância entre dois pontos

Distância Euclidiana	$d = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2}$
Distância Euclidiana Média	$d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2}{p}}$
Distância Euclidiana Padronizada	$d = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left( \frac{x_i - y_i}{S_i} \right)^2}$ <p><math>S_i \rightarrow</math> desvio padrão da <math>i</math>-ésima coordenada</p>
Distância Euclidiana Ponderada (Mahalanobis para $A = C^{-1}$ )	$d = \sqrt{(x - y)^T \cdot A(x - y)}$ <p><math>A \rightarrow</math> Matriz de ponderação</p> <p><math>C \rightarrow</math> Matriz de covariância</p>
Distância de Minkowsky	$d = \left[ \sum_{i=1}^p w_i  x_i - y_i ^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad k \geq 1, x_i \neq y_i$

Distância de Gower	$d = -\log_{10} \left[ 1 - \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \frac{ x_i - y_i }{x_{\max_i} - x_{\min_i}} \right]$
Distância de Cattel	$d = \frac{2 \left( P - \frac{2}{3} \right) - d_e^2}{2 \left( P - \frac{2}{3} \right) + d_e^2}$ <p><math>d_e^2 \rightarrow</math> Distância Euclidiana com variáveis padronizadas</p>
Distância de Tchebychev	$d(x, y) = \max \{  x_1 - y_1 , \dots,  x_P - y_P  \}$

De acordo com [Silv03], das métricas relacionadas na Tabela 3.1 a distância Euclidiana é a mais utilizada, apesar de assumir que os valores dos atributos do ponto não são correlacionados uns com os outros, sendo que em muitas aplicações esta característica não é desejável. Entretanto, para o trabalho proposto, a distância Euclidiana atende de forma satisfatória os requisitos para a formação dos agrupamentos.

### 3.2.3 Validação

[Silv03] ressalta a necessidade de formular critérios ou métodos quantitativos que ajudem a realizar uma avaliação objetiva dos resultados dos algoritmos de agrupamento. Estes critérios e métodos quantitativos são índices que auxiliam na validação dos agrupamentos realizados pelos algoritmos.

Segundo [Ribe09], é necessário conhecer a importância da validação, ou avaliação, tanto para objetivos de precisão do agrupamento (avaliação externa), quanto para aceitação dos resultados do agrupamento em tempo de execução (avaliação interna), podendo a validação ser efetuada de duas formas:

- a) Considerando um critério externo, que avalia os resultados de um algoritmo de agrupamento comparando com uma estrutura de classes pré-especificada, que reflete o conhecimento a priori da real estrutura dos dados. A avaliação externa compara o resultado do agrupamento com um caso real de divisão de classes;

- b) Considerando um critério interno, que geralmente envolve medidas que utilizam os próprios vetores dos dados para mensurar a qualidade do agrupamento, sem consultar uma estrutura de classes externa. A avaliação interna mede a qualidade do agrupamento sem conhecimento da real distribuição de classes. Uma outra forma de calcular a avaliação interna se faz por métodos baseados em estabilidade, nos quais se realiza amostragem dos dados.

De acordo com [Silv03], as funções de validação têm sido usadas como indicadores da qualidade do resultado da partição, pois, fornecem índices de validação. Estes índices podem ser considerados como um valor que disponibiliza uma maneira de avaliar os resultados do agrupamento.

[Ribe09] relata que a similaridade geral, composta pela soma das similaridades do centróide do grupo aos padrões, é um dos critérios mais usados em agrupamentos de documentos; bem como, que o caso inverso desta medida é o erro quadrado intragrupos, o qual utiliza a medida de dissimilaridades para calcular o grau de separação dos pontos em relação aos seus centróides. As duas medidas medem a proximidade intragrupos.

Segundo [Alve07], quando um algoritmo não leva em conta um critério de avaliação, deve-se utilizar métodos baseados em funções de validação aplicadas sobre a partição para determinar o número de grupos e partição mais adequada dentre os resultados obtidos. Por fornecerem índices de validação, as funções de validação têm sido utilizadas como indicadores da qualidade do resultado da partição.

[Vill08] sugere como alternativa de avaliação a atribuição de nota à qualidade dos grupos formados, considerando as distâncias intra e intergrupos a fim de obter grupos compactos e bem separados.

[Silv03] conclui que apesar dos avanços e das diferentes propostas na literatura visando uma validação de grupos objetiva e bem determinada, nenhuma delas é aceita de forma unânime.

### 3.3 ALGORITMO K-MEANS

Como mencionado anteriormente, o algoritmo de agrupamento utilizado no presente trabalho é o *k-means*, também conhecido como k-médias, proposto em 1967 por J. MacQueen, conforme mencionado em [Rabe07]. O referido algoritmo utiliza o método de partição para a formação dos agrupamentos. De acordo com [Gold05], é o algoritmo mais utilizado na tarefa de agrupamento. Segundo [Rabe07], o *k-means* possui diversas variações (*k-modes*, *k-prototypes* e *k-medoids*), as quais, de uma forma geral, diferem no cálculo da similaridade entre os grupos encontrados e ou na estratégia para calcular a média dos grupos.

De acordo com [Rabe07], o algoritmo *k-means* faz uso de dados numéricos, selecionando k elementos para formação inicial dos centróides (elementos centrais) do grupo. Assim será obtida uma classificação automática, ou seja, sem a necessidade de supervisão e de uma classificação pré-existente. Segundo [Ribe09], cada centróide corresponde ao centro geométrico de um grupo, ou seja, à média de todos os vetores do grupo. Dado um grupo  $G_k$ , o seu centróide pode ser obtido da seguinte forma:

$$c_k = \frac{1}{|G_k|} \sum_{d_i \in G_k} d_i \quad (3.2)$$

Onde  $|G_k|$  corresponde ao número de padrões pertencentes ao grupo  $G_k$ .

Para a implementação do algoritmo *k-means* é necessário seguir os seguintes passos:

- 1- Definição dos k centróides: pode ser feita através da seleção randômica de k elementos ou através da seleção dos k primeiros elementos ou ainda através da seleção de k elementos com valores bem distintos;
- 2- Associação de cada elemento a um centróide: calculam-se as distâncias de cada elemento aos centróides, sendo considerada a menor distância

encontrada para cada elemento, a fim de se efetuar a associação do elemento ao centróide correspondente;

- 3- Cálculo dos novos centróides: após a formação dos agrupamentos iniciais são calculados os novos centróides;
- 4- Os passos 2 e 3 devem ser repetidos até que seja satisfeito o critério de parada do algoritmo ou, o que é mais usual, até que não haja mais alterações dos centróides.

A Figura 3.3 é similar a apresentada por [Gold05], para representar esquematicamente o funcionamento do algoritmo *k-means*.

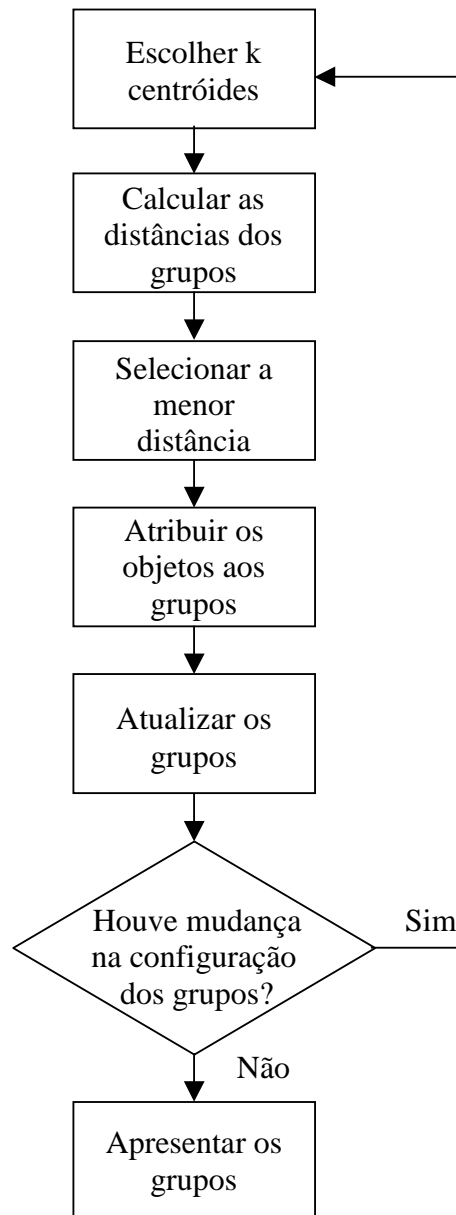


Figura 3.3 – Funcionamento do algoritmo *k-means*

### 3.4 ALGORITMOS GENÉTICOS

Em um histórico breve, [Polt07] relata que a primeira referência a algoritmos genéticos (AG) foi na Dissertação de John H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, de 1975. Em 1989 David E. Goldberg aprofunda o assunto no trabalho *Genetic Algorithms in Search*. Daí por diante outros artigos e dissertações consolidaram e validaram a técnica, a qual, de acordo com [Sant04] procura solucionar problemas complexos de otimização e aprendizado computacional de uma forma probabilística, sem exigir muito conhecimento prévio destes. Trata-se de um método de resolução de propósitos gerais, cujo princípio é independente da natureza do problema específico. Ainda de acordo com [Sant04], os AG têm como base a Teoria da Seleção Natural, descrita no livro *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, publicado em 1858 pelos naturalistas ingleses Charles Darwin e Alfred Wallace.

Basicamente, a Teoria da Seleção Natural supõe que a evolução das espécies está diretamente ligada à capacidade dos indivíduos se adaptarem ao meio em que vivem, onde apenas os mais aptos sobrevivem e se perpetuam através de descendentes. Nesse processo seletivo são gerados indivíduos com algumas características que os destacam, de forma positiva, dos demais de sua espécie. Com isso aumentam suas probabilidades de sobrevivência e gerar descendentes ainda melhores, evoluindo a espécie quanto à sua adaptação ao meio ambiente. Por outro lado, indivíduos que não se destacam tendem a não sobreviverem e a não gerar descendentes, sendo gradativamente eliminados.

Analogamente à Teoria da Seleção natural, nos AG os indivíduos sofrem operações pseudogenéticas a fim de gerarem novos indivíduos mais adaptados, possibilitando dessa forma a obtenção da solução potencialmente ótima do problema, ou seja, o melhor indivíduo. De acordo com [Falc04] existe uma relação analógica entre os componentes de um indivíduo da população e a representação das características de um problema de otimização combinatória. Cada indivíduo da população, denominado cromossomo, representa uma solução do problema codificado. Os valores que compõem um indivíduo são denominados genes, os quais podem sofrer alterações de uma geração para outra, através da aplicação de operadores de seleção, cruzamento e mutação, formando assim novos cromossomos ou novas soluções para o problema. Ainda, segundo [Falc04], uma característica importante dos AG é que não utilizam necessariamente informações a respeito do problema durante o processo evolutivo, o que significa que, uma vez

codificada a solução através de um indivíduo, o processo de melhoria dessa solução é independente do problema original.

[Anal06] ilustra o ciclo de um algoritmo genético através da Figura 3.4, representando as etapas de seleção, cruzamento e mutação.

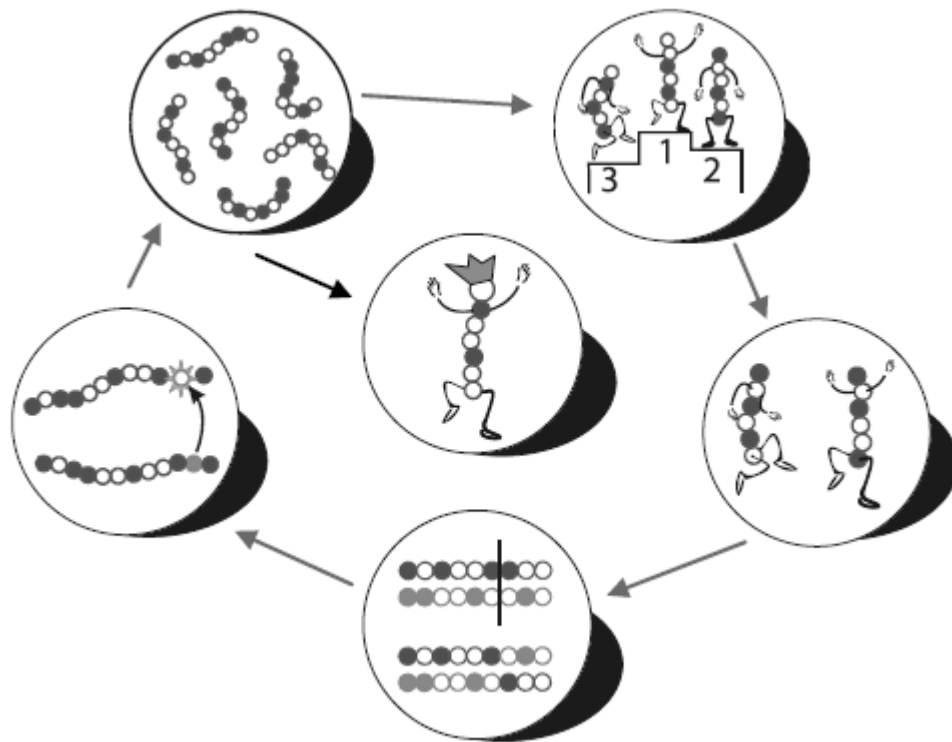


Figura 3.4 – Ciclo de um algoritmo genético

[Cost05] destaca os principais fatores que tornam o algoritmo genético uma técnica bem sucedida, que são: a simplicidade de operação; a facilidade de implementação; a eficácia na busca da região onde provavelmente encontra-se a solução ótima; e a aplicabilidade em situações onde não se conheça o modelo matemático ou se este for de difícil representação ou impreciso.

De um modo geral, [Polt07] relaciona as características dos AG, como a seguir:

- Operam numa população de pontos e não a partir de um ponto isolado;
- Podem operar num espaço de soluções codificadas, e não no espaço de busca diretamente;

- Necessitam somente de informação sobre o valor de uma função objetivo para cada membro da população;
- Usam transições probabilísticas e não regras determinísticas.

Conforme descrito por [Oliv04] a formulação original dos AG foi desenvolvida com a utilização dos dígitos binários, sendo adaptada mais tarde para parâmetros contínuos (números reais). Apesar da representação binária ser eficiente, ela pode não apresentar boa precisão para problemas de parâmetros contínuos. Usando a representação com números reais a precisão pode melhorar significativamente, além de reduzir o tempo e o esforço computacional, tendo em vista que uma etapa do algoritmo, a codificação das variáveis, deixa de ser necessária.

Resumidamente, [Falc04] apresenta a relação de elementos necessários e suas definições, para a modelagem e resolução de um problema com a utilização dos AG, a saber:

- Geração: determinada população num dado instante de tempo;
- População: conjunto de indivíduos;
- Indivíduo: definido pelos seus cromossomos (tipicamente um), representa uma possível solução;
- Cromossomo: conjunto de genes;
- Gene: codificação de um traço podendo tomar diferentes valores;
- Função de aptidão (*fitness*): para medir a qualidade do indivíduo;
- Cruzamento: troca de material genético entre dois indivíduos;
- Mutação: inserção de material genético novo em indivíduos.

A Figura 3.5 apresenta esquematicamente as etapas de desenvolvimento e de funcionamento de um algoritmo genético:



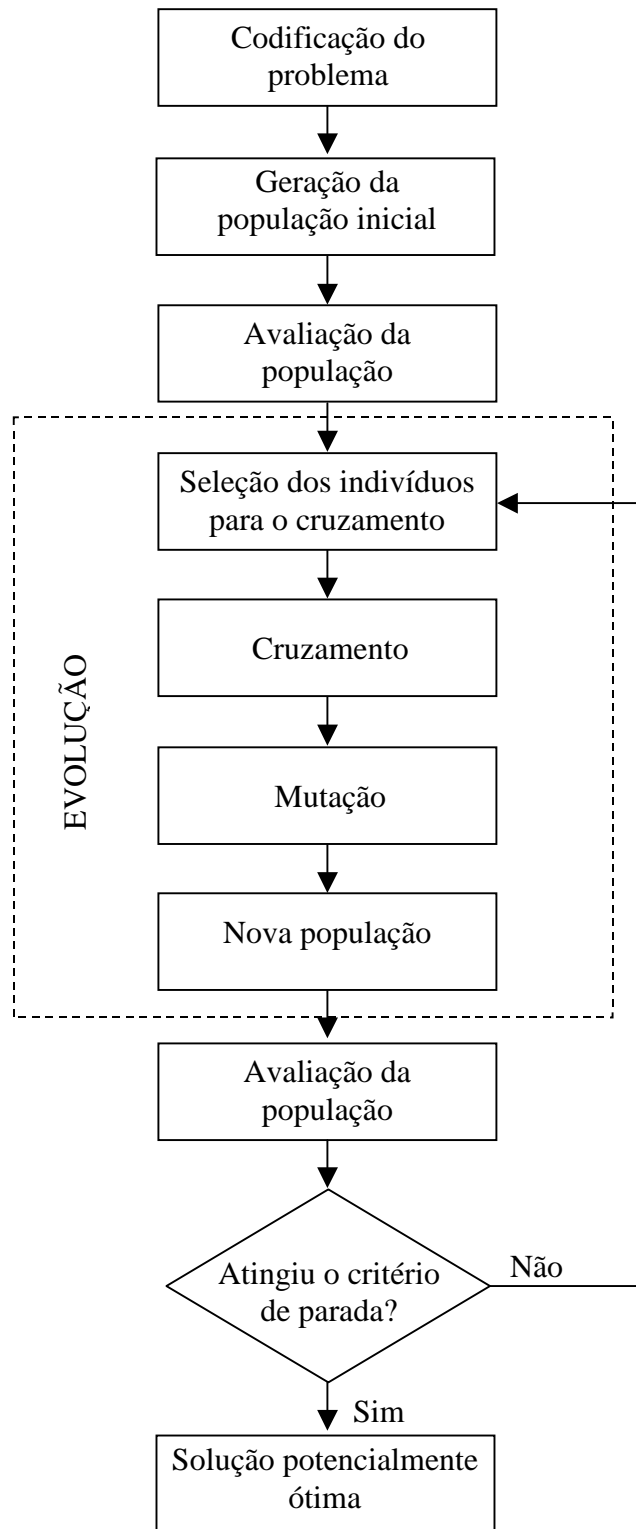


Figura 3.5 – Desenvolvimento e funcionamento de um algoritmo genético

### 3.4.1 Elementos de um algoritmo genético

[Falc04] relaciona os seguintes componentes básicos, ou etapas, que constituem um algoritmo genético:

- Representação genética das soluções do problema;
- Definição da função de aptidão (avaliação ou fitness);
- Determinação da população inicial;
- Definição do método de seleção;
- Definição dos operadores genéticos (cruzamento e mutação) para a reprodução dos novos indivíduos;
- Definição de parâmetros genéticos, tais como: tamanho da população, critérios de parada do algoritmo, taxa de mutação, etc.

