

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JOEL ALVES BATISTA

**PROPOSTA DE UM MODELO PARA A ROTEIRIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:** integrando algoritmo genético ao sistema de
informação geográfico usando os recursos da web

Santa Bárbara D'oeste

2012

JOEL ALVES BATISTA

PROPOSTA DE UM MODELO PARA A ROTEIRIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: integrando algoritmo genético ao sistema de informação geográfico usando os recursos da web

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Orlando Roque da Silva

Santa Bárbara D'oeste

2012

JOEL ALVES BATISTA

**PROPOSTA DE UM MODELO PARA A ROTEIRIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:** integrando algoritmo genético ao
sistema de informação geográfico usando os recursos da web

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), para a obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 16/02/2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Orlando Roque da Silva (Orientador)

Doutor em Engenharia de Produção
Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas-FMU

Prof. Dr. Ângelo Palmisano

Doutor em Engenharia de Produção
Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas-FMU

Prof. Dr. Paulo Jorge Moraes Figueiredo

Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Metodista de Piracicaba-UNIMEP

À minha esposa Yolanda, aos meus
filhos Lucas, Rebeca e Déborah, e ao
meu avô, pai Cícero (*in memória*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado fé, saúde e força para superar os desafios da vida.

A todos que direta ou indiretamente me apoiaram e me incentivaram a vencer mais este desafio em minha vida.

Em especial, à minha família: os meus pais - Doca Batista e Dona Lurdes -, os meus irmãos - Nadi, Seunen, Edson, Sebastião, Leny, Vanda, Josué, Ananias, Azarias, Obadias, Helenita e Jerias que sempre foram fonte de inspiração para minha iniciação no mundo da matemática, motivação e apoio para superação das dificuldades em minha vida.

À minha esposa Yolanda que é meu porto seguro, minha fonte de motivação, meu apoio e meu carinho, sem a qual este trabalho não teria tanto significado.

A meus filhos Lucas, Rebeca e Déborah, que deram um novo significado a minha vida e me mostraram o significado do amor incondicional e a importância da família.

Àquele que me ensinou a diferença entre honra e obediência, meu avô, pai Cícero, *in memória*.

Ao professor Orlando Roque da Silva, pela orientação, dedicação, liberdade e paciência dedicadas a mim no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Orlando Roque da Silva, Alexandre Tadeu Simon e Paulo Jorge Moraes Figueiredo, pelas críticas e sugestões realizadas na etapa de qualificação do projeto.

À Clarissa Gastão Bolandin, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), pelo apoio e ajuda ao longo do curso.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À Universidade Estadual do Maranhão pela liberação para essa missão em estudo em outro Estado.

Aos professores do Departamento de engenharia mecânica e produção da Universidade Estadual do Maranhão, que se esforçaram para possibilitar a realização do meu mestrado.

Às professoras Rossane Cardoso Carvalho e Shirley Silva Abreu e Marília de Carvalho Cerveira.

Aos professores do PPGEF pelos ensinamentos e vivência cordial ao longo da elaboração deste trabalho.

Aos colegas de curso e funcionários que propiciaram um ambiente acolhedor, sem o qual as tarefas diárias seriam penosas e, especialmente, à Inayara Gonzales pelo companheirismo e por gerar um ambiente positivo e acolhedor necessários para o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

O crescimento da população mundial, o modo de produção adotado pela sociedade, a globalização do consumo têm como consequência o crescimento desordenado das cidades e a geração de grandes quantidades de resíduos que causam problemas de ordem ambiental, social e econômica. O impacto ambiental causado pelos resíduos das atividades humanas tem exigido especial atenção quer seja ambiental ou social, especialmente nos grandes centros urbanos. No que se refere à dimensão social a atividade com os resíduos sólidos pode promover a melhoria das condições de vida, por meio da geração de emprego e renda, de trabalho formal e informal para as populações menos favorecidas. Destacam-se ainda os benefícios associados ao processo produtivo da atividade por meio da recuperação de energia. O principal motivador deste trabalho é contribuir para a solução dos problemas advindos da grande geração de resíduos sólidos, propondo um modelo de roteirização para otimizar a coleta e o transporte destes resíduos, com vista a minimizar as rotas do transportes e os custos financeiros gerados por esta atividade. A solução proposta é formulada por meio do modelo de transporte de Bodin et al (1993) e da Metaheurística Algoritmo Genético, integrado ao Sistema de Informação Geográfico, usando os recursos da web, com o propósito de encontrar uma rota ótima a ser executada pelo veículo coletor dos resíduos sólidos. Para isso, o modelo utiliza um grafo misto orientado $G = (V, A)$ com roteamento sobre arco permitindo, assim, o cálculo de uma rota ótima construída por meio do Problema do Carteiro Chinês (PCC).

Palavras-chave: Gerenciamento de Resíduo Sólido. Otimização de Transporte. Algoritmo Genético. Modelo de roteirização. Problema do Carteiro Chinês. Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT

The world population growth, the mode of production adopted by society, the globalization of consumption have resulted in overcrowded cities and the generation of large quantities of waste causing problems of environmental, social and economic. The environmental impact caused by impact waste from human activities has required special attention or whether environmental or social, especially in large urban centers. Regarding the social dimension promoting the improvement of living conditions, by generating employment and income, formal and informal work for underprivileged populations. We also highlight the benefits associated with the production process through the energy recover. The main motivation of this work is to contribute solving this problem by proposing a routing model to optimize the collection and transportation of solid waste to minimize the routes of transport and financial costs. The proposed solution is formulated by the transport model Bodin et al (1993) and the metaheuristic Genetic Algorithm. Integrated with Geographic Information System by using resources through the web, with the purpose of finding an optimal path to be executed the solid waste collecting vehicle. For this, the model uses a mixed graph-oriented $G = (V, A)$ with arc routing on, thus allowing calculating an optimal route built by the Chinese Postman Problem (CCP).

Keywords: Solid Waste Management. Transportation optimization. Genetic Algorithm. Routing Model. Chinese Postman Problem. Geographic Information System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Atividades gerenciais dos resíduos sólidos.....	34
Figura 2 - Fluxo da implementação do AG, processo de reprodução.	58
Figura 3 - Exemplo de seleção por roleta.....	66
Figura 4 - Representação gráfica do operador de mutação.	67
Figura 5 - Crossover de um ponto.....	68
Figura 6 - Crossover de dois pontos	69
Figura 7 - Cruzamento uniforme.....	69
Figura 8 - Operador de recombinação.	73
Figura 9 - Operador de recombinação	74
Figura 10 - Operador de recombinação.	74
Figura 11 - Operador de mutação	74
Figura 12 - Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica.....	80
Figura 13 - Representação de dados nos formatos vetorial e matricial.....	81
Figura 14 - Topologia de nós e de rede para um conjunto de arcos	83
Figura 15 - Topologia de arcos para um conjunto de polígonos.....	84
Figura 16 - Definição de uma malha ou <i>grid</i>	85
Figura 17 - Rota encontrada pelo Google maps na ilha de São Luís - Ma.....	93
Figura 18 - Tela do Transcoord.....	94
Figura 19 - Face gráfica da das rotas otimizadas, feitas pelo roteador proposto. .	95
Figura 20 - Rota ótima construída com a interação do AG ao SIG e à web.	95
Figura 21 - Modelo de gerenciamento proposto.....	96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção per capita de resíduos sólidos Kg/dia.....	36
Gráfico 2 - Coleta seletiva nos municípios do Brasil.....	40
Gráfico 3 - População atendida pela coleta seletiva.....	40
Gráfico 4 - Coleta Seletiva por regiões no Brasil.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Destino final dos resíduos sólidos em porcentagem e tipos de destino	33
Tabela 2 - Evolução dos custos da coleta seletiva.....	41
Tabela 3 - Representação da solução de um cromossomo.	61
Tabela 4 - Arranjo combinatório de (m, k).	70
Tabela 5 - Representação das feições geográficas no ambiente computacional..	80

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
CAOUMA	Centro de Apoio Operacional de Meio Ambiente, Urbanismo e Patrimônio Cultural
CDS	Comissão para o Desenvolvimento Sustentável
CEMPRE	Compromisso Empresarial para a Reciclagem
DAEE	Departamento de Água e Energia Elétrica
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto Paulista de Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
PCC	Problema do Carteiro Chinês
PMX	Partial Mapped
PNSB	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVE's	Postos de Entrega Voluntária
ReCESA	Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental
SIG	Sistema de Informação Geográfico
SRTRSU	Sistema de Roteirização do Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	MATERIAIS E MÉTODOS	22
2.1	Diretriz 1 - <i>Design science</i> tem como objeto de estudo um artefato.	22
2.2	Diretriz 2 - O problema é relevante.	22
2.3	Diretriz 3 - Avaliação rigorosa.....	23
2.4	Diretriz 4 - A design science efetivamente contribui para a área de conhecimento do artefato.	23
2.4.1	Projeto do artefato.....	23
2.4.2	Ampliação dos fundamentos	24
2.4.3	Desenvolvimento de novas metodologias	24
2.5	Diretriz 5 - Pesquisa rigorosa.....	24
2.6	Diretriz 6 - Uso eficiente de recursos.	24
2.7	Diretriz 7 - Comunicação dos resultados.....	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
3.1	Caracterização dos resíduos sólidos urbanos	27
3.2	Definição de resíduos sólidos.....	30
3.3	Classificação dos resíduos sólidos.....	34
3.4	Etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos	36
3.4.1	Geração dos resíduos sólidos	36
3.4.2	Acondicionamento	37
3.4.3	Coleta	38
3.4.4	Coleta seletiva	39
3.4.5	Estação de transferência ou de transbordo	42
3.4.6	Reciclagem.....	42
3.4.7	Disposição final	43
3.5	Transportes	44
3.5.1	Dimensionamento dos serviços de coleta	44
3.5.2	Definição dos itinerários de coleta.....	47
3.5.3	Técnicas de zoneamento	47
4	ALGORITMO GENÉTICO	50
4.1	Introdução aos algoritmos genéticos.....	50
4.2	Principais conceitos e elementos de um algoritmo genético.	54

4.3	Operadores genéticos	58
4.4	População inicial	60
4.5	Operador de aptidão	62
4.6	Operador de seleção	64
4.7	Operador de mutação	67
4.8	Recombinação ou <i>crossover</i>	68
4.9	O Problema do Carteiro Chinês	70
4.9.1	Modelagem do problema do carteiro chinês.....	71
4.9.2	Operador de recombinação.....	72
4.9.3	Operador de mutação.....	74
4.9.4	Pressão seletiva.....	74
4.9.5	Critério de parada.....	75
5	SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICO (SIG)	76
5.1	Representação de objetos espaciais em geoprocessamento	80
5.2	Instrumentos do Sig Web	85
5.3	Geração da matriz de distâncias	87
6	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO	90
6.1	Formulação do problema de roteirização de veículo	90
6.2	Formulação Matemática	91
6.3	Recursos da Web	93
7	CONCLUSÃO	98
7.1	Recomendações para trabalhos futuros.	99
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

A destinação da enorme e diversificada quantidade de resíduo gerado diariamente é, atualmente, uma das maiores preocupações da humanidade. A crescente geração de resíduos decorre do aumento da população mundial, do modelo atual de produção e do consumo, além da grande concentração da população em espaços urbanos, o que gera o aumento significativo dos resíduos sólidos a serem coletados e a dificuldade na localização de áreas para destinação final, a qual acarreta em escolha de áreas cada vez mais distantes dos grandes centros. Isto encarece o custo da operação e da manutenção de veículos e de equipamentos envolvidos no processo de coleta e de transporte (BARBOSA, 2011).

A conscientização crescente do público sobre as questões ambientais, as exigências legais cada vez mais severas das alternativas de tratamento e disposição final adequado dos resíduos sólidos, bem como a necessidade premente de minimização destes resíduos e dos recursos a eles destinados têm levado a novas exigências e tendências na gestão destes resíduos que, no Brasil, é de competência dos municípios.

A construção de modelos de gerenciamento que permitam o cumprimento de requisitos legais, que apoiem as exigências da população e observem as condições de otimização e eficácia são fundamentais para a competitividade de empresas dependentes de uma roteirização de veículo eficiente, em especial, aquelas que operacionalizam a coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos.

O espaço em que se encontram as cidades registrou, durante toda sua história, os traços de suas dinâmicas anteriores, resultantes da confrontação de energias política, social e econômica. Este espaço se constitui como um sistema de acumulações resultantes da dinâmica que permite traduzir, por meio de mecanismos próprios, a decifração dos movimentos da história realizada pela sociedade. É nesse contexto que as relações econômicas organizam as relações nos espaços sociais e seu processo produtivo, bem como a sua interação com a

natureza, no entanto, são as relações sociais que determinam as relações econômicas (AB'SABER, 2002).

A ênfase no estudo das relações sociais de produção nos leva à constatação do desequilíbrio na apropriação da renda gerada no processo produtivo. As atividades industriais, por meio da apropriação dos resultados das pesquisas científicas, potencializaram os efeitos das práticas de produção e consumo de bens industrializados. Tais atividades abrangem, hoje, vasta dimensão territorial, tornando visíveis os impactos à natureza na mesma escala de dimensão. O objeto comum para a análise das formas de perpetuação deste sistema produtivo baseia-se na capacidade da natureza de repor os recursos necessários a este modo de produção (CLAVAL et al, 2002).

Estudar a variada influência do progresso da ciência, dos meios de produção e da técnica sobre o meio ambiente natural é um dos problemas mais importantes da nossa época. As intervenções fundamentais relacionadas com o uso racional dos recursos da biosfera com proteção e melhoria do meio ambiente devem efetuar-se em todos os ramos da ciência contemporânea e devem estar interconectadas, já que possuem uma meta comum: a ação recíproca do objeto que se estuda e o meio ambiente integral (GUERASIMOV, 1983).

Notadamente o homem não tem observado, de forma intencional ou por ignorância, a sua interdependência com o meio ambiente. Isso fica patente quando, de forma indiscriminada, busca as fontes de suprimentos para seus processos produtivos, sem levar em conta a fragilidade do meio ambiente, agindo como se os recursos naturais fossem inesgotáveis.

A fragilidade dos ambientes naturais face às intervenções humanas é maior ou menor em função de suas características genéticas. A princípio, salvo algumas das regiões do planeta, os ambientes naturais mostram-se em estado de equilíbrio dinâmico até o momento em que o homem passa progressivamente, a interferir cada vez mais na exploração dos recursos naturais (ROSS, 1994).

Inegavelmente o espaço urbano proporciona maior facilidade de acesso aos bens e serviços oferecidos pelo poder público, além de permitir maiores oportunidades de ascensão profissional e social. A concentração populacional nesses espaços permite, ainda, atendimento de infraestrutura de serviço de forma mais racional, tanto para o cliente desses serviços quanto para o

poder público que os oferece. Entretanto, o grande aumento dessa concentração em centros urbanos traz vários problemas, dentre eles a geração diária de uma enorme quantidade de resíduos sólidos (GUNTHER, 2008).

Sob o ponto de vista econômico, a produção exagerada de resíduos sólidos, a disposição final inadequada sem projetos e sem critérios para reverter tal situação, representa um desperdício de materiais, de energia, de recursos naturais e financeiros.

A gestão e a disposição inadequada dos resíduos sólidos causam impactos socioambientais, tais como a degradação do solo, o comprometimento de corpos d'água e mananciais, a intensificação de enchentes, contribui, ainda, para poluição do ar e para a proliferação de vetores de importância sanitária nos centros urbanos e para as catações em condições insalubres nas ruas e nas áreas de disposição final (BESEN et al, 2011).

É nesse contexto que está inserido e se justifica este trabalho ao propor um modelo de gerenciamento baseado em Algoritmo Genético integrado ao Sistema de Informação Geográfico (SIG) e que utiliza os recursos da web de modo a otimizar a coleta, o transporte dos resíduos sólidos urbanos e instrumentalizar os municípios maranhenses, em especial São Luís, capital do Maranhão, com vistas a promover um adequado aproveitamento dos resíduos sólidos.

Visto que, segundo o Centro de Apoio Operacional de Meio Ambiente, Urbanismo e Patrimônio Cultural (CAOUMA, 2008), 97,7% dos municípios do estado trabalham com disposição inadequada dos resíduos sólidos. Este trabalho desenvolveu-se tendo como base a cidade de São Luís do Maranhão, composta por vias de peculiaridades únicas com entrâncias, devido à prevalência de manguezais, com sua superfície terrestre formada na totalidade por terrenos frágeis e arenosos.

Estas características exigem, por parte do poder público, um tratamento adequado quanto às questões relacionadas à coleta, ao acondicionamento, ao transporte, ao aproveitamento e à reciclagem dos resíduos com vistas a evitar degradação ambiental, a permitir melhor qualidade sanitária para a população, a gerar oportunidade de emprego e renda para a população

menos favorecida, além de dar disposição final adequada aos resíduos gerados por mais de um milhão de seus habitantes.

A coleta e o transporte de resíduos sólidos em São Luís são feitos pelas empresas Limp Fort, Limpel e Coliseu. Este estudo de roteirização foi efetuado no setor de coleta da empresa Limp Fort. O problema da coleta de resíduos sólidos tratado neste trabalho é formulado com base no processo de coleta diário da empresa em estudo. Para isso, foi necessário recorrer a dados extraídos das características da rede viária, da atividade de coleta e dos veículos usados na coleta.

Para fazer a coleta de resíduos sólidos, a empresa divide a sua área de atuação em 30 setores. A coleta se divide em noturna e diurna. A primeira é realizada diariamente nos 12 setores centrais, que compreendem o centro da cidade e os bairros adjacentes e próximos à localização de centro comercial nos bairros. Já a coleta diurna é realizada em dias alternados nos 18 setores correspondentes aos bairros periféricos. Às segundas, quartas e sextas-feiras a coleta é realizada em 9 setores e às terças, quintas e sábados nos outros setores. A demanda pelo serviço se localiza sobre a extensão das ruas ao longo das quais são depositados os resíduos e não em locais específicos e pré-determinados, distribuídos pela cidade.

Nas áreas rurais do município, não há coleta regular e, por isso, os moradores têm que juntar o próprio lixo e descarregar em locais pré-estabelecidos visitados pela empresa. Nesses locais, a empresa demanda de três a cinco viagens por caminhão às segundas e terças-feiras; e duas a três viagens por setor no restante da semana.

O processo da coleta tem início com o encaminhamento dos caminhões vazios da garagem para os setores, com um motorista e três garis em cada caminhão. A empresa não mantém nem os motoristas e nem os garis fixos nos setores. Nos setores, eles iniciam a coleta passando de casa em casa por algumas ruas e, quando a capacidade do veículo é atingida, os garis permanecem no setor enquanto o caminhão se dirige para o aterro da Ribeira, localizado a 32 quilômetros do centro da cidade. No pátio do aterro, o caminhão é pesado por fiscais da prefeitura encarregados de conferir o volume coletado para fins de

pagamento à empresa, depois se dirige para o aterro sanitário, onde é feito a descarga e por fim, retorna para o setor de coleta.

Enquanto isso, a equipe de garis desse caminhão percorre a pé as ruas do setor onde foi iniciada a coleta e recolhe o lixo das casas restantes e os empilha em alguns pontos. Assim, quando o caminhão volta vazio do aterro passa somente pelos locais onde os garis empilharam o lixo. Todos os veículos, de capacidade idêntica, ficam, a princípio, estacionados em uma única garagem da empresa de onde são enviados aos setores e para onde devem retornar no final do expediente, depois do término de coleta em todo o setor.

A atividade pode ser definida como um conjunto de clientes com os quais está associado um volume de carga que deve ser localizada ao longo das ruas da malha viária para ser coletado regularmente por uma frota de veículos, inicialmente localizados em um depósito central, com características idênticas e com capacidade fixa. Esta capacidade especifica um limite superior que pode ser coletado por cada veículo. Numa segunda etapa, um conjunto de clientes localizados em pontos dispersos sobre a rede viária precisa ser atendido pelo veículo que deve passar por todos os pontos exatamente uma única vez. Toda rota começa na garagem, visita a certo número de clientes e termina com o retorno para a garagem sem violar a restrição de capacidade.

O tema aqui discutido tem se constituído em questão estratégica para governos e sociedade em todo o mundo e, atualmente, vem sendo abordado por meio de sistemas de apoio à decisão, muitos deles baseados em Sistema de Informação Geográfico (SIG). Alguns trabalhos recentes envolvendo a integração da pesquisa operacional e do SIG aplicados à resolução dos problemas relacionados às questões de logística e no gerenciamento dos resíduos sólidos e problemas de localização podem ser vistos em Lima (2002), Arakaki e Lorena (2006), Camargo e Cunha (2006), Carrara et al (2006) Rovetta et al (2010). Tais trabalhos ressaltam a importância e a atualidade do tema aqui desenvolvido.

Diversos softwares são utilizados no auxílio da análise do ciclo de vida dos produtos com vistas à diminuição da geração dos resíduos sólidos e gestão de logística. Porém, a maioria deles, tais como o Gabi-4, Humberto, Trace e Transcad, entre outros, acabam gerando dependência de importações, programas e dados que, na maioria das vezes, não satisfazem às características peculiares

do sistema dos resíduos sólidos locais. Nesse sentido, este trabalho busca suprir a falta de sistemas de gerenciamento com características específicas baseados em softwares livres integrados a outros gerados de forma apropriada às necessidades locais.

A capacidade de um SIG aumenta consideravelmente quando se faz o uso combinado com técnicas de Pesquisa Operacional. Contudo, a integração de SIG com algoritmos de transporte e localização apesar de bastante promissora, ainda não está totalmente difundida na comunidade científica e carece de estudo e aplicação nas mais diversas áreas, justificando e ressaltando, mais uma vez, a relevância deste trabalho (ARAKAKI; LORENA, 2006).

A pergunta que se impôs a este trabalho de dissertação foi: É possível, por meio do algoritmo genético integrado ao Sistema de Informação Geográfico e usando os recursos da web a construção de um artefato ou constructo, doravante denominado de Sistema de Roteirização do Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos (SRTRSU), que possibilite a roteirização de veículos com vistas a otimizar as rota de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos?. Para buscar a resposta a esta questão foram estabelecidos os objetivos:

Propor um modelo de roteirização por meio da integração do algoritmo genético ao sistema de informação geográfico utilizando os recursos da web, e desenvolver um artefato de roteirização de veículos, com vistas à minimização dos custos da coleta e transporte para uma adequada disposição final dos resíduos sólidos urbanos.

Para alcançar os objetivos deste trabalho de dissertação desenvolveu-se a seguinte metodologia:

- a) desenvolvimento computacional da solução, utilizando-se de diversas tecnologias como o SIG, os recursos da web para o cadastramento dos pontos, o cálculo das distâncias, a roteirização nos percursos e a construção de algoritmos matemáticos;
- b) validação da solução, por intermédio de testes, para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com a realidade observada;
- c) construção do modelo para o gerenciamento dos resíduos sólidos.

O primeiro objetivo foi encontrar um conjunto de rotas para minimizar a distância total percorrida pelos veículos. Os custos e o tempo de viagem são

lineares em função da distância; então, minimizar a distância é uma função objetivo correlata para minimização do tempo de viagem e custos.

Para atingir os objetivos propostos, a presente dissertação divide-se em duas partes. A primeira parte compreende a introdução e os capítulos dois e três nos quais são feitas a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica dos processos relacionados ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, além de trabalhar conceitos e definições necessários para aprofundamento do tema.

A segunda parte consta do capítulo quatro ao capítulo sete. No capítulo quatro, apresenta-se a introdução à teoria dos algoritmos genéticos, descrevendo cada um de seus componentes, apresentando a revisão bibliográfica sobre o tema e os sistemas relacionados às etapas do programa de roteirização de veículos referentes à coleta, ao transporte e à disposição final dos resíduos sólidos urbanos. No capítulo cinco, faz-se a revisão bibliográfica do Sistema de Informação Geográfico (SIG), a construção do referencial do sistema de transporte e das coordenadas geográficas, usando os recursos da web para este fim.

O capítulo sexto, apresenta o Sistema de Roteirização do Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos (SRTRSU), o modelo de gerenciamento proposto usando Algoritmos Genéticos, Sistema de Informação Geográfico e recursos da web para Otimização das rotas. No capítulo sete é apresentado o alcance do modelo de gerenciamento proposto bem como a contribuição para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como esta pesquisa busca produzir um artefato ou constructo, optou-se por utilizar a método de pesquisa *design science* na condução desta dissertação. Hevner et al (2004) sistematizaram um conjunto de sete diretrizes que se tornaram referência para pesquisadores no que concerne a compreender e avaliar o método de pesquisa *design Science*. Tais diretrizes devem ser criteriosamente observadas em qualquer pesquisa que adote a abordagem *design science*. As diretrizes consideradas são apresentadas a seguir.

2.1 Diretriz 1 - *Design Science* tem como objeto de estudo um artefato.

Artefato é tudo o que não é natural, é algo construído pelo homem. Os princípios da *design science* têm suas raízes na engenharia dos sistemas e coisas artificiais. Tais sistemas não obedecem às leis naturais ou as teorias comportamentais, pelo contrário, a criação deles confia em um núcleo de teorias aplicadas, testadas, modificadas e expandidas por meio da experiência, criatividade, intuição e capacidade de resolver problemas do pesquisador (SORDI et al, 2011).

2.2 Diretriz 2 - O problema é relevante.

Hevner et al (2004), afirma que o problema precisa ser motivante, interessante e a sua solução ser útil para os usuários. A *design science* volta-se para soluções de base tecnológica e atrelada a importantes problemas empresariais. Na alegação de conhecimento científico pragmático “há uma preocupação com as aplicações, “o que funciona” e é solução para o problema”.

Considerando-se os pressupostos da *design science*, de identificação de problema relevante e construção e validação rigorosa de artefato para sua resolução, tem-se que o paradigma ou alegação do conhecimento empregado pela abordagem *Design science*, é o pragmatismo (CRESWELL, 2007, p. 29; SORDI et al, 2011).

2.3 Diretriz 3 - Avaliação rigorosa.

A utilidade, a qualidade e a eficácia da *design science* devem ser demonstradas rigorosamente por meio de métodos precisos para avaliação do resultado produzido (HEVNER et al, 2004). A avaliação do resultado do *design science* é frequentemente fundamentada nas exigências empresariais que de modo usual ocorrem no contexto da utilidade, da qualidade e da beleza (estilo) do artefato produzido.

A avaliação inclui também a integração do artefato com a infraestrutura técnica do ambiente do negócio. A avaliação de artefatos projetados é feita por meio de metodologias disponíveis na área científica. A escolha do método a ser empregado é importante, pois o mesmo deve ser o mais apropriado aos objetivos da avaliação (HEVNER et al, 2004; SORDI et al, 2011).

2.4 Diretriz 4 - A *design science* efetivamente contribui para a área de conhecimento do artefato.

Uma questão fundamental em qualquer tipo de pesquisa é: “Quais são as contribuições inovadoras e interessantes que a pesquisa proporciona?”. A *design science* tem potencial para produzir três tipos de contribuições baseadas na inovação, generalidade e importância do artefato projetado. Um ou mais destes tipos de contribuição devem ser considerados na pesquisa (HEVNER et al, 2004; SORDI et al, 2011).

2.4.1 Projeto do artefato

A maioria das contribuições da *design science* é a criação do próprio artefato. O artefato deve ser uma solução para um problema até então não solucionado e abrange a aplicação em ambiente apropriado. Pode constituir-se em uma expansão da base do conhecimento ou a aplicação de conhecimento existente sob uma ótica inovadora. Metodologias para desenvolvimento de sistemas, projetos de ferramentas e protótipos de sistemas são exemplos de artefatos (HEVNER et al, 2004 ; SORDI et al, 2011).

2.4.2 Ampliação dos fundamentos

Os resultados da *design science* possibilita que sejam feitas adições à base de conhecimentos existentes. Os resultados da *design science* podem ser a definição de constructos, os métodos ou extensões de técnicas que melhorem as teorias, as estruturas, os instrumentos, os conceitos, os modelos, os métodos e os protótipos existentes, ou incrementem a base de conhecimentos referentes às técnicas de análise de dados, procedimentos, medidas e critérios de validação (HEVNER et al , 2004. , SORDI et al, 2011).

2.4.3 Desenvolvimento de novas metodologias

O criativo desenvolvimento e uso de métodos de avaliação da pesquisa *design science* contribuem para o desenvolvimento de novas metodologias. A abordagem da *design science* considera que medidas e métricas para avaliação são componentes cruciais da pesquisa em *design science* e constituem-se, também, em contribuição para a expansão da base de conhecimento existente (HEVNER et al , 2004. ; SORDI et al, 2011).

2.5 Diretriz 5 - Pesquisa rigorosa.

Pesquisa por meio de *design science* requer a aplicação de métodos rigorosos, seja na construção ou na avaliação do projeto do artefato. O rigor é avaliado frequentemente pela aderência da pesquisa a uma apropriada coleção de dados e a análises de técnicas corretas. (HEVNER et al , 2004. ; SORDI et al, 2011).

2.6 Diretriz 6 - Uso eficiente de recursos.

Empregam-se recursos disponíveis para se alcançar os fins, satisfazendo as leis do ambiente pertinente ao problema. Uma pesquisa bem conduzida requer conhecimento tanto do domínio de aplicação quanto do domínio da solução. O artefato ou seu processo de criação é a melhor solução em um dado espaço-tempo. A natureza interativa do processo de projeto permite contínua realimentação entre as fases de construção para incrementar a qualidade do sistema, objeto de estudo. Pelas características específicas desta diretriz, a sua constatação em qualquer trabalho só pode ser feita se houver

declaração específica dos autores referente ao assunto (HEVNER et al , 2004. ; SORDI et al, 2011).

2.7 Diretriz 7 - Comunicação dos resultados.

Os resultados da pesquisa *design science* são apresentados a diversas audiências com detalhes adequados a cada uma. As apresentações consideram detalhes específicos de acordo com o público alvo (HEVNER et al, 2004. ; SORDI et al, 2011).

Para alcançar os objetivos propostos e atender as diretrizes da metodologia adotada, esta pesquisa está estruturada em quatro fases:

Na primeira fase, é caracterizado o problema para o qual se busca uma solução na forma de um artefato, mais precisamente, na forma de um software, atendendo assim, a diretriz dois da metodologia adotada.

Na segunda fase, cumprindo com as diretrizes um e seis, são estabelecidas as bases do artefato a ser desenvolvido, ou seja, o modelo de roteirização com o respectivo algoritmo de roteirização no qual é feita a integração dos seguintes elementos:

- a) recursos da web - pela determinação de roteiros através do Google maps que faz roteiros, mas não os otimiza;
- b) recursos do sistema de informação Geográfico (SIG) - a determinação das coordenadas geográficas, sua transformação em coordenadas do sistema Universal Transversa de Mercator-UTM, pelo transcoord;
- c) o Problema do Carteiro Chinês (PCC) - os pontos de coleta ficam nas rotas em função da distância euclidiana e centroide de cada um dos agrupamentos os quais foram feitos utilizando o algoritmo do menor caninho de Dijkstra.

O PCC é aplicado no *toolbox* de algoritmo genético do Matlab, da Empresa Mathworks, com o intuito de encontrar o roteiro ótimo. Para o problema de transporte é utilizado o proposto por Bodin et al (1993) no qual é aplicado as instâncias de Christofides et al (1979). Estas são as restrições do problema de transporte o qual deve ser colocado para otimização pelo PCC. Os parâmetros do AG utilizados são: a população inicial com 100 indivíduos, a mutação uniforme

com elitismo, o *crossover* de um ponto, com taxa de *crossover* de 90%, e com taxa de mutação de 0,1%, a distribuição uniforme e o critério de parada a convergência de 98%.

Na terceira fase, uma vez desenvolvido o algoritmo de roteirização, parte-se para a validação do modelo proposto, cumprindo com a diretriz cinco, aplicando o modelo do Sistema de Roteirização do Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos (SRTRSU) na coleta de resíduos sólidos da cidade de São Luís. A aplicação e testes do algoritmo foram feitos em uma situação real, bem como a qualidade, a utilidade e a eficácia do mesmo foram aferidas, atendendo assim a diretriz três.

Na quarta fase, concluída a pesquisa, com os ajustes obtidos por meio da aplicação no ambiente real, ficou mais clara a redução nos custos como esperado na diretriz seis. O resultado será divulgado para o principal público-alvo desta pesquisa que além do acadêmico, inclui os municípios do estado do Maranhão, especialmente a capital maranhense, São Luís, cumprindo, assim, com a diretriz sete.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está dividida em: caracterização dos resíduos sólidos urbanos; definição de resíduos sólidos; etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos; geração dos resíduos sólidos: acondicionamento; coleta; coleta seletiva; estação de transferência e transbordo; reciclagem; disposição final; transporte: dimensionamento; definição de itinerário; técnicas de zoneamento.

3.1 Caracterização dos resíduos sólidos urbanos

O tema resíduo sólidos tem ganhado cada vez mais visibilidade pública e política e, na atualidade, dois pontos principais marcam a discussão em torno desse assunto. De um lado, ele é abordado como grave problema, um desafio colocado aos municípios e à sociedade contemporânea; e, de outro, em uma perspectiva de cunho econômico-político, enfatiza-se o tema como solução ou, pelo menos, como alternativa e possibilidade de novas oportunidades de geração de emprego, renda e negócio (IKUTA, 2010).

Essas abordagens não são excludentes, pelo contrário, elas se complementam, revelam algumas dimensões que a questão em tela assumiu na atualidade e demonstram que sua compreensão é uma tarefa complexa, que requer a análise de múltiplos aspectos que permeiam o assunto e suas interações.

Assim, no enfoque dos resíduos sólidos como problema, destacam-se aspectos como, por exemplo: a crescente quantidade e diversificação dos materiais que compõem os resíduos sólidos gerados e coletados; os padrões de produção e consumo que fundamentam a origem destes resíduos; os baixos índices de tratamento, principalmente de resíduos orgânicos e de serviços de saúde; a disposição final dos resíduos coletados que, muitas vezes, ocorre em condições inadequadas; o trabalho no lixo; o reduzido número de municípios com coleta seletiva dos resíduos sólidos (IKUTA, 2010).

Já na abordagem do tema como solução ou alternativa que enseja diversas possibilidades novas, destaca-se: a geração de trabalho e renda para catadores autônomos e catadores organizados em cooperativas e associações, além de empregos junto a galpões de transferência e transbordo, de

atravessadores e na produção da indústria da reciclagem de materiais (IKUTA, 2010).

Neste contexto, o aumento das pesquisas sobre o tema, bem como a ampliação da discussão envolvendo diversos setores da sociedade civil, tem contribuído para mudanças na concepção do lixo e nos modelos de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. Surgiram e se multiplicaram pelo país experiências que articulam as ações do poder público, os grupos de catadores de materiais recicláveis e a sociedade civil através de programas municipais de coleta seletiva que funcionam das mais diferentes formas. Atrelado a isso, ressalta-se a ideia de que a reciclagem contribui para a economia de recursos naturais e recuperação de energia no processo produtivo (GRIMBERG, 2007).

A dinâmica social que envolve a questão dos resíduos sólidos no Brasil, na atualidade, assume outras dimensões, pois novos aspectos como, por exemplo, corresponsabilidade, parcerias, solidariedade e novos sujeitos entram em cena, levando à construção de um marco regulatório para a questão.

Para efeito do cumprimento da lei neste contexto e das normas dos órgãos competentes, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), dispendo sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, define o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos como o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final, ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

Entende-se por gestão integrada de resíduos sólidos, o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos urbanos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com o controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

A Comissão sobre o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (CDS), fomentada pelo Banco Mundial, objetiva alcançar um equilíbrio justo entre as necessidades econômicas, sociais e ambientais das gerações presentes e futuras com padrões sustentáveis de produção e consumo. Define como produção sustentável aquele cujo consumo de bens e serviços procura atender às necessidades das atuais gerações, permitindo-lhes melhores condições de vida

sem, contudo, comprometer a qualidade ambiental e o atendimento das necessidades das gerações futuras.

A destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos é aquela que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações e que observa as normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública, à segurança. Além disso, minimizam os impactos ambientais adversos, visando à distribuição ordenada de rejeitos em aterros. Podendo adotar, para isso, a logística reversa como instrumento de desenvolvimento econômico e social. A logística reversa é caracterizada por um conjunto de ações, de procedimentos e de meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial para reaproveitamento em seu ciclo, ou em outros ciclos produtivos, ou em destinação final, ambientalmente adequada (HEMMELMAYR, 2011).

Por sua vez, a reciclagem é o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolvem a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes.

Os resíduos sólidos são materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final seja no estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos e suas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível (HEMMELMAYR, 2011).

Por fim, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos é o conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, dos importadores, dos distribuidores e dos comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental (BRASIL, 2010).

Dentre os princípios norteadores da Política Nacional de Resíduos Sólidos pode-se citar:

- a) a responsabilidade pós-consumo compartilhada entre o poder público, os fabricantes, os importadores, os comerciantes e o consumidor, de maneira que este último cumpra as determinações de separação dos resíduos sólidos domiciliares e dê adequada disponibilização para a coleta;
- b) na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos;
- c) a disposição final, ambientalmente adequada dos rejeitos, considerando sempre o ciclo total do produto em todas as etapas do serviço;
- d) a precedência das soluções de redução, de reutilização e de reciclagem às formas de disposição final;
- e) o incentivo, o estímulo e a valorização das atividades de reutilização, de coleta seletiva, de compostagem e de reciclagem de resíduos;
- f) a implantação pelo fabricante ou importador de sistemas obrigatório de coleta e retorno de produtos ou resíduos tecnológicos, ficando obrigados a recebê-los em depósito;
- g) a atribuição de responsabilidade, junto ao poder público, do fabricante, do importador, do consumidor e do usuário final, pelo gerenciamento dos resíduos de embalagens;

A normalização ambiental, representada pela série ISO-14000, tem auxiliado na conscientização no que se refere às normas ambientais mostrando-se independente da legislação, o que dá mais agilidade à questão dos resíduos ainda que seja por motivos mercadológicos.

3.2 Definição de resíduos sólidos

A NBR 10.004 define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, comercial, agrícola, de serviço e de varrição, ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes dos sistemas de tratamento de águas, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos

cujas particularidades tornem inviável o lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis face à melhor tecnologia disponível (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 36).

Segundo Philippi Junior et al (2004), a definição da ABNT se aproxima da definição dos órgãos de meio ambiente americanos, bem como a definição da agenda 21, a saber:

Os resíduos sólidos compreendem todos os restos de resíduos não perigosos, tais como os resíduos comerciais e institucionais, o lixo das ruas e os entulhos de construção. Em alguns países o sistema de gestão dos resíduos sólidos também se ocupa dos resíduos sólidos humanos, tais como excrementos, cinzas de incineradores, sedimentos de fossas sépticas e de instalações de tratamento de esgoto. Se manifestarem características perigosas esses resíduos devem ser tratados como resíduos perigosos.

O forte crescimento populacional e a grande concentração desta população em centros urbanos propiciam, como consequência, a geração de uma grande quantidade de resíduos sólidos, trazendo diversos problemas de ordem social, econômica e ambiental. A capacidade de consumo e, conseqüentemente, de geração dos resíduos estão ligadas diretamente à capacidade econômica de adquirir mercadorias e a lógica social e econômica na qual a população está inserida. Destaca ainda que a busca pelo aprimoramento da sociedade tem passado pela elevação constante do nível de consumo de seus indivíduos. Entenda-se por nível de consumo não apenas as quantidades dos itens consumidos, mas também sua diversidade (LOGAREZZI, 2006).

A satisfação das necessidades básicas, tendo o contexto individual e coletivo como referências, busca, muitas vezes, satisfazer necessidades criadas artificialmente, tendo o desejo individual e a ostentação no coletivo como referências. O consumo é marcado, então, pela satisfação imediata da necessidade ou do desejo natural ou artificial que o comprador tinha ou acreditava ter.

Dados os efeitos da grande produção industrial, decorrente da necessidade de suprir a demanda da sociedade por mais produtos, tem-se a geração de resíduos e o aumento da poluição, exigindo ações que permitam a redução dos impactos ao meio ambiente.

Para isso, o planejamento estratégico corporativo adaptado às novas tendências globais de gestão ambiental inclui três relevantes critérios, sendo:

- a) eficiência econômica;
- b) equidade social;
- c) respeito ao meio ambiente.

Visando contribuir para a maximização dos benefícios de valores humanos, organizacionais e ambientais, verifica-se uma proposta de articulação conveniente destas reflexões, buscando o entendimento sistêmico entre a produção e o consumo sustentáveis, ou seja, aqueles que procuram suprir às necessidades humanas, respeitando as limitações do meio ambiente em se recompor. Limitações que não são estáticas e o homem pode e deve ampliá-las em benefício de todos (BARBIERI, 2011).

É crescente o interesse em estudar soluções com embasamento técnico para a problemática da geração, da coleta, do transporte, da reciclagem e da destinação final de resíduos sólidos e sua crescente importância deve-se a três fatores principais:

- a) grande quantidade de lixo gerada, de acordo com dados de Brown (1993), a produção de lixo pode variar de 0,46 kg/hab/dia, na cidade de Kano na Nigéria a 2,27 kg/hab/dia em Chicago nos Estados Unidos. O índice per capita brasileiro, segundo o IBGE (2000), está em torno de 0,45 a 1,2 kg/hab/dia;
- b) gastos financeiros relacionados ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. No Brasil, em média, os serviços de limpeza demandam de 7% a 15% do orçamento dos municípios, dos quais em torno de 50% e 70% são dedicados à coleta e transporte;
- c) impactos ao meio ambiente e à saúde da população. O destino final inadequado dos resíduos permite a contaminação do ar, da água, do solo e a proliferação de vetores nocivos à saúde humana (CUNHA; CAIXETA FILHO, 2002).

A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) agrega e consolida dados obtidos através de um levantamento estatístico detalhado do saneamento básico, realizado em todos os municípios do Brasil pela rede de coleta do IBGE. A PNSB (2008) revela uma melhora na situação da destinação final dos resíduos sólidos coletados no país nos últimos anos. Essa melhoria vem

ocorrendo progressivamente desde a pesquisa realizada em 1989, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Destino final dos resíduos sólidos em porcentagem e tipos de destino

Ano	Destino final dos resíduos sólidos em porcentagem e tipos de destino		
	Vazadouro a céu aberto	Aterro controlado	Aterro sanitário
1989	88,2	9,6	1,1
2000	47,4	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: IBGE, pesquisa nacional de saneamento básico (PNSB), publicada em 10/08/2010.

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2000), a quantidade de lixo domiciliar produzida diariamente em todos os municípios do Brasil chegava a 125.281 toneladas, sendo que 47,4% eram destinados a aterros a céu aberto, 22,3 % a aterros controlados e apenas 17.3% a aterro sanitário.

Segundo a PNSB (2008), mais da metade das cidades brasileiras ainda usavam lixões. O número de municípios que dão uma destinação final adequada aos resíduos sólidos aumentou no Brasil entre 2000 e 2008, mas os lixões ainda eram o principal destino do lixo em 50,8% das cidades. Em 2000, esse percentual era de 72,3% (PNSB, 2008). De acordo com o estudo, o índice de municípios que passaram a usar prioritariamente os aterros sanitários aumentou de 17,3% em 2000, para 27,7% em 2008.

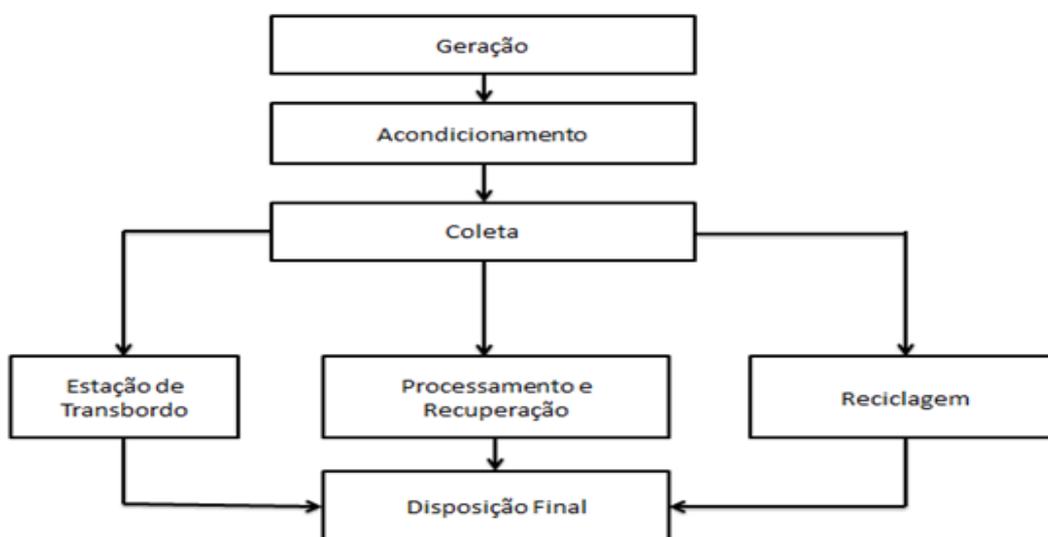
A pesquisa do IBGE mostra também que o número de cidades com projetos de coleta seletiva mais do que dobrou, passando de 451, em 2000, para 994 em 2008.

É chamada a atenção para o fato de que um bom gerenciamento desses serviços, que estão entre os de maior visibilidade, representa boa aceitação da administração municipal por parte da população. Adicionalmente, a

sua otimização leva a uma economia significativa dos recursos públicos (JARDIM, 2000).

As atividades gerenciais ligadas aos resíduos sólidos podem ser agrupadas nos elementos funcionais (TCHOBANOGLIOUS 1977; CUNHA; CAIXETA FILHO, 2002), conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Atividades gerenciais dos resíduos sólidos



Fonte: Cunha e Caixeta (2002)

3.3 Classificação dos resíduos sólidos

Segundo a NBR 10.004 os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

- a) quanto à origem;
- resíduo domiciliar,
 - resíduos de limpeza urbana,
 - resíduos sólidos urbanos,
 - resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços,
 - resíduos dos serviços públicos de saneamento básico,
 - resíduos industriais,
 - resíduos de serviços de saúde,
 - resíduos da construção civil,

- resíduos agrossilvopastoris,
 - resíduos de serviços de transportes,
 - resíduos de mineração,
- b) quanto à periculosidade;
- resíduos perigosos,
 - resíduos não perigosos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004).

Segundo Lima (2002), os resíduos sólidos são qualquer material, substância ou objeto descartado resultante de atividades humanas e animais, ou decorrente de fenômenos naturais, que se apresentam nos estados sólido e semissólido incluindo-se os particulados.

Ainda segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT (2004), os resíduos sólidos, quanto à classificação, dividem-se em:

- a) resíduos comuns - consistem em resíduos urbanos provenientes de residências ou de qualquer outra atividade que gere resíduos com características domiciliares ou a estes equiparados, bem como os resíduos de limpeza pública urbana;
- b) resíduos especiais - são aqueles que necessitam de gerenciamento específico, em razão de sua tipologia e/ou quantidade que, segundo Lima (1991), são subdivididos em: Resíduos industriais; Resíduos minerais; Resíduos radioativos; Resíduos da construção civil; Resíduos do comércio e de serviços; Resíduos tecnológicos; Resíduos de pneumáticos; Resíduos de explosivos e armamentos; Resíduos de embalagem.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT (2004), os resíduos sólidos são classificados de acordo com os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública:

- a) resíduos classe I - perigosos: apresentam periculosidade ou uma das seguintes características - inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. São exemplos, as baterias e os produtos químicos;
- b) resíduos classe II - não inertes: não se enquadram como resíduos classe I – perigosos, ou resíduos classe III - inertes e podem ter as

seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. São exemplos, a matéria orgânica e o papel.