### 3.4.2 Representação da Solução

Um dos primeiros passos a serem dados para a implementação de um algoritmo genético é a definição da representação de uma solução em forma de um cromossomo ou indivíduo. Em outras palavras, codifica-se a solução através de uma seqüência de caracteres que traduzam as suas características. De acordo com [Falc04], normalmente, uma solução de um problema está associada a um cromossomo  $p$  representado por um vetor com  $n$  posições, tal que:  $p = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , sendo cada componente  $x_i$  correspondente a um gene, ou seja, a uma variável da solução.

A codificação da solução pode ser feita utilizando-se números binários ou inteiros. A representação binária apresenta vantagens, como: a facilidade em aplicar as operações genéticas; a simplicidade em programar e a base teórica desenvolvida para esse tipo de representação. A inconveniência desta representação está no tratamento de problemas que possuem parâmetros contínuos, para os quais, dependendo da precisão desejada, podem ser necessárias longas cadeias de bits, requerendo substancial memória. Além disso, a posição dos genes a serem operados geneticamente interfere de forma significativa na aptidão do cromossomo do qual fazem parte, o que é desfavorável ao algoritmo genético.

Em linha com o exposto acima, [Oliv04] relata que originalmente a formulação dos AG foi desenvolvida com base nos dígitos binários (0 e 1), a qual, posteriormente, foi adaptada para parâmetros contínuos (números reais). Ainda de acordo com [Oliv04] apesar da eficiência da representação binária, ela não apresenta boa precisão em problemas de parâmetros contínuos, os quais são melhor caracterizados através da representação por números reais, sendo dessa forma reduzido o tempo computacional, pois, a codificação das variáveis torna-se desnecessária.

### **3.4.2.1 Função de Aptidão**

A definição da função de aptidão (ou objetivo) é um ponto sensível na construção de um algoritmo genético para solução de um problema, pois, esta “guiará” a evolução dos indivíduos da população. Logo a sua composição deve conter as variáveis mais relevantes ou representativas do problema a ser tratado. Em outras palavras, a função de aptidão deve traduzir o critério de avaliação dos indivíduos, ou seja, deve diferenciá-los com base no valor de aptidão (ou *fitness*) associado a cada um, de forma que quanto maior a aptidão maior será a chance do indivíduo sobreviver e se reproduzir, como acontece na natureza: indivíduos mais adaptados ao ambiente têm maiores chances de se perpetuar. Segundo [Falc04], a função de aptidão deve ser capaz de discriminar os indivíduos bons dos ruins, além disso, esta diferenciação deve ser significativa, pois, caso contrário, haverá um elevado consumo de tempo computacional.

De acordo com [Lazz08], a função objetivo (ou função de aptidão) é em geral uma caixa preta para o algoritmo genético, não importando a forma como os resultados são obtidos, cabendo ao usuário definir a forma de avaliar os indivíduos (por exemplo, através de uma função matemática).

### 3.4.2.2 População inicial

A população inicial consiste em um conjunto de indivíduos que representam possíveis soluções do problema. Essa população pode ser gerada aleatoriamente ou baseada em uma heurística quando há algum conhecimento prévio sobre as soluções. Nessa linha, [Silv08] relata que, quando for possível prever as regiões do espaço de busca mais prováveis de se encontrar a solução ótima, podem ser inseridos alguns indivíduos que contenham soluções presentes nestas regiões.

De acordo com [Silv08], o tamanho da população é pré-determinado e normalmente não muda no decorrer das gerações. Logo, é um parâmetro que deve ser definido antes de se iniciar o algoritmo. A sua escolha afeta o desempenho do algoritmo genético e, dependendo da natureza do problema, pode ser desde centenas até milhares de indivíduos. Segundo [Falc04], uma população pequena pode reduzir o espaço de busca, diminuindo as possibilidades de se atingir o ótimo global. No outro extremo, as populações grandes acarretam maior consumo de tempo computacional.

### 3.4.2.3 Método de seleção

Nos AG os mecanismos de seleção devem simular o processo de seleção natural, o que favorece a sobrevivência dos indivíduos mais aptos ou adaptados ao meio ambiente. A maioria dos métodos de seleção é projetada para escolher preferencialmente indivíduos com maiores valores de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população.

De acordo com [Cost05], existem diversos métodos para a seleção de indivíduo. Entretanto, os mais utilizados são os métodos da Roleta, do Torneio e por Ranking.

- Método da Roleta

Consiste na seleção dos indivíduos de acordo com o valor de sua aptidão, sendo a probabilidade do indivíduo ser sorteado diretamente proporcional ao seu respectivo valor de aptidão. A roleta deve ser dividida em  $n$  partes, sendo  $n$  igual o número de indivíduos e cada parte proporcional ao valor da aptidão, como ilustrado na Figura

3.6, onde, como exemplo, são considerados 5 indivíduos e suas respectivas aptidões, bem como a expressão para a determinação das probabilidades.

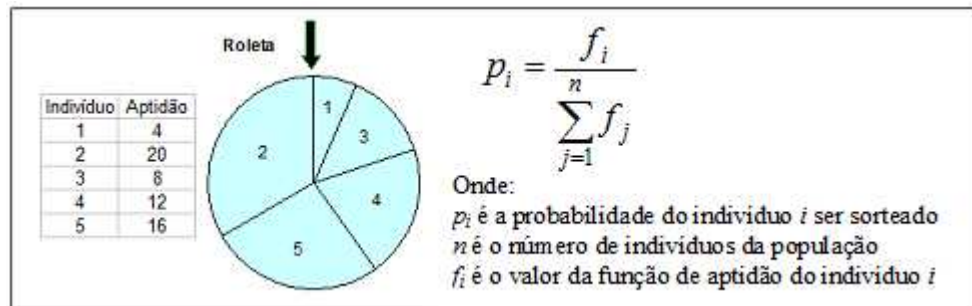


Figura 3.6 – Método de seleção da roleta

A roleta deve ser girada repetidas vezes até que se tenha um número suficiente de indivíduos para a formação da população. Vale ressaltar que um mesmo indivíduo pode ser sorteado mais de uma vez. Segundo [Silv09], o método da roleta pode ser aplicado sem reposição, ou seja, ao ser escolhido o indivíduo deve ser desconsiderado no próximo giro da roleta e as probabilidades calculadas novamente.

De acordo com [Bent08], no início da execução do AG ou para populações pequenas, podem ser encontradas grandes diferenças nos valores de aptidão dos indivíduos, ou indivíduos bem avaliados, quando a aptidão média da população é baixa. Ao final da execução é bem comum que a média da população esteja próxima do valor do melhor indivíduo. Nestes casos, pode haver convergência prematura do AG, resultando em populações com pouca diversidade.

- Método do Torneio

Consiste na escolha aleatória de dois indivíduos, sendo selecionado o de maior aptidão para participação da formação da população. De acordo com [Brus08], na seleção por torneio não são atribuídos, explicitamente, valores de probabilidades aos indivíduos. Em uma variação deste método estipula-se arbitrariamente um número  $k$  ( $k \geq 2$ ) de indivíduos para participação do torneio e é escolhido o de maior aptidão para participação da formação da nova população.

Conforme [Brus08], quanto maior for o valor de  $k$  maior será a pressão seletiva, conseqüentemente, os indivíduos mais fortes dominarão a população com maior velocidade, causando a extinção dos mais fracos.

Segundo [Silv09], o método do torneio é uma forma mais simples de seleção dos indivíduos e possui um custo computacional menor que do método da roleta.

- Método por Ranking

Consiste na seleção dos indivíduos de acordo com as probabilidades atribuídas a estes. Inicialmente, os indivíduos são ordenados de acordo com os seus valores de aptidão (formação do ranking) e logo após cada indivíduo recebe um novo valor de aptidão de acordo com a sua posição no ranking. A seleção então é feita considerando o novo valor de aptidão, dessa forma os indivíduos melhor ranqueados terão mais chances de serem escolhidos.

[Bent08], cita o ranking linear, no qual a população deve ser ordenada conforme o valor de aptidão de cada indivíduo e são considerados apenas os  $\mu$  melhores avaliados. As probabilidades são distribuídas de forma idêntica (cada um recebe  $1/\mu$ ) independente da posição no ranking, ou seja,  $\mu$  primeiros indivíduos têm chances iguais de serem escolhidos para a formação da nova população.

#### **3.4.2.4 Operadores Genéticos**

A evolução da população ao longo das gerações se dá pela aplicação dos operadores genéticos, os quais são responsáveis pela diversificação da população e pela manutenção das características de adaptação dos indivíduos, adquiridas em gerações anteriores. De acordo com [Ávil02], os operadores genéticos têm por objetivo a transformação da população através de sucessivas gerações, com o intuito de melhorar a aptidão dos indivíduos.

Segundo [Brus08], após a seleção dos indivíduos para reprodução devem ser aplicados os operadores genéticos para modificar as características genéticas dos indivíduos, sendo a mutação e o cruzamento os operadores mais utilizados. [Silv09] relata

que é necessária a adoção do elitismo para que não se perca boas soluções durante o processo de formação das novas populações. Na mesma linha, para [Ávil02], devido às suas características probabilísticas, os AG podem localizar o melhor indivíduo ou um indivíduo muito bom a qualquer momento. Entretanto esse indivíduo pode ser perdido ao longo do processo evolutivo, logo é necessária a adoção do elitismo para evitar a perda do indivíduo com alto valor de aptidão.

#### - Cruzamento

Operador genético que possibilita a recombinação das características dos pais durante a reprodução, ou seja, é responsável pela transmissão da herança genética dos pais aos novos indivíduos. De acordo com [Bent08], a recombinação das soluções através da aplicação do cruzamento, favorece a exploração do espaço de soluções em torno das já conhecidas, além de direcionar o processo de evolução de uma maneira geral. A troca de material genético ocorre de acordo com uma determinada probabilidade (taxa de cruzamento), logo, pode não acontecer, sendo os “novos” indivíduos idênticos aos selecionados da geração anterior.

Segundo [Ávil02], da mesma forma que os AG possuem alta flexibilidade de implementação, a operação de cruzamento também pode ser realizada de diferentes maneiras. [Falc04] cita alguns tipos de cruzamentos encontrados na literatura, quais sejam: com um ponto de corte; com dois pontos de corte; com  $n$  pontos; uniforme; por variável; e entre vários indivíduos. O mesmo autor também faz referência aos operadores desenvolvidos para problemas de ordenação, como arranjo e permutações, para os quais deve-se evitar a repetição de uma variável no mesmo indivíduo.

Para [Silv08], os tipos de cruzamento mais comuns são: de um ponto, de dois pontos e uniforme. Estes tipos serão detalhados abaixo, com exceção do de dois pontos por ser uma variação do de  $n$  pontos, que também será detalhado.

O cruzamento de um ponto, segundo [Brus08] é o mais utilizado. Um ponto de corte é aleatoriamente escolhido nos cromossomos dos pais, e os segmentos de cromossomos criados são combinados, de forma que as informações anteriores a este ponto de um dos pais são ligadas às informações posteriores a este ponto no

outro pai. A Figura 3.7 ilustra esta operação considerando a representação binária de dois cromossomos.

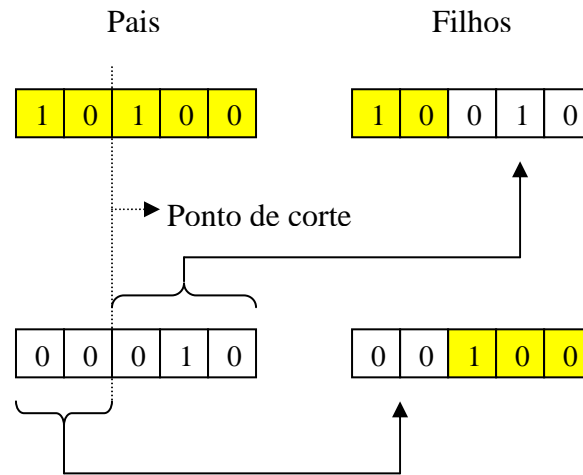


Figura 3.7 – Operação de cruzamento em um ponto

O cruzamento multipontos ou de  $n$  pontos consiste na generalização do cruzamento em um ponto, com as trocas de material genético sendo efetuadas em vários pontos selecionados nos cromossomos. De acordo com [Falc04], se algum ponto de corte for escolhido duas vezes, não se deve fazer nova escolha.

Já no cruzamento uniforme não são escolhidos os pontos de corte ou cruzamento, mas sim, é determinada a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais, através de um parâmetro global. [Bent08] descreve o cruzamento uniforme como um operador que faz a comparação dos cromossomos gene a gene. Constatados valores iguais, ambos os descendentes recebem o valor; caso sejam diferentes, eles serão trocados de acordo com uma probabilidade fixa.

- Mutação

Operador que possibilita a introdução e a manutenção da diversidade genética da população, através da alteração arbitrária de um ou mais genes do cromossomo de acordo com a probabilidade de mutação (taxa de mutação). Segundo [Cost05], após sucessivas combinações ao longo das gerações pode haver perda acidental e irreversível de informação genética e a mutação funciona como uma proteção



contra essa perda. Para o caso da representação binária do cromossomo, a operação de mutação consiste na troca do valor de um gene, escolhido aleatoriamente, de 0 para 1 ou vice-versa. De acordo com [Falc04], em problemas que envolvam ordenação e permutação, a mutação deve ser efetuada sem que haja repetição de variáveis em um mesmo indivíduo, sendo a operação realizada a partir da escolha de duas variáveis para que sejam trocadas as posições destas. A Figura 3.8 ilustra esta operação considerando a representação binária do indivíduo.



Figura 3.8 – Operação de mutação

- Elitismo

Na sua forma mais básica, consiste em acrescentar à nova população o indivíduo da população anterior com maior valor de aptidão. De acordo com [Bent08], através da técnica elitista, o indivíduo melhor avaliado de uma geração é introduzido na geração seguinte, a fim de evitar a perda de informações importantes presentes em indivíduos de alta aptidão. Ainda segundo [Bent08], o elitismo pode ser aplicado considerando o controle do número de vezes que um indivíduo pode ser reintroduzido; com isso, busca-se evitar convergências para máximos locais. [Ávil02] descreve duas formas de aplicação do elitismo. A primeira, denominada elitismo simples, consiste na manutenção do melhor indivíduo para introdução nas populações futuras. A cada geração é feita a verificação se surgiu um indivíduo mais apto. Caso negativo, continua-se inserido o indivíduo anteriormente selecionado. Na segunda, denominada elitismo global, é verificada a aptidão dos filhos após a aplicação dos operadores genéticos e são introduzidos na nova população somente os filhos que forem contribuir para o aumento da aptidão média.

### 3.4.2.5 Parâmetros genéticos

Os parâmetros genéticos devem ser adotados de acordo com as características do problema e com os recursos disponíveis, pois, influenciam diretamente no comportamento e desempenho dos AG. [Falc04] cita a análise de desempenho como uma das linhas de pesquisa sobre AG, na qual buscam-se mecanismos, parâmetros e outros artifícios que melhorem o desempenho dos AG na solução dos problemas. De acordo com [Polt07], os principais parâmetros de controle dos AG são o tamanho da população, a taxa de cruzamento e a taxa de mutação.

O tamanho da população está ligado diretamente à eficiência global dos algoritmos genéticos. A escolha de uma população pequena demanda uma menor necessidade de recursos computacionais, entretanto, a eficiência do algoritmo fica comprometida em função da pequena cobertura do espaço de busca. Por outro lado, uma grande população fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, evitando convergências prematuras para soluções locais, mas exige um tempo maior de execução do algoritmo ou maiores recursos computacionais. Na mesma linha, segundo [Falc04], o aumento da população proporciona o aumento da diversidade e diminui a probabilidade de convergência para um ponto ótimo local, entretanto, acarreta o aumento do tempo necessário para a convergência para a região ótima global.

A taxa de cruzamento está ligada à velocidade de introdução de novos indivíduos na população. Quanto maior a taxa mais rapidamente a população será modificada, podendo nos casos de altas taxas ocorrer a perda de indivíduos de maior aptidão. Se for utilizada uma taxa muito baixa o algoritmo torna-se lento. De acordo com [Falc04], o aumento da probabilidade de cruzamento leva ao aumento da combinação dos blocos de construção, entretanto, também aumentam as chances da quebra das boas soluções.

A taxa de mutação, de acordo com [Carv06], representa a probabilidade de se submeter os genes de um indivíduo ao operador de mutação. [Brus08] relata que a taxa de mutação deve ser pequena, pois, altas taxas de mutação implicariam em buscas aleatórias.

De acordo com [Bent08], a taxa de mutação pode ser variável, com valores altos nas gerações iniciais (favorecendo a exploração do espaço das soluções que inicialmente são obtidas aleatoriamente ao longo das gerações) e com valores cada vez menores até que o algoritmo estabilize os indivíduos entorno do valor ótimo.

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA PROPOSTA

---

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Existe um campo muito vasto para o desenvolvimento de trabalhos científicos tomando como base as atividades dos centros de operação das empresas de distribuição de energia elétrica. Em muitos casos são utilizadas técnicas computacionais heurísticas visando a obtenção de respostas para problemas complexos da operação.

As reclamações feitas aos *call centers* das empresas, geralmente, são registradas em um sistema de gestão da distribuição e repassadas ao centro de operação para que sejam providenciados os atendimentos, a partir da distribuição das ocorrências para as equipes de emergência. Normalmente, para facilitar o atendimento emergencial, as áreas de concessão das empresas são divididas em regiões geográficas, as quais possuem um número definido de equipes para o atendimento, podendo tais regiões ser atendidas por um ou por vários centros de operação. Se tomarmos como exemplo o caso da Light, a sua área de concessão, com cerca de 10.970 km<sup>2</sup>, está dividida em 9 regiões (coordenações regionais) e a distribuição das ocorrências está concentrada em um único centro de operação. Neste trabalho, será considerado o atendimento em uma região geográfica específica, sendo que para o caso de atendimento em várias regiões bastaria a aplicação do algoritmo para cada região.

A Figura 4.1 ilustra o fluxograma de atendimento de ocorrências de BT, considerando um único centro de operação e a área de concessão dividida em três regiões geográficas.