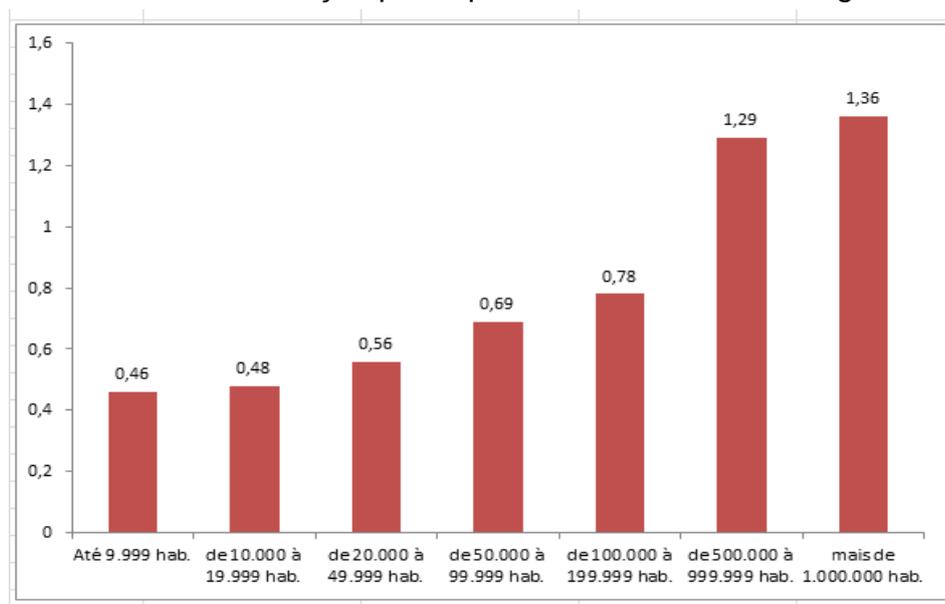
- c) resíduos classe III - inertes: não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade de águas. São exemplos, as rochas, os tijolos, os vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente (VEGA, 2007).

3.4 Etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos

3.4.1 Geração dos resíduos sólidos

Tomando como base os dados mencionados anteriormente, pode-se inferir que a geração de resíduos sólidos ocorre em função do aumento da concentração da população. Como mostra o Gráfico 1:

Gráfico 1 – Produção per capita de resíduos sólidos Kg/dia



Fonte: IBGE, Departamento de População e Indicadores Sociais, PNSB 2008, publicada 10/08/2010.

Há uma correlação positiva entre a maior população e a maior geração de resíduos sólidos urbanos, conforme mostra a Gráfico 1. A população de até 10.000 habitantes produz 0,46kg/hab, de 10.000 até 20.000, produz 0,48kg/hab, enquanto a população de mais de 1.000.000 de habitantes produz 1.36kg/hab. A quantidade de resíduos produzida é bastante variável e depende de uma série de

outros fatores, tais como: a renda da população, a época do ano, a cultura, o movimento da população nos períodos de férias e fins de semana e os novos métodos de acondicionamento de mercadorias com a tendência mais recente de utilização de embalagens não retornáveis.

Tudo isso exige do poder público municipal esforço com vistas a promover campanhas ou implantar programas educativos voltados à conscientização da população para a limpeza da cidade e a programar medidas que visem, principalmente, diminuir a geração de resíduos sólidos.

3.4.2 Acondicionamento

Acondicionar os resíduos sólidos domiciliares significa prepará-los para a coleta de forma sanitariamente adequada e compatível com o tipo e a quantidade de resíduos (BARBOSA, 2011).

Segundo a lei nacional dos resíduos sólidos, o acondicionamento é de responsabilidade do gerador - residência, estabelecimento comercial ou prestador de serviços de saúde -, mas no caso dos serviços de limpeza urbana – a varrição de ruas - é de responsabilidade das administrações municipais que também devem exercer as funções de regulamentação, de educação e de fiscalização, inclusive no caso dos estabelecimentos de saúde, visando assegurar condições sanitárias e operacionais adequadas (INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL, 2009).

Para alcançar os objetivos quanto à otimização do processamento das etapas relacionadas aos resíduos sólidos urbanos, o primeiro procedimento do processo deve ser o planejamento e a implantação de um sistema logístico reverso com o propósito de viabilizar a coleta, o transporte e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial para reaproveitamento, com o objetivo de economizar a matéria prima virgem e a energia (LANGLEY, 2011).

Para Leite (2003), a logística reversa tem a função de coletar e de encaminhar os materiais e os produtos para os processos produtivos, através de bons processos de entrada.

O acondicionamento dos resíduos deve ser disposto em recipientes adequados, visando facilitar e padronizar o transporte, racionalizando-o. Os resíduos sólidos bem acondicionados evitam poluição ambiental e risco à

segurança da população, pois é um potencial vetor de transmissão de doenças e facilita o processo de coleta (GONZÁLEZ, 2010).

Atualmente, tem-se percebido a importância da separação dos resíduos orgânicos do material reciclável na própria fonte geradora, pois, com isso, se consegue um lixo seco de maior qualidade para ser reciclado. Mas o sucesso do acondicionamento adequado para a coleta de resíduos sólidos urbanos e da eficácia da separação, no próprio domicílio, depende principalmente da conscientização da população, que deve ser orientada através de ações educativas.

3.4.3 Coleta

A otimização do processo de coleta deve buscar a máxima satisfação da população com a prestação de serviços através da adequada consideração dos aspectos de qualidade, de custos, de atendimento e de proteção à saúde pública. Sendo assim, é fundamental que se estabeleça um controle operacional dos serviços prestados para a avaliação dos mesmos. A operação de coleta engloba desde a partida do veículo de sua garagem, todo o percurso gasto na viagem na rota para remoção dos resíduos dos locais onde foram depositados, até o retorno ao ponto de partida (BRASILEIRO; LACERDA, 2008).

A coleta normalmente pode ser classificada em dois tipos de sistemas:

- a) sistema especial de coleta de resíduos contaminados;
- b) sistema de coleta de resíduos não contaminados. Neste último, a coleta pode ser realizada de maneira convencional, onde os resíduos são encaminhados para locais de tratamento, de reciclagem, de recuperação ou de disposição final, ambientalmente adequado.

Os resíduos coletados poderão ser transportados para estações de transferência ou transbordo, quando há, no município, este local que tem por objetivo servir de espaço para que e faça a triagem dos resíduos, com vistas à reciclagem, ao processamento, à recuperação, à incineração em usinas de triagem e compostagem (IPT, 1995; BARBOSA, 2011).

3.4.4 Coleta seletiva

Coleta seletiva é o processo de separação e recolhimento dos resíduos, conforme sua constituição. Esta separação pode ocorrer tanto na fonte geradora quanto nos centros de triagem ou nas usinas de reciclagem de preferência localizadas na estação de transbordo. Esta prática facilita a reciclagem visto que os materiais estarão mais limpos e, conseqüentemente, com maior potencial de reaproveitamento (BESEN, 2011).

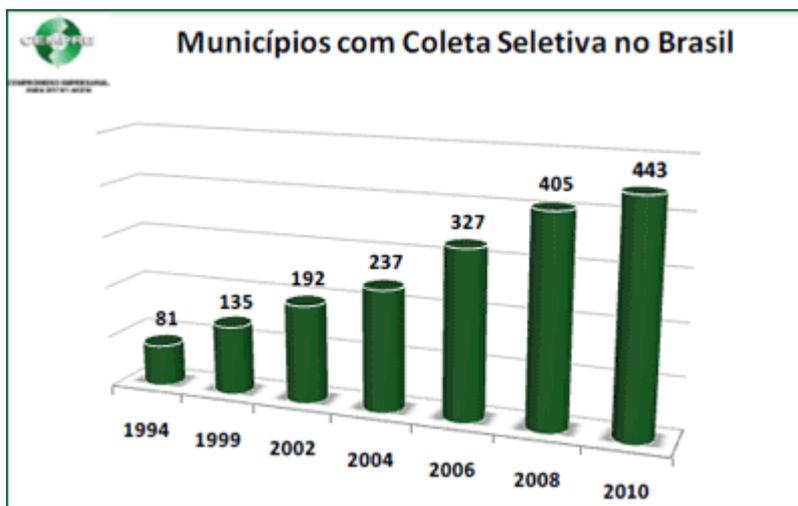
Para o sucesso da coleta seletiva é importante que o município ofereça um sistema eficiente de recolhimento dos recicláveis. Para implantar um sistema de coleta seletiva é necessário:

- a) conscientizar a população de que o material reciclável não é propriamente lixo, devendo, portanto, ser acondicionado separadamente;
- b) promover e oferecer condições para que a população possa descartar seletivamente papéis, plásticos, vidros e metais, instalando recipientes identificados nas praças e estabelecimentos públicos e efetuando a coleta com regularidade;
- c) implantar um centro de triagem para separação, classificação e armazenamento destes materiais até a sua reutilização;
- d) promover um estudo de mercado para conhecer a viabilidade de comercialização dos materiais recicláveis;
- e) deve prever, também, o recolhimento dos resíduos orgânicos, os quais poderão ser aproveitados para gerar energia, gás ou adubo orgânico.

A operação da coleta seletiva pode ser realizada de forma domiciliar realizada por caminhão de carroceria, com coleta semanal; ou através de Postos de Entrega Voluntária (PEV's), em caçambas e contêineres de diferentes cores instalados em pontos estratégicos, onde a população possa depositar o material previamente selecionado (BESEN, 2011).

Segundo o CEMPRE (2010), 443 municípios brasileiros operam programas de coleta seletiva com evolução indicada no Gráfico 2.

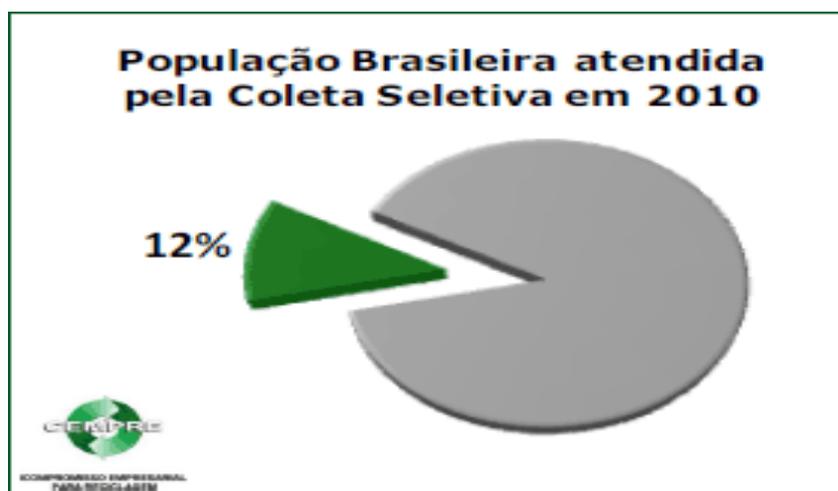
Gráfico 2 - Coleta seletiva nos municípios do Brasil.



Fonte: Compromisso Empresarial para a Reciclagem (2010)

Apesar do número de cidades com esse serviço ter aumentado, na maior parte delas a coleta atende somente 12% da população local, como mostra o Gráfico 3.

Gráfico 3 - População atendida pela coleta seletiva.



Fonte: Compromisso Empresarial para a Reciclagem (2010)

Dentre as várias dificuldades apontadas para operacionalização da coleta seletiva, o custo é sempre indicado como a principal. Como mostra a Tabela 2, os custos têm caído ao longo do tempo com expectativa de viabilização

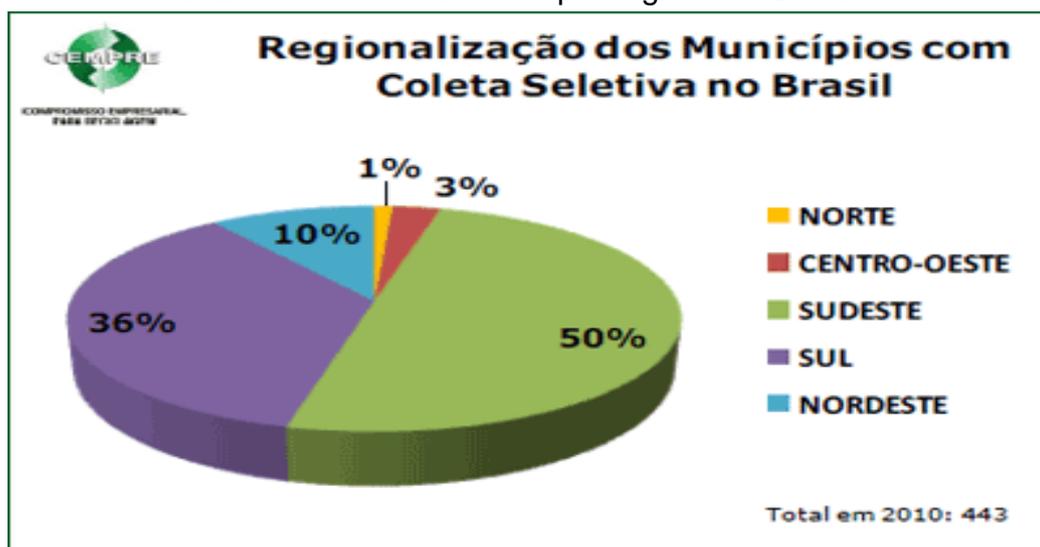
do processo de prestação de serviços ambientais advindos da logística. Na Tabela 2, é mostrada a evolução do custo da coleta seletiva comparado com os custos da coleta convencional.

Tabela 2 - Evolução dos custos da coleta seletiva.

Ano	Custo da coleta
1994	10 vezes
1999	8 vezes
2002	5 vezes
2004	6 vezes
2006	5 vezes
2008	5 vezes
2010	4 vezes

Como pode ser percebido, há um longo caminho a se percorrer com o propósito de se ter um nível adequado de coleta seletiva dos resíduos sólidos no Brasil, além de se perceber que existe correlação entre os índices de desenvolvimento regional, uma maior renda per capita da população, e a reciclagem, como mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4 - Coleta Seletiva por regiões no Brasil.



Fonte: Compromisso Empresarial para a Reciclagem (2010)

3.4.5 Estação de transferência ou de transbordo

As estações de transferência ou transbordo são locais onde os caminhões coletores descarregam sua carga em veículos com carrocerias de maior capacidade para que, posteriormente, sejam enviadas até o destino final (ALMEIDA, 2007). O objetivo dessas estações é reduzir o tempo gasto no transporte e, conseqüentemente, os custos com o deslocamento do caminhão coletor desde o ponto final do roteiro até o local de disposição final do lixo. Como exemplo das vantagens oriundas da instalação de tais estações está o fato de que elas permitem aos garis ficarem mais tempo envolvidos na atividade de coleta, uma vez que o tempo de viagem dos caminhões até o local de descarga é reduzido e, também, gera considerável redução no número de rotas (CUNHA; CAIXETA, 2002; QUISSINI. et al, 2007).

3.4.6 Reciclagem

A reciclagem é o termo genericamente utilizado para designar o reaproveitamento de materiais beneficiados, como matéria-prima, para um novo produto. Muitos materiais podem ser reciclados e os exemplos mais comuns são o papel, o vidro, o metal e o plástico. As maiores vantagens da reciclagem são a minimização da utilização de fontes naturais, muitas vezes não renováveis e a minimização da quantidade de resíduos que necessita tratamento final, como os aterros ou a incineração (MALAKAHMAD, 2011).

O conceito de reciclagem serve apenas para os materiais que podem voltar ao estado original e ser transformados, novamente, em um produto igual em todas as suas características. A reciclagem dos resíduos sólidos é uma alternativa viável para propiciar à preservação de recursos naturais, a economia de energia, a redução da área que demanda o aterro sanitário, a geração de emprego e renda, assim como a conscientização da população para questões ambientais (MALAKAHMAD, 2011).

A reciclagem é um processo industrial ou artesanal de transformação de materiais descartados em produtos que serão reincorporados à sociedade de consumo ou utilizados como matéria-prima de outros processos industriais ou artesanais. Ela consiste no resultado de uma série de atividades através das quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, sendo

coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de bens, elaborados anteriormente apenas com matéria-prima virgem, refazendo-se, assim, o ciclo produtivo.

Reciclagem é, ainda, um conjunto de técnicas que tem por finalidade aproveitar os detritos e reutilizá-los no ciclo de produção de que saíram. O termo reciclagem é originalmente utilizado para indicar o reaproveitamento ou a reutilização no mesmo processo em que, por alguma razão, foi rejeitado.

O termo reciclagem, aplicado a resíduos, designa o reprocessamento de materiais selecionados de forma a permitir novamente sua utilização. O retorno da matéria-prima ao ciclo de produção é denominado reciclagem, embora o termo já venha sendo utilizado popularmente para designar o conjunto de operações envolvidas. A reciclagem de materiais e produtos é fortemente influenciada pela participação colaborativa do consumidor.

3.4.7 Disposição final

Segundo o IBGE (2000), a disposição final dos resíduos, pode ser classificada em quatro tipos básicos, a saber:

- a) aterro sanitário, técnica de disposição de resíduos e de lixo, fundamentado em critérios de engenharia e em normas operacionais específicas, que permitem a confinação segura em termos de controle da poluição ambiental e da proteção à saúde pública;
- b) aterro controlado, local utilizado para despejo de resíduos e de lixo coletado, com cuidado de, após a jornada de trabalho, cobri-lo com uma camada de terra, sem causar danos ou riscos à saúde pública e a segurança, minimizando os impactos ambientais;
- c) lixão ou Vazadouro a céu aberto, disposição final de resíduos e de lixo pelo seu lançamento bruto, sobre o terreno sem qualquer cuidado ou técnica especial;
- d) vazadouro em áreas alagadas, disposição final do lixo pelo seu lançamento bruto em cursos d'água ou terrenos alagadiços.

Em se tratando das alternativas de disposição final dos resíduos, o aterro sanitário é o que reúne as maiores vantagens, considerando a redução dos impactos ocasionados pelo descarte dos resíduos sólidos urbanos. No caso do

aterro controlado, é menos prejudicial que os lixões pelo fato dos resíduos dispostos no solo serem posteriormente cobertos com terra. Constitui-se uma solução com eficácia bem inferior à possibilitada pelos aterros sanitários, pois, ao contrário destes, não ocorre inertização da massa de lixo em processo de decomposição. Os lixões constituem uma forma inadequada de descarte final dos resíduos sólidos urbanos (COELHO et al., 2011).

Problemas e inconvenientes como a depreciação da paisagem, a presença de vetores transmissores de doenças, a formação de gás metano e a degradação social de pessoas são fatores comuns a todos os lixões e devem ser considerados como indicadores no planejamento do saneamento das cidades (CUNHA; CAIXETA FILHO, 2002).

3.5 Transportes

A escolha de um local deve levar em consideração os custos de transporte de resíduos, pois se trata de um custo apreciável no conjunto das operações do sistema. São conhecidas algumas variantes deste tipo de problema, embora a que se reveste de interesse para este trabalho seja a que associa os custos de transporte à distância total percorrida, desde os centros de produção de Resíduos Sólidos Urbanos-RSU até o centro de processamento e deposição, por intermédio de uma função de custos de transporte. O objetivo de minimização dos custos de transporte é então conseguido, fazendo com que a distância total de viagem necessária à prestação do serviço seja mínima, entendendo-se esta distância total como o somatório dos produtos da distância percorrida em cada viagem, pelo número de viagens efetuadas entre cada par de pontos de procura e de oferta.

3.5.1 Dimensionamento dos serviços de coleta

Um bom dimensionamento da frota de veículos tem como consequência direta a racionalização dos custos destinados ao transporte dos resíduos sólidos, visto ser proveniente da coleta e do transporte destes resíduos a maior parte dos gastos com serviços de limpeza, conforme mencionado anteriormente.

O dimensionamento e a programação da coleta e transporte estão relacionados à estimativa dos recursos necessários, ao tipo de veículo e aos equipamentos a serem utilizados, à frota necessária, à quantidade de pessoal, à definição de como o serviço será executado, às frequências, aos horários, aos roteiros, aos itinerários e aos pontos de destinação (JARDIM, 2000).

O dimensionamento é o início da etapa de modelagem matemática de um problema de coleta e de transporte. O objetivo do dimensionamento dos serviços de coleta é determinar o número de veículos necessários destinados ao serviço, bem como estabelecer parâmetros que possibilitem a confecção dos itinerários ou rotas, por isso sempre que houver uma ampliação dos serviços de coleta ou mesmo uma reformulação, um estudo do dimensionamento se faz necessário (JARDIM, 2000).

Alguns parâmetros devem ser observados no dimensionamento dos setores de coleta domiciliar, entre eles as características da malha urbana, o número de viagens entre o setor até o aterro ou estação de transbordo, ou destino final e o setor de coleta a ser realizada, a quantidade de resíduos coletados por viagem, a distância entre o setor e o aterro ou estação de transbordo, a velocidade de deslocamento no setor durante a coleta e fora dela em trechos já coletados e a velocidade de deslocamento fora do setor (PFEIFFER; CARVALHO, 2009).

Em municípios de maior porte, onde o problema torna-se mais complexo, recomenda-se o envolvimento do poder público no dimensionamento e na programação dos serviços de coleta domiciliar, mesmo quando executados por particulares. Isso visa assegurar que atendam aos padrões de desempenho e de nível de serviço julgados adequados e garantam a justa remuneração pelos serviços prestados.

Os passos a serem seguidos para o dimensionamento e a programação do serviço de coleta de resíduos domiciliar (CARVALHO, 2001) são:

- a) estimativa do volume de resíduos a ser coletado;
- b) definição das frequências de coleta;
- c) definição dos horários de coleta domiciliar;
- d) dimensionamento da frota dos serviços de coleta;
- e) levantamento e coleta de dados;

- f) localização de pontos importantes para a coleta;
- g) determinação do volume e peso específico de resíduos a ser coletado;
- h) definição dos setores de coleta;
- i) estimativa da quantidade total de resíduos por setor;
- j) estimativa dos parâmetros operacionais por setor;
- k) dimensionamento da frota necessária para cada setor;
- l) cálculo da frota total necessária;
- m) definição dos itinerários;
- n) estação de transferência;
- o) definição dos itinerários de coleta.

De posse dos parâmetros operacionais, para cada setor de coleta, tais como, a jornada de trabalho, a velocidade média de coleta, entre outros parâmetros, o cálculo do número de veículos por setor N_s pode ser determinado a partir da seguinte fórmula:

$$N_s = \frac{1}{j} \left[\left(\frac{L}{V_c} \right) N + 2 \left(\frac{D_s}{V_t} \right) + 2 \left(\frac{D_d}{V_t} \right) \left(\frac{Q}{C} \right) \right]$$

Fórmula [2]: Determinação do número de veículo por setor.

Fonte: (JARDIM, 1995; PFEIFFER, (2009)).

onde:

J : duração útil da jornada de trabalho, desde a saída da garagem até o seu retorno, excluindo intervalos para almoço e outros tempos improdutivos, dada em horas;

L : extensão total das vias do setor de coleta [Km];

V_c : velocidade média de coleta [Km/h];

D_s : distância entre a garagem e o setor de coleta [km/h];

D_d : distância entre setor de coleta e ponto de descarga [Km];

V_t : velocidade média nos percursos de posicionamento e de transferência em [km/h];

Q : quantidade total de lixo a ser coletada no setor [t];

C : capacidade dos veículos de coleta [t].

3.5.2 Definição dos itinerários de coleta

Chama-se itinerário de coleta o trajeto que o veículo coletor deve percorrer dentro de um mesmo setor, em um mesmo período, coletando e transportando o máximo de resíduos em um mínimo percurso ou tempo com o menor desgaste possível para a guarnição e o veículo.

O processo de coleta é dinâmico, podendo ser alterado se houver alguma variação da geração de resíduos em cada setor, por exemplo, a mudança na direção do tráfego e as janelas de tempo, entre outros aspectos que poderão levar a alterações no roteiro original (BRAGA, 2008).

A alocação de viagens para efetuar a coleta de resíduos é a parte do processo de transporte que atribui um dado número de viagens a um determinado subsistema na localidade onde os resíduos estão depositados. Esse processo requer, como entrada, uma descrição completa do sistema de transporte existente, além de uma matriz de viagens entre as zonas ou bairros. A saída de um processo dá estimativa do volume de tráfego e alocação de equipamentos necessários em cada setor de coleta dos resíduos sólidos, cuja eficiência está relacionada à existência e à execução de um bom zoneamento (BRAGA, 2008).

3.5.3 Técnicas de zoneamento

A técnica de zoneamento é utilizada para agregar unidades padronizadas em determinados locais, a fim de se obter uma amostra controlável para fins de modelagem. As principais características a se considerar em um zoneamento são o número de zonas e o tamanho de cada uma delas.

Segundo Ortúzar e Willumsen (1994), para se estabelecer um sistema de zoneamento é necessário em primeiro lugar distinguir e delimitar a área de estudo propriamente dita, para facilitar essa tarefa sugerem:

- a) na escolha da área em estudo é imprescindível considerar o contexto para tomada de decisão, a estrutura do que se pretende modelar e a natureza das viagens de interesse: obrigatória, opcional, de curta ou longa distância;
- b) para estudos estratégicos é recomendável definir a área de estudo de forma que a maioria das viagens tenha origem e destino nela mesma. Porém, isso pode ser inviável para as análises de

problemas de transporte em pequenas áreas urbanas onde a maioria das viagens de interesse é direta e por vias secundárias de atalho;

- c) no estudo de gerenciamento do tráfego em áreas onde as viagens terão origens e/ou destinos fora da área de interesse, o importante é verificar se há possibilidade de modelar mudanças nessas viagens como resultado de novas estruturas de zonas;
- d) a área de estudo deve ser um pouco maior do que a área específica de interesse, abrangendo as estruturas que serão consideradas. Devem-se fazer concessões no caso de reformulação de rotas, mudanças no destino. Nesse caso, é bom modelar os efeitos causados com essas reformulações na área em estudo.

Para Napoleão e Mattos (2011), as zonas são representadas nos modelos computacionais como se todos os seus atributos e propriedades estivessem concentrados em um único ponto chamado centroide da zona. É neste ponto que as coordenadas serão medidas e, a partir dele, o processo de busca é inicializado.

Essa notação pontual é considerada como sendo um ponto flutuante, ao invés de físico, normalmente localizado no centro de gravidade da zona ou em um ponto onde há concentração populacional.

Os centroides são fixados diretamente à rede por meio de conectores de centroides que representam o custo médio (tempo e distância) de ligação do sistema de transporte para viagens com origem e destino naquela zona. Tão importante quanto o custo associado a cada conector de centroide é o nó que os conecta à rede. Este será localizado nos acessos ou arcos e nas saídas naturais para a própria zona. O papel dos centroides e dos conectores de centroides deve ser o de auxiliar na definição dos limites da zona.

Ortúzar e Willumsen (1994) listam alguns critérios de zoneamento que foram levantados de experiências em vários estudos práticos:

- a) o tamanho do zoneamento não deve ser muito grande de modo que a suposição de que todas as atividades concentram-se no centroide;
- b) o sistema de zoneamento deve ser compatível com outras divisões administrativas;

- c) as zonas devem ser tão homogêneas quanto possível;
- d) os limites de zona devem ser compatíveis com as linhas de isolamento e de margem e com aqueles do sistema de zoneamento anterior;
- e) a forma das zonas deve permitir facilmente a determinação de seus conectores de centroides;
- f) avaliar posteriormente as características entre as zonas. Uma zona deve representar a área natural de atração das redes de transportes e seus conectores identificados para representar os principais custos.

Toda tarefa de busca e de otimização de qualquer problema geralmente é composta por três componentes básicos: **a codificação do problema** em questão, geralmente um dos passos mais complexos do processo; **o espaço de busca**, onde são consideradas todas as possibilidades de solução de um determinado problema e **a função de avaliação**, que é uma maneira de avaliar os membros do espaço de busca que, por sua vez, varia de acordo com o problema.

As técnicas de busca e otimização tradicionais iniciam com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando associações ao problema a ser solucionado. Por outro lado, em problemas complexos, as técnicas de computação evolucionária operam sobre uma população de candidatos em paralelo de forma mais eficiente. Assim, elas podem fazer a busca em diferentes áreas do espaço de solução, alocando um número de membros apropriado para a busca em várias regiões.

Dentre as técnicas evolucionárias, o Algoritmo Genético (AG) difere dos métodos tradicionais de busca e otimização, principalmente em quatro aspectos: trabalha com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros; trabalha com uma população e não com um único ponto; utiliza informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar; utiliza regras de transição probabilísticas e não determinísticas. Sendo, portanto, adequado para busca de uma solução de transporte e de roteirização (VIGO et al., 2012).

4 ALGORITMO GENÉTICO

Este capítulo descreve os algoritmos genéticos, seus principais conceitos e elementos, o modo de operação do mesmo no espaço de busca, a forma de se encontrar a solução do problema, sua fundamentação teórica e seu alcance.

4.1 Introdução aos algoritmos genéticos

Os algoritmos evolucionários surgiram no período simbólico da inteligência artificial, como métodos de pesquisa através dos quais se procurava conseguir uma boa solução para problemas com vasto espaço de pesquisa.

Estes espaços eram muito grandes para uma enumeração completa, principalmente devido aos recursos computacionais da época. Os Algoritmos Evolucionários formam uma classe de algoritmos de pesquisa probabilística e de otimização baseados no modelo de evolução natural, onde a natureza é a fonte de inspiração. Os principais representantes deste paradigma computacional, e que foram desenvolvidos independentemente, são conhecidos como: estratégias evolutivas, programação evolucionária e algoritmos genéticos (BIAN, 2010).

Charles Darwin afirma que o mecanismo de evolução é uma competição que seleciona os indivíduos mais bem adaptados em seu ambiente, podendo assegurar descendentes, transmitindo as características que permitiram sua sobrevivência. Darwin apresentou as seguintes hipóteses para explicar o processo de seleção natural:

- a) o número de filhos tende a ser mais numeroso do que os respectivos pais;
- b) o número de indivíduos de uma mesma espécie permanece constante;
- c) a partir das hipóteses anteriores pode-se concluir que haverá uma luta pela sobrevivência;

Dentro da mesma espécie, os indivíduos apresentam pequenas diferenças em relação às suas características, sendo que a maior delas está presente nos respectivos pais (DRÉO, 2005; LAI, 2010).

Com base na teoria Darwiniana, pesquisadores tentaram imitar esse mecanismo de evolução o que levou à criação de vários métodos de busca e otimização em problemas complexos. Dentre eles os Algoritmos Genéticos (AG).

Os AGs foram apresentados inicialmente por John Holland em seu trabalho intitulado "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*" em 1975, com o objetivo de formalizar matematicamente e explicar os processos de adaptação de processos naturais e desenvolver sistemas artificiais que mantivessem os mecanismos originais encontrados em sistemas naturais (IYODA, 2000).

O AG pertence a essa classe de métodos embasados na teoria de evolução das espécies. Dada uma geração atual, uma nova população é gerada através da aplicação de operadores genéticos, como recombinação e mutação de genes. Este processo é realizado até um determinado número de gerações e o indivíduo mais apto encontrado é considerado a solução do problema. O princípio da seleção natural propõe que os indivíduos, cujas variações se adaptem melhor ao ambiente, terão maior probabilidade sobrevivência e reprodução (LOPES, 2006; FRACCAROLI, 2010).

Grande parte dos problemas científicos pode ser formulada como um problema de otimização. Segundo Luemberger (2008), a maior parte dos problemas de otimização possuem o seguinte formato: dado uma função:

$$f: R_n \rightarrow R_m$$

e um espaço de busca $S \subset R_n$, o problema pode ser formulado como um problema de programação linear:

$$\min \{C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n\}$$

sujeito às equações de desigualdades ou restrições:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$\begin{matrix} \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot \end{matrix}$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m.$$

com a condição de que as variáveis não sejam negativas:

$$x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; \dots, x_n \geq 0.$$

Os problemas de otimização são classificados de acordo com a sua função, o objetivo, as restrições e o tipo de variável de decisão, Basicamente, os métodos de busca são: os numéricos, os enumerativos e os probabilísticos.

Os métodos numéricos englobam todos os algoritmos tradicionais baseados em variações da direção do gradiente e estão preparados para ser eficientes na busca de pontos estacionários, geralmente mínimos locais. Também mínimos globais são achados com frequência, mas, a tarefa de achar o mínimo global é um desafio importante neste método.

Os métodos enumerativos seguem uma ideia bastante intuitiva: examinam-se os pontos do espaço em busca do ótimo local ou global. Conforme a dimensão do espaço de busca, o número de pontos cresce a dimensão do problema e o método torna-se impraticável.

Os métodos probabilísticos utilizam a escolha probabilística como ferramenta para a busca dirigida, convergindo mais rapidamente para o ótimo. Um bom exemplo desta técnica são os AGs. O algoritmo genético inicia com um conjunto de elementos codificados chamados de indivíduos e a cada uma destas estimativas é atribuído um valor que mostra a qualidade da solução.

Nos últimos anos tem havido interesse cada vez maior, em diversas áreas da ciência, em problemas solucionados a partir de sistemas baseados nos princípios da evolução e da hereditariedade, ou seja, sistemas que mantêm uma população, representando as soluções em potencial de um problema, que passará por um processo seletivo baseado na aptidão de cada indivíduo e em seguida por operadores genéticos para garantir a diversidade da espécie. Dentre esses sistemas destacam-se a classe dos AG (MICHALEWICZ, 1996).

Os AGs, juntamente com Estratégias Evolucionárias e Programação Evolutiva forma uma classe de algoritmos de pesquisa baseada na evolução natural. Uma visão geral dos métodos de busca e otimização são dadas por:

- a) métodos baseadas em cálculo que se utilizam do gradiente para alcançar o extremo de uma função, além de necessitarem de um ponto inicial, a partir do qual iniciam o processo de busca no espaço

de pesquisa. O uso do gradiente e a necessidade do ponto inicial fazem com que o extremo que estes métodos encontrem, sejam válidos apenas em certa vizinhança, ou seja, é um extremo local. Usam um conjunto de condições necessárias e suficientes que devem ser satisfeitas pelas soluções de um problema a ser otimizado;

- b) métodos enumerativos tentam encontrar o ponto ótimo fazendo uma varredura em todo espaço de solução do problema, ponto a ponto. Realizando suas pesquisas de forma aleatória, onde o melhor resultado encontrado em cada pesquisa vai sendo substituído por outro melhor resultado que por ventura venha ser encontrado. Procura a solução, pesquisando sequencialmente cada ponto do espaço de busca. Os métodos enumerativos são combinatórios e para se ter uma ideia da dificuldade que este método apresenta para encontrar a solução em um espaço de grandes dimensões, basta verificar o número de possibilidades de se classificar N elementos em K maneiras diferentes que é dado por:

$$N(n, k) = \frac{1}{k!} \sum_{i=0}^k (-1)^i \binom{k}{i} (k-i)^n,$$

onde N é o número de possibilidade da combinação dos N elementos pelas K maneiras. Pela fórmula acima, agrupar $n = 25$ máquinas em agrupamentos de $k = 5$ máquinas, tem-se: $N(25,5) = 2.436.684.974.110.751$ maneiras diferentes de ordenamento, tornando a busca pela solução do problema impraticável. O que mostra a necessidade de se encontrar outra maneira para solucionar o problema. Os métodos Aleatórios foram desenvolvidos para dar cabo a problemas como este, cujo espaço de busca tenha uma explosão exponencial;

- c) métodos aleatórios têm apresentado melhor desempenho em relação aos dois métodos anteriores, pelo fato de possuírem recursos para escapar de extremos locais e também pelo fato de

não testarem todas as possibilidades do espaço de pesquisa, como fazem os métodos enumerativos.

Porém, para problemas de pequenas dimensões não são os mais adequados por serem ineficiente em relação ao tempo de convergência, não trazendo vantagem quanto ao tempo computacional. No entanto, se revelam apropriados para problemas de grandes dimensões, pois, mesmo não oferecendo o ótimo, eles fornecem uma aproximação, plenamente aceitável, para a maioria dos casos.

O método aleatório de grande potencial de aplicação são os AGs. São métodos aleatórios de otimização que através de busca heurística, combinam a noção de sobrevivência dos mais adaptados numa busca estruturada, porém aleatória, com avaliação paralela dos pontos no espaço de buscas.

Os algoritmos genéticos têm sido aplicados com sucesso em vários problemas de otimização tais como: o problema do caixeiro viajante, em problemas similares aos problemas de arranjo físico de instalações, em problemas de empacotamento, além de estudos em problemas específicos de otimização de função não linear mista e inteira.

Os algoritmos genéticos consistem na representação através de uma *string* denominada cromossomo, onde cada componente representa um gene do ponto no espaço de busca (população), uma função de fitness para avaliar os pontos pesquisados e um parâmetro estocástico para controlar a aplicação dos operadores genéticos (DE JONG, 2006; FANG, 2008).

4.2 Principais conceitos e elementos de um algoritmo genético.

Como observa Goldberg (1989), o algoritmo genético pode ser visto como uma representação matemática da teoria de Darwin e da genética, chamada de a nova sintaxe da teoria da evolução, cujos principais postulados podem ser resumidos em:

- a) a evolução é um processo que opera sobre os cromossomos do organismo e não sobre o organismo que os carrega. Os cromossomos do organismo são o projeto e terão reflexo direto sobre todas as características desse organismo. O indivíduo é a decodificação de seus cromossomos. Desta maneira, o que ocorrer

com o organismo, durante sua vida, não irá se refletir sobre seus cromossomos. Entretanto, o inverso não é verdadeiro;

- b) a seleção natural é o elo entre os cromossomos e o desempenho que suas estruturas decodificam. O processo de seleção natural faz com que, aqueles cromossomos, que decodificaram organismos mais bem adaptados ao seu meio ambiente, sobrevivam e reproduzam mais do que aqueles que decodificam organismos menos adaptados.

O processo de reprodução é o ponto através do qual a evolução se caracteriza. Mutações podem causar diferenças entre os cromossomos dos pais e de seus filhos. Além disso, processos de recombinação “crossover” podem fazer com que os cromossomos dos filhos sejam bastante diferentes dos de seus pais, uma vez que eles combinam materiais cromossômicos de dois genitores (FAN, 2010).

O alfabeto da genética usado como inspiração para os AGs é dado por:

- a) cromossomo - representa um indivíduo na população, definido normalmente como um vetor de componentes que representa uma solução possível para o problema;
- b) gene - representa uma componente do cromossomo, isto é, uma variável do problema de acordo com o alfabeto utilizado (binário inteiro ou real);
- c) fenótipo - denota o cromossomo codificado;
- d) genótipo - representa a estrutura do cromossomo codificado;
- e) população - conjunto de indivíduos, isto é, conjunto de soluções do problema no espaço de busca;
- f) geração - iteração completa do AG que gera uma nova população;
- g) fitness— é a medida de aptidão de um indivíduo que está normalmente associada ao valor da função objetivo para cada solução da população corrente;
- h) allele – são os possíveis valores de uma variável do problema;
- i) locus – representa a posição do atributo no cromossomo; é a posição da componente do vetor;

- j) operadores genéticos – são as regras que permitem a manipulação do cromossomo, que basicamente são;
- k) crossover ou cruzamento ou o operador que permite a obtenção de indivíduos filhos a partir da combinação dos cromossomos pais;
- l) mutação é o operador que permite a produção de um novo indivíduo por alteração direta no cromossomo pai.

O algoritmo consegue resolver problemas complexos de uma maneira muito simples. Como na natureza, o algoritmo não sabe o tipo do problema que estava sendo resolvido. Uma simples função de adequação faz o papel da medida de adaptação dos organismos e cromossomos ao meio ambiente. Assim, os cromossomos com uma adaptação melhor, medida por esta função, tinham maior oportunidade de reprodução do que aqueles com uma má adequação, imitando o processo evolucionário da natureza. A seguir está representado o Algoritmo Genético básico de Holland.

- a) **[início]** - gere uma população aleatória de n cromossomos (soluções adequadas para o problema);
- b) **[adequação]** - avalie a adequação $f(x)$ de cada cromossomo x da população;
- c) **[nova população]** - crie uma nova população, repetindo os passos seguintes até que a nova população esteja completa;
 - [Seleção]** Selecione de acordo com sua adequação (melhor adequação, mais chances de ser selecionado) dois cromossomos para serem os pais,
 - [Cruzamento]** Com a probabilidade de cruzamento cruze os pais para formar a nova geração. Se não realizar cruzamento, a nova geração será uma cópia exata dos pais,
 - [Mutaç o]** Com a probabilidade de muta o, altere os cromossomos da nova gera o nos locus (posi o nos cromossomos),
 - [Aceita o]** Coloque a nova descend ncia na nova popula o,
- d) **[Substitua]** Utilize a nova popula o gerada para a pr xima rodada do algoritmo;

- e) **[Teste]** Se a condição final foi atingida, **pare** e retorne a melhor solução da população atual;
- f) **[Repita]** Vá para o passo 2.

Neste processo, cada cromossomo chamado de indivíduo no AG corresponde a um ponto no espaço de solução do problema. O processo de solução adotado nos AGs consiste em gerar, através de regras específicas, um grande número de indivíduos, de forma a promover uma varredura tão extensa quanto necessária do espaço de soluções (DEB, 2001).

São considerados dois aspectos importantes na resolução de problemas através da utilização de AG. Primeiro, a forma de codificação da solução em cromossomo e, em segundo lugar, para codificar o valor de qualquer cromossomo, no contexto do problema, necessita-se de uma função de avaliação que por sua vez indica quão adequada está a solução ao problema proposto no espaço de solução. A técnica de codificar soluções pode variar de problema para problema e de AG para AG. No trabalho original de Holland, a codificação é feita usando cadeia binária de bits.

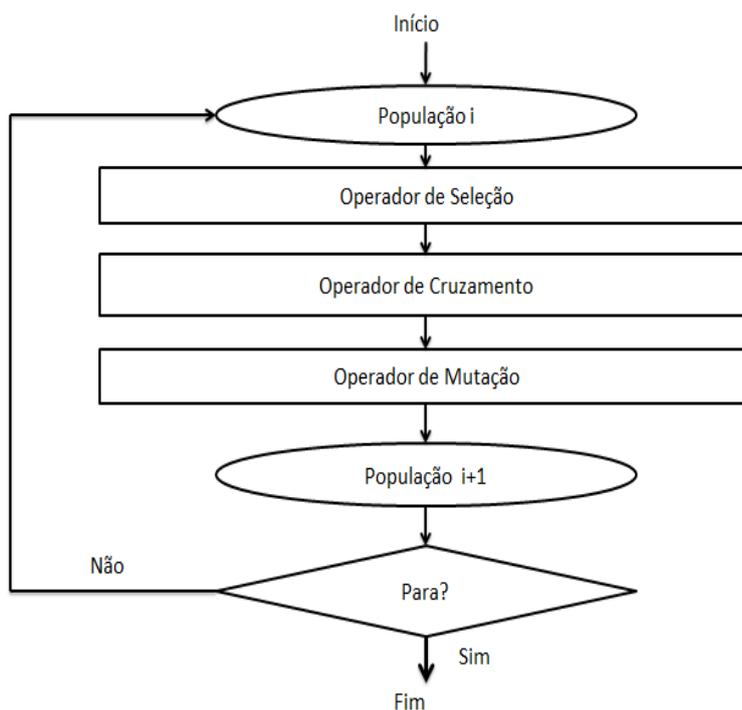
A representação binária apresenta desempenho pobre se aplicada a problemas numéricos com alta dimensionalidade ou se alta precisão numérica for requerida. Além disso, descrevem simulações computacionais comparando o desempenho de AGs com codificação binária e com ponto flutuante. Os resultados apresentados mostram uma clara superioridade da codificação em ponto flutuante para os problemas estudados (DEB, 2001).

A função de adequação é a maneira de se fazer a ligação entre o algoritmo genético e o problema a ser resolvido. Ela toma como entrada o cromossomo, que é uma tentativa de solução do problema, e devolve um número real, informando o desempenho deste cromossomo no problema; este número representa o seu grau de adaptabilidade, que informa quão longe ou perto este cromossomo está da solução ótima do problema. Assim, a função de adequação faz, no algoritmo genético, o mesmo papel que o meio ambiente faz com os organismos vivos: fornece o grau de adaptação do organismo (cromossomo) ao ambiente e este valor será usado no processo de seleção para reprodução (GOLDBERG, 1989).

4.3 Operadores genéticos

Operadores genéticos são as regras que permitem levar a cabo a geração de uma nova população a partir de outra inicial (HOLLAND, 1975). Todo AG faz uso de pelo menos três operadores: um de seleção, um de cruzamento e um de mutação que atuam sobre uma população atual para gerar a seguinte. A Figura 2 representa uma estrutura de implementação do AG de forma simplificada, onde se observa a etapa de iniciação, em que uma população é criada de forma aleatória. Essa população passa por um processo de seleção para reprodução, definido pela função aptidão, onde os mais aptos são escolhidos e passarão pelos operadores genéticos de cruzamento e mutação gerando uma nova população (BIELLI et al, 2002).

Figura 2 - Fluxo da implementação do AG, processo de reprodução.



Fonte: Bielli et al. (2002).

Observa-se, pela Figura 2, que cada iteração do algoritmo genético corresponde à aplicação de um conjunto de quatro operações básicas: cálculo de aptidão, de seleção, de cruzamento e de mutação. Ao fim destas operações cria-

se uma nova população chamada de geração que, espera-se, representar uma melhor aproximação da solução do problema de otimização que a população anterior. A população inicial é gerada atribuindo-se aleatoriamente valores aos genes de cada cromossomo.

A aptidão de um indivíduo da população é medida por uma função, também chamada de função objetivo do problema de otimização. A aptidão é em seguida normalizada, para permitir um melhor controle do processo de seleção. Não há um critério único que determine a parada do AG. Normalmente usa-se a aptidão do melhor indivíduo em conjunto com a limitação do número de gerações ou o critério de convergência. Quando os cromossomos convergem em torno de 95% das vezes diz-se que o AG convergiu. Procede-se, então, a sua parada.

Segundo Holland (1975), o AG pode ser escrito sucintamente em seis passos:

- a) inicie uma população, de tamanho N , com cromossomos gerados aleatoriamente. Esta população formada por um conjunto aleatório de indivíduos pode ser vista como possível solução do problema;
- b) durante o processo evolutivo, esta população é avaliada e para cada indivíduo é dada uma nota, ou índice, refletindo sua habilidade de adaptação a determinado ambiente. É aplicada a função de adequação em cada cromossomo desta população;
- c) crie novos cromossomos através de cruzamentos de cromossomos selecionados desta população. Aplique a recombinação e a mutação nestes cromossomos. Uma porcentagem dos indivíduos mais adaptados é mantida, enquanto os outros são descartados;
- d) elimine membros da antiga população de modo a ter espaço para inserir estes novos cromossomos, mantendo a população com o mesmo número N de Cromossomos. Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características fundamentais através de mutações e cruzamentos ou crossover ou recombinação genética gerando descendentes para a próxima geração;
- e) aplique a função de adequação nestes cromossomos e insira-os na população. Este processo, chamado de reprodução, é repetido até

que uma solução satisfatória seja encontrada. Embora possam parecer simples do ponto de vista biológico, estes algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos de busca adaptativos poderosos e robustos;

- f) se a solução ideal for encontrada, retorne o cromossomo com a melhor adequação. Caso contrário, volte ao passo (c). A medida que as gerações forem se sucedendo, cromossomos cada vez mais bem adaptados, isto é: obtém-se um cromossomo como solução com alto grau de adequação ao problema proposto.