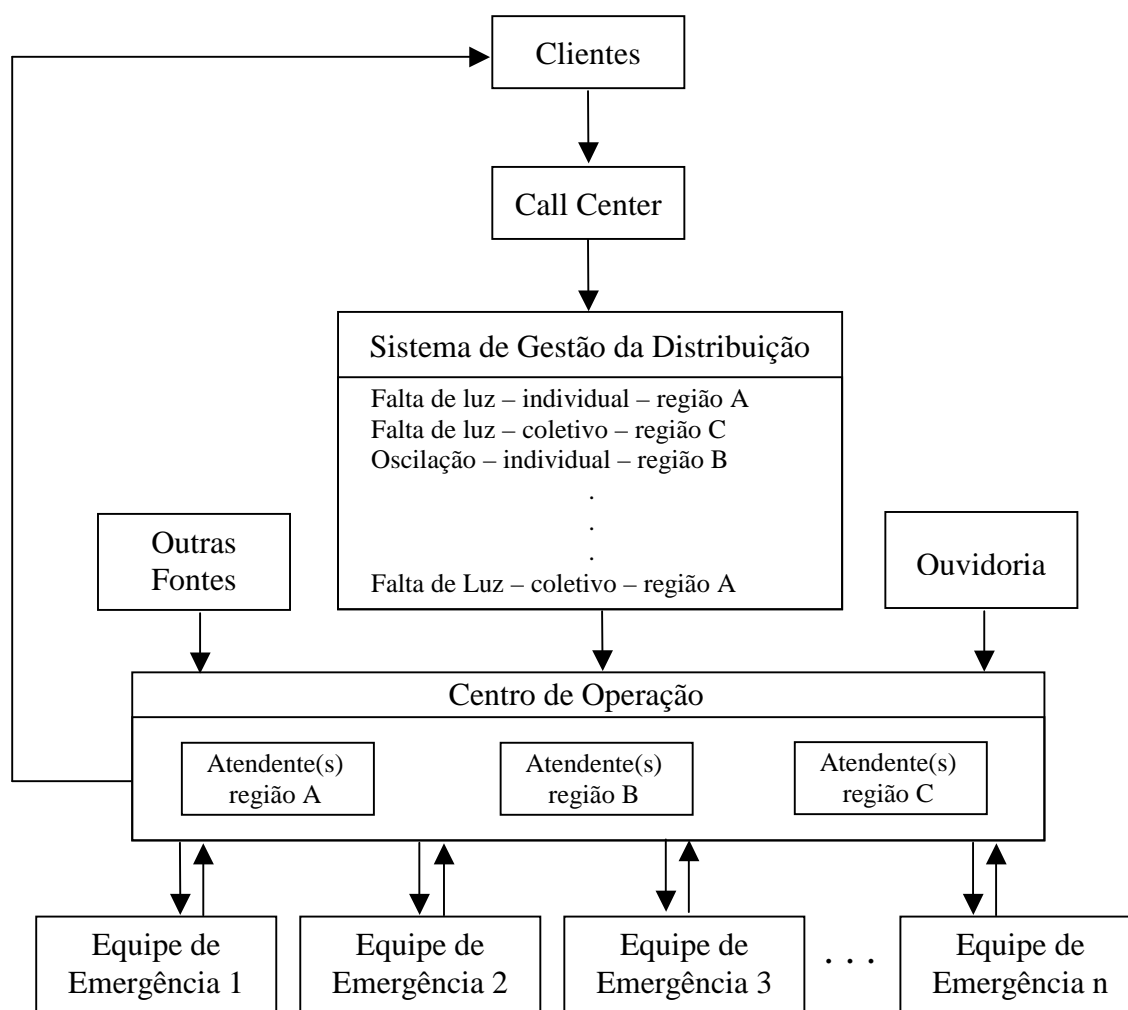


Figura 4.1– Fluxograma de atendimento de ocorrências de BT

Os setores de atendimento de emergências das empresas distribuidoras de energia elétrica funcionam diariamente por 24 horas, contando com um número variável de equipes em cada turno de trabalho.

Os problemas mais comuns relatados pelos clientes são falta de luz, falta de fase e oscilação de tensão, os quais são divididos em duas categorias: a dos casos individuais, que atingem, normalmente, um único cliente; e a dos casos coletivos, que a afetam um número maior de clientes simultaneamente, cujos problemas geralmente estão relacionados a transformadores. Os casos relatados aos setores de ouvidoria das empresas devem ser priorizados em função de existirem prazos mais apertados para o atendimento do cliente e normalmente são associados às reincidências de um problema.

A atividade de alocação de ocorrências de BT para as equipes de emergência realizarem os atendimentos tem um papel estratégico para o alcance das metas das empresas de distribuição de energia. Por conseguinte, este trabalho está focado na busca da eficiência do despacho de ocorrências através da utilização de ferramentas computacionais.

A metodologia aqui proposta está dividida em três etapas. Na primeira etapa é utilizado um algoritmo convencional para gerar os parâmetros das ocorrências que juntamente com o número de equipes disponíveis para o atendimento comporão os dados de entrada. Na segunda parte é utilizado um algoritmo de mineração de dados para a formação de grupos de ocorrências, considerando-se as proximidades entre as mesmas. Por fim, na terceira parte são definidas as sequências de atendimentos das ocorrências de cada grupo, utilizando-se um algoritmo evolutivo. Dessa forma, são obtidas as rotas otimizadas que atendem aos propósitos de minimização dos tempos de atendimento e do valor do CHI.

## **4.2 FILTRAGEM E CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS DE OCORRÊNCIAS**

Usualmente, as comunicações dos clientes registradas pelos *call centers* em sistemas de gestão da distribuição recebem o primeiro tratamento pelos próprios SGD, conforme os dados de cadastro dos clientes, podendo uma comunicação ser associada à outra por possuírem características em comum, por exemplo, o endereço ou o equipamento de força supridor (transformador de zona). As empresas adotam parâmetros para caracterizar os tipos de ocorrências (caso coletivo ou isolado). Por exemplo, para a criação de uma ocorrência de caso coletivo é necessária a associação de um determinado número de comunicações de clientes isolados pertencentes a uma mesma unidade transformadora. Este número de comunicações varia de empresa para empresa e pode ter valores diferentes para regiões geográficas distintas em uma mesma empresa. Esse tipo de ocorrência é conhecido como ocorrência de zona (transformador de distribuição). As comunicações que não são passíveis de associação são transformadas em ocorrências de cliente isolado.

Para fim de atendimento, as ocorrências possuem dois estados, o pendente, que caracteriza as ocorrências que ainda não foram atendidas (mesmo que já tenha uma equipe

destinada para o atendimento) e o encerrado, que caracteriza a finalização da ocorrência no SGD, ou seja, foram inseridas as informações relativas ao atendimento prestado, tais como os horários de distribuição da ocorrência para a equipe, de chegada ao local e de identificação do tipo de defeito e de finalização do atendimento, bem como o resultado do atendimento (problema resolvido ou não) e o serviço executado pela equipe de emergência.

Para a geração dos dados de entrada é utilizado um “gerador de ocorrências”, o qual consiste em um algoritmo especialista desenvolvido para criação dos dados para testes, simulando o registro de ocorrências pendentes em um SGD. Os dados que caracterizam as ocorrências são as coordenadas geográficas e o tipo.

As coordenadas geográficas correspondem a valores pertencentes a um plano X-Y, representando os dados de latitude e longitude. A fim de simplificar o problema, a altitude é desprezada, mesmo porque não são consideradas as características de relevo para distribuição das ocorrências.

O tipo nada mais é do que a caracterização da ocorrência como sendo um caso coletivo (zona), representado pela letra Z ou individual (cliente isolado) representada pela letra I. O número de ocorrências de cliente isolado é normalmente muito maior que o número de ocorrências de zona.

Além dos parâmetros das ocorrências, entre os dados de entrada também estão o número total de ocorrências pendentes e o número de equipes de emergência disponíveis para o atendimento.

A Figura 4.2 apresenta as informações de entrada a serem utilizadas no algoritmo de determinação de rotas.

(Nº de equipes)	(Nº de ocorrências)		
4	40		
(Nº da ocorrência)	(Coordenada X)	(Coordenada Y)	(Tipo)
1	123	265	I
2	432	215	Z
3	153	333	I
⋮	⋮	⋮	⋮
n	342	168	I

Figura 4.2 – Informações de entrada

Sempre que for necessário fazer nova distribuição de ocorrências, é utilizada uma nova entrada de dados, a qual é gerada desconsiderando as ocorrências já atendidas.

Os critérios utilizados neste trabalho para efetuar novas distribuições de ocorrências são baseados em parâmetros que determinam a mudança das condições de atendimento, tais como o número de novas ocorrências (ainda não atendidas), alterações no número de equipes disponíveis para o atendimento e ociosidade de equipes.

### 4.3 DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS

As ocorrências que se constituem nos dados de entrada do problema em estudo devem ser divididas em grupos para que posteriormente sejam determinadas as rotas ótimas de atendimento.

A quantidade de agrupamentos é uma variável de entrada que corresponde ao número de equipes de emergência disponíveis para a realização do atendimento na região de interesse. Dessa forma, será destinado um grupo de ocorrências para cada equipe de emergência.

Aplicando o algoritmo *k-means*, as ocorrências são agrupadas em torno de centróides que inicialmente são representados pelas primeiras  $n$  ocorrências, onde  $n$  é igual ao número de equipes de emergência, sendo estes centróides atualizados a cada iteração do algoritmo de agrupamento. A Figura 4.3 ilustra o fluxograma de formação dos agrupamentos.

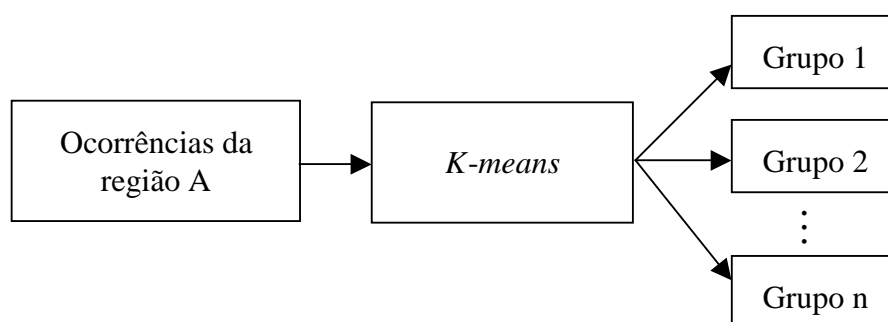


Figura 4.3 – Formação dos agrupamentos

A seguir, são detalhadas as etapas de execução da rotina de agrupamento, após a leitura dos dados de entrada, representados pelas variáveis listadas:



$nc \rightarrow$  Número de centróides (corresponde ao número de equipes de emergência)

$no \rightarrow$  Número de ocorrências

$x_i \rightarrow$  Coordenada  $x$  da ocorrência  $i$

$y_i \rightarrow$  Coordenada  $y$  da ocorrência  $i$

- 1- Inicialmente, os  $nc$  centróides recebem as coordenadas das  $nc$  ocorrências contidas na base de dados;
- 2- Após a definição das coordenadas iniciais dos centróides, são calculadas as distâncias euclidianas entre cada ocorrência em relação aos  $nc$  centróides.

$$D_{ij} = \sqrt{(x_{ci} - x_j)^2 + (y_{ci} - y_j)^2} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, nc \quad \text{e } j = 1, 2, \dots, no \quad (4.1)$$

Onde:

$x_{ci}$  corresponde à coordenada  $x$  do centróide  $i$ .

$y_{ci}$  corresponde à coordenada  $y$  do centróide  $i$ .

$D_{ij}$  é a distância entre o centróide  $i$  e a ocorrência  $j$ .

Com base nas distâncias calculadas, cada ocorrência é agrupada em torno do centróide mais próximo. Cada vez que uma ocorrência é associada ao grupo representado por certo centróide, as coordenadas deste são recalculadas de acordo com (4.2).

$$x_{ck} = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} x_j}{n_k} \quad (4.2)$$

$$y_{ck} = \frac{\sum_{j=1}^{n_k} y_j}{n_k}$$

Onde:

$n_k$  é o número de ocorrências do grupo  $k$ .

Vale ressaltar que a utilização da distância euclidiana não reflete a distância real entre a posição do centróide e a posição da ocorrência, devido a não consideração do relevo, mãos de direção das vias e obstáculos de percurso. Entretanto, oferece uma boa aproximação, a qual atende aos propósitos deste trabalho.

- 3- A base de dados é novamente percorrida, e caso a localização de uma ocorrência esteja mais próxima do centróide de um outro agrupamento, esta é transferida para o novo agrupamento (cujo centróide é o mais próximo) e os centróides dos agrupamentos aumentados e diminuídos são recalculados.
- 4- A etapa 3 é repetida até que não haja mais alterações nas composições dos grupos. A verificação das alterações dos grupos é feita através da comparação das ocorrências que pertenciam a cada grupo na iteração  $i$  e na iteração  $i+1$ . Caso não haja mudanças nas composições dos grupos o processo é encerrado e os grupos são armazenados para utilização nas etapas subsequentes.

A Figura 4.4 ilustra a condição de parada do algoritmo de agrupamento.

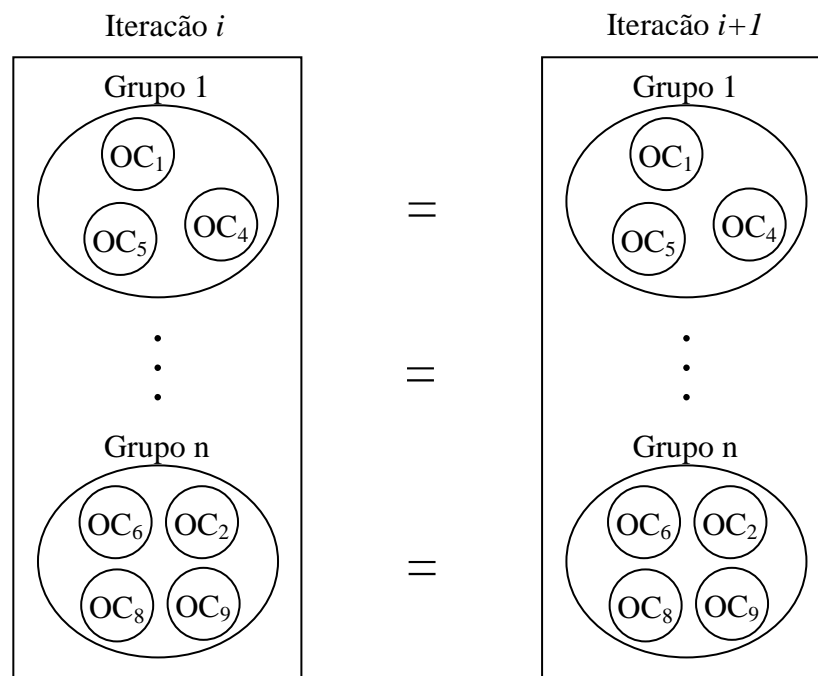


Figura 4.4 – condição de parada do algoritmo de agrupamento

## 4.4 OTIMIZAÇÃO DE ROTAS

Após a formação dos grupos, é necessário definir a ordem de atendimento das ocorrências, o que deve ser feito buscando a minimização do TMAE e do CHI. O tempo de atendimento de uma ocorrência de cliente isolado tem o peso igual ao de uma ocorrência de caso coletivo para o cálculo do TMAE, ou seja, é considerada a unidade “ocorrência” independente do seu tipo.

Para a minimização do TMAE, as rotas devem ser definidas considerando a menor distância percorrida e também o tempo de execução dos serviços. Para a minimização do CHI, as ocorrências de caso coletivo devem ser priorizadas em função de envolverem um número maior de clientes, o que implica em um peso maior para o CHI.

A otimização das rotas é feita obedecendo aos requisitos descritos acima e para tal é utilizado um AG cujas etapas básicas são descritas a seguir e estão representadas na Figura 4.5. O AG é executado tantas vezes quanto for o número de grupos de ocorrências, ou seja, uma execução para cada grupo.

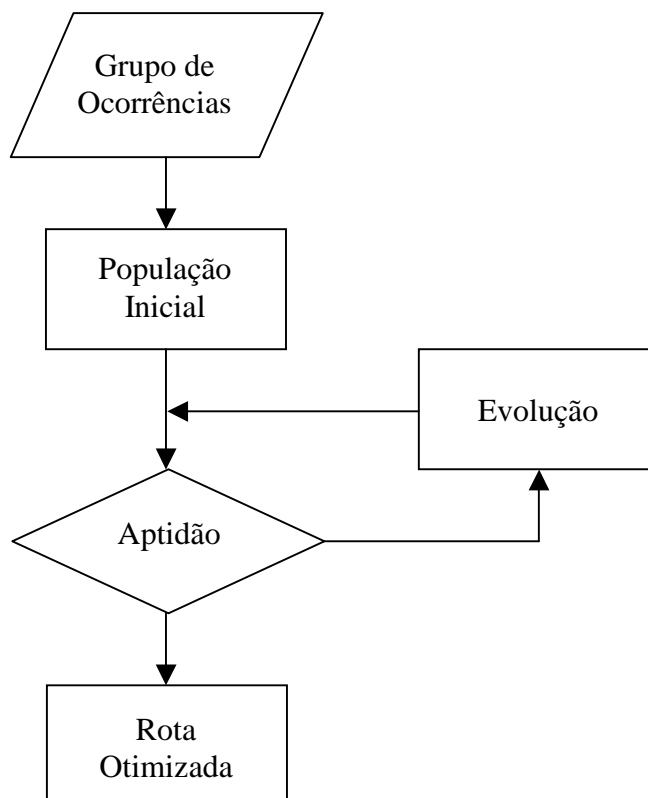


Figura 4.5 – Obtenção da rota otimizada

#### 4.4.1 População inicial

Para cada grupo de ocorrências, a população inicial consiste em um conjunto de soluções (rotas), a partir do qual ocorrerá a evolução das soluções ao longo das gerações. Neste trabalho, os indivíduos da população inicial são obtidos através de combinações aleatórias das sequências de atendimento. O tamanho da população deve ser escolhido com cuidado, pois, dependendo do número de ocorrências do grupo, a população pode ser grande demais (excedendo o número de soluções possíveis e levando à repetição de indivíduos) ou insuficiente (dificultando a determinação da rota ótima). Pode-se exemplificar a situação descrita acima considerando uma população de oito indivíduos ( $tpop = 8$ ) e dois grupos (A e B) compostos por 3 e 6 ocorrências, respectivamente, como segue abaixo:

Seja  $n$  o número de ocorrências de um grupo, o número máximo de soluções possíveis ( $ns$ ) é dado pela combinação das  $n$  ocorrências tomadas  $n$  a  $n$  (permutação), logo:

$$\begin{aligned} ns &= n! \\ ns_A &= n_A! & ns_B &= n_B! \\ ns_A &= 3! & ns_B &= 6! \\ ns_A &= 3.2.1 & ns_B &= 6.5.4.3.2.1 \\ ns_A &= 6 & ns_B &= 720 \end{aligned}$$

Pode-se observar que:

Para o grupo A haveria 6 soluções possíveis; como  $tpop = 8$  resultaria em uma população maior que o número máximo de soluções, o que levaria a soluções repetidas.

Para o grupo B, 720 soluções são possíveis; como  $tpop = 8$ , uma população de tamanho muito pequeno seria formada, o que dificultaria a determinação da melhor rota.

A fim de tornar mais eficiente a busca pela melhor solução explorando a diversidade dos indivíduos, a verificação e eliminação dos indivíduos repetidos fazem parte da rotina de geração da população inicial.

Além do filtro de indivíduos repetidos, utiliza-se um pré-processamento para a formação da população inicial, a fim de acelerar a busca pelas melhores soluções.

Através de testes com vários tamanhos de população, observou-se que a expressão abaixo fornecia uma boa aproximação dos melhores tamanhos testados neste trabalho.

$$tpop = nog.(nog + 2) \text{ para } nog > 4 \quad (4.3)$$

Onde:

*tpop* é o tamanho da população do grupo considerado.

*nog* é o número de ocorrências do grupo considerado.

Para os grupos com o número de ocorrências menor ou igual a quatro, foi aplicada a enumeração para a obtenção da rota ótima, através da comparação direta das rotas possíveis, ou seja, sem a utilização do algoritmo genético.

Na Figura 4.6 está representada, esquematicamente, a geração da população inicial.

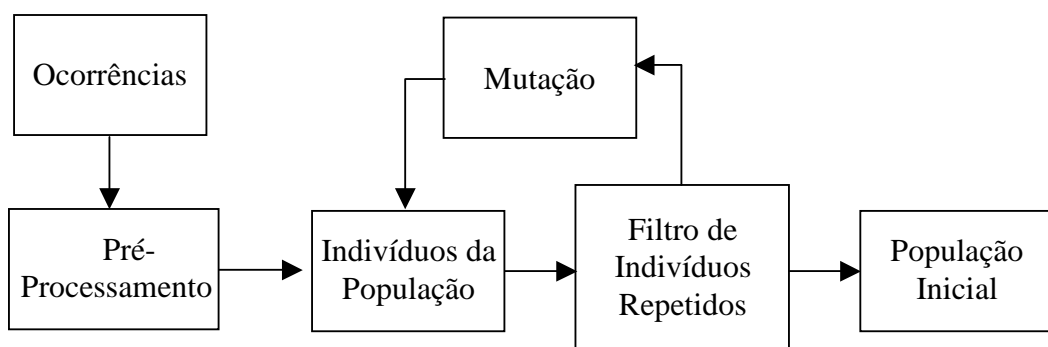


Figura 4.6 – Geração da População Inicial

A seguir, são detalhadas as etapas de execução da rotina de geração da população inicial.

- 1- Na etapa de pré-processamento, considera-se a priorização das ocorrências de unidades transformadoras. Para tanto, são gerados indivíduos em que os primeiros gens correspondem às ocorrências de zona e os demais gens são ocupados pelas ocorrências de clientes isolados de acordo com o critério do vizinho mais próximo. Para definição da quantidade de indivíduos pré-processados, considerou-se o número de ocorrências do grupo, com o intuito de garantir que, todas as ocorrências do tipo zona pertencentes ao grupo, pelo menos uma vez, encabeçam uma seqüência de atendimento (indivíduo).
  
- 2- Os indivíduos são formados a partir da geração de números inteiros aleatórios no intervalo  $[1, nog]$ , sendo determinada a seqüência de atendimento com base nos números obtidos.

$$ran_{ij} = x \quad \therefore \quad 1 \leq x \leq nog \quad (4.4)$$

Onde:

$ran_{ij}$  corresponde ao número randômico relativo à ocorrência  $i$  do indivíduo  $j$  da população.

A quantidade de números gerados ( $qran$ ) é igual ao número de ocorrências multiplicado pelo tamanho da população.

$$qran = nog \cdot tpop \quad (4.5)$$

A posição que cada ocorrência ( $oc_i$ ) deverá ocupar, para a formação da seqüência de atendimento (indivíduo), será dada pelo número inteiro  $ran_{ij}$ . A Figura 4.7 retrata a formação dos indivíduos de uma população.

ocorrências	OC <sub>1</sub>	OC <sub>2</sub>	...	OC <sub>nog</sub>
posição sorteada	ran <sub>11</sub>	ran <sub>21</sub>		ran <sub>nog1</sub>

ocorrências	OC <sub>1</sub>	OC <sub>2</sub>	...	OC <sub>nog</sub>
posição sorteada	ran <sub>12</sub>	ran <sub>22</sub>		ran <sub>nog2</sub>

⋮

ocorrências	OC <sub>1</sub>	OC <sub>2</sub>	...	OC <sub>nog</sub>
posição sorteada	ran <sub>1tpop</sub>	ran <sub>2tpop</sub>		ran <sub>nog tpop</sub>

Figura 4.7 – Formação dos indivíduos de uma população

Como exemplo, a Figura 4.8 ilustra a formação de um indivíduo da população inicial de um grupo composto por 4 ocorrências, os valores 3, 2, 4 e 1 associados às ocorrências  $oc_1$ ,  $oc_2$ ,  $oc_3$ , e  $oc_4$ , correspondem aos números inteiros gerados aleatoriamente para determinar a posição da ocorrência no indivíduo.

ocorrências	OC <sub>1</sub>	OC <sub>2</sub>	OC <sub>3</sub>	OC <sub>4</sub>
posição sorteada	3	2	4	1

Figura 4.8 – Formação de um indivíduo

A seqüência de atendimento proposta no exemplo da Figura 4.8 deu origem ao indivíduo  $i$  retratado na Figura 4.9.

Indivíduo $i$	OC <sub>4</sub>	OC <sub>2</sub>	OC <sub>1</sub>	OC <sub>3</sub>
---------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Figura 4.9 – Indivíduo  $i$

- 3- A verificação de indivíduos repetidos é efetuada comparando-os entre si, elemento por elemento. Caso sejam identificados indivíduos repetidos, são executadas operações de mutação (a qual será detalhada na Seção 4.4.2) e efetuadas novas comparações. Essa rotina é repetida até que não haja mais elementos repetidos. A Figura 4.10, mostra de forma sequencial as etapas de formação da população

inicial. Após a formação da população inicial, a aptidão de cada indivíduo é calculada a fim de se obter parâmetros para a aplicação dos operadores genéticos na etapa de evolução das gerações. A aptidão reflete a adequação dos indivíduos à solução do problema e o seu cálculo será detalhado na Seção 4.4.3.

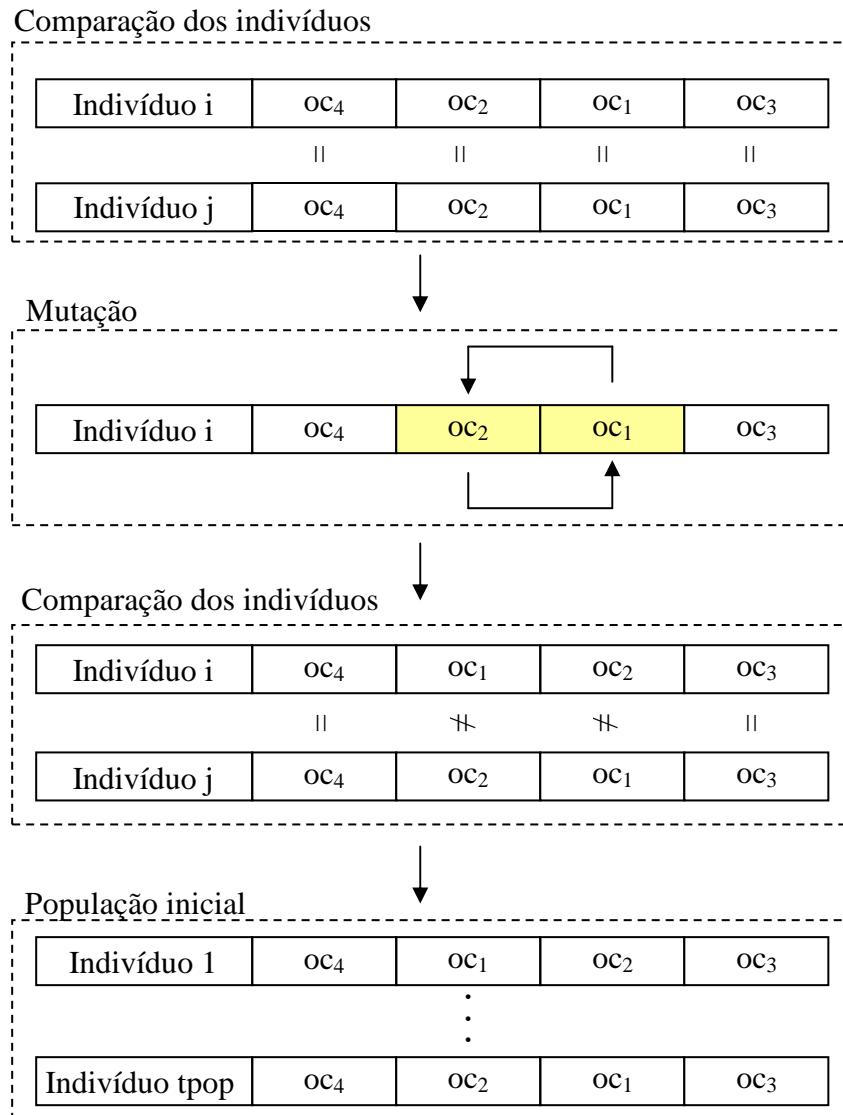


Figura 4.10 – Formação da população inicial

## 4.4.2 Evolução

A cada iteração do processo de otimização de rotas é formada uma nova população a partir da população atual. A escolha dos indivíduos que passarão por recombinações genéticas para criação da nova geração é feita de forma que os indivíduos de maior aptidão



tenham maiores chances de serem escolhidos. Os indivíduos selecionados são submetidos às operações de cruzamento e mutação, formando assim a nova população. Ressalta-se que o melhor indivíduo verificado em cada geração comporá a população da geração seguinte, ou seja, é aplicado o elitismo simples, citado por [Ávil02]. A Figura 4.11 mostra esquematicamente as etapas para a formação da nova população.

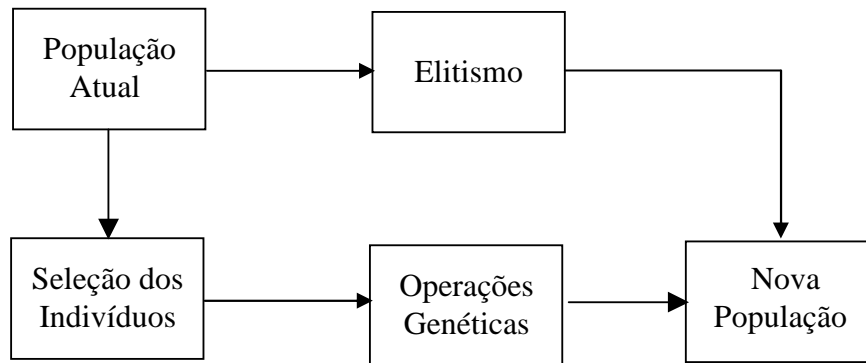


Figura 4.11 – Formação da nova população

A seguir, são detalhadas as etapas da formação da nova população, ou seja, evolução da população anterior:

- 1- No processo de seleção dos indivíduos a probabilidade de escolha de cada um está ligada diretamente à sua aptidão, de forma que os indivíduos com maiores aptidões têm maiores chances de serem escolhidos. Com isso, a expectativa é que a nova geração tenha uma aptidão média melhor do que a da geração anterior. O método utilizado para a seleção dos indivíduos é o da roleta, através do qual são escolhidos randomicamente dois números no intervalo [0,1] e multiplicados pela aptidão total da geração dada por (4.5), sendo os valores obtidos comparados sequencialmente com a aptidão acumulada associada a cada indivíduo, dada por (4.6), para seleção dos mesmos.

$$APT_{total} = \sum_{k=1}^{ipop} AP_k \quad (4.5)$$

$$APTacumulada_i = \sum_{k=1}^i AP_k \quad (4.6)$$

Onde:

$AP_k$  é a aptidão do k-ésimo indivíduo da geração.

A Figura 4.12 ilustra de forma esquemática a probabilidade de cada indivíduo ser escolhido, dada pela expressão (4.7).

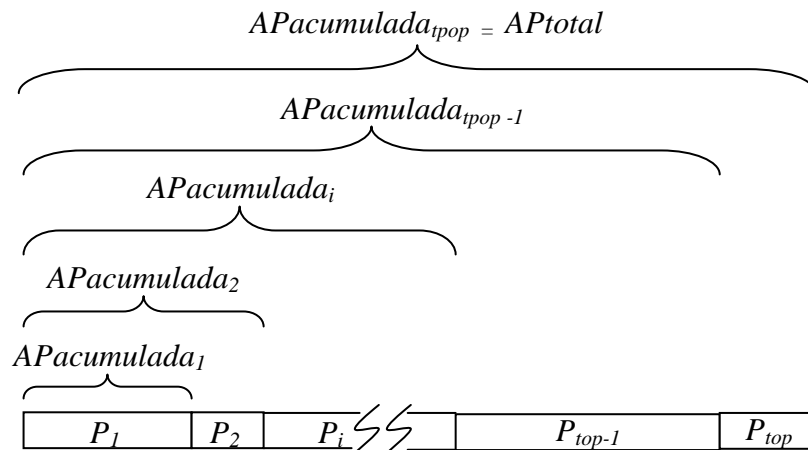


Figura 4.12 – Probabilidade de cada indivíduo ser escolhido

$$P_i = \frac{APT_i}{APTtotal} \quad (4.7)$$

Onde:

$P_i$  é a probabilidade do i-ésimo indivíduo ser escolhido

O número de indivíduos escolhidos para formação da nova geração é igual ao dobro do tamanho da população menos dois ( $2 \cdot tpop - 2$ ), pois, serão necessários dois pais para formação de cada novo indivíduo e um par deve ser desconsiderado devido à aplicação do elitismo.

- 2- Após a escolha dos pais para a formação da nova geração, serão aplicadas as operações genéticas para a obtenção dos novos indivíduos.

Como apresentado na Seção 4.4.1, o cromossomo (indivíduo) está estruturado de forma que a seqüência dos seus gens represente a ordem de atendimento e a cada gen está associada uma ocorrência.

Para cada par de indivíduos será sorteado um número no intervalo [0,1] e caso esse número seja menor ou igual à probabilidade de cruzamento, será aplicada a operação de cruzamento para a formação do novo indivíduo. Caso o número sorteado seja maior que a probabilidade de cruzamento, o novo indivíduo será o pai que tiver a maior aptidão.

A operação de cruzamento consiste na combinação do material genético dos pais a partir do ponto de cruzamento ( $pc$ ), o qual corresponde à parte inteira da divisão do tamanho do cromossomo (número de ocorrências do grupo –  $nog$ ) por um número aleatório no intervalo [1, $nog$ ]. A primeira parte do filho (novo indivíduo) é constituída pela primeira parte do pai 1, ou seja, os gens à esquerda do  $pc$ . A segunda parte do filho é formada por gens do pai 2 que não aparecem na primeira parte do filho, obedecendo à seqüência com que aparecem no pai 2. No caso do número escolhido ser igual a 1, fazendo com que o  $pc$  seja igual ao  $nog$ , o filho será idêntico ao pai mais apto. A Figura 4.13 ilustra a operação de cruzamento de dois indivíduos de um grupo de sete ocorrências com o  $pc = 3$ . Os gens destacados em cada cromossomo sinalizam as ocorrências de cada pai que farão parte do filho.

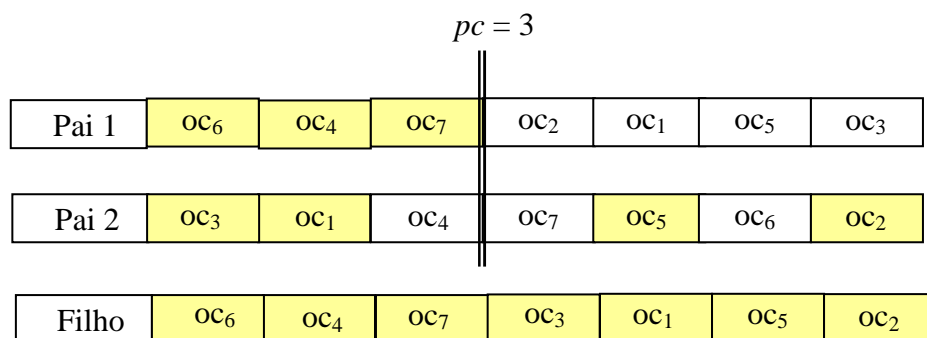


Figura 4.13 – Operação de Cruzamento

Após a realização da operação de cruzamento será verificado se o indivíduo da nova geração (filho) deverá sofrer mutação, para tanto um número no intervalo [0,1] é escolhido randomicamente e caso este número seja menor ou igual à probabilidade de mutação (0,01) o novo indivíduo sofrerá mutação.

A operação de mutação consiste na troca das ocorrências de duas posições de atendimento, sendo as posições determinadas com base em números escolhidos aleatoriamente no intervalo [0,1].

A operação de mutação consiste na troca da ocorrência da posição  $i$  pela ocorrência da posição  $j$ , conforme exemplificado na Figura 4.14.

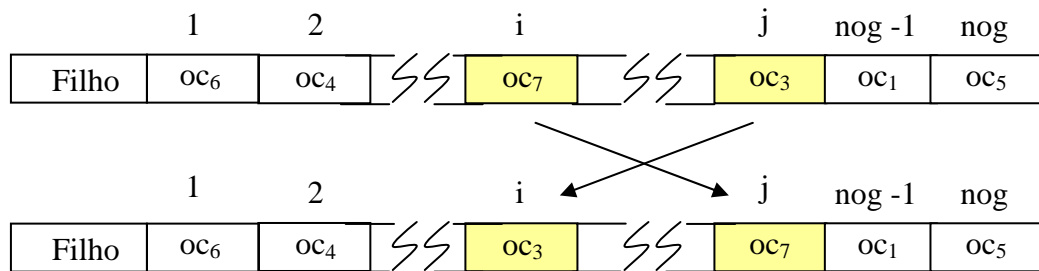


Figura 4.14 – Operação de Mutação

### 4.4.3 Cálculo da aptidão

Após a formação da população inicial ou de uma nova população, a aptidão de cada indivíduo é calculada a fim de verificar a adequação dos mesmos à solução do problema. A adequação do indivíduo está ligada ao valor da função objetivo. Neste trabalho a função objetivo leva em conta a distância percorrida e o tempo de atendimento das ocorrências (os quais estão ligados ao TMAE) e a priorização das ocorrências do tipo zona (a qual está relacionada ao CHI).

A partir da sequência de atendimento, representada por um indivíduo, são calculadas as três parcelas que compõem a função objetivo, as quais devem ser multiplicadas pelas ponderações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\delta$ , associadas a cada uma delas.

Para a determinação do valor da primeira parcela é calculada a distância total percorrida, obedecendo à sequência de atendimento, sendo o inverso desse valor multiplicado pela ponderação  $\alpha$ , conforme apresentado a seguir.

Considerando, por exemplo, o indivíduo  $k$  da Figura 4.15, serão calculadas as distâncias entre as ocorrências  $d$  e  $b$ ,  $b$  e  $a$ ,  $a$  e  $e$ ,  $e$  e  $c$ , e entre o ponto de partida e a ocorrência  $d$ . Os pontos de partida são predeterminados, sendo iguais ao ponto  $(0,0)$  para todas as equipes

que iniciem o seu turno ou com coordenadas diferentes para equipes que já efetuaram algum atendimento e estão em locais distintos.