4.4 População inicial

Os primeiros passos de um Algoritmo Genético é a geração de uma população inicial, que é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam possíveis soluções do problema a ser resolvido. Durante o processo evolutivo, esta população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota, denominada aptidão ou fitness, refletindo a qualidade da solução que ele representa (LACERDA; CARVALHO, 1999; ALBAYRAK, 2011).

O algoritmo genético pode ser representado pelos passos indicado no código a seguir:

início

$t = 0;$

inicialize $p(t)$;

calcular os valores de $p(t)$;

enquanto a condição inicial não for satisfeita faça:

Início

início

$t = t + 1;$

reproduzir $C(t)$ de $p(t - 1)$;

cruzar e mutar os elementos de $C(t)$;

formar $C'(t)$;

calcular os valores de $C'(t)$;
selecionar os substituto de $p(t)$ em $C'(t)$ e $p(t - 1)$;
end;
end.

Fonte: Representação do AG seminal de holland, adaptado por GOLDBERG (1989).

Um cromossomo é uma estrutura de dados, geralmente vetor ou cadeia de bits que representa uma possível solução do problema a ser otimizado. Em geral, um cromossomo representa um conjunto de parâmetros da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Os cromossomos componentes de um AG assumem tipicamente a forma de cadeias binárias. Cada posição dentro dessa cadeia tem dois alelos possíveis: 0 ou 1. Cada cromossomo pode ser visto como um ponto no espaço de busca das soluções candidatas. O AG processa populações de cromossomos, efetuando substituições sucessivas de uma população por outra (BIELLI et al., 2002).

As possíveis soluções de um problema devem ser representadas de forma mais simples possível. A representação do cromossoma depende do tipo de problema e do que, essencialmente, se deseja manipular geneticamente. Os principais tipos de representação são:

Tabela 3 - Representação da solução de um cromossomo.

Representação	Problema
Binária	Numéricos e inteiros
Números reais	Numéricos
Permutação de Símbolos	Baseados em ordem
Símbolos repetidos	Agrupamentos

Fonte: Sousa Junior (2009).

A representação binária é a mais simples, fácil de manipular e de ser transformada em inteiro ou real e, ainda, facilita a prova de alguns teoremas. Todavia, a representação por números reais com ponto flutuante é a mais eficiente. A representação por números reais oferece melhor desempenho. Geralmente a aptidão do indivíduo é determinada através do cálculo da função objetivo, que depende das especificações do problema em questão. Cada indivíduo é uma entrada para uma ferramenta de análise de desempenho, cuja saída fornece medidas que permitem ao algoritmo genético o cálculo da aptidão do indivíduo. Ainda nesta fase os indivíduos são ordenados conforme a sua aptidão (MICHALEWICZ, 1996).

4.5 Operador de aptidão

A função de aptidão tem o papel de ligar o AG ao problema propriamente dito. Ela é usada para avaliar o cromossomo para posterior uso pelos operadores de reprodução. A função de adequação ou aptidão possui como entrada uma cadeia de bits e saída um valor real. Neste passo são calculados os valores de aptidão para cada um dos indivíduos da população. É comum que esta aptidão seja calculada através da função objetivo, que depende diretamente das especificações do problema em questão. Após o cálculo, os indivíduos são ordenados conforme sua aptidão (GOLDBERG, 1989; MARTINEZ et al, 2009).

É necessário dispor de algum modo para avaliar o quão distante um cromossomo está da solução ideal. Este processo de adequação pode, dependendo da complexidade do problema ser exato ou não. Nos casos de grande complexidade, alguma heurística poderá ser utilizada. O ideal é que a função de adequação seja normalizada, isto acontece quando seus valores estão sempre dentro do intervalo $[0, 1]$, isso significa que um cromossomo com valor de adequação com o maior valor é a melhor solução possível. Portanto, este cromossomo é a resposta do problema. No caso oposto, um menor valor representa a pior solução possível.

Quando a codificação binária é utilizada para representar valores reais, o tamanho do cromossomo dependerá da precisão requerida. Sendo t o tamanho do intervalo real da variável e p a precisão requerida. O tamanho do cromossomo necessário para representar esta variável é calculado pela equação:

$$n = \left\lceil \log_2(t \cdot 10^p) \right\rceil + 1$$

por exemplo, se o intervalo de busca é $[1,3]$ tem-se o tamanho do intervalo igual a 2, $(t = 3 - 1) = 2$, ao se utilizar uma precisão de 5 casas decimais ($p = 5$) seria necessário.

$n = \lceil \log_2(2 \cdot 10^5) + 1 \rceil = 18$, bits para representar a variável no espaço de busca.

Segundo Gonçalves e Von Zuben (2010) é necessário mapear o intervalo real da variável no intervalo binário. Este processo é realizado em duas etapas. Inicialmente aplica-se a função de mapeamento sobre o valor real da variável e posteriormente converte-se o valor obtido para base binária. É necessário saber a faixa de operação da cada uma das variáveis e a precisão desejada. Estes dois parâmetros definem, em conjunto, quantos bits se usará por variável. Sendo x o valor real da variável e \hat{x} o valor mapeado cujo valor é determinado por:

$$\hat{x} = \frac{(x - x_{min}) \cdot (2^n - 1)}{t}$$

assim, o cromossomo é representado pela cadeia de bits obtida com o mapeamento de \hat{x} para a base binária. Por sua vez, o processo de decodificação é realizado em duas etapas: inicialmente converte-se o cromossomo da base 2 para a base 10, cujo valor é um valor em:

$$\hat{x} \in N, 0 \leq \hat{x} \leq 2^n - 1$$

onde:

$$s = [b_n b_{n-1}, \dots, b_2 b_1 b_0] = \sum_{i=1}^n b_i \cdot 2^i = \hat{x}.$$

Na etapa seguinte \hat{x} é mapeado de volta para o espaço de busca de acordo com a equação:

$$x = x_{min} + \left(\frac{x_{max} - x_{min}}{2^n - 1} \right) \cdot \hat{x}$$

onde x_{min} e x_{max} indicam os limites do intervalo de busca. E x_{max} é o valor de aptidão assinalado ao melhor indivíduo, sendo x_{min} o valor de aptidão assinalado

ao pior indivíduo. Esses dois valores são determinados pelo usuário. Os demais indivíduos têm valores de aptidão linearmente distribuídos entre x_{min} e x_{max} , que indicam os limites do intervalo de busca.

A codificação binária possui algumas desvantagens quando é aplicada a problemas de alta dimensionalidade e com alta precisão numérica. Isto ocorre pelo fato de que quando há um grande número de variáveis, obtêm-se longas cadeias de bits que podem fazer os algoritmos convergirem vagarosamente. Por exemplo, para 100 variáveis com domínio no intervalo $[-500, 500]$, com precisão de 6 casas decimais, a cadeia de bits possuirá um tamanho igual a 30, gerando um espaço de busca igual a 10^{100} o que é intratável na prática. Um AG utilizando codificação binária obtém um pobre desempenho para este tipo de problema.

Caso se esteja trabalhando com a codificação real não há necessidade de transformar os valores para que seja realizado o cálculo da função de aptidão (MICHALEWICZ, 1996; DEB, 2001).

4.6 Operador de seleção

A principal ideia em um operador de seleção, de um AG, é oferecer aos melhores indivíduos da população corrente preferência para o processo de reprodução, permitindo que estes indivíduos possam passar suas características às próximas gerações. Isto funciona como na natureza, onde os indivíduos altamente adaptados ao seu ambiente possuem naturalmente mais oportunidades para reproduzir do que aqueles indivíduos considerados mais fracos.

O processo de seleção ocorre após a aplicação da função de adequação nos cromossomos. Ela desempenha o papel da seleção natural na evolução, selecionando para sobreviver e reproduzir os organismos melhor adaptados ao meio, no caso, os cromossomos com melhor valor na função de adequação (SCHNEIDER, 1998).

O primeiro passo é atribuir um valor de aptidão ou mérito que refletirá o quanto o indivíduo está adaptado ao ambiente. É comum neste caso, usar a função objetivo com algumas modificações para atribuir os valores de mérito para cada indivíduo. Existem diversas maneiras de se promover esta seleção sendo as mais utilizadas: o Torneio e a Roleta (GOLDBERG, 1989; LAI, 2010).

É necessário definir as condições de parada para o algoritmo. Geralmente, é utilizado como condição de parada o número máximo de gerações, ou seja, quando o número de gerações atingir um valor predefinido, o algoritmo é encerrado.

Goldberg (1989), afirma que a maneira pela qual os cromossomos são selecionados para reprodução pode variar, dependendo do método utilizado.

Nesta fase, os indivíduos que se mostraram mais aptos na geração atual são selecionados para gerar uma nova população através do cruzamento. O processo de seleção é realizado pelos mecanismos a seguir:

- a) amostragem direta: o conjunto de indivíduos representantes da geração é selecionado baseado em um critério fixo. Pode ser visto como escolha os n melhores;
- b) amostragem aleatória simples ou equiprovável: todos os elementos possuem a mesma chance de serem escolhidos para compor o conjunto que gerará a prole seguinte;
- c) amostragem estocástica: a chance de cada indivíduo ser selecionado é diretamente proporcional ao valor de seu fitness.

A seleção deve dirigir o processo de busca em favor dos indivíduos mais aptos. Muitos autores, entre eles, Goldberg (1989), Lacerda e Carvalho (1999) e Bielli et al. (2002), consideram a maneira mais fácil para implementar o operador de seleção a criação de uma roleta onde cada cadeia de bit ou indivíduo da população é representado nessa roleta, proporcionalmente, ao seu índice de aptidão. O próximo passo é selecionar um cromossomo com probabilidade igual ao do setor por ele obtido, isto é, a probabilidade de selecionar um dado cromossomo para reprodução é proporcional à sua função de adequação. A seleção é realizada conforme descrito a seguir:

- a) gera-se um número aleatório entre 0 e 2π ;
- b) soma-se, em qualquer ordem, o valor do setor alocado de cada cromossomo. Continua-se somando enquanto esta soma não ultrapassar o número aleatório gerado;
- c) o cromossomo cujo setor fizer esta soma e ultrapassar o número aleatório gerado será o cromossomo escolhido; observe-se que isto sempre ocorrerá, pois a soma de todos os setores é 2π .

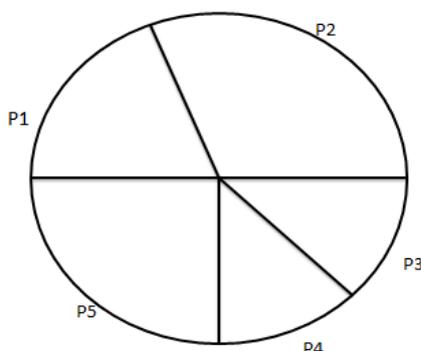
Este processo é semelhante a uma roleta, na qual os setores vão se sucedendo, sob um pino marcador, até que a roda pare com o pino sobre um setor qualquer. Quanto maior a largura do setor, maior a probabilidade deste setor se encontrar sob o pino marcador. Assim, aos indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, portanto maior probabilidade de ser escolhido para repassar a seus descendentes as suas características. Enquanto aos de aptidão mais baixa é dada uma porção relativamente menor da roleta, logo menor probabilidade de ser escolhido para perpetuar as suas características na geração seguinte (GOLDBERG, 1989; LAI, 2010; YINGYING et al, 2011).

Dada uma população com m indivíduos, a probabilidade de seleção p_i de cada cromossomo S_i com aptidão f_i é dada por:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}, \quad i = 1, \dots, n$$

O gráfico representativo de probabilidade, de cada setor, é mostrado na Figura 3, para uma população de cinco indivíduos.

Figura 3 - Exemplo de seleção por roleta.



Fonte: Lacerda e Carvalho (1999).

O método da roleta apresentado por Lacerda e Carvalho (1999) pode ser visto no algoritmo:

```

1 begin
2   total ←  $\sum_{i=1}^n f_i$ 
3   rand ← randômico (0, total);
4   total parcial ← 0;
5   i ← 0;
6   repeat
7     i ← i + 1;
8     total parcial ← total parcial + fi;

```

```

9  until total parcial  $\geq$  rand;
10 return individuo Si
11end.

```

Finalmente, a roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população e são escolhidos como indivíduos que participarão da próxima geração, aqueles sorteados na roleta (LACERDA; CARVALHO, 1999; YINGYING et al, 2011).

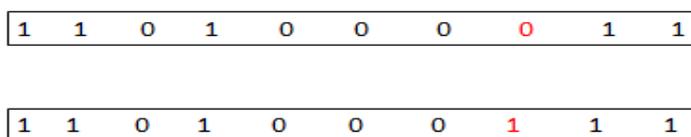
4.7 Operador de mutação

O operador de mutação modifica aleatoriamente um ou mais genes de um cromossomo. Com esse operador, um indivíduo gera uma cópia de si mesmo, o qual pode sofrer alterações. A probabilidade de ocorrência de mutação em um gene é denominada taxa de mutação. Usualmente, são atribuídos valores pequenos para a taxa de mutação, uma vez que esse operador pode gerar um indivíduo potencialmente pior que o original.

Considerando a codificação binária, o operador de mutação padrão simplesmente troca o valor de um gene em um cromossomo. Assim, se o alelo de um gene selecionado é 1, o seu valor passa a ser 0 após a aplicação da mutação (GOLDBERG, 1989; YU et al, 2011).

Na Figura 4, no ponto de mutação, o gene trocou do valor 0 do alelo da oitava posição e passou a ter o valor 1

Figura 4 - Representação gráfica do operador de mutação.



No caso de problemas com codificação em ponto flutuante, os operadores de mutação mais populares são a mutação uniforme e a mutação Gaussiana (DEB, 2001).

O operador mutação uniforme seleciona aleatoriamente um componente $k \in \{1, 2, \dots, n\}$ do cromossomo

$$x = [x_1, \dots, x_k, \dots, x_n]$$

e gera um indivíduo

$$x' = [x_1, \dots, x'_k, \dots, x_n].$$

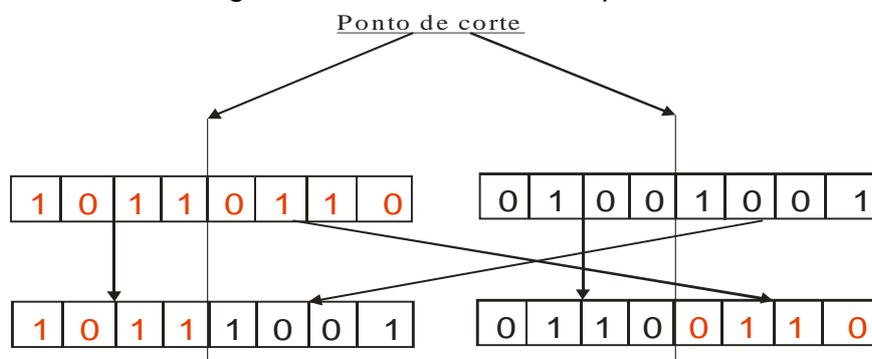
onde x'_k é um número aleatório com distribuição de probabilidade uniforme, amostrado no intervalo $[x_{min}, x_{max}]$, sendo x_{min} e x_{max} , respectivamente, dos limites inferior e superior para o valor do alelo x_k , (MALAY, 2004).

4.8 Recombinação ou *crossover*.

O operador de recombinação ou *crossover* é o mecanismo de obtenção de novos indivíduos pela troca ou combinação dos alelos de dois ou mais indivíduos. É o principal operador de reprodução dos AGs. Fragmentos de um dos indivíduos são trocados por fragmentos equivalentes oriundo de outro indivíduo. O resultado desta operação é um indivíduo que combina as melhores características dos pais (GOLDBERG, 1989).

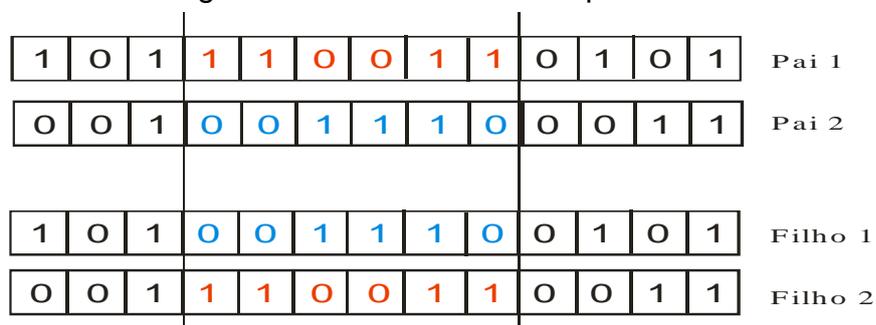
Segundo Goldberg, (1989) um tipo bastante comum de recombinação é a de um ponto. Nessa operação, seleciona-se aleatoriamente um ponto de corte nos cromossomos, dividindo este em uma partição à direita e outra à esquerda do corte. Cada descendente é composto pela junção da partição à esquerda (direita) de um pai com a partição à direita (esquerda) do outro pai, Figura 5 ilustra um exemplo de *crossover* de um ponto. Outra recombinação, de n-pontos, divide os cromossomos em n partições, as quais são recombinadas. A Figura 6 ilustra um exemplo com *crossover* de 2 pontos de corte. Neste caso, o Filho 1 (Filho 2) recebe a partição central do Pai 2 (Pai 1) e as partições à esquerda e à direita dos cortes do Pai 1 (Pai 2).

Figura 5 - Crossover de um ponto.



Crossover de dois pontos:

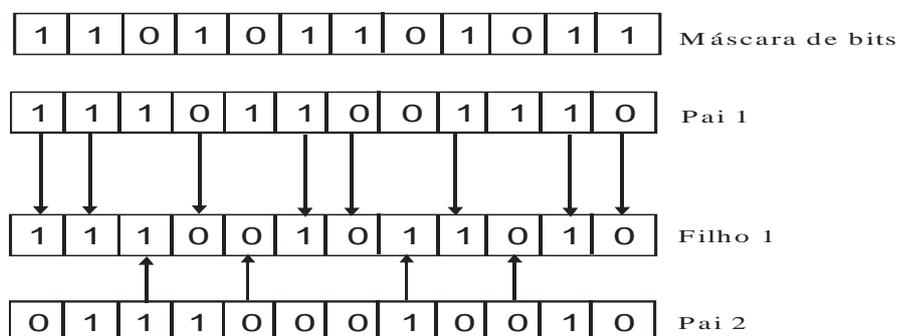
Figura 6 - Crossover de dois pontos



Fonte: Lacerda e Carvalho (1999).

Outro tipo de recombinação muito comum é a recombinação uniforme que considera cada gene independentemente, escolhendo de qual pai o gene do filho será herdado. Em geral, cria-se uma máscara e uma lista de variáveis aleatórias de distribuição uniforme em $[0, 1]$. Se o primeiro bit da máscara possui o valor 1, então o primeiro bit do *pai 1* é copiado para o primeiro bit do filho1. Caso contrário, o primeiro bit do *pai 2* é copiado para o primeiro bit do filho1. O processo se repete para os bits restantes do filho1. Na geração do filho2 o procedimento é invertido, ou seja, se o bit da máscara é 1, então será copiado 0 bit do *pai 2*. Se o bit for igual a 0, então será copiado o bit do *pai 1*. Como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Cruzamento uniforme



Fonte: Lacerda e Carvalho (1999).

4.9 O Problema do Carteiro Chinês (PCC)

Problemas combinatórios são problemas discretos, em geral NP – hard ou de tempo não polinomial. Isso significa que o grau de dificuldade é de complexidade exponencial. Um problema combinatório, NP- difícil (do inglês NP-hard), de otimização, é o clássico “Problema do Caixeiro Viajante” conhecido, em inglês, pela sigla TSP, *Traveling Salesman Problem* ou, ainda, Problema do Carteiro Chinês (PCC). Neste problema, um caixeiro deve percorrer um conjunto de “N” cidades e voltar a sua cidade de origem, passando exatamente uma vez em cada cidade, de modo que a distância percorrida seja mínima. O número de caminhos possíveis pode ser deduzido, como explicado a seguir. Seja $f(n)$ a função que fornece o número de caminhos possíveis com ‘n’ cidades.

Qualquer caminho ligando as ‘n’ cidades é composto de ‘n’ arestas; ao se introduzir uma nova cidade C, qualquer das “n” arestas de um caminho poderá ser ‘quebrada’, unindo a nova cidade ao caminho, isto é, a aresta que ligava A-B poderá ser quebrada ligando A-C-B; assim, para cada um dos antigos caminhos, surgem “n” novos caminhos:

$$f(n) = \frac{(n-1)!}{2}$$

para se ter uma ideia do grau de dificuldade de se encontrar a solução do problema do caixeiro viajante, vemos na tabela a seguir a dimensão do espaço de busca em função do número de cidade.

Tabela 4 - Arranjo combinatório de (m, k).

Número de cidades	Número de rotas
3	1
4	3
5	12
6	320
10	181.440
16	653.837.184.000

Fonte: Argout (2007).

4.9.1 Modelagem do problema do carteiro chinês

Os problemas combinatórios, devido às suas características peculiares, são modelados, em geral, de forma a otimizar a velocidade da pesquisa, embutindo, tanto nos operadores (Recombinação e Mutação) como na definição do cromossomo as restrições intrínsecas do problema. Diminuindo, dessa forma, o tempo de processamento (MICHALEWICZ, 1994; ALBAYRAK, 2011).

Segundo Lacerda e Carvalho (1999) e Michalewicz (1996), no TSP, se fosse utilizada a abordagem tradicional, com as cidades codificadas em binário e os operadores tradicionais, aconteceria dois tipos de problemas:

- a) o tamanho de um campo em binário (gene), reservado para cada cidade, poderia comportar valores maiores do que o número máximo de cidades, tais como: um campo de 4 bits por gene, por exemplo, permitiria codificar até 16 cidades mesmo que o número de cidades do problema fosse 10;
- b) um operador tradicional de mutação, agindo sobre um cromossomo binário, poderia fazer com que houvesse repetições no número da cidade em diferentes genes do cromossomo. Para se resolver estes problemas seria necessário construir um operador que refizesse o cromossomo retirando estes erros, o que consumiria uma fatia razoável do tempo de processamento.

Segundo Michalewicz (1996) e Miller (2010), são recomendadas três representações para a modelagem do cromossomo, com os respectivos operadores:

- a) representação por adjacência: nesta representação, a cidade J é escrita na posição i se e somente se o caminho vai da cidade i para a cidade J em alguma parte do percurso. Por exemplo, a seguinte representação: (4 3 1 2) Mapeia o caminho:

$$1 \longrightarrow 4 \longrightarrow 2 \longrightarrow 3 \longrightarrow 1.$$

- b) representação ordinal - nesta representação, o caminho (P) é construído a partir de duas listas - a primeira denominada C, denota as cidades ainda não visitadas, descritas ordenadamente; a segunda lista, denotada por S, indica em que ordem os elementos

de C devem ser retirados para se obter o caminho. Um exemplo com quatro cidades é dado a seguir:

$$C = (1\ 2\ 3\ 4) \quad S = (1\ 3\ 1) \quad P = ()$$

O primeiro símbolo de S é 1, significa: retire a primeira cidade de C e coloque-a em P. Obtendo-se:

$$C = (2\ 3\ 4) \quad S = (1\ 3\ 1) \quad P = (1)$$

O próximo símbolo em S é 3, significa: retire a terceira cidade de C e coloque-a em P. Obtendo-se:

$$C = (2\ 3) \quad S = (1\ 3\ 1) \quad P = (1\ 4)$$

A seguir, encontra-se em S novamente o símbolo 1, o que significa: retire a primeira cidade de C e coloque-a em P. Obtendo-se:

$$C = (3) \quad S = (1\ 3\ 1) \quad P = (1\ 4\ 2)$$

Finalmente, usando o mesmo algoritmo:

$$C = () \quad S = (1\ 3\ 1) \quad P = (1\ 4\ 2\ 3)$$

Sendo P o caminho final: $1 \longrightarrow 4 \longrightarrow 2 \longrightarrow 3 \longrightarrow 1$.

A principal vantagem em se usar este tipo de representação é que o operador de recombinação funciona do modo tradicional (como em uma cadeia de bits);

- c) representação por caminho - nesta representação, a mais natural, o mapeamento da rota é feito pela sequência do número das cidades percorridas. Por exemplo, o seguinte cromossomo: (1 4 2 3) indica a seguinte sequência:

$$1 \longrightarrow 4 \longrightarrow 2 \longrightarrow 3 \longrightarrow 1,$$

sempre há o caminho implícito da última cidade à primeira.

4.9.2 Operador de recombinação

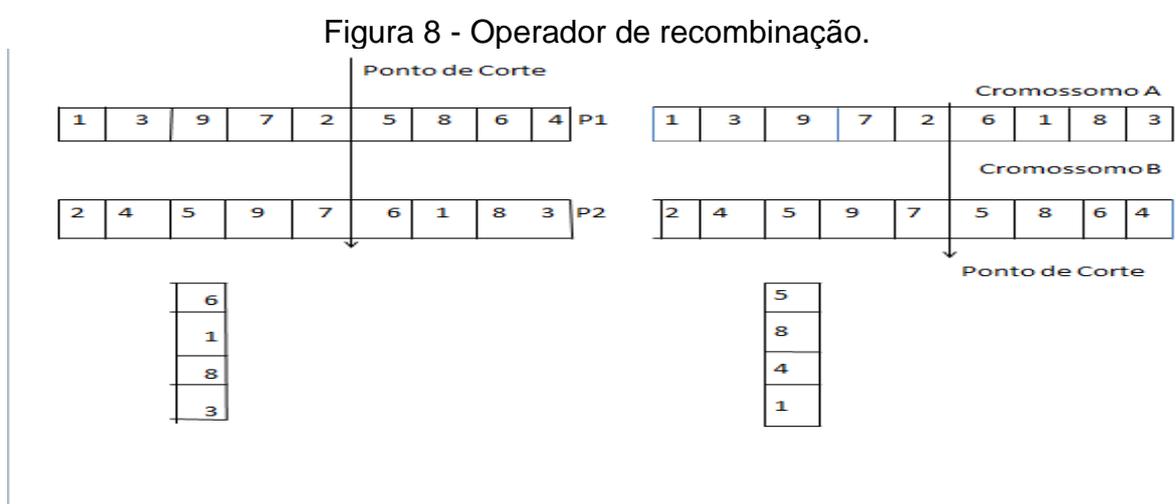
O operador de recombinação é um operador dual e pode operar em mais de um ponto. A técnica vista a seguir é conhecida como PMX partially mapped, proposta por Goldberg (1989) e Li e Sun (2009).

A recombinação, na representação por caminho, pode ser feita em duas etapas. Na primeira etapa, os dois cromossomos a serem recombinados são pareados e seus alelos trocados, a partir do ponto de quebra como mostra a Figura 8 a seguir. Pode-se verificar que os cromossomos ficaram inconsistentes,

pois existem cidades repetidas tanto em A (cidades 1 e 3) quanto em B (cidades 4 e 5). Para corrigir é necessária a utilização de um operador de ‘reparo’ que terá que deixar ambos os cromossomos consistentes novamente. É importante observar que o cromossomo é consistente se e somente se:

- todos os seus genes possuem cidades válidas entre 1 e N ;
- não existem cidades repetidas.

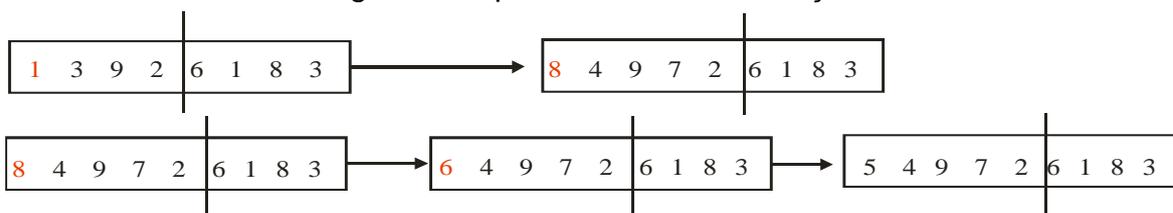
Como ambos os cromossomos, por hipótese, estavam íntegros antes da recombinação, então as possíveis inconsistências foram devidas às partes que foram trocadas. Inicialmente o operador de reparos constrói um mapa, ou tabela, dos genes que foram trocados:



Fonte: Goldberg (1988).

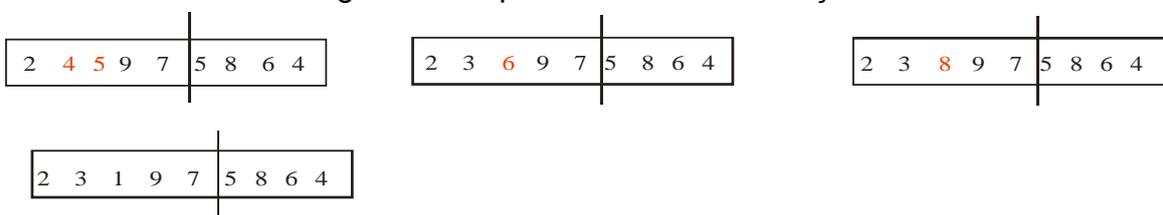
A seguir, verifica-se na primeira parte de cada cromossomo, se algum gene está repetido na segunda parte, se isso ocorrer ele deverá ser trocado pelo gene correspondente da parte oposta. Verifica-se que os genes 1 e 3, do cromossomo “A” fazem parte de sua última parte, indicando repetição e, por isso, deverão ser trocados. A troca continua ocorrendo enquanto existirem elementos repetidos na primeira parte do cromossomo. Uma vez que não há mais elementos da tabela, na primeira parte do cromossomo, o processo de reparo do cromossomo está completo. Analogamente, para os cromossomos restantes, tem-se:

Figura 9 - Operador de recombinação



uma vez que não há mais elementos da tabela, na primeira parte do cromossomo, o processo de reparo do cromossomo **A** está completado. Procedese da mesma forma para o cromossomo **B**, como a seguir:

Figura 10 - Operador de recombinação.



e o processo de reparo em B está completado. Finalmente tem-se:



4.9.3 Operador de mutação

O operador de mutação para o TSP consiste simplesmente em se trocar de posição duas cidades escolhidas aleatoriamente dentro do cromossomo. Como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Operador de mutação



4.9.4 Pressão seletiva

A pressão seletiva é a razão entre o maior fitness da população e o fitness médio. Quando há uma alta pressão seletiva, alguns indivíduos com valor

de fitness muito acima da média terão vários descendentes nas próximas gerações, em casos extremos, indivíduos próximos do ótimo global, mas com baixo valor de fitness poderão ser extintos. Como consequência disto o AG tenderá a convergir rapidamente e provavelmente para um máximo local (TANOMARU, 1995; LACERDA; CARVALHO, 1999; LOPES, 2006).

Segundo Lopes (2006), é desejável em gerações iniciais que a pressão seletiva seja mínima, permitindo que indivíduos com baixo valor de fitness tenham chances de serem escolhidos do processo seletivo. Já na fase final do AG os indivíduos tendem a ter valores de fitness muito próximo devido à convergência do AG, e nesta etapa é preferível que a pressão seletiva seja máxima, de modo a induzir a evolução no sentido do ótimo global.

4.9.5 Critério de parada

Não há um critério exato para terminar a execução do AG. Porém, no intervalo de 95% a 99% dos cromossomos apresentando o mesmo valor, é possível dizer que o algoritmo convergiu para o ótimo (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Além da convergência, podem-se adotar como critérios de parada as seguintes situações:

- a) quando o AG atinge um determinado número de gerações;
- b) quando se atinge o valor ótimo da solução, se este é conhecido.

O critério de parada utilizado foi a convergência. Ou seja, quando 98% da população apresentar valores no intervalo $[x, y]$ até o limite de 100 gerações, o procedimento é finalizado. Sendo x igual ao maior valor encontrado para aptidão e y igual a 0,99.

5 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICO (SIG)

Este capítulo descreve o sistema de informação geográfico-SIG sua fundamentação teórica, sua topologia e seu alcance. Os recursos da web também são descritos com suas feições bem como a matriz de distâncias ou custos através do algoritmo do menor caminho, usando a distância Euclidiana.

O SIG é o termo aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial. Oferece ao administrador, ao urbanista, ao planejador e ao engenheiro uma visão inédita de seu ambiente de trabalho, em que todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão ao seu alcance, inter-relacionadas com base no que lhes é fundamentalmente comum, à localização geográfica (ARONOFF, 1989).

Segundo Batella (2009), devido a sua ampla gama de aplicações, que inclui temas, como agricultura, floresta, cartografia, cadastro urbano, transporte e redes de concessionárias - água, energia e telefonia - há uma grande diversidade de SIG e pelo menos três grandes maneiras de utilizá-lo:

- a) como ferramenta para produção de mapas;
- b) como suporte para análise espacial de fenômenos;
- c) como um conjunto de banco de dados geográficos com a função de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Estas três visões do SIG são convergentes e refletem a importância do tratamento das informações geográficas dentro de uma instituição.

Segundo Fleury et al. (2000); Rose (2001); Church (2002); Carrara et al. (2006), o SIG pode ser definido como uma coleção organizada de hardware, software, pessoal qualificado e dados geográficos com o objetivo de gerenciar banco de dados, efetuando operações de inserção, armazenagem, manipulação, remoção, atualização, análise e visualização de dados, tanto espaciais como não-espaciais, funcionando como uma valiosa ferramenta em estudos de planejamento e gerenciamento.

As definições de SIG a seguir refletem cada uma, à sua maneira, a multiplicidade de usos e visões possíveis desta tecnologia e apontam para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização.

Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados (ARONOFF, 1989).

Conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real (FURQUIM, 2008).

Um sistema de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente em um ambiente de respostas a problemas (TORRES, 2008).

Um banco de dados indexados espacialmente, sobre o qual opera um conjunto de procedimentos para responder a consultas sobre entidades espaciais (BATELLA, 2009).

A partir destas definições é possível indicar as principais características de um SIG:

- a) inserir e integrar, em uma única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários e cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos de terreno;
- b) oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

Segundo Batella (2009), o SIG constitui o ambiente de inteligência que dá suporte de forma lógica e estruturante à gestão e ao processo decisório das diferentes esferas de aplicação, permitindo, inclusive, a construção de indicadores, baseados em análises geográficas. Já a fase de apresentação dos dados tem como principal objetivo a geração de relatórios, que podem ser no formato de mapas, plantas, gráficos, tabelas de valores, texto impresso ou em arquivo digital.

O SIG traz feições espaciais: ponto, linha e polígono agregados a uma tabela de atributos. Essa característica é fundamental na manipulação dos dados espaciais, permitindo aos SIG a realização de análises complexas, envolvendo o

cruzamento de informações com a principal finalidade de gerar novos produtos (SILVEIRA et al, 2008).

Como exemplo de operações que geram novos produtos em SIG, podem-se citar as operações de junção e de relação entre tabelas de operações de união, subtração e interseção entre camadas, operações de análises espaciais como o buffer e o Diagrama de Voronin; e operações geoestatísticas como os processos de interpolação realizados com os dados de elevação do relevo (LUCENA et. al, 2010).

Os instrumentos propostos com a utilização do Geoprocessamento visam aperfeiçoar as análises e as intervenções urbanas e facilitar o diálogo entre os técnicos, os administradores e a comunidade. O Geoprocessamento é o conjunto de técnicas de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais, voltado para objetos específicos (RODRIGUES, 1993).

Conforme Câmara et al (2005) pode-se, de modo geral, dividir em seis segmentos as aplicações do geoprocessamento:

- a) cadastral: aplicações de cadastro urbano e rural, realizadas tipicamente por prefeituras. Neste caso, o geoprocessamento utiliza-se da ferramenta SIG para dispor de funções de consulta a bancos de dados espaciais e apresentação de mapas e imagens.
- b) cartografia automatizada: para a produção de mapas;
- c) ambiental: os SIG são empregados para integração de dados, gerenciamento e conversão entre projeções cartográficas, modelagem numérica de terreno, processamento de imagens e geração de cartas;
- d) redes: em geoprocessamento, o conceito de rede denota as informações associadas a serviços de utilidade pública - água, luz e telefone (CÂMARA et al, 2005). Redes de drenagem, de bacias hidrográficas e de rodovias. Nestes casos, cada objeto geográfico, como cabo telefônico e cano de água, possui uma localização geográfica exata e está sempre associado a certos atributos descritivos armazenados no banco de dados;
- e) Planejamento rural: empresas agropecuárias que necessitam planejar a produção e distribuição de seus produtos;

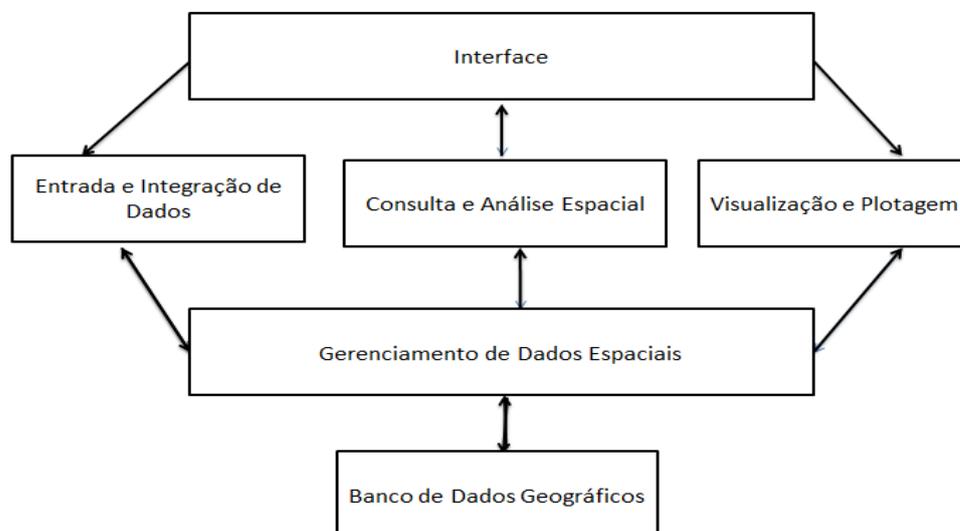
f) business geographic: também conhecido como geomarketing, vem sendo utilizado por empresas que necessitam distribuir as equipes de vendas e promoção ou localizar novos nichos de mercado. Nesses casos os SIG são uma poderosa ferramenta para analisar a distribuição geográfica de clientes, acompanhar resultados de campanhas de marketing, identificar potenciais clientes, planejar expansão, entre tantas outras possibilidades.

O emprego de geoprocessamento proporciona uma delimitação precisa do território e o levantamento da infraestrutura que o problema em questão exige, além de possibilitar a realização de análises espaciais e simulações sobre uma série de temas que compõem o quadro do desenvolvimento urbano, permitindo assim, identificar problemas de ordem prioritária, aplicar corretamente os recursos e avaliar os resultados (CÂMERA et al, 2005).

No nível mais próximo ao usuário, a interface homem-máquina define como o sistema é operado e controlado. No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento de dados espaciais, entrada, edição, análise, visualização e saída. No nível mais interno do sistema, um sistema de gerência de bancos de dados geográficos oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos.

De uma forma geral, as funções de processamento de um SIG operam sobre dados em uma área de trabalho em memória principal. A ligação entre os dados geográficos e as funções de processamento do SIG é feita por mecanismos de seleção e consulta que definem restrições sobre o conjunto de dados. A Figura 12 indica o relacionamento dos principais componentes ou subsistemas de um SIG. Cada sistema, em função de seus objetivos e necessidades, programa estes componentes de forma distinta.

Figura 12 - Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica.



Fonte: INPE (2002)

5.1 Representação de objetos espaciais em geoprocessamento

Em geoprocessamento, informações gráficas são utilizadas para representar o espaço geográfico como forma de descrever o espaço que nos cerca. Há dois modelos de representação das informações gráficas: Vetorial e Matricial. O modelo vetorial é adotado para demarcar os vários objetos presentes no espaço estudado. Para representar fenômenos geográficos pressupõe-se que eles sejam discretos, com limites definidos. Identificado por representação vetorial, as feições geográficas fundamentais como ponto, linha e polígono estão bem definidas. Como na Tabela 5:

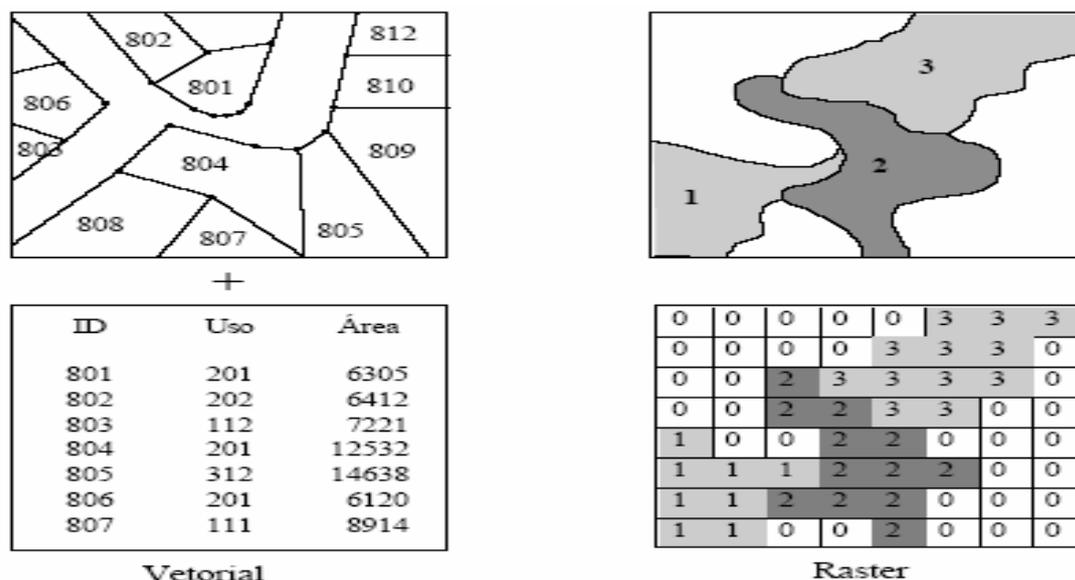
Tabela 5 - Representação das feições geográficas no ambiente computacional.

Modelo de Dados	Vetor	Matriz
Realidade	Lagos, Casas, Rodovias, Postes	Área.
Conceito	Objeto	Campo
Estrutura de Dados	Pasta, Arquivo de Formas,	Grid

Fonte: Câmara e Monteiro (2003 apud RIBEIRO, 2001).

A Figura 13 mostra a forma da feição vetorial e a forma da feição matricial ou raster.

Figura 13 – Representação de dados nos formatos vetorial e matricial



Fonte: Eastman (1998)

O uso de um modelo específico dependerá da intenção de uso, da forma como os dados são coletados e do custo associado a cada modelo. Eastman (2011) aponta os pontos fortes dos modelos raster e vetoriais. Segundo este autor, modelos raster são tipicamente intensos em dados, uma vez que estes precisam registrar dados em cada posição de célula. Entretanto, a vantagem é que o espaço geográfico é uniformemente definido de forma simples e previsível. Como resultado, o modelo raster tem maior poder analítico do que os modelos vetoriais na análise de espaços contínuos e são mais aptos para o estudo de dados que variam continuamente no espaço (CÂMARA et al, 1995).

Pontos representam feições de formas como poços, postes, edifícios, cidades, densidade demográfica e pontos de fixação. Linhas representam feições de formas unidimensionais de objetos geográficos muito estreitos para serem apresentados como áreas. Simbolizam os rios, as rodovias e as curvas de nível. Polígonos são utilizados para representar as feições cujas formas são bidimensionais. São usados para simbolizar, por exemplo, áreas de uma

determinada espécie de vegetação em estudo, de zonas de ocupação do uso do solo (CÂMARA et al, 1995).

No modelo vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas, sendo empregados principalmente para a produção de cartas. Com relação à representação dos dados vetoriais: pontos; linhas e polígonos os objetos de área; polígonos podem ter três formas diferentes de utilização como objetos isolados, aninhados e adjacentes. Objetos isolados são aqueles da mesma classe que não se tocam, tais como: edificações, piscinas e quadras. Neste caso, não existem segmentos poligonais compartilhados entre os objetos. Os objetos de linha também podem ter formas diferentes, de utilização isolada em árvores e em rede. Objetos de linha isolados ocorrem, por exemplo, na representação de muros e cercas em mapas urbanos. Organizados em árvore, podem ser encontrados nas representações de rios e seus afluentes, de redes de esgotos e de drenagem pluvial (BATELLA, 2009).

A organização em rede pode representar as redes elétricas e telefônicas, a malha viária urbana etc. Quanto aos objetos aninhados, podem ser citadas as curvas de nível e todo tipo de isolinhas em que se têm linhas que não se cruzam, e são entendidas como empilhadas umas sobre as outras.

Com relação aos objetos adjacentes utilizados para representar modalidades de divisão territorial: bairros, setores censitários, municípios e outros; mapas geológicos e pedológicos, que podem ter o compartilhamento de fronteiras, gerando a necessidade por estruturas topológicas.

Segundo Ribeiro (2001), topologia é o método matemático usado para definir as relações espaciais existentes entre feições contíguas ou adjacentes. Uma das características mais marcantes de um Sistema de Informações Geográficas é a sua capacidade de manipular dados estruturados topologicamente. Há duas razões básicas para se trabalhar os dados com estruturação topológica:

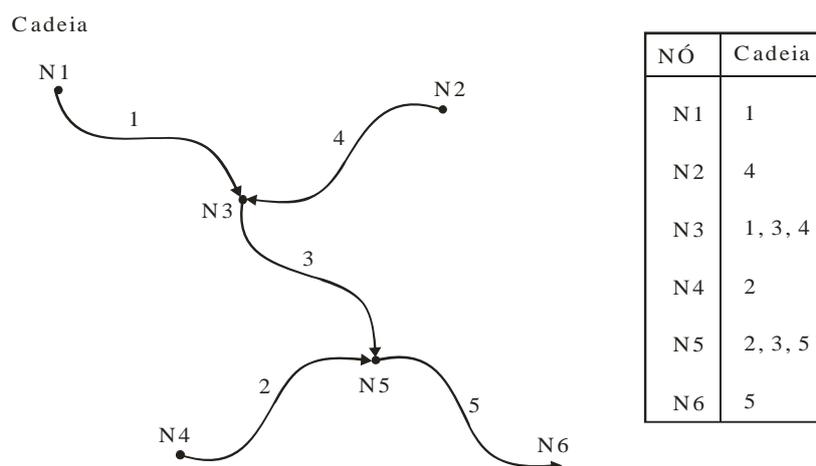
- a) possibilita a verificação do processo de criação de dados espaciais por meio de um instrumento matemático robusto;
- b) aumenta a eficiência computacional de consultas complexas com base na identificação de adjacências ou pertinência.

Dessa forma, as relações espaciais são tipicamente armazenadas nos respectivos quadros de atributos, de polígonos ou de arcos dos planos de informação, evitando-se redundâncias ou repetição de dados.