Ordem de atendimento →	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
Indivíduo k	oc <sub>d</sub>	oc <sub>b</sub>	oc <sub>a</sub>	oc <sub>e</sub>	oc <sub>c</sub>
Tipo da ocorrência →	zona	isolado	zona	isolado	isolado

Figura 4.15 – Indivíduo k

A distância total percorrida é igual à soma da distância entre o ponto de partida e a primeira ocorrência a ser atendida com o somatório das distâncias entre as ocorrências.

$$DP_k = D_{pp1} + \sum_{i=1}^{nog-1} D_i \quad (4.8)$$

$$D_{pp1} = \sqrt{(x_{pp} - x_1)^2 + (y_{pp} - y_1)^2} \quad (4.9)$$

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad \therefore \quad i = 1, 2, \dots, nog - 1 \quad e \quad j = i + 1 \quad (4.10)$$

$$Primeira\ parcela_k = \alpha \cdot \frac{1}{DP_k} \quad (4.11)$$

Onde:

$x_i$  → Coordenada x da ocorrência da posição i de atendimento

$y_i$  → Coordenada y da ocorrência da posição i de atendimento

$D_{pp1}$  → Distância entre o ponto de partida e a posição da primeira ocorrência a ser atendida

$D_i$  → Distância entre a ocorrência da posição i e a posição da ocorrência i+1

$DP_k$  → Distância percorrida para atendimento conforme seqüência do indivíduo k

Para a determinação do valor da segunda parcela da função de aptidão é calculada a razão entre o somatório das posições de atendimento das ocorrências de cliente isolado e

o somatório das posições das ocorrências de zonas, sendo essa razão multiplicada pela ponderação  $\beta$ .

$$Isolado_k = \sum_{i=1}^{noi} I_i \quad (4.12)$$

$$Zona_k = \sum_{i=1}^{noz} Z_i \quad (4.13)$$

$$Segunda\ parcela_k = \beta \cdot \frac{Isolado_k}{Zona_k} \quad (4.14)$$

Onde:

$I_i \rightarrow$  ordem de atendimento da ocorrência de cliente isolado  $i$

$Z_i \rightarrow$  ordem de atendimento da ocorrência de zona  $i$

$noi \rightarrow$  Número de ocorrências do tipo cliente isolado

$noz \rightarrow$  Número de ocorrências do tipo cliente zona

Para o indivíduo da Figura 4.15 a segunda parcela seria:

$$Segunda\ parcela = \beta \cdot \frac{2 + 4 + 5}{1 + 3}$$

A terceira parcela está relacionada ao tempo de atendimento, o qual corresponde ao intervalo de tempo entre o registro da ocorrência até a finalização da mesma. O valor da terceira parcela é dado pelo inverso do tempo total de atendimento das ocorrências, sendo essa razão multiplicada pela ponderação  $\delta$ .

$$TTA_k = \sum_{i=1}^{noc} TA_i \quad (4.15)$$

$$Terceira\ parcela_k = \delta \cdot \frac{1}{TTA_k} \quad (4.16)$$

Onde:

$TA_i \rightarrow$  Tempo de atendimento da ocorrência  $i$

$noc \rightarrow$  Número de ocorrências atendidas

A composição das três parcelas forma a função de aptidão, cujo valor deve ser maximizado.

$$Aptid\tilde{a}o_k = \alpha \cdot \frac{1}{DP_k} + \beta \cdot \frac{Isolado_k}{Zona_k} + \delta \cdot \frac{1}{TTA_k} \quad (4.17)$$

Na função de aptidão em (4.17), observa-se que, quanto menor for a distância total percorrida maior será a primeira, expressando a necessidade de se percorrer um menor caminho. Da segunda parcela pode-se notar que, quanto menor for o valor do somatório das posições das ocorrências de zona maior será o somatório das posições das ocorrências de cliente isolado. Em consequência, maior será a segunda parcela da aptidão, levando em consideração dessa forma que as ocorrências de zonas, tenham prioridade no atendimento. Finalmente, a terceira parcela indica que quanto menor for o tempo de atendimento total maior será a contribuição dessa parcela para maximização da função objetivo.

Além da aptidão individual dos indivíduos é interessante também calcular a aptidão média de cada geração para que possa acompanhar a melhoria obtida durante o processo evolutivo.

Neste trabalho, o critério de parada do algoritmo consiste simplesmente em atingir um número máximo de gerações pré-determinado. Outra possibilidade seria a monitoração da taxa de aptidões (média ou máxima) entre duas gerações subsequentes.

Terminado o processo evolutivo o melhor indivíduo observado será apresentado como a rota ótima. Os processos descritos serão executados tantas vezes quantas forem as equipes, a fim de se obter a rota ótima para cada uma delas.

## 4.5 ATUALIZAÇÃO DO DESPACHO DAS EQUIPES

Após a primeira distribuição das ocorrências entre as equipes, podem ocorrer diversas situações em que será necessária a atualização do despacho ou em outras palavras, a redistribuição das ocorrências. A seguir são descritas situações que podem servir de critério para a atualização do despacho:

- O número de ocorrências pendentes pode sofrer alterações significativas em um curto espaço de tempo, logo, essa é uma situação que deve motivar a redistribuição das ocorrências para as equipes. Portanto, deve-se adotar um valor de novas ocorrências por intervalo de tempo, para que se possa disparar o processo de redistribuição das ocorrências.
- O número de equipes disponíveis para o atendimento pode ser alterado em função da saída de alguma equipe, por motivos diversos como: defeito na viatura ou em algum equipamento essencial para a realização dos atendimentos, direcionamento da equipe para uma atividade de atendimento não emergencial, parada para inspeção de segurança, etc. Neste caso, vislumbra-se a necessidade de fazer a redistribuição das ocorrências que já haviam sido destinadas à equipe que saiu. A entrada de uma equipe adicional para o atendimento também é um fator que pode motivar a redistribuição das ocorrências.
- O término do atendimento das ocorrências destinadas a uma determinada equipe, ficando a mesma ociosa, também pode motivar a redistribuição das ocorrências.

Pela análise das situações que podem motivar a atualização do despacho, nota-se que os mesmos estão basicamente relacionados à quantidade de ocorrências pendentes e, principalmente, à quantidade de equipes, a qual destaca-se devido aos diversos fatores que podem levar à sua alteração. A mudança de turno pode implicar em alteração do número de equipes, para mais ou para menos, bem como ocorre uma troca do contingente disponível para o atendimento. Normalmente, cada turno de trabalho possui uma quantidade de equipes predeterminada, podendo haver, dentro do próprio turno, variações



da quantidade de equipes devido à disponibilização de equipes extras ou indisponibilidade de uma ou mais equipes.

Em algumas empresas as mesmas equipes que atendem a BT atendem também as demandas da MT (manobras programadas e atendimento de ocorrências emergenciais de média tensão). Logo, o número de equipes fica sujeito a uma diminuição repentina em função do surgimento de uma ocorrência de MT, a qual tem prioridade sobre as ocorrências da BT, tendo em vista que o número de clientes envolvidos em ocorrências de MT é muito maior que nas de BT.

Algumas situações envolvendo a redistribuição das ocorrências serão consideradas nos testes a serem apresentados no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 5

### SIMULAÇÕES E RESULTADOS

---

#### 5.1 INTRODUÇÃO

O algoritmo desenvolvido para a busca da solução ótima para o problema proposto foi implementado utilizando a linguagem de programação Fortran. A verificação da eficácia do algoritmo foi efetuada através da realização de testes, em diversos cenários, considerando ocorrências de BT geradas aleatoriamente.

Para a geração dos dados de entrada, visando a realização dos testes, foi desenvolvida uma macro no Microsoft Excel (programação em Visual Basic), a qual gera aleatoriamente as coordenadas das ocorrências e o tipo de ocorrência (cliente isolado ou zona). Os detalhes da macro não serão comentados, pois não fazem parte do escopo deste trabalho.

Os resultados apresentados são compostos pela distância total percorrida pelas equipes, pelas seqüências de atendimento para cada equipe e pelo tempo total de atendimento das ocorrências.

A distância percorrida total é dada pelo somatório das distâncias percorridas por cada equipe.

As seqüências de atendimento das ocorrências direcionadas a cada equipe são apresentadas em forma gráfica.

O tempo total de atendimento foi calculado pelo somatório das seguintes parcelas:

- Tempo de deslocamento – corresponde ao produto da distância percorrida para chegar ao local de atendimento pela velocidade média da viatura (adotada arbitrariamente - 40km/h);
- Tempo de reparo – corresponde ao tempo médio para execução de um serviço de reparo, sendo considerado 20 minutos para um atendimento de ocorrência de cliente isolado e 35 minutos para um atendimento de ocorrência de unidade

transformadora. Os valores dos tempos de reparo adotados correspondem aos apurados pela empresa Light no ano de 2009.

- Tempo desde o despacho anterior – corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o despacho atual e o despacho anterior, o qual será considerado para os testes em que ocorrer redistribuições das ocorrências pendentes, pois, o tempo de atendimento final deve considerar todos os tempos de atendimento apurados em cada despacho;

Os registros das ocorrências emergenciais nos SGDs das empresas não são efetuados no mesmo instante, ou seja, cada ocorrência é registrada em um determinado horário, existindo então um tempo de duração inicial, o qual corresponde à diferença entre o horário de registro da ocorrência em um SGD e o horário da distribuição da ocorrência para a equipe de emergência. Para simplificar a análise dos resultados, será apresentado o tempo de atendimento desconsiderando-se a duração inicial de cada ocorrência. Isso significa que, supõe-se que todas ocorrências iniciaram no momento em que os dados de entrada foram submetidos ao algoritmo de roteamento. Logo, o tempo inicial que a ocorrência ficou “esperando” para ser distribuída não será levado em conta, pois, não tem influência no processo de determinação das rotas ótimas.

Como mencionado no capítulo anterior, os principais parâmetros que influenciam a distribuição das ocorrências são as quantidades de equipes de emergência e de ocorrências, que, podem variar por diversos motivos, tais como, mudanças climáticas, condições técnico-econômicas, acontecimentos imprevistos como defeito em uma viatura, dentre outros. Os cenários propostos para os testes serão configurados de acordo com a variação dos referidos parâmetros.

Para a obtenção da rota ótima, o AG promove a evolução da população ao longo de 60 gerações, selecionando ao final o melhor indivíduo de todas as gerações, ou seja, a melhor solução encontrada segundo os critérios da função de aptidão (FA) adotada. Os valores das ponderações das FA ( $\alpha = 1000$ ,  $\beta = 1$  e  $\delta = 2000$ ) foram obtidos por meio de testes. As probabilidades de cruzamento e mutação utilizadas no AG são, respectivamente, 0,85 e 0,01, obtidas após a realização de testes para ajustes destes parâmetros.

Cabe mencionar que os testes foram realizados utilizando microcomputador com processador AMD Athlon 64X2 – 1.9GHz e 3GB de RAM, sendo observados tempos computacionais variando entre 4 e 12 segundos.

## 5.2 TESTE 1 – AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS

### 5.2.1 Descrição

O despacho de ocorrências de BT pode ser efetuado de formas diferentes, em função da necessidade estratégica exigida no momento, ou seja, se a intenção for atender um maior número de ocorrências em um menor tempo possível, independente da quantidade de clientes envolvidos em cada ocorrência, deve-se adotar uma forma de despacho. Neste caso, a prioridade é obter um menor TMAE. Por outro lado se o desejo for priorizar o CHI (ou DEC), o que corresponde a efetuar o atendimento de um maior número de clientes em um menor tempo possível, a forma de despacho deve ser diferente da aplicada para o primeiro caso. Logo, a determinação de uma rota ótima para as equipes deve levar em consideração aspectos relevantes para a melhoria dos indicadores de desempenho de uma empresa, como a redução do TMAE e do CHI. Neste trabalho é investigada a aplicação de critérios que buscam atingir tais objetivos, sendo utilizadas para tal, diferentes formulações para a função de aptidão a ser avaliada durante o processo de otimização das rotas. Os critérios investigados e as respectivas funções de aptidão são descritos a seguir.

#### **Critério A: Minimização da distância percorrida**

Tomando a distância como o único parâmetro para a obtenção da rota ótima, a função de aptidão para o k-ésimo indivíduo será representada pela equação (4.11), a qual guiará a evolução da população ao longo das gerações buscando a minimização das distâncias percorridas pelas equipes de emergência.

#### **Critério B: Minimização da distância percorrida e observação das prioridades para atendimento**

Pelo critério B considera-se, além da distância percorrida, a prioridade das ocorrências, a qual está ligada ao tipo de ocorrência. Como já relatado, as ocorrências do tipo zona têm prioridade sobre as ocorrências de cliente isolado, devido ao maior número de clientes envolvidos nas mesmas. Para a obtenção da rota ótima, a função de aptidão para o k-ésimo indivíduo será representada pela equação (5.1), formada pela soma de

(4.11) e (4.14). Assim a evolução da população ao longo das gerações buscará o restabelecimento de um maior número de clientes no menor tempo e a minimização das distâncias percorridas pelas equipes de emergência.

$$Aptidão_k = \alpha \cdot \frac{1}{DP_k} + \beta \cdot \frac{Isolado_k}{Zona_k} \quad (5.1)$$

### **Critério C: Minimização da distância percorrida, minimização do tempo de atendimento e observação das prioridades para atendimento**

Para a obtenção da rota ótima segundo o critério C, que considera como parâmetros a distância percorrida, o tempo de atendimento e as prioridades, a função de aptidão será dada por (4.17). Espera-se que o tempo de atendimento seja um balizador, estabelecendo um ponto de equilíbrio entre a necessidade de se minimizar a distância percorrida, tendo em vista o TMAE, e a importância de se restabelecer um maior número de clientes no menor tempo possível, beneficiando o CHI.

Para efeito de avaliação dos critérios descritos, considera-se que ocorrências são distribuídas para as equipes somente uma vez, ou seja, não há alterações na quantidade de ocorrências e no número de equipes ao longo do atendimento. Isto corresponde a fazer uma distribuição inicial das ocorrências entre as equipes e aguardar a conclusão dos atendimentos sem redistribuir as ocorrências ainda pendentes para as equipes ociosas (as que já terminaram sua cota de atendimentos), sem considerar o registro de novas ocorrências, bem como não levando em conta a entrada em serviço de novas equipes de emergência ou a saída de equipes de emergência. Outra consideração importante é que todas as equipes partem do mesmo ponto, arbitrariamente escolhido com coordenadas (0,0).

Os dados de entrada são compostos por 6 ocorrências de unidade transformadora (Z) e 34 ocorrências de cliente isolado (I), totalizando 40 ocorrências, estando disponíveis 4 equipes de emergência para o atendimento, conforme detalhado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados das ocorrências

Número da ocorrência	Número de equipes		Número de ocorrências
	4		40
	Coordenadas das ocorrências		Tipo
X	Y		
1	94	35	I
2	30	40	Z
3	24	103	I
4	111	39	I
5	76	49	I
6	110	74	I
7	57	26	I
8	3	41	I
9	64	48	I
10	80	86	I
11	59	49	I
12	50	65	I
13	51	61	I
14	58	81	I
15	36	35	I
16	26	70	I
17	57	22	I
18	73	93	I
19	24	114	Z
20	95	45	I
21	13	20	Z
22	63	67	I
23	89	90	Z
24	89	10	I
25	1	51	I
26	118	96	I
27	88	33	I
28	113	14	I
29	12	22	Z
30	115	65	I
31	26	45	I
32	60	16	I
33	66	109	I
34	83	7	I
35	59	18	I
36	94	6	I
37	96	39	I
38	80	108	I
39	14	114	I
40	48	1	Z

A Figura 5.1 apresenta a distribuição espacial das ocorrências de acordo com as suas respectivas coordenadas.

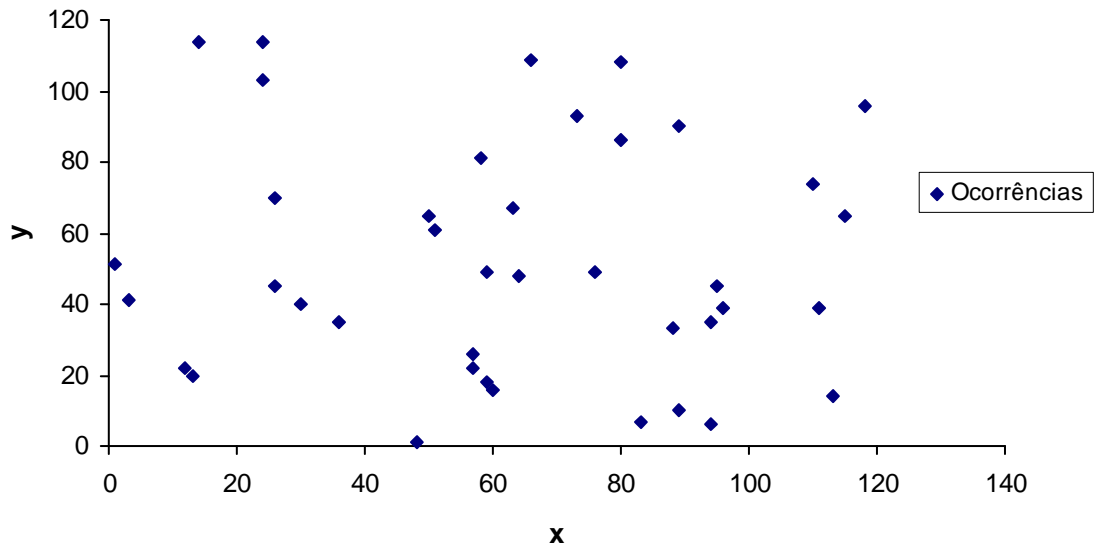


Figura 5.1 – Distribuição espacial das ocorrências

Considerando as 4 equipes disponíveis para o atendimento, as 40 ocorrências foram distribuídas entre as equipes utilizando o algoritmo *k-means* apresentado na Seção 3.3, formando 4 grupos, conforme ilustrado na Figura 5.2.

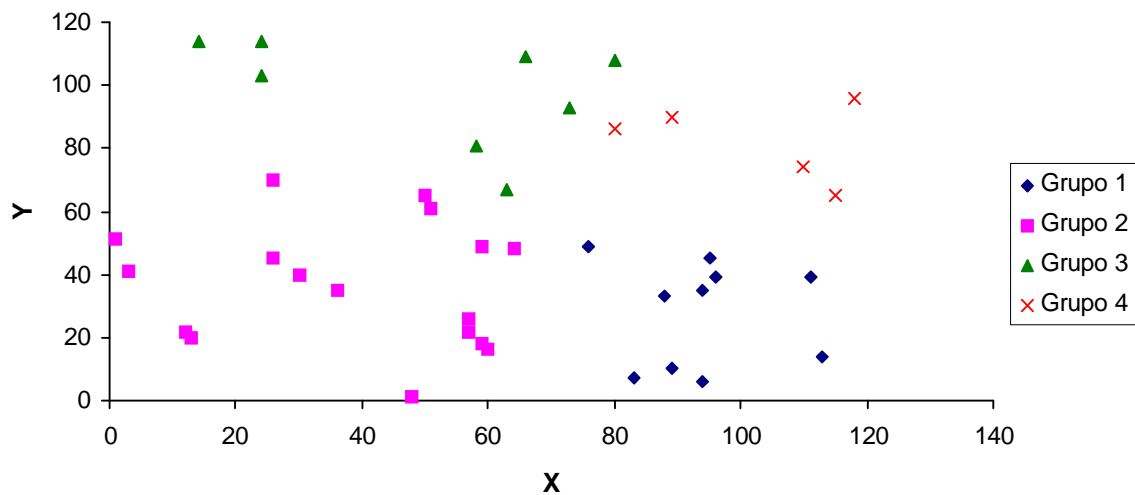


Figura 5.2 – Grupos de ocorrências

As ocorrências não foram distribuídas em igual quantidade para as equipes, pois a distribuição é baseada na formação de quatro centróides, sendo cada ocorrência associada a um centróide de acordo com a sua proximidade.

## 5.2.2 Critério A - Resultados

A Tabela 5.2 expõe os resultados obtidos pela aplicação do Critério A, o qual baseia-se na minimização da distância percorrida. Vale ressaltar que o valor de tempo de atendimento total não leva em conta a simultaneidade dos atendimentos efetuados por cada equipe.

Tabela 5.2 – Resultados para o Critério A

	Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3	Equipe 4	Total
<b>Número de Ocorrências Atendidas</b>	10	17	8	5	40
<b>Distância Percorrida (km)</b>	196	247	220	191	854
<b>Tempo de Atendimento (min)</b>	494	770	505	401	2170

A Tabela 5.3 expõe as seqüências dos atendimentos, otimizadas após a aplicação do algoritmo genético e considerando o Critério A.

Tabela 5.3 – Seqüências de atendimento para o Critério A

Equipe	Seqüência de Atendimento																	
1	Ocorrência	34	24	36	28	4	20	37	1	27	5							
	Tipo	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I							
2	Ocorrência	21	29	8	25	31	2	15	7	17	40	32	35	9	11	13	12	16
	Tipo	Z	Z	I	I	I	Z	I	I	I	Z	I	I	I	I	I	I	I
3	Ocorrência	22	14	18	38	33	3	19	39									
	Tipo	I	I	I	I	I	I	Z	I									
4	Ocorrência	10	23	26	6	30												
	Tipo	I	Z	I	I	I												



Ressalta-se que as identificações das ocorrências correspondem aos números associados a cada uma nos dados de entrada, conforme a Tabela 5.1. A seqüência de atendimento segue a ordem da esquerda para a direita.

A Figura 5.3 ilustra as rotas de atendimento das ocorrências para cada equipe, os pontos destacados (símbolos maiores) correspondem às primeiras ocorrências atendidas.

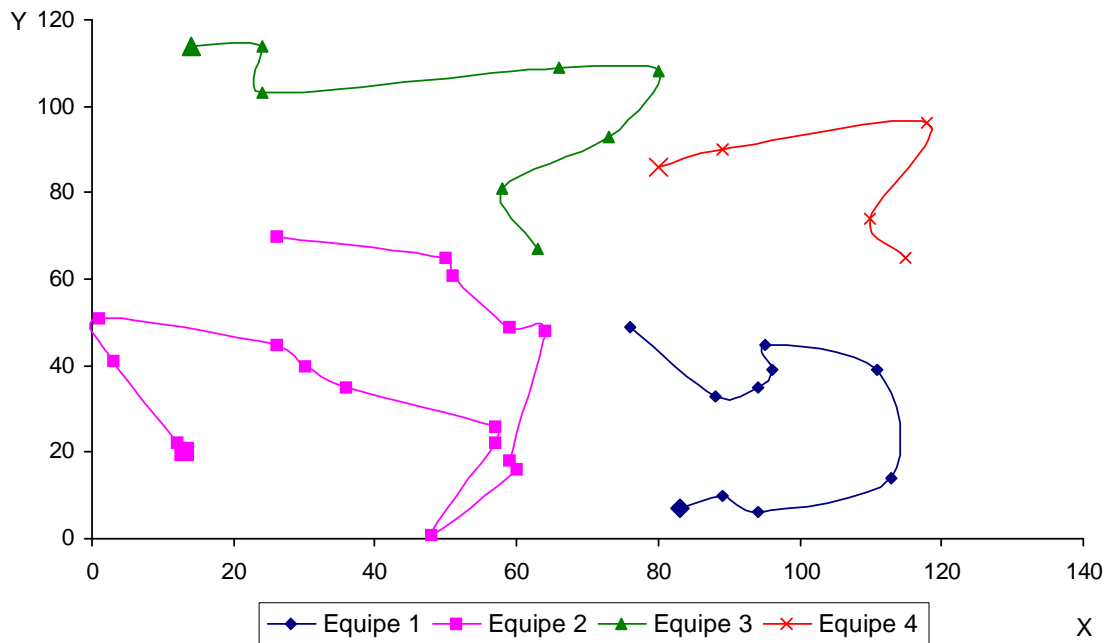


Figura 5.3 – Rotas de atendimento para o Critério A

Os valores dos indicadores TMAE (min) e CHI (adimensional), obtidos segundo o Critério A, são 364 e 4403, respectivamente.

### 5.2.3 Critério B - Resultados

A Tabela 5.4 expõe os resultados obtidos pela aplicação do Critério B, o qual baseia-se na minimização da distância percorrida e observação das prioridades para o atendimento. Vale ressaltar que o valor de tempo de atendimento total não leva em conta a simultaneidade dos atendimentos efetuados por cada equipe.

Tabela 5.4 – Resultados para o Critério B

	Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3	Equipe 4	Total
<b>Número de Ocorrências Atendidas</b>	10	17	8	5	40
<b>Distância Percorrida (km)</b>	196	296	255	209	956
<b>Tempo de Atendimento (min)</b>	494	845	558	429	2326

A Tabela 5.5 expõe as seqüências dos atendimentos, otimizadas após a aplicação do algoritmo genético e considerando o Critério B.

Tabela 5.5 – Seqüências de atendimento para o Critério B

Equipe	Seqüência de Atendimento																	
1	Ocorrência	34	24	36	28	4	20	37	1	27	5							
	Tipo	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I							
2	Ocorrência	29	2	21	40	32	35	17	7	15	31	8	25	16	12	13	11	9
	Tipo	Z	Z	Z	Z	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	Ocorrência	19	39	3	14	22	18	38	33									
	Tipo	Z	I	I	I	I	I	I	I									
4	Ocorrência	23	10	26	6	30												
	Tipo	Z	I	I	I	I												

Ressalta-se que, as identificações das ocorrências correspondem aos números associados a cada uma nos dados de entrada, conforme Tabela 5.1. A seqüência de atendimento segue a ordem da esquerda para a direita.

A Figura 5.4 ilustra as rotas de atendimento das ocorrências para cada equipe.

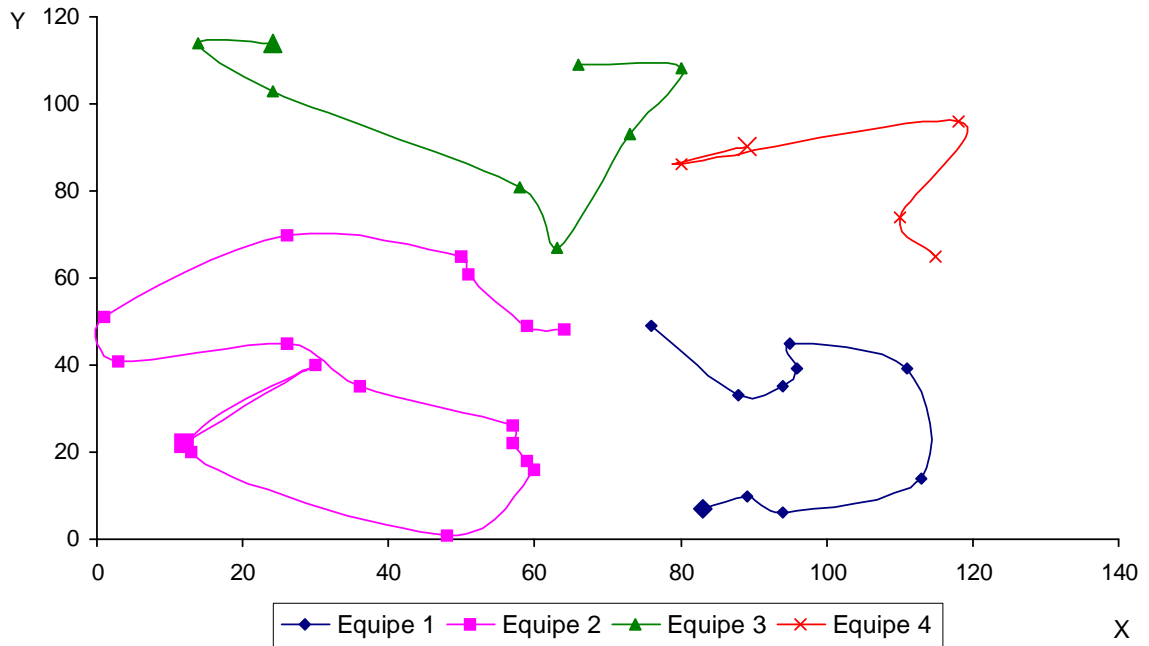


Figura 5.4 – Rotas de atendimento para o Critério B

Os valores dos indicadores TMAE (min) e CHI (adimensional), obtidos segundo o Critério B, são 410 e 3224, respectivamente.

### 5.2.4 Critério C - Resultados

A Tabela 5.6 expõe os resultados obtidos pela aplicação do critério C, o qual baseia-se na minimização da distância percorrida e do tempo de atendimento, e na observação das prioridades para o atendimento. Vale ressaltar que o valor de tempo de atendimento total não leva em conta a simultaneidade dos atendimentos efetuados por cada equipe.

Tabela 5.6 – Resultados para o Critério C

	Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3	Equipe 4	Total
<b>Número de Ocorrências Atendidas</b>	10	17	8	5	40
<b>Distância Percorrida (km)</b>	196	274	249	209	928
<b>Tempo de Atendimento (min)</b>	494	812	548	429	2283

A Tabela 5.7 expõe as seqüências dos atendimentos, otimizadas após a aplicação do algoritmo genético e considerando o Critério C.

Tabela 5.7 – Seqüências de atendimento para o Critério C

Equipe	Seqüência de Atendimento																	
1	Ocorrência	34	24	36	28	4	20	37	1	27	5							
	Tipo	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I							
2	Ocorrência	21	29	2	40	32	35	17	7	15	31	8	25	16	12	13	11	9
	Tipo	Z	Z	Z	Z	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
3	Ocorrência	19	39	3	33	38	18	14	22									
	Tipo	Z	I	I	I	I	I	I	I									
4	Ocorrência	23	10	26	6	30												
	Tipo	Z	I	I	I	I												

Ressalta-se que, as identificações das ocorrências correspondem aos números associados a cada uma nos dados de entrada, conforme Tabela 5.1. A seqüência de atendimento segue a ordem da esquerda para a direita.

A Figura 5.5 ilustra as rotas de atendimento das ocorrências para cada equipe.

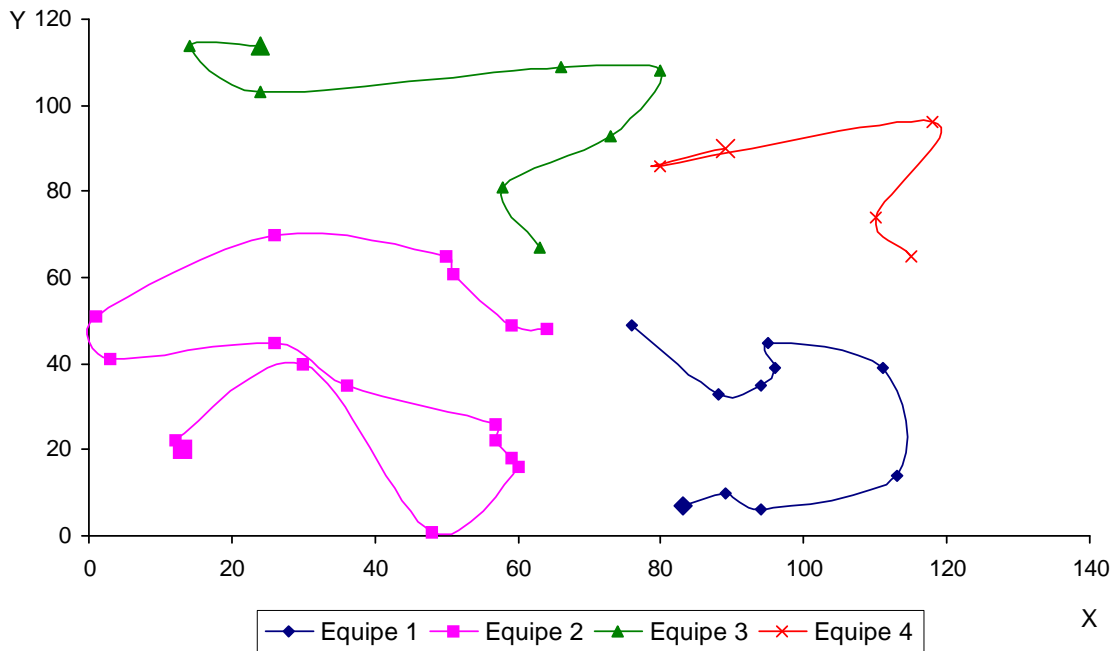


Figura 5.5 – Rotas de atendimento para o Critério C

Os valores dos indicadores TMAE (min) e CHI (adimensional), obtidos segundo o Critério C, são 395 e 2943, respectivamente.

### 5.2.5 Resultados Globais

A Tabela 5.8 apresenta os resultados consolidados para cada critério. Os dados de tempo de atendimento, obtidos para cada critério, correspondem ao somatório dos tempos das equipes, sem considerar a simultaneidade dos atendimentos. Isoladamente estes dados de tempo não têm significado prático, entretanto, servem de base para a comparação dos resultados obtidos segundo cada um dos critérios descritos, pois, em todos os casos foi considerado o despacho único, ou seja, sem redistribuição de ocorrências.

Tabela 5.8 – Resumo dos resultados por critério

<b>Critério</b>	<b>Distância Total Percorrida (km)</b>	<b>Tempo Total de Atendimento (min)</b>
A	854	2170
B	956	2326
C	928	2283

Pela inspeção da Tabela 5.8, verifica-se que o Critério A tende a apresentar vantagem sobre os Critérios B e C, ou seja, com a utilização da FA que visa somente a minimização da distância percorrida seria obtido o melhor TMAE. Entretanto, apenas com estes dados nada se pode concluir sobre o CHI.

Para que se possa comparar os resultados dos critérios em relação ao CHI, a Figura 5.6 ilustra, para cada critério, o restabelecimento do fornecimento da energia para os clientes atingidos pelas ocorrências ao longo do tempo, considerando a simultaneidade dos atendimentos efetuados por cada equipe. Para se quantificar o número de clientes atingidos pelas ocorrências, foi considerado que um transformador de zona alimenta 150 clientes. Logicamente o número de clientes atendidos pelos transformadores pode variar conforme a potência de cada equipamento e a densidade populacional da área, entretanto, a adoção do valor 150 foi definida com base nos dados da Light, que considera que, em média, um transformador de zona fornece energia para 150 clientes.

Com base no exposto acima, a quantidade de clientes atingidos pelas ocorrências relacionadas nos dados de entrada é igual a 934, considerando que uma ocorrência tipo cliente isolado atinge apenas um cliente e uma tipo zona atinge 150 clientes.

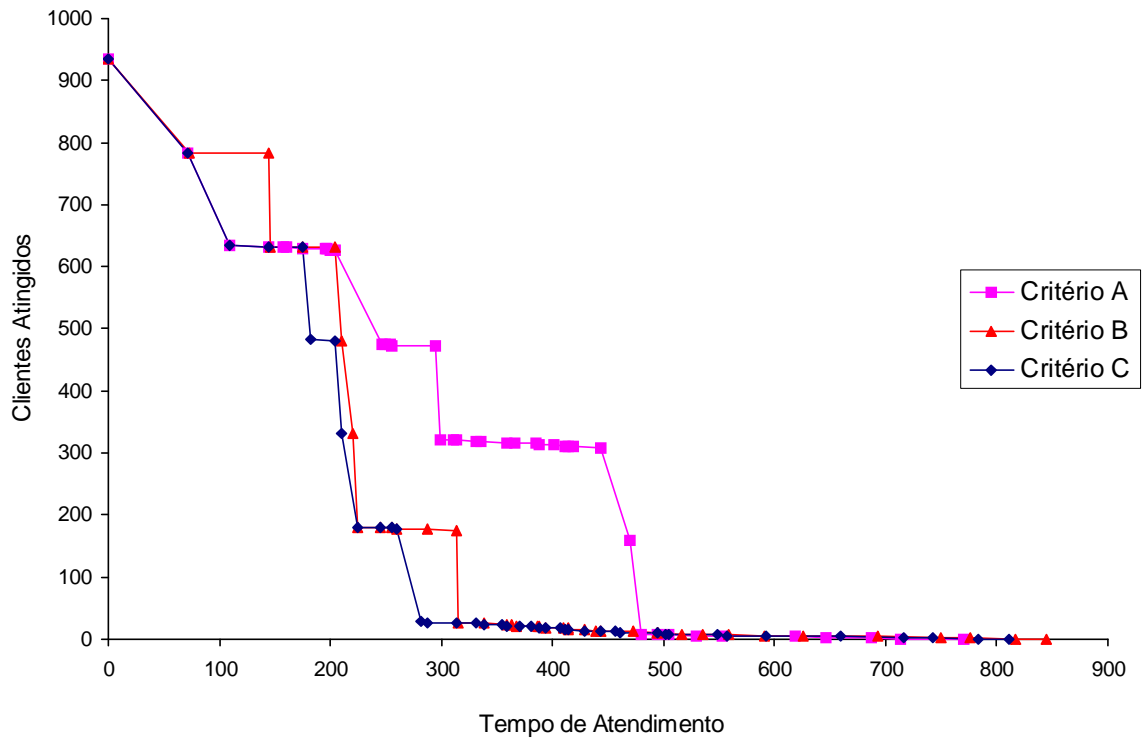


Figura 5.6 – Restabelecimento dos clientes ao longo do tempo

Pela Figura 5.6 observa-se que o despacho segundo o Critério C promove o restabelecimento de um maior número de clientes no menor tempo. O critério B também apresenta significativa vantagem em relação ao Critério A, no que tange o restabelecimento do maior número de clientes. Estes resultados indicam o foco dos Critérios B e C na melhoria do CHI.