Ainda segundo Ribeiro (2001), há duas formas de representações topológicas:

- a) arco-nós: é a representação vetorial associada a uma rede linear conectada por nós, que é o ponto de interseção entre duas ou mais linhas, correspondente ao ponto inicial ou final de cada uma delas. Nenhuma linha poderá estar desconectada das demais para que a topologia de rede possa ficar totalmente definida, conforme mostrado na Figura 14.

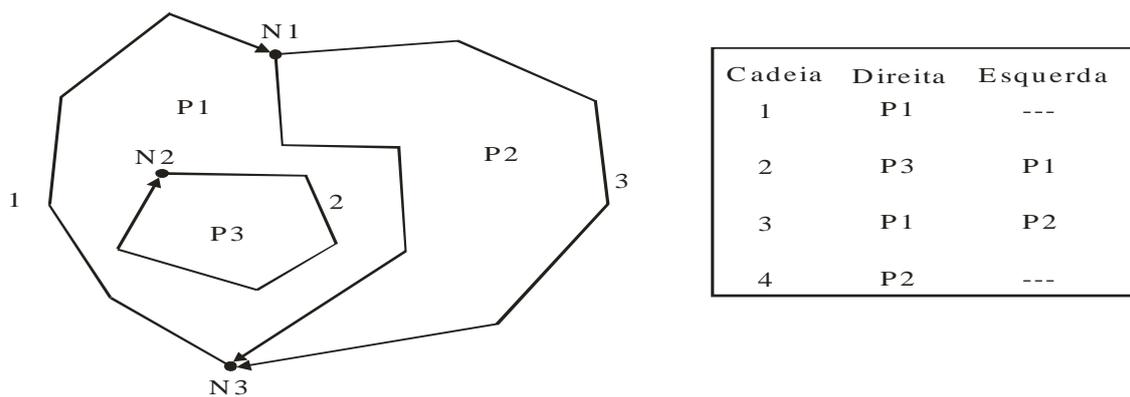
Figura 14 - Topologia de nós e de rede para um conjunto de arcos



Fonte: Ribeiro, 2001

- b) arco-nó-polígono: utilizada quando se quer representar elementos gráficos do tipo área. Na Figura 15 observa-se, uma vez que cada cadeia está orientada, que é possível determinar o polígono à direita e à esquerda, bem como identificar polígonos adjacentes (P1 e P2), aqueles que compartilham uma mesma cadeia (N3).

Figura 15 -: Topologia de arcos para um conjunto de polígonos.

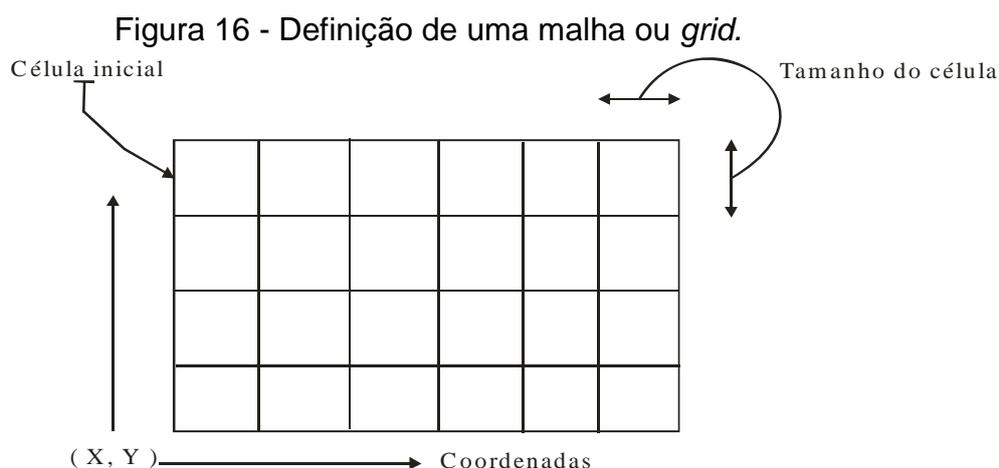


Fonte: Ribeiro (2001)

Quando as relações espaciais são estruturadas topologicamente, os dados redundantes são eliminados, porque o mesmo arco poderá ser usado para representar uma feição linear, uma parte do limite de uma área ou ambas. Por outro lado, estruturas geométricas de dados armazenam apenas a geometria das feições. Uma vez que a topologia não é armazenada, os limites comuns pertencentes a polígonos adjacentes são armazenados duas vezes, uma para cada polígono do qual faz parte.

O modelo matricial permite perceber o espaço como um campo contínuo de coordenadas cartesianas, onde para cada localidade existe um atributo (RIBEIRO, 2001).

Essa forma é basicamente utilizada quando se investigam os fenômenos que variam de uma maneira suave e contínua ao longo do espaço: elevação, temperatura, precipitação. Nesse modelo de dados, o mundo é representado como uma superfície subdividida em uma malha regular de células de mesmo tamanho - Figura 16.



Fonte: Ribeiro (2001).

O sistema de informação geográfica pode ser entendido, nas situações acima apresentadas, como um poderoso elo entre diferentes campos da pesquisa. Assim, os sistemas de informações geográficas possuem um amplo campo de atuação. Caracterizando-se em função de três domínios: a natureza empírica da realidade, o modo de observação, os propósitos e a interação humana.

5.2 Instrumentos do Sig Web

O crescimento populacional desordenado nas cidades, com aglomerações de pessoas, maior fluxo de veículos e geração de resíduos, torna necessário o planejamento do transporte e coleta dos resíduos em todo o perímetro urbano onde o problema é notório. A roteirização do sistema de transporte e a coleta de resíduos sólidos urbanos são ferramentas que reduzem as consequências da falta de planejamento.

O gerenciamento dos resíduos urbanos é um conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento que uma administração municipal desenvolve para coletar, segregar, tratar e dispor os resíduos de uma cidade (VILHENA, 2002).

Uma coleta mal planejada encarece o transporte, gera prejuízos e reclamações, prejudica o tratamento e a disposição final dos resíduos. O itinerário de coleta é o trajeto que o veículo coletor deve percorrer dentro de um mesmo

setor, em um mesmo período, transportando o máximo de resíduos em um mínimo de percurso.

O avanço das tecnologias tem provocado profundas mudanças nas metodologias e nas aplicações de inúmeras ferramentas e segmentos das ciências. A informática é sem dúvida a grande responsável por boa parte desta evolução. O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um bom exemplo de área da geografia desenvolvida a partir da evolução da informática, que mescla precisão, eficiência, rapidez no processamento e manipulação dos dados.

Para Batella (2009), o SIG é classificado como um sistema que permite ao usuário coletar, manusear e analisar dados georeferenciados, automatizar a produção de documentos cartográficos, modelagem espacial, produção de gráficos e gerenciamento de vários outros tipos de informações com interação amigável com o cliente.

Em geral, a maioria dos pesquisadores converge suas opiniões ao estabelecer o conceito de SIG, constituindo definições complementares e não excludentes.

No ambiente de um SIG, as entidades do mundo real podem ser didaticamente descritas por dados espaciais ou de atributos. A manipulação destes dados com o objetivo de extrair informações é denominada análise geográfica. O registro dos atributos pode ser feito de acordo com várias escalas ou níveis de medidas, dependendo do grau de refinamento que se queira dar à descrição do objeto de estudo. Conceitualmente podem-se dividir as operações de análise geográfica em três grupos:

- a) operações de manipulação: usadas, por exemplo, para classificar tematicamente um atributo em função do seu valor em cada posição, ou combinar atributos diferentes com o objetivo de encontrar alguma correlação espacial entre eles;
- b) operações de consulta espacial: usadas, por exemplo, para recuperar de um banco de dados um conjunto de dados que satisfaça a uma condição definida pelo usuário. O SIG, como resultado de uma operação de consulta, pode ser, posteriormente, manipulado ou simplesmente visualizado através de uma operação de apresentação;

- c) operações de apresentação: usadas para controlar as possíveis formas de visualização dos resultados das operações de manipulação ou de consulta, geralmente são apresentadas em forma de mapas.

A tecnologia SIG tem tido enorme impacto em praticamente todos os campos que gerenciam e analisam dados geograficamente distribuídos. No contexto da logística, várias empresas, nos setores públicos e privados, baseiam suas decisões de planejamento de transportes em SIG, utilizando suas potencialidades com relação a ferramentas de gerenciamento, armazenamento e processamento de dados.

5.3 Geração da matriz de distâncias

Para um uso eficaz das ferramentas do SIG é necessário um alinhamento entre os objetivos da aplicação e seus instrumentos. Para a roteirização de veículos utilizando-se o SIG, a matriz que contém as distâncias entre cada par cliente/candidato é a entrada primária para se resolver qualquer problema de localização que tenha como objetivo a minimização de custos, de distâncias e transportes quando relacionados às distâncias percorridas entre pontos de oferta e demanda. Uma vez criada esta matriz, ela servirá de base para a resolução do problema de localização para diferentes cenários, devendo ser recalculada apenas se novos nós forem adicionados à rede ou se aparecerem novas vias.

A matriz de distância pode ser calculada a partir de dois métodos distintos dentro do software SIG: pela rede viária ou baseada nas distâncias euclidianas entre os pontos.

$$f(x, y) = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}$$

O método que faz uso da rede viária, representado por camada específica de linhas, é mais preciso e realista que o segundo método baseado em distâncias euclidianas.

Para se utilizar este método é necessário que se tenha, inicialmente, criado uma rede. A criação desta rede se faz a partir da camada que contém as rodovias, a qual armazena as distâncias de cada segmento da malha viária,

composta por arcos e nós, estando cada segmento relacionado a um identificador único (coordenadas) presente na base de dados relacionado na matriz de origem-destino. Nem sempre o menor caminho, em termo de distâncias, é aquele que permite o menor tempo de deslocamento ou o menor custo percebido.

Neste trabalho, a escolha foi a de encontrar o menor caminho. A determinação do menor caminho é encontrado pelo algoritmo de Dijkstra, que é muito utilizado e aparece com frequência, de maneira direta ou indireta, em processos de otimização em redes de transportes.

O algoritmo de Dijkstra constrói o menor caminho de um ponto a outro (SYSLO et al., 1983). Para este trabalho, optou-se pelo algoritmo de Dijkstra considerando, ainda, que não haja restrições para ir de uma zona a outra, desde que se construa o menor caminho entre os centroides das zonas indicadas pelo cromossomo com origem e destino coincidentes para obter rotas circulares. Considera-se a distância euclidiana para calcular as distâncias entre os centros dos centroides.

O Algoritmo Menor-Caminho-Dijkstra (SYSLO et al., 1983)

INICIAÇÃO:

para todo $v \in V$ **faça**

início

$\text{dist}(v) \leftarrow \infty$;

$\text{final}(v) \leftarrow \text{falso}$;

$\text{pred}(v) \leftarrow -1$;

fim;

$\text{dist}(s) \leftarrow 0$;

$\text{final}(s) \leftarrow \text{verdade}$;

$\text{recente} \leftarrow s$;

(, o nó s é rotulado permanentemente com 0. Todos os outros nós são rotulados temporariamente como ∞ , o nó s é o nó mais recente rotulado como permanente)

ITERAÇÃO:

enquanto $\text{final}(t) = \text{falso}$ **faça**

início

para todo sucessor imediato v do recente se não $\text{final}(v)$ **faça**

início {, atualiza os rótulos temporários.}

$\text{novorótulo} \leftarrow \text{dist}(\text{recente}) + W_{\text{recente}, v}$;

se $\text{novorótulo} < \text{dist}(v)$ **então**

início

$\text{dist}(v) \leftarrow \text{novorótulo}$;

$\text{pred}(v) \leftarrow \text{recente}$;

fim; {, re-rotula v se houver um caminho menor pelo nó recente e

torna recente o predecessor de v no menor caminho de s .}

fim;

```

deixa que y seja o nó com o menor rótulo temporário, o qual é  $\neq \infty$ ;
final(y)  $\leftarrow$  verdade;
recente  $\leftarrow$  y
{. y, o próximo nó para rotular permanentemente s .}

```

fim.

Fonte: Syslo et al. (1983)

A ideia básica do algoritmo de Dijkstra é sair de um nó inicial s , ir até um nó final t , rotulando os nós seguintes com a distância de cada um até s , escolhendo como próximo nó aquele que estiver a uma menor distância de s .

Uma vez determinado que o nó u represente a menor distância de s rotula-se u como permanente e os demais como temporários. Em seguida, o nó seguinte mais próximo de u será rotulado de permanente e assim por diante até que se chegue ao ponto final t .

Para iniciar o algoritmo, rotula-se s de 0, já que essa é a distância de s para ele mesmo. Todos os outros nós são rotulados com ∞ , temporariamente, até que sejam alcançados e escolhidos como o nó mais próximo do antecessor.

Neste caso o nó é rotulado com o valor da distância acumulada até s e passa a ser considerado nó permanente.

O algoritmo de Dijkstra pode ser adaptado para situações onde o nó de origem coincide com o nó de destino, em um itinerário circular.

A partir da determinação do caminho mínimo da rota é possível aplicar a função objetivo e avaliar a aptidão de cada cromossomo.

Para a aquisição das rotas fez-se uso das coordenadas dos nós da rede, usando a busca do Google maps, da empresa google, que é um serviço de pesquisa e visualização de mapas e imagens de satélite da terra. É uma ferramenta livre e disponível na web.

6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ROTEIRIZAÇÃO

Este capítulo descreve a fundamentação matemática do problema de roteirização de transporte de resíduo sólido urbano doravante denominado de Sistema de Roteirização do Transporte de Resíduos Sólidos Urbanos (SRTRSU) por meio da integração dos recursos do Sistema de Informação Geográfico (SIG) com o uso dos recursos da web.

6.1 Formulação do problema de roteirização de veículo

A classificação do problema de transporte proposto por Bodin et al (1993) no qual foram aplicadas as restrições ou instâncias do modelo de transporte de Christofides et al (1979). O algoritmo gerado neste trabalho tem as características listadas a seguir:

- a) tamanho da frota disponível: **infinita**;
- b) tipo da frota disponível: **homogênea**;
- c) localização da frota disponível: **em uma única garagem**;
- d) natureza da demanda: **determinística, sem permissão de faltas**;
- e) localização da demanda: **nos nós**;
- e) restrições temporais da demanda: **não existentes**;
- f) redes subjacentes: **rede euclidiana**;
- g) restrições de capacidade do veículo: **iguais para todos os veículos**;
- h) restrição de duração máxima da rota: **iguais para todas as rotas**;
- i) operação: **somente entrega ou somente coleta**;
- j) custos: **somente custos variáveis em função do tempo de rota e de carga/ descarga**;
- k) objetivo: **minimizar o total dos custos variáveis**.

Segundo Bodin et al (1993), as instâncias relacionadas acima caracterizam um problema de roteirização básico. No entanto, neste trabalho, por meio da integração dos problemas clássicos da pesquisa operacional com os recursos da web e do sistema de informação geográfico é possível a construção de algoritmos flexíveis que permitam a interação dos operadores do sistema de transporte de resíduos sólidos de modo a tornar sua utilização corriqueira.

As características listadas em um sistema de transporte mostram que os custos nas rotas são variáveis em função do tempo durante o qual o veículo

fica na rota. O tempo consumido é proporcional à distância entre os nós, cuja distância é dada pela fórmula da **distância Euclidiana** e que o tempo depende do fluxo na malha viária, dificultando a aplicação da roteirização em problemas reais. Isto exige eventuais relaxações em função dos horários de pico e do sentido do trânsito na via.

6.2 Formulação Matemática

As hipóteses mencionadas acima permitem a seguinte formulação matemática:

Seja o grafo cíclico orientado, $G = \{V, A\}$, onde $V = (v_0, v_1, v_2, \dots, v_n)$, é um conjunto de n pontos e $A = (v_i, v_j): i, j \in V$ é um conjunto de arcos entre os vértices em V . O ponto v_0 é a base inicial, onde estão os veículos. Os pontos $v_i, 1 \leq i \leq n$ são os pontos a serem atendidos para cada demanda q_i . A cada arco $(v_i, v_j), (i, j \in V)$ está associado um valor não negativo c_{ij} que representa o tempo de viagem ou custo entre os pontos de entrega. As restrições dos veículos da frota homogênea são as seguintes:

Capacidade máxima é dada por Q ;

Tempo máximo de rota é dado por D ;

O tempo consumido entre os pontos v_i e v_j é dado por t_{ij} e o tempo de parada do veículo K no ponto v_i é t_{ki} ;

A função objetivo a ser minimizada neste problema de roteirização é o custo total das rotas dada pela equação:

$$\text{minimizar } \sum_i \sum_j \sum_k c_{ij} X_{ijk},$$

onde X_{ijk} é a variável binária que se igual a 1 indica que o veículo k viaja do ponto i ao ponto j . As restrições do problema são então:

$$\sum_i \sum_k X_{ijk} = 1, \text{ para todo } j \quad (1)$$

$$\sum_j \sum_k X_{ijk} = 1, \text{ para todo } i \quad (2)$$

$$\sum_i X_{ipk} - \sum_j X_{pkj} = 0, \text{ para todo } p, k \quad (3)$$

$$\sum_i q_i (\sum_j X_{ijk}) \leq Q, \text{ para todo } k \quad (4)$$

$$\sum_i t_{ik} (\sum_j X_{ijk}) + \sum_i \sum_j t_{ij} X_{ijk} \leq D, \text{ para todo } j \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{0jk} \leq 1, \text{ para todo } i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{i0k} \leq 1, \text{ para todo } j \quad (7)$$

$$X_{ijk} \in (0, 1) \quad (8)$$

$$\sum_{i,j \in S} X_{ijk} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq \{2, \dots, n\} \forall k \quad (9)$$

As restrições 1 e 2 garantem que um, e apenas um veículo, fará a viagem entre dois pontos. A restrição 3 assegura que o veículo que atende a um ponto sairá deste para fazer outra viagem. A restrição 4 e 5 não permite que a capacidade do veículo e o tempo de rota sejam excedidos. As restrições 6 e 7 garantem que cada veículo só sairá do depósito e retornará a ele uma única vez. A restrição 8 garante que as variáveis X_{ijk} sejam binárias.

As condições de continuidade e de realização de uma única rota não garantem por si só que o conjunto de soluções represente rotas válidas. Soluções inválidas são aquelas que foram as chamadas sub-rotas e a impossibilidade de ocorrência de sub-rota não contendo o depósito é assegurada pela restrição 9, sendo S qualquer subconjunto de pontos alocados a um veículo, excluindo-se o depósito, que não se repete e que fazem parte de um mesmo roteiro. O número máximo de arco que pode existir neste roteiro não pode ser maior que o número de pontos menos uma unidade, evitando, assim, fechar o ciclo entre os pontos (BODIN et al, 1993; MILLER, 2010).

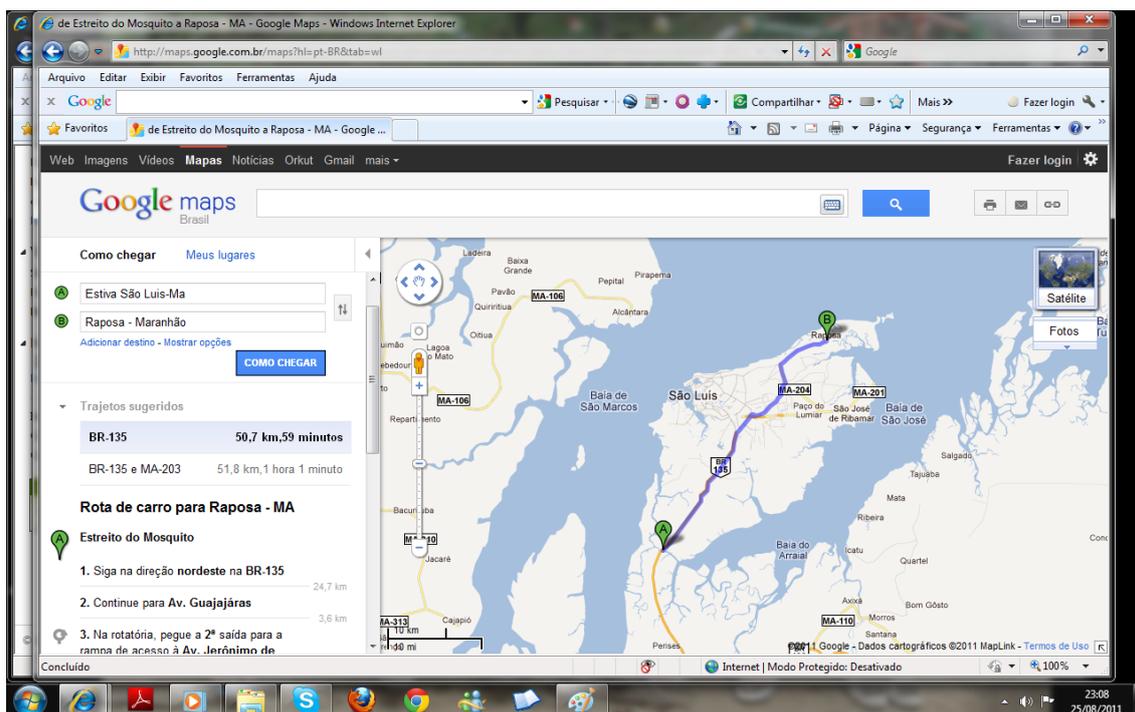
6.3 Recursos da Web

As aplicações da web, atualmente, são altamente dinâmicas e interativas, graças à utilização de uma técnica denominada AJAX, que é uma combinação de várias tecnologias, tais como Java script e o XML.

O Google Web Toolkit (GWT) é um framework Java, de código aberto, para implementação de aplicativos AJAX. Neste modelo as aplicações web têm características e funcionalidade similares a aplicações para desktop.

O Google maps é um serviço de visualização de mapas e imagem da terra. É um serviço gratuito na web, fornecido pela empresa Google, que disponibiliza a sua API Application Programming Interface ou Interface de Programação de Aplicativos de manipulação de mapas a terceiros bastando, para isso, a obtenção de uma chave mediante um cadastro. Com isso o serviço estará à disposição do cliente para uso indefinidamente. Como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Rota encontrada pelo Google maps na ilha de São Luís – Ma



Fonte: Google Maps

Com ele é possível traçar rotas entre quaisquer pontos da superfície terrestre. Porém ele não faz a otimização destas rotas. Uma vez encontradas todas as coordenadas geográficas dos nós das rotas pelo Google maps, e transformando-as em coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM)

aplica-se esses dados à caixa de ferramentas do algoritmo genético do matlab. Com isto, o problema de transporte proposto por Bodin et al (1993) e com as coordenadas geográficas encontradas nos nós das rotas pode-se obter a otimização das mesmas.

É necessário que se faça a conversão das coordenadas geográficas para a coordenada Universal Transversa de Mercator (UTM), visto que o matlab não reconhece os minutos e segundos da latitude e longitude. Para a transformação das coordenadas geográficas em UTM, utilizou-se o Transcood, que é um aplicativo desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), do Estado de São Paulo. Ele é utilizado para transformar as Coordenadas Geográficas, geralmente disponibilizadas em unidades de graus, minutos, segundos e décimos de segundos, para a projeção UTM, geralmente disponibilizadas em metros ou quilômetros, nas coordenadas Norte e Leste. O transcood permite tanto a transformação de coordenadas geográficas para UTM, como o contrário. Abaixo é exibida a tela do transcood.

Figura 18 - Tela do Transcood.

The screenshot shows the 'TransCoord' application window titled 'Transformação de Coordenadas (Elipsóide SAD-69)'. It features two main sections: 'Coordenadas Geográficas' and 'Coordenadas UTM'. The 'Coordenadas Geográficas' section includes input fields for Latitude (0° 0' 0" 0) and Longitude (0° 0' 0" 0). The 'Coordenadas UTM' section includes input fields for North (Norte (m): 0 0) and East (Este (m): 0 0). A red arrow button points from the geographic coordinates to the UTM coordinates, and a green arrow button points from the UTM coordinates back to the geographic coordinates. Below these sections, there is a 'Hemisfério' section with radio buttons for 'Sul' (selected) and 'Norte', and a 'Longitude do Meridiano Central' field set to 51. The 'TransCoord' logo is displayed in red and green, with the text 'Versão 1.0 Novembro / 1999' and 'Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica' below it. An 'Encerrar' button is located at the bottom right.