Considerando que para se ter uma melhor performance em relação ao CHI deve-se restabelecer o quanto antes a maioria dos clientes. A Tabela 5.9 expõe os tempos para o restabelecimento de pelo menos 90% dos clientes e o para o restabelecimento do último cliente.

Tabela 5.9 – Tempos de restabelecimento dos clientes

Critério	Tempo de restabelecimento dos clientes (min)	
	Pelo menos 90% dos clientes	Último cliente
A	480	770
B	315	845
C	282	812

Pela inspeção da Tabela 5.9, observa-se que apesar do despacho segundo o Critério A finalizar primeiro o atendimento, somente após 480 minutos do início do atendimento é que a maioria dos clientes é restabelecida, um resultado bem aquém dos resultados dos outros critérios. O Critério B apresenta melhor desempenho que o A em relação ao restabelecimento do maior número de clientes no menor tempo, mas pior que o A no restabelecimento do último cliente. Os dados da Tabela 5.9 confirmam a tendência do critério C em focar o CHI, o referido critério apresenta um melhor resultado do que os critérios A e B em relação ao tempo de restabelecimento da maioria dos clientes.

A Tabela 5.10 expõe de forma consolidada os dados de TMAE e CHI para cada critério.

Tabela 5.10 – Resumo dos resultados de TMAE e CHI

Critério	TMAE (min)	CHI
A	364	4403
B	410	3224
C	395	2943

Corroborando com o observado na Figura 5.6 e nos dados da Tabela 5.9, os dados da Tabela 5.10 mostram que o Critério C apresenta excelente desempenho em relação ao CHI e um desempenho melhor que o B em relação ao TMAE e não muito distante do C em relação a este último indicador.

Por tudo que foi exposto nesta seção, pode-se concluir que o melhor critério para efetuar o despacho das ocorrências emergenciais é o Critério C.

Reforçando esta conclusão, pode-se considerar que, para uma empresa a priorização da melhoria do CHI em relação ao TMAE é mais interessante, pois, o CHI influencia diretamente na receita da empresa com a venda de energia. E ainda, apesar do Critério C

ter apresentado um desempenho inferior ao A em relação ao TMAE, a visão da maioria dos clientes quanto ao tempo de restabelecimento não é refletida por este indicador, isto porque, no cálculo do TMAE uma ocorrência envolvendo 150 clientes contribui de forma igual a que envolve 1 cliente, ou seja, as ocorrências não são ponderadas de acordo com o número de clientes envolvidos. Quando é restabelecido um número maior de clientes em um menor tempo, a satisfação da maioria dos clientes está garantida.

Para a realização dos próximos testes será utilizado o Critério C, ou seja, as rotas serão obtidas com o intuito de minimizar a distância percorrida e o tempo de atendimento, com a observação das prioridades em função do tipo de ocorrência.

## 5.3 TESTE 2 – APROVEITAMENTO DE EQUIPES OCIOSAS

### 5.3.1 Descrição

Considerando os mesmos dados de entrada, expostos na Tabela 5.1, serão efetuadas simulações a fim de investigar a eficiência da redistribuição das ocorrências pendentes quando da verificação de ociosidade de alguma equipe.

O despacho inicial para este teste é idêntico ao despacho efetuado segundo o Critério C. Logo, serão aproveitados os resultados obtidos no Teste 1. A Tabela 5.11 expõe o *status* do atendimento de cada ocorrência (atendida ou pendente – não atendida) no despacho inicial. A cota inicial de ocorrências da equipe 4 foi finalizada em 429 minutos, o que significa que a referida equipe ficou ociosa após este período.

Tabela 5.11 – *Status* de atendimento das ocorrências após o despacho inicial

Equipe	Ocorrências atendidas até a verificação da ociosidade da equipe 4									Ocorrências não atendidas							
	1	34	24	36	28	4	20	37	1	27	5						
2	21	29	2	40	32	35	17	7	15	31	8	25	16	12	13	11	9
3	19	39	3	33	38				18	14	22						
4	23	10	26	6	30												

De acordo com a Tabela 5.11, das 40 ocorrências para o atendimento, 14 ainda encontravam-se pendentes quando uma das equipes ficou ociosa. Logo, foi efetuado o



redespacho das 14 ocorrências de cliente isolado que ainda permaneciam sem atendimento.

Apesar do redespacho, verificou-se que em 80 minutos a equipe 1 terminou a sua cota de ocorrências, ficando ociosa. A Tabela 5.12 expõe o *status* de cada ocorrência após o primeiro redespacho e quando a equipe 1 se tornou ociosa.

Tabela 5.12 – *Status* de atendimento das ocorrências após o primeiro redespacho

Equipe	Ocorrências atendidas até a verificação da ociosidade da equipe 1		Ocorrências não atendidas				
	1	27	5				
2	9	11	13	12	22	14	18
3			15				
4			16	31	8	25	

Em função de novamente uma equipe ficar ociosa após a segunda distribuição das ocorrências, foi efetuado um novo despacho a fim de redistribuir as 10 ocorrências ainda sem atendimento.

Vale ressaltar que os pontos de partida das equipes foram considerados como sendo as coordenadas da última ocorrência atendida por cada equipe até o momento da ociosidade de uma delas, diferentemente do despacho inicial no qual as equipes partiram do mesmo ponto.

### 5.3.2 Resultados

A Tabela 5.13 expõe os resultados obtidos após a execução das três distribuições das ocorrências (despacho inicial, despacho por ociosidade da equipe 4 e despacho pela ociosidade da equipe 1).

Tabela 5.13 – Resultados do teste 2

	Equipe 1	Equipe 2	Equipe 3	Equipe 4
<b>Número de Ocorrências Atendidas</b>	13	12	8	7
<b>Distância Percorrida (km)</b>	234	184	230	265
<b>Tempo de Atendimento (min)</b>	625	596	617	633

A Tabela 5.14 expõe as seqüências dos atendimentos, após as três distribuições das ocorrências.

Tabela 5.14 – Seqüências de atendimento para o Teste 2

Equipe	Seqüência de Atendimento													
1	Ocorrência	34	24	36	28	4	20	37	1	27	5	15	31	8
	Tipo	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
2	Ocorrência	21	29	2	40	32	35	17	7	9	11	16	25	
	Tipo	Z	Z	Z	Z	I	I	I	I	I	I	I	I	
3	Ocorrência	19	39	3	33	38	13	12	22					
	Tipo	Z	I	I	I	I	I	I	I					
4	Ocorrência	23	10	26	6	30	14	18						
	Tipo	Z	I	I	I	I	I	I						

A Figura 5.7 ilustra as rotas de atendimento das ocorrências para cada equipe, obtidas após os três despachos.

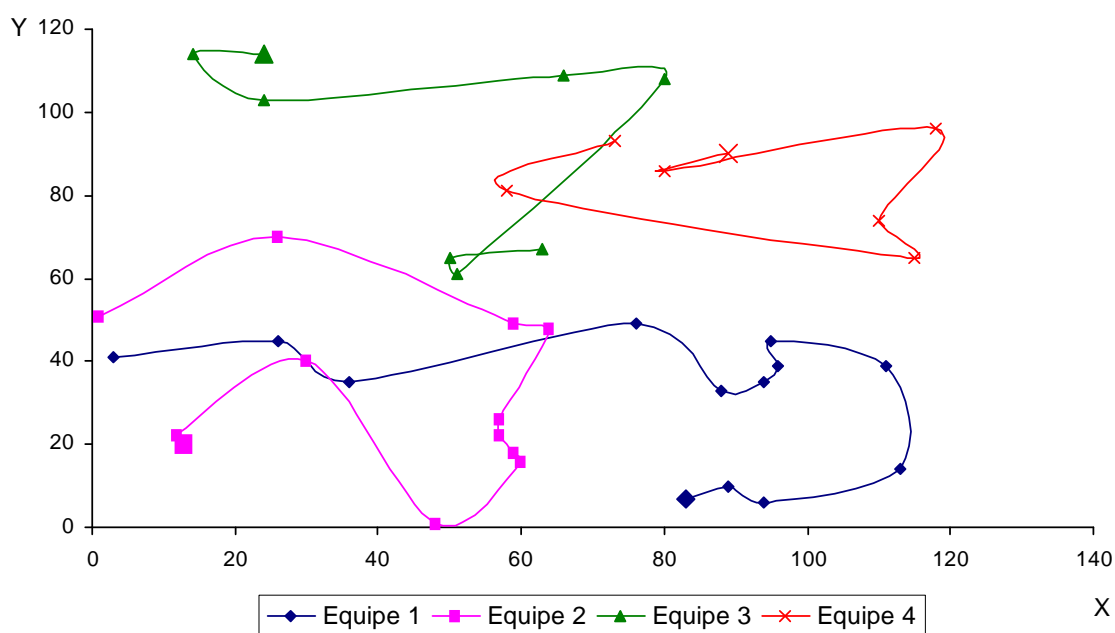


Figura 5.7 – Rotas de atendimento para o Teste 2

Ressalta-se que os cruzamentos das rotas ocorreram em função do reaproveitamento das equipes para o atendimento em outras micro regiões (formadas no processo inicial de agrupamento das ocorrências).

### 5.3.3 Comparação – Despacho único x Redespacho com aproveitamento de equipes ociosas

A fim de se analisar o efeito do redespacho, nesta seção será apresentada uma comparação entre os resultados obtidos com as estratégias de despacho único (sem redistribuição de ocorrências), realizado no Teste 1 segundo o Critério C e de redespachos para aproveitamento das equipes ociosas.

Os resultados relativos à distância total percorrida e os tempos de restabelecimento dos clientes sendo considerada a simultaneidade dos atendimentos efetuados pelas equipes, estão expostos na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Resultados despacho único x redespacho

Estratégia	Distância total percorrida (km)	Tempo de restabelecimento dos clientes (min)	
		Pelo menos 90% dos clientes	Último cliente
Despacho único	928	282	812
Redespacho com aproveitamento de equipes ociosas	912	282	633

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5.15, observa-se o melhor desempenho da estratégia de atendimento com redespacho de equipes ociosas, pois, com a referida estratégia, a distância total percorrida pelas equipes foi menor e o atendimento foi finalizado em tempo muito menor. Em relação ao restabelecimento do maior número de clientes no menor tempo, as duas estratégias se mostraram iguais, o que se explica pelo fato da primeira distribuição otimizada das ocorrências ser a mesma.

A Figura 5.8 ilustra o restabelecimento do fornecimento da energia para os clientes atingidos pelas ocorrências ao longo do tempo, considerando a simultaneidade dos atendimentos efetuados por cada equipe, ratificando as observações feitas em relação aos tempos dos restabelecimentos.

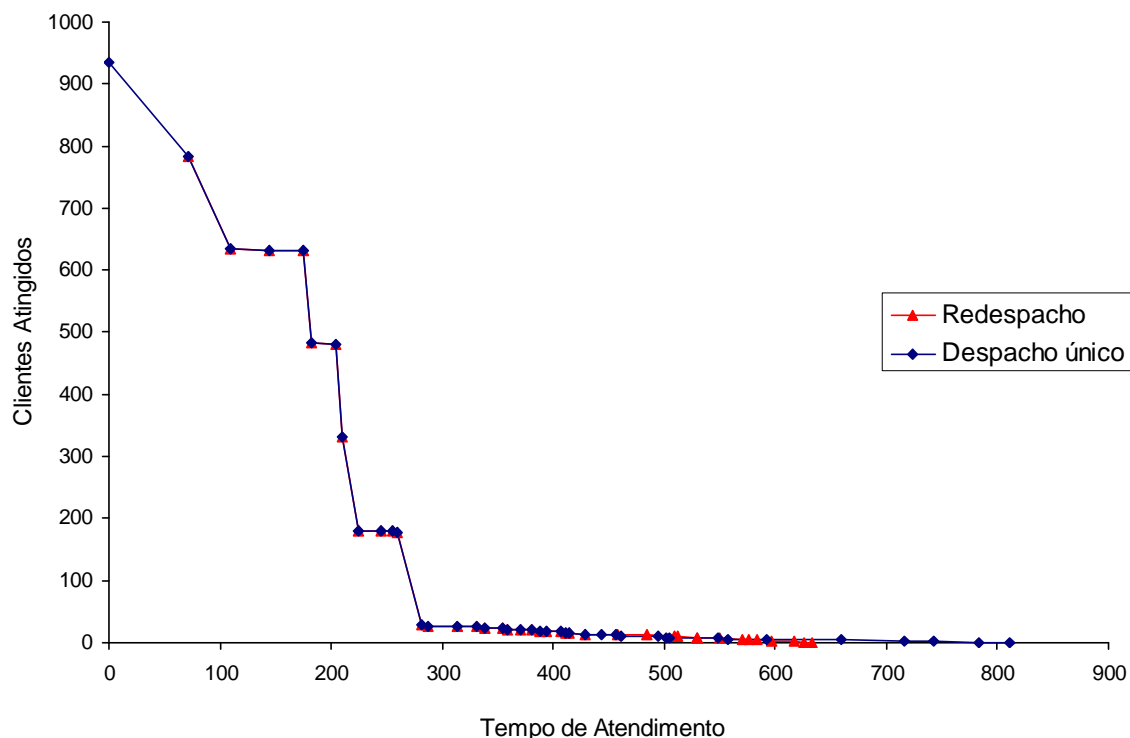


Figura 5.8 – Restabelecimento dos clientes ao longo do tempo

A Tabela 5.16 apresenta a quantificação do TMAE e CHI para as duas estratégias de atendimento comparadas.

Tabela 5.16 – Quantificação dos indicadores TMAE e CHI

Estratégia de atendimento	TMAE (min)	CHI
Despacho único	395	2943
Redespacho com aproveitamento de equipes ociosas	383	2935

Com base em tudo que foi exposto nesta seção, conclui-se que, como esperado, a estratégia de redespacho de equipes ociosas mostrou-se mais eficiente do que a de despacho único, pois, apresenta melhores resultados para os indicadores TMAE e CHI, além de reduzir a distância total percorrida, o que está totalmente aderente às necessidades das empresas de diminuir as perdas de receita por interrupção do fornecimento de energia, atendimento às exigências regulatórias e redução das despesas operacionais.

## **5.4 TESTE 3 – ENTRADA EM SERVIÇO DE EQUIPE ADICIONAL**

### **5.4.1 Descrição**

A entrada em serviço de equipes de emergência adicionais, estando o processo de atendimento em andamento, é muito comum. Por diversos motivos as empresas utilizam esta estratégia, tais como: para acelerar o processo de atendimento, para melhoria dos indicadores em determinadas áreas, ou simplesmente por ociosidade de equipes que estavam designadas para outras funções que não o atendimento de emergência.

Neste teste busca-se avaliar os impactos nos indicadores TMAE e CHI gerados pela entrada de uma equipe adicional, durante o processo de atendimento. O momento para a entrada da equipe adicional foi arbitrado em 1h e 30 minutos após o primeiro despacho.

Considerando os dados das ocorrências, expostos na Tabela 5.1, serão investigadas duas estratégias para o redespacho das ocorrências pendentes, quais sejam:

#### **Estratégia A: Redespacho de todas ocorrências pendentes**

Após 1 hora e 30 minutos do primeiro despacho, as ocorrências ainda pendentes serão redistribuídas entre todas as equipes, inclusive a equipe adicional. Sendo efetuados redespachos com as 5 equipes a cada verificação de equipe ociosa.

#### **Estratégia B: Redespacho das ocorrências pendentes do maior grupo**

Nesta estratégia, após 1 hora e 30 minutos do primeiro despacho, a equipe adicional receberá parte das ocorrências da equipe que tiver o maior número de ocorrências pendentes, bem como, nos redespachos por ociosidade, as ocorrências pendentes da equipe com o maior grupo de ocorrências serão distribuídas entre a própria equipe e a equipe ociosa. Vale ressaltar que, as demais equipes permanecerão com as suas ocorrências recebidas nos despachos anteriores.

Para os casos de redespacho o ponto de partida de cada equipe será a posição geográfica da última ocorrência atendida pela equipe antes da nova distribuição de ocorrências, caso a equipe não tenha atendido nenhuma ocorrência as coordenadas do

novo ponto de partida serão calculadas de acordo com a distância percorrida pela equipe, considerando a velocidade média de deslocamento de 40 km/h e o período de tempo decorrido entre um despacho e o outro. Para a equipe adicional as coordenadas do ponto de partida serão (0,0) para o primeiro despacho que a equipe participar.

#### 5.4.2 Resultados – Estratégia A x Estratégia B

A fim de avaliar qual a melhor estratégia para os redespachos das ocorrências pendentes a partir da entrada de uma equipe adicional, nesta seção será apresentada uma comparação entre os resultados obtidos com as duas estratégias propostas.

Os resultados relativos às distâncias totais percorridas e os tempos de restabelecimento dos clientes, considerando a simultaneidade dos atendimentos efetuados pelas equipes, estão expostos na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Resultados Estratégia A x Estratégia B

Estratégia	Distância total percorrida (km)	Tempo de restabelecimento dos clientes (min)	
		Pelo menos 90% dos clientes	Último cliente
A	889	260	615
B	912	225	524

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5.17, observa-se o melhor desempenho da Estratégia B para os redespachos das ocorrências em decorrência da entrada de equipe adicional ou da ociosidade de equipes, pois, com a referida estratégia, o maior número de clientes foi atendido em menor tempo do que na Estratégia A, além do atendimento ser finalizado em tempo muito menor, apesar da distância total percorrida pelas equipes na Estratégia B ser maior do que na Estratégia A.

A Figura 5.9 ilustra o restabelecimento do fornecimento da energia para os clientes atingidos pelas ocorrências ao longo do tempo, considerando a simultaneidade dos

atendimentos efetuados por cada equipe, ratificando as observações feitas em relação aos tempos dos restabelecimentos para as duas estratégias.

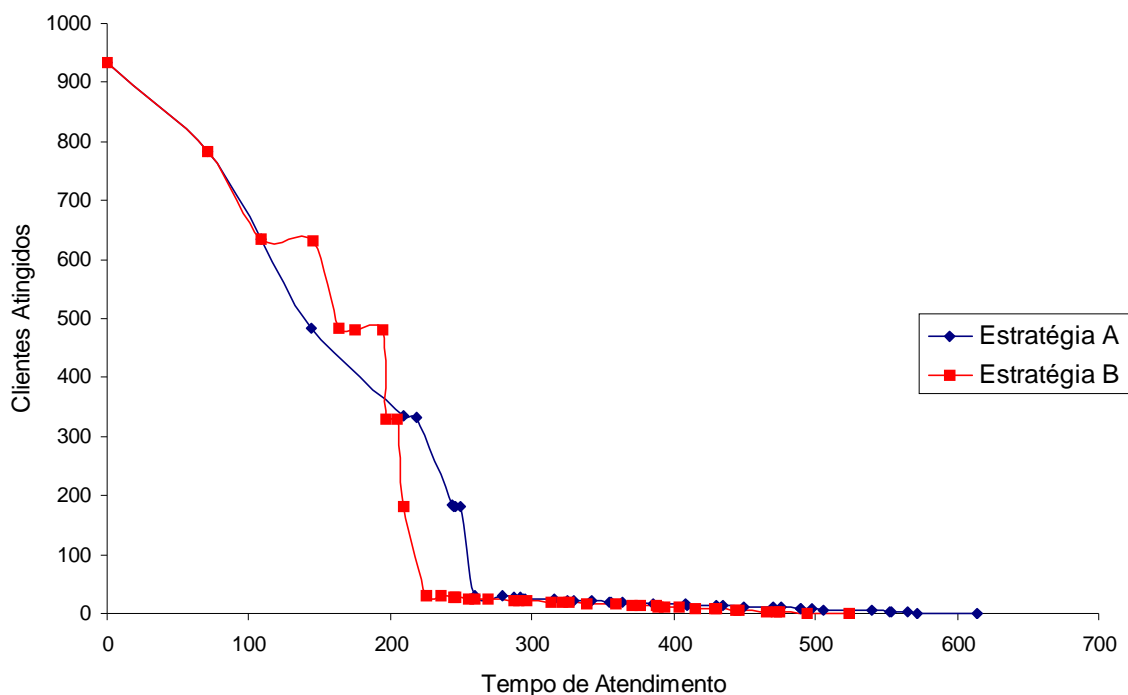


Figura 5.9 – Restabelecimento dos clientes ao longo do tempo

A Tabela 5.18 apresenta a quantificação do TMAE e CHI para as duas estratégias de redespachos comparadas.

Tabela 5.18 – Quantificação dos indicadores TMAE e CHI

<b>Estratégia</b>	<b>TMAE (min)</b>	<b>CHI</b>
A	367	2817
B	316	2632

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5.18, a Estratégia B proporciona a obtenção de melhores valores de TMAE e CHI do que a estratégia A, o que se traduz em um melhor alinhamento da Estratégia B com as necessidades das empresas.

Com base em tudo que foi exposto nesta seção, conclui-se que a Estratégia B, a qual estabelece que nos redespachos sejam distribuídas para as equipes novas ou ociosas somente as ocorrências pendentes do maior grupo, mostrou-se mais eficiente do que a

Estratégia A, a qual determina que nos redespachos sejam distribuídas todas as ocorrências pendentes entre todas equipes.

## **5.5 TESTE 4 – ACÚMULO DE NOVAS OCORRÊNCIAS**

### **5.5.1 Descrição**

O processo de atendimento de emergências em sistema de distribuição é muito dinâmico, ou seja, à medida que as ocorrências são atendidas novas solicitações de atendimento são registradas pelos *call centers* das empresas.

Considerando os mesmos dados de entrada, expostos na Tabela 5.1, e o registro de mais 20 ocorrências, a uma taxa de registro arbitrada em 10 ocorrências por hora, serão efetuadas simulações a fim de investigar sobre o melhor momento para promover o despacho das novas ocorrências segundo os indicadores TAME e CHI. Serão considerados dois critérios para o despacho das novas ocorrências, os quais se diferenciam pela quantidade de ocorrências acumuladas que servirá como gatilho para disparar o processo de despacho das ocorrências recém registradas. O despacho das novas ocorrências pode implicar em uma possível redistribuição das ocorrências já distribuídas para as equipes, pois, serão formados novos grupos considerando as ocorrências antigas e novas.

Sabe-se que as ocorrências são registradas por um *call center* em momentos distintos, mas a fim de simplificar a obtenção do tempo de atendimento de cada ocorrência, será considerado o registro simultâneo das ocorrências a cada hora, de acordo com a taxa de registro arbitrada (10 ocorrência por horas), ou seja, decorrida uma hora do despacho inicial serão registradas 10 ocorrências e após duas horas mais 10.

#### **Critério 1: Despacho pelo acúmulo de 10 ocorrências**

Para o Critério 1 cada vez que houver o acúmulo de 10 ocorrências será efetuado um redespacho a fim de distribuí-las para as equipes. Dessa forma, considerando o registro de 20 novas ocorrências a uma taxa de 10 por hora, para esse critério teremos dois redespachos para a distribuição das novas ocorrências.



## **Critério 2: Despacho pelo acúmulo de 20 ocorrências**

Para o Critério 2 quando houver o acúmulo de 20 ocorrências será efetuado um redespacho a fim de distribuí-las para as equipes. O tempo de atendimento das 10 primeiras ocorrências registradas sofrerá um acréscimo de uma hora devido à espera pela distribuição das mesmas, pois, somente após o registro das 10 últimas (completando 20 novas ocorrências) é que será efetuado o redespacho.

Além dos redespachos visando a distribuição das novas ocorrências, serão efetuados redespachos por ociosidade de equipes segundo a Estratégia B do teste anterior, na qual a equipe ociosa deve auxiliar a equipe que tiver o maior número de ocorrências pendentes no momento do redespacho.

Os dados das novas ocorrências registradas estão detalhados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Dados das novas ocorrências

Número da ocorrência	Número de equipes		Número de ocorrências
	4		20
	Coordenadas das ocorrências		Tipo
X	Y		
41	84	64	I
42	36	92	Z
43	97	85	Z
44	103	94	I
45	104	6	I
46	62	92	Z
47	56	35	I
48	31	33	I
49	70	118	I
50	83	117	I
51	12	119	I
52	69	12	I
53	34	5	I
54	36	113	I
55	33	19	I
56	49	49	Z
57	75	24	I
58	9	54	I
59	94	45	I
60	75	75	I

## 5.5.2 Resultados – Critério 1 x Critério 2

A fim de investigar sobre o melhor momento para efetuar o despacho das novas ocorrências registradas, nesta seção será apresentada uma comparação entre os resultados obtidos segundo os dois critérios considerados.

A Tabela 5.20 apresenta a quantificação do TMAE e CHI para os critérios propostos.

Tabela 5.20 – Quantificação dos indicadores TMAE e CHI

<b>Critério</b>	<b>TMAE (min)</b>	<b>CHI</b>
1	471	5680
2	466	5787

Os dados de TMAE apresentados na Tabela 5.20 sugerem uma pequena vantagem do Critério 2, que considera o acúmulo das 20 ocorrências para efetuar a distribuição das mesmas, sobre o Critério 1, que determina a distribuição a cada acúmulo de 10 ocorrências. Entretanto devido à pequena diferença entre os valores de TAME, não se pode afirmar de forma contundente que um critério se sobressai sobre o outro.

Em relação ao CHI, pela inspeção da Tabela 5.18, fica evidenciada a melhor performance do Critério 1 em relação ao Critério 2. Pode-se considerar que efetuando a distribuição a cada acúmulo de 10 ocorrências, as ocorrências do tipo zona, que envolvem um maior número de clientes serão atendidas mais rapidamente, pois, os tempos de espera das mesmas serão menores e elas têm prioridade sobre as ocorrências do tipo cliente isolado.

Pelo exposto, pode-se concluir que caso a intenção seja obter um melhor desempenho no indicador CHI, deve-se evitar grandes acúmulos de novas ocorrências para efetuar a distribuição das mesmas e que, em relação ao TMAE, há necessidade de se realizar outras investigações considerando novos dados de ocorrências para se chegar a uma conclusão sobre o melhor momento para distribuição das novas ocorrências.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

---

#### 6.1 CONCLUSÕES SOBRE O TRABALHO

A crescente melhoria e otimização dos processos apoiados por sistemas computacionais tem levado as empresas do setor de distribuição de energia elétrica a buscar cada vez mais uma melhor harmonização dos seguintes aspectos: atendimento de qualidade às demandas dos clientes, cumprimento das exigências regulatórias e necessidade de adequação de custos operacionais. Este trabalho apresentou uma metodologia baseada em técnicas de mineração de dados e metaheurística para a solução do problema de alocação de ocorrências para as equipes de atendimento de emergências em uma rede de distribuição de energia elétrica, que pode servir de base para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que atenda às necessidades das empresas através da automação do despacho das ocorrências emergenciais.

A utilização da técnica *k-means* se mostrou adequada à necessidade de formação dos agrupamentos de ocorrências, conforme as suas proximidades, visando a concentração dos atendimentos de cada equipe em micro regiões. Tal estratégia pode levar, como foi percebido nos testes realizados, a uma distribuição numericamente desigual das ocorrências entre as equipes. De forma a lidar com esta situação, uma estratégia para redespacho das ocorrências, sempre que uma equipe se tornar ociosa, foi analisada.

No processo de otimização de rotas foi empregado um algoritmo genético, tendo sido testadas algumas funções de aptidão, de acordo com os diferentes objetivos que envolvem este problema. Em todos os casos, considerou-se a necessidade de redução do CHI e do TMAE, indicadores fortemente correlacionados com a qualidade de atendimento de uma empresa de distribuição de energia elétrica. Outras estratégias para redespacho das ocorrências, além da ociosidade das equipes, foram testadas. Nestes casos, foi verificada a importância do redespacho quando ocorrem alterações no número de equipes e após o acúmulo de novas ocorrências.

Testes foram realizados utilizando dados simulados de ocorrências e também dados reais sobre tempos médios de atendimento levantados pela empresa Light. Os resultados obtidos mostraram a eficácia da abordagem proposta e a coerência entre as funções de aptidão empregadas e os objetivos considerados. Foi possível observar que significativa melhoria pode ser obtida com um processo otimizado de distribuição de ocorrências e roteamento das equipes. Também foi observado que a metodologia proposta pode ser utilizada para o desenvolvimento e avaliação de novas estratégias para o atendimento das ocorrências emergenciais de uma rede de distribuição de energia elétrica.

Cabe mencionar que os tempos computacionais observados nos testes realizados indicam que esta abordagem é compatível com as necessidades das atividades de tempo real, tais como o despacho de ocorrências emergenciais.

O principal benefício da abordagem proposta neste trabalho é a automação do processo de despacho de ocorrências para as equipes de atendimento. Tal automação, por si só, já representa um ganho no tempo de decisão sobre o despacho. A obtenção de um despacho otimizado, assim como o emprego das estratégias de redespacho, faz com que os atendimentos sejam muito mais eficientes. Tudo isso faz com que a reconexão de consumidores ocorra de forma mais efetiva e em um tempo muito menor, levando à melhoria direta dos indicadores de desempenho de uma empresa e ao aumento da satisfação geral de seus consumidores.

## **6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O campo de pesquisas para trabalhos relativos às atividades de tempo real em centros de operação de empresas de energia elétrica é muito fértil. No que diz respeito especificamente ao despacho de ocorrências emergenciais, como continuidade do trabalho proposto, seria interessante a consideração de penalidades relativas ao relevo e mãos de direção das vias, para a determinação das rotas de atendimento das ocorrências. Isso poderia ser explorado, por exemplo, através da integração de um algoritmo evolutivo com um Sistema de Informação Geográfica (SIG), como em [Marq08] que propõe um modelo para a solução do problema de roteamento de veículos de carga em plataforma SIG aplicando a metaheurística de otimização por colônia de formigas.

Outro ponto a ser explorado seria a completa automatização do processo de despacho de ocorrências emergências em redes de distribuição de energia elétrica com a integração de um módulo inteligente para a distribuição das ocorrências e análise dos resultados dos atendimentos, à sistemas de comunicação com as equipes por dados e de localização de veículos, considerando a tendência das empresas do setor em utilizar o despacho das ocorrências via *personal digital assistant* (PDA) e os sistemas de rastreamento de veículos em tempo real, como em [Varr07] que relata a experiência de uma concessionária de energia na integração de seu SGD aos sistemas de rastreamento de veículos e de despacho via PDA.

Por fim, outras metaheurísticas, empregadas em problemas de roteamento encontrados na literatura, devem ser investigadas para a aplicação no problema tratado nesta Dissertação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Alve07] L. Alves, *Eficiência de Métodos de Agrupamento de Dados na Modelagem Nebulosa Takagi-Sugeno*, Dissertação de Mestrado, PUC-PR, 2007.

[Anal06] M. Analoui, M. F. Amiri, *Feature Reduction of Nearest Neighbor Classifiers using Genetic Algorithm*, World Academy of Science, Engineering and Technology Vol 17, p. 36-39, 2006.

[Ávil02] S. L. Ávila, *Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletoras*, Dissertação de Mestrado, UFSC, nov./2002.

[Bent08] E. P. Bento, N. Kagan, *Algoritmos Genéticos e Variantes na Solução de Problemas de Configuração de Redes de Distribuição*, SBA - Revista Controle & Automação, Vol. 19, No 3, p. 302-315, jul-set/2008.

[Brej06] S. R. C. Brejon, P. P. Belfiore, L. P. L. Fávero, *Enfoque Sistêmico para a Tomada de Decisões em Problemas de Roteirização de Veículos*, XIII SIMPEP, nov/2006.

[Brus08] S. M. Bruschi, R. F. D. Melo, *Algoritmo Genético para a Tomada de Decisão de Particionamento de Processos Lógicos em Simulação Distribuída*, IEEE Latin American Transactions, Vol. 6, No 1, mar/2008.

[Carv06] M. A. M. de Carvalho, A. G. dos Santos, *Algoritmo Aplicado à Seleção de Colunas no Problema de Alocação de Tripulações*, XII ENCITA, out./2006.

[Cost05] C. E. S. Costa, *Aplicação de Técnicas de Pesquisa Operacional na Determinação de Setores de Atendimento em uma Concessionária de Energia*, Dissertação de Mestrado, UFPR, out./2005.

[Cunh00] C. B. da Cunha, *Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais*, Revista Transportes da ANPET, Vol. 8, No 2, p. 51-74, nov/2000.

- [Dias01] M. M. Dias, *Um modelo de formalização do processo de sistema de descoberta de Conhecimento em banco de dados*, Tese de Doutorado, UFSC, 2001.
- [Falc04] M. A. G. Falcone, *Estudo Comparativo entre Algoritmos Genéticos e Evolução Diferencial para a Otimização de um Modelo de Cadeia de Suprimento Simplificada*, Dissertação de Mestrado, PUC-PR, set./2004.
- [Form05] E. E. Formigoni, *Resolução de Problemas de Roteamento de Veículos na Entrega de Produtos da Indústria Avícola*, Dissertação de Mestrado, UFPR, ago./2005.
- [Gold05] R. Goldschmidt, E. Passos, *Data Mining um Guia Prático*, 1<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2005.
- [Guid08] M. P. Guidini, C. H. C. Ribeiro, *Utilização da Biblioteca TerraLib para Algoritmos de Agrupamento em Sistemas de Informações Geográficas*, VIII SIGE \_ ITA, 2008.
- [Hrus03] E. R. Hruschka, N. F. F. Ebecken, *A Genetic Algorithm for Cluster Analysis*, Intelligent Data Analysis, Vol. 7, No 1, p. 15-25, 2003.
- [Lazz08] P. Lazzarotto, *Algoritmos de Roteamento Hierárquicos em Redes de Sensores Sem Fio Utilizando Algoritmos Evolutivos para Determinação de Cluster-head's*, Dissertação de Mestrado, UTFPR, jun./2008.
- [Marq08] E. C. Marques, R. S. Parpinelli, R. C. L. Salazar, *Roteamento de Veículos em Plataformas SIG Assistidas por Colônias de Formigas*, Revista Hífen, Vol. 32, No 62, p. 139-147, 2<sup>o</sup> sem./2008.
- [Oliv04] M. H. de Oliveira, V. S. Junior, *Estudo de Otimização e Casos Utilizando Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado*, FAMAT em Revista - UFU, No 03, p. 101-108, set./ 2004.

[Polt07] M. R. Poltosi, *Elaboração de Escalas de Trabalho de Técnicos de Enfermagem com Busca Tabu e Algoritmos Genéticos*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale dos Sinos, mar./2007.

[PROD10] PRODIST, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional*, Resolução 395 da Agência Nacional de Energia Elétrica, jan./2010.

[Rabe07] E. Rabelo, *Avaliação de Técnicas de Visualização para a Mineração de Dados*, Dissertação de Mestrado, UEM, set./2007.

[RMOE09] RMOED, *Relatório Mensal da Operação Elétrica da Distribuição*, Light Serviços de Eletricidade S.A. – Diretoria de Redes – Superintendência Técnica – Gerência de Operação, dez./2009.

[Ribe01] G. M. Ribeiro, M. D. V. de Ruiz, L. Dexheimer, *Programa de Roteamento de Veículos Aplicação no Sistema de Coleta dos Correios*, ENEGEP, TR11-0871, 2001.

[Ribe09] M. N. Ribeiro, *Seleção Local de Características em Agrupamento Hierárquico de Documentos*, Dissertação de Mestrado, UFPE, fev./2009.

[Sant04] D. D. Santos, D. Pasotto, *Estudo Comparativo de Algoritmos Genéticos Aplicados ao Escalonamento de Tarefas*, Cad. de Pós-Graduação em Eng. Elétrica - Universidade Presbiteriana Mackenzie, Vol. 4, No 1, p. 99-112, 2004.

[Silv03] L. R. S. da Silva, *Aprendizagem Participativa em Agrupamento Nebuloso de Dados*, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, mar./2003.

[Silv07] R. C. O. da Silva, *Avaliação da Implantação de Softwares de Roteirização de Veículos*, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, ago./2007.

[Silv08] R. R. Silva, *Estudo e Aplicação de um Algoritmo Genético Compacto Usando Elitismo e Mutação*, Dissertação de Mestrado, UTFPR, abr./2008.



[Silv09] D. T. da Silva, *Algoritmos Genéticos e o Problema de Corte Multiobjetivo*, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, mai./2009.

[Souz09] M. J. F. Souza, *Inteligência Computacional para Otimização*, Notas de Aula da Disciplina Inteligência Computacional para Otimização. Disponível em: <<http://www.iceb.ufop.br/decom/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>>, acessado em Dezembro de 2009.

[Steir00] M. T. A. Steiner, L. V. S. Zambone, D. M. B. Costa, C. Carnieri, A. L. da Silva, *O Problema do Roteamento no Transporte Escolar*, Pesquisa Operacional, Vol. 20, No 1, p. 83-99, jun./ 2000.

[Steir06] M. T. A. Steiner, C. E. S. Costa, D. M. B. Costa, E. A. Filho, V. C. Zambenedetti, *Técnicas da Pesquisa Operacional Aplicadas à Logística de Atendimento aos Usuários de uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica*, Revista Eletrônica Sistemas & Gestão, Vol. 1, No 3, p. 229-243, set./dez. 2006.

[Varr07] C. O. S. Varricchio, N. Moraes, P. E. C. Monteiro, A. L. Costa, *Sistemas de Localização e Despacho de Viaturas em Apoio à Operação da Distribuição*, VII SIMPASE, ago./2007.

[Vill08] W. J. P. Villanueva, F. J. V. Zuben, *Índices de Validação de Agrupamentos*, Artigo DCA-FEEC, Unicamp, 2008.

[Znam00] A. Znamensky, C. B. da Cunha, *Heurística para o Problema de Roteirização e Programação do Transporte de Deficientes*, Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes - ANPET p. 303-311, nov/2000.