Fonte: DAEE

Para otimizar as rotas e fazer a roteirização do transporte nestas rotas, deve-se encontrar as coordenadas geográficas - latitude e longitude. Essas coordenadas são transformadas em unidades UTM, colocando-as nas instâncias do AG como população inicial do PCC, obtendo, assim, a otimização das rotas definidas pelos coordenadas dos nós, encontradas pelas coordenadas geográficas. Assim o gráfico das coordenadas mostra as coordenadas reais no mapa, gerada pelo SIG. A matriz de distância dá os custos entre todos os nós do

percurso. O gráfico da distância total dá a distância total percorrida na rota, enquanto o gráfico de convergência dá a melhor solução atual de convergência para o ótimo do problema em questão. Como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Face gráfica da das rotas otimizadas, feitas pelo roteador proposto.

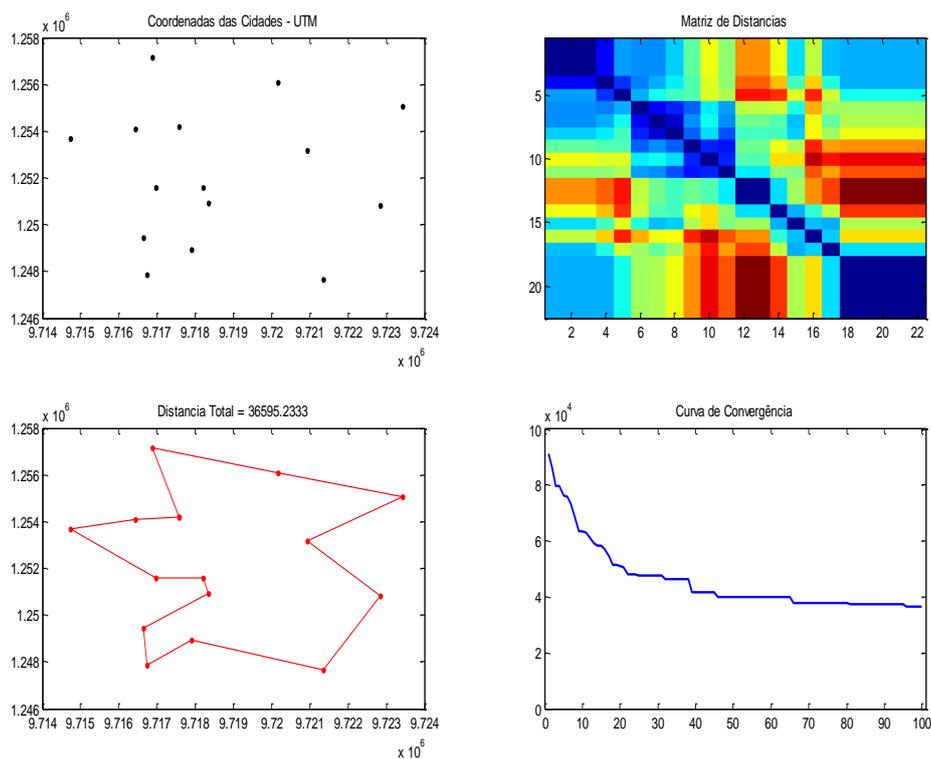
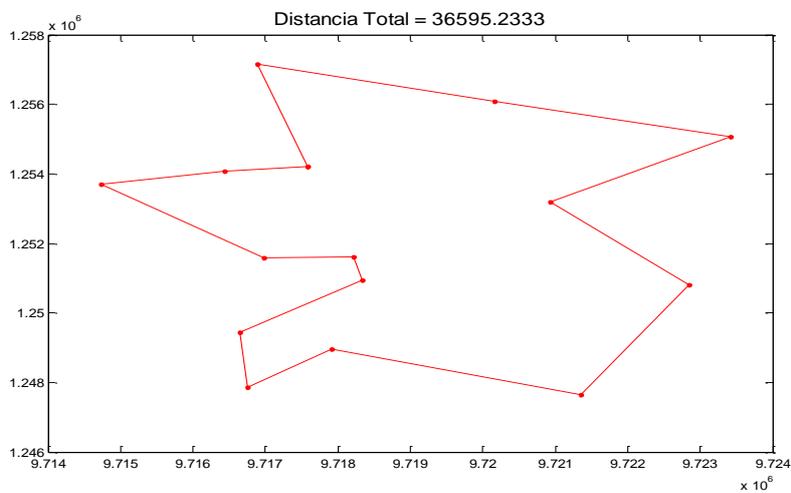


Figura 20 - Rota ótima construída com a interação do AG ao SIG e à web.



O vetor solução do problema: 10 9 11 2 1 7 4 12 5 3 6 22 21 8 13 20 19 16 17 14 15 18.

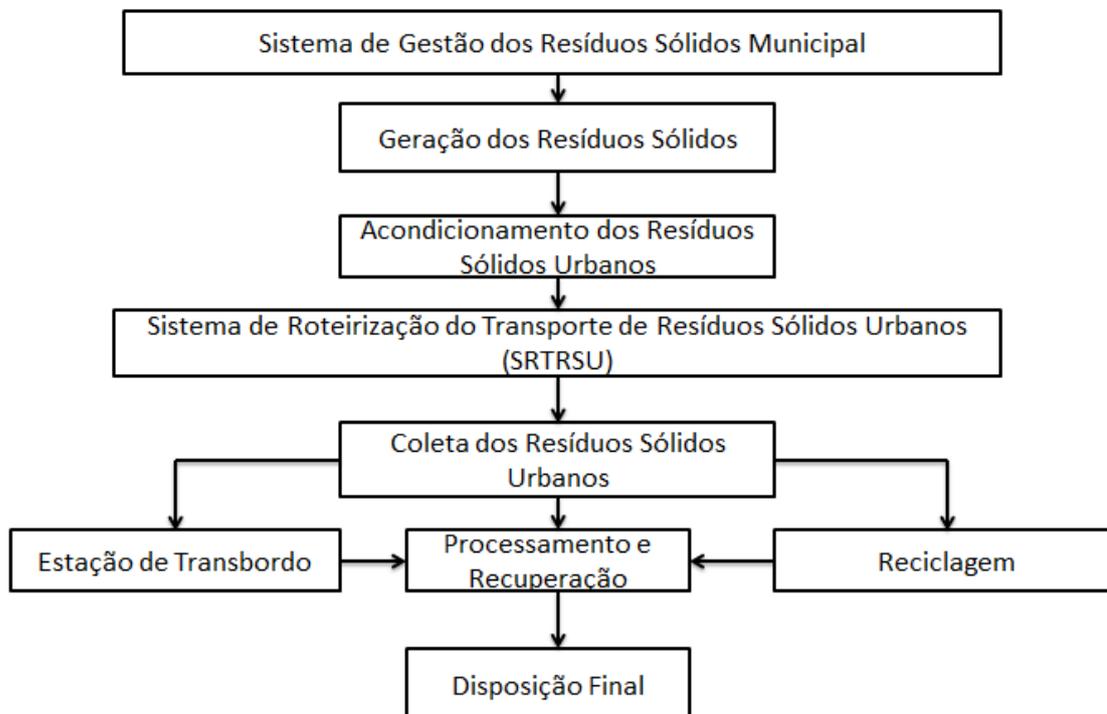
A solução do problema é o vetor do percurso designado pelo roteador. Todos os nós da rede são representados pela sequência de pontos que, neste caso, indica que o veículo localizado no nó inicial da rede, deve fazer o seguinte caminho:

10 → 9 → 11 → 2 → 1 → 7 → 4 → 12 → 5 → 3 → 6 → 22 → 21 → 8 → 13 → 20 → 19 → 16 → 17 → 14 → 15 → 18 → 10.

A escolha na determinação da sequência na rota do SRTRSU é completamente aleatória e há sempre um caminho implícito entre o ponto terminal da rota e o ponto inicial da mesma.

O modelo proposto segue a ordem, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Modelo de gerenciamento proposto.



Observa-se que, Tchobanoglous (1977) mostra que as atividades gerenciais ligadas aos resíduos sólidos podem ser agrupadas em seis elementos funcionais: geração, acondicionamento, coleta, estação de transbordo, processamento e recuperação e disposição final. Mostrado na Figura 1.

No modelo proposto neste trabalho, o sistema de roteirização foi planejado para operar de modo a otimizar as rotas de coleta seguindo os elementos gerencias proposto por Tchobanoglous, como indica a Figura 21.

A aplicação na ilha de São Luís do Maranhão foi dificultada pelo fato de, mesmo existindo um sistema de roteirização, a sua aplicação não é feita adequadamente. Segundo o gerente de transporte da empresa responsável, no setor pesquisado, isso se deve a má formação dos operadores do sistema e, principalmente, às interferências políticas feitas pelas prefeituras.

Ainda, segundo o gerente da empresa responsável pela limpeza e transporte dos resíduos sólidos, do setor pesquisado, a empresa utiliza o sistema de roteador, principalmente, para localização e atendimento de problemas mecânicos na frota. O sistema de coleta é feito a partir de pontos cadastrados pela prefeitura, eliminando, segundo ele, a necessidade de um sistema de roteirização.

Ao comparar as rotas feitas pela empresa e as feitas pelo sistema de roteirização do transporte de Resíduos Sólido Urbano proposto por este trabalho, seguindo as coordenadas dos pontos cadastrados pela prefeitura, percebeu-se um ganho de economia em torno de 5,3% no tempo médio gasto no transporte no mesmo percurso feito sem a aplicação do sistema de roteirização, a partir de 20 pontos cadastrados. Com 36 pontos cadastrados o ganho passa a 6%. Justificando a aplicação do sistema proposto.

Os pontos cadastrados são locais predeterminados onde a população deposita seus resíduos utilizando, para isso, o serviço dos 1328 carroças a tração animal cadastradas na prefeitura.

Não foi feito a comparação com o sistema completo de coleta na área de cobertura da ilha de São Luís, devido ao fato da área total ser dividida entre três empresas diferentes dentre elas mais a empresa de limpeza pública urbana do município de São Luís e o tempo exíguo disponível para este fim.

7 CONCLUSÃO

Atualmente, a grande geração de resíduos sólidos é um dos problemas que tem se tornado de difícil solução, em especial, nos grandes centros urbanos. Uma vez que o aumento da população mundial, e o fato de que mais da metade desta população viverem em centros urbanos, não só tem gerado, nesses locais, resíduos domiciliares, que por si só representam um desafio para os gestores públicos, como também tem produzido uma gama de outros tipos de resíduos que por apresentarem características diferentes e volumes crescentes exigem um gerenciamento rigoroso e adequado às suas peculiaridades.

Esses fatores explicam o porquê do problema da coleta e transporte de resíduos sólidos deve ser encarado de maneira multidisciplinar pelas conotações sócio-econômico-culturais e de políticas sustentáveis (IKUTA, 2010). É nesse contexto que uma proposta de roteirização, ótima, pode levar à redução dos custos operacionais da coleta e do transporte dos resíduos sólidos urbanos. A proposta de qualquer modelo de gestão nesta área deve ser preparada, também, para acompanhar o dinamismo da cidade, visto que ao mesmo tempo em que as cidades crescem em população e extensão, passam constantemente por modificações em suas redes viárias. Para atender a esta dinâmica os gestores, responsáveis por estes serviços, necessitam de respostas rápidas e confiáveis e ao mesmo tempo, onerem menos o orçamento do município.

Para alcançar o objetivo inicialmente estabelecido nesta dissertação, foi feita a busca de definições e caracterização dos resíduos sólidos urbanos. Em seguida, buscou-se informação sobre técnicas da pesquisa operacional aplicada a problemática de gerenciamento de coleta e transporte de resíduos sólidos. Desenvolveu-se o estudo e a proposição de um algoritmo para resolver o Problema do Carteiro Chinês, utilizando a metaheurística Algoritmo Genético integrado ao sistema de informação geográfico e aos recursos da web para a otimização das rotas de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos. Isto foi plenamente alcançado.

A escolha pela metaheurística Algoritmo Genético se justifica por se tratar de um método robusto no tratamento dos dados relacionados ao problema e pode encontrar o ótimo global, não se prendendo a um ótimo local anteriormente

encontrado. O sistema funcionará do seguinte modo: o pessoal responsável pelo gerenciamento dos resíduos do município encontram as coordenadas no espaço de busca da rota desejada, por meio do Google maps, transformam estas coordenadas, utilizando o transcoord, fornecem as coordenadas transformadas ao artefato proposto que mostrará na tela do computador a rota otimizada. O modelo utilizou um grafo cíclico orientado $G = (V, A)$ para representar o setor de coleta, facilitando a programação computacional do cálculo da rota mais econômica.

Esta dissertação teve o propósito de gerar um artefato, no caso um software para contribuir com os sistemas de gestão de resíduos sólidos nos municípios maranhenses. Além de fazer aplicação do artefato gerado, comparando sua eficiência com os sistemas de roteamento existente, objetivando verificar sua eficácia na geração da melhor rota. Para isso, utilizou ferramentas livres que permitem a economia de recursos e a possibilidade de implantação em todos os municípios, independentemente da disposição de recursos. E assim, esta dissertação cumpriu o seu objetivo com o caráter social inicialmente almejado.

7.1 Recomendações para trabalhos futuros.

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são uma poderosa ferramenta na busca de soluções otimizadas para o problema em questão. À medida que o problema tende a se tornar mais complexo, com introdução de mais variáveis, a solução do AG torna-se mais lenta devido à explosão exponencial a que ele está submetido.

A sugestão para trabalhos futuros é a de que se faça a utilização de AGs híbridos de forma a potencializá-los para a resolução de problemas mais complexos com maior velocidade.

Recomenda-se desenvolvê-lo com mais funcionalidade, de modo a torná-lo um sistema completo de roteirização de veículos e, assim, incorporá-lo a um sistema de gestão empresarial, responsável por todas as etapas do gerenciamento de resíduos sólidos do município. Além da aplicação no modelo de busca em dois ou mais estágios, com as estações de transbordo como sub-base de distribuição, onde se dará o pré-processamento e reciclagem dos resíduos e de onde o restante, não aproveitável, seguirá para o aterro de disposição final

adequado. Neste ponto o processo de otimização será abordado pela programação linear inteira, muito estágio integrado ao AG para o processo de busca da rota ótima.

Recomenda-se ainda, sua implantação nos mais diversos municípios maranhenses e posteriormente em outros municípios da federação, acompanhando suas adaptações ao dinamismo inerente à política da gestão dos resíduos sólidos de cada um deles.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. Bases conceituais e papel do conhecimento da previsão dos impactos. In: _____. **Previsão de impactos**. São Paulo: EdUSP, 2002. p. 32.
- ALBAYRAK, M.; ALLAHVERDI, N. Development a new mutation operator to solve the traveling salesman problem by aid of genetic algorithms. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 3, p.1313-1320, 2011.
- ALMEIDA, Jane Rabelo. **Condições de trabalho dos catadores de materiais recicláveis**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Sustentabilidade) - Centro Universitário de Caratinga. Caratinga, 2007.
- ARAKAKI, R.G.I.; LORENA, L.A.N. Uma Heurística de Localização-Alocação (HLA) para problemas de localização de facilidades. **Revista Produção**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 319-328, 2006.
- ARGOUT, A. R. T. T. **Procedimento para projeto de arranjo físico modular em manufatura através de algoritmo genético de agrupamento**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004. **Resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- BARBOSA, M. **Condições de trabalho em unidades de triagem de resíduo sólido em quatro cooperativas de Campinas, SP: caracterização e percepção de catadores**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.
- BARBIERI, J. C. RAM. **Rev. Adm. Mackenzie**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 51- 82, maio/jun. 2011.
- BATELLA, Wagner. **Introdução ao geoprocessamento**. Belo Horizonte: IEC-PUC Minas: Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2009.
- BESEN, G. R. **Coleta seletiva com a inclusão de catadores: construção participativa de indicadores e de índices de sustentabilidade**. 2011. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Universidade de São Paulo, 2011.
- BIAN, X and L. MI, Development on genetic algorithm theory and its applications. **Application Research of Computers**, v. 27, n. 7, p. 2425–2429, 2010.
- BIELLI, M. CARAMÍNIA, M. CAROTENUTO, P. Genetic Algorithms in Network Optimization. **Transportation Research Part C**, p.19-34, 2002.
- BODIN, L. et al. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. **Computers and Operations Research**, v.10, n. 2 p. 200-211, 1993.

BRAGA, J. O. N. et. al. O uso do geoprocessamento no diagnóstico dos roteiros de coleta de lixo da cidade de Manaus. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 387-394, 2008.

BRASILEIRO, L.; LACERDA, M. Análise do uso de SIG no roteamento dos veículos sólidos de coleta de resíduos sólidos domiciliares. **Revista Engenharia Sanitária**, v. 13, n. 4, p. 326-360, 2008.

BRASIL Governo do Distrito Federal. Congresso Nacional. **Lei nacional de resíduos sólidos**. Disponível Em: <<http://www.gdf.gov.br>>. Acesso em 28 ago. 2011.

BROWN, L. R. **Por uma sociedade viável**. Rio de Janeiro: FGV, 1983.

CÂMARA, G. et al. **Bancos de dados geográficos**. Curitiba: MundoGEO, 2005.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; DAVIS, C. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2003.

CÂMARA, G. et al. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. São José dos Campos, SP: INPE, 1995.

CAMARGO, P.V.; CUNHA, C.B. Uma heurística eficiente para a determinação de agrupamentos (“clusters”) com restrição de capacidade em ambiente e planilha eletrônica. In: **Congresso Anual da ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, Brasília, Anais, v.20, p.1437-1448, 2006.

CARRARA, C. M.; AGUIAR, E. M.; FARIA C. A. Localização de terminais logísticos urbanos com o uso de ferramentas SIG: aplicação à cidade de Uberlândia. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2006. **Anais...**, Brasília, DF: ANPET, 2006. v. 20. p. 1497-1508.

CHRISTOFIDES, N; MINGOZZI, A.; TOTH, P. The vehicle routing problem. In: _____. **Combinatorial optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1979. p. 315-338.

CHURCH, R.L. Geographical information systems and location science. **Computers & Operations Research**, v. 29, 2002, p. 541-562.

CLAVAL, Paul; CORREA, R. L.; RASENDHAL, Z. A Paisagem dos Geógrafos, In: _____. **Paisagens, texto e identidade**. 2002. 240 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

COELHO, H.M.G. et al. Proposta de um índice de destinação de resíduos sólidos industriais. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 307-316, jul./set. 2011.

CRESWELL, J. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

CUNHA, V.; CAIXETA FILHO, J. V. Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas. **Revista Gestão e Produção**, v. 9, n. 2, p. 143-161, 2002.

DEB, K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. In: _____. **Wiley-interscience series in systems and optimization**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

DE JONG, K. A. **Evolutionary computation: a unified approach**. Cambridge, MA: MIT Press, 2006. Disponível em: <http://www.cs.gmu.edu/~eclab/projects/ec_courseware>. Acesso em: ago. 2011.

DRÉO, J. et al. **Metaheuristics for hard optimization: methods and case studies**. New York: Springerlink, 2005.

EASTMAN, J.R.; NEETI, N. A contextual mann-Kendall approach for the assessment of trend significance in image time series, **Transactions in GIS**, v. 15, n. 5, p. 599-611, 2011.

FAN, X. et al. A solid waste collection optimization considering energy utilization for large city area. **IEEE**, v. 38, p.1904-1909, 2010.

FANG, C. Genetic algorithm and Its application in TSP Problem. **Journal of Sichuan College of Education**, v. 24, n. 1, p. 110–112, 2008.

FLEURY, P.F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K.F. **Logística empresarial: a perspectiva brasileira**. São Paulo: Atlas, 2000.

FRACCAROLI, E.S. Análise de desempenho de algoritmo evolutivo no domínio do futebol de robôs. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FURQUIM, Antônio Jorge. **Principais características e diferenças entre sistemas SIG desktop e SIG WEG**. Curitiba: Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A, 2008.

GOLDEN, B.L.; BODIN, L. Microcomputer-based vehicle routing and scheduling software. **Computers and Operations Research**, v. 13 n. 2, p. 277-285, 1986.

GONÇALVES, A. R.; VON ZUBEN F. J. Hybrid evolutionary algorithm guided by a fast adaptive Gaussian mixture model applied to dynamic optimization problems. In: WORKSHOP ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, JOINT CONFERENCE, 3., 1986, São Paulo. **Proceeding...**, São Bernardo do Campo, SP: 2010. p. 553-558.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison-Wesley, 1989.

GONZÁLEZ, T. P. Barriers to the implementation of environmentally oriented reverse logistics: evidence from the automotive industry sector. **Wiley Online Library**, v. 21, n. 4, p. 889-904, 2010.

GRIMBERG, E. Coleta seletiva com inclusão social. In: FÓRUM LIXO E CIDADANIA NA CIDADE DE SÃO PAULO: EXPERIÊNCIA E DESAFIOS. 2007, 2007. **Anais...** São Paulo: Instituto Pólis, 2007. 148p. 2007.

GUERASIMOV, I. **A Sociedade e o Meio Natural**. Moscou: Ed. Progresso, 1983.

GUTHER, W. M. R. **Resíduos sólidos no context da saúde pública**. 2008. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Departamento de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, 2008.

HEMMELMAYR, V. et al. **A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems**. New York: Springer Link, 2011. .

HEVNER, A.R. et al. Design science in Information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, n. 1, p.75-105, 2004.

HOLLAND, J.H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Michigan: Univ. of Michigan Press: Ann Arbor, 1975.

IPT lixo municipal: manual de desenvolvimento integrado: relatório técnico, São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. Ministério da Ação Social. Secretaria Nacional de Saneamento. **Cartilha de Limpeza Urbana**. Disponível em: <<http://www.ibam.org.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm>>. Acesso em: 2 ago. 2009.

IYODA, E. M. **Inteligência computacional no projeto automático de redes neurais híbridas e redes neurofuzzy heterogêneas**. Campinas, 2000.

IKUTA, F. A. **Resíduos sólidos urbanos no Pontal do Paranapanema: inovação e desafios na coleta seletiva e organização de catadores**. 2010. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2010.

JARDIM, N. S. (Coord.) **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT: CEMPRE, 1995.

JARDIM, N. S.; et al. Gerenciamento integrado do lixo municipal. In: _____. **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2000. cap. 1, p. 3-25.

SOUZA, Maria Tereza Saraiva de. Rumo à prática empresarial sustentável. **RAE**, São Paulo, v. 4, n. 33, p. 44, jul/ago. 1993.

SOUSA JUNIOR, C. S. **Metodologia de identificação de topologias em sistemas DSL baseada em otimização evolucionária multiobjetivo**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

LACERDA, E. G. M. ; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Introdução aos algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

LAI, X. Y. Genetic algorithm and its application. **China computer and communication**, p. 117–119, 2010.

LANGLEY, J. Attributes of packaging and influences on waste. **Emerald**, v. 24, n. 3, p. 161–175, 2011.

LEITE, P. R. **Logística reversa**, New York: Pearson Prentice, 2003.

LI, D.; SUN, H, X. An application research of TSP based on genetic algorithm, **Science Technology of Heilongjiang Province**, n. 13, p. 27, 2009.

LIMA, et al. Uma solução para os problemas de localização. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 34., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBPO, 2002.

LOGAREZZI, A. Educação ambiental em resíduo: uma proposta de terminologia. In: _____. **Consumo e resíduo**: fundamentos para o trabalho educativo. São Carlos: EdUFSCar, 2006. p. 216.

LOPES, H. S. **Fundamentos da computação evolucionária e aplicações**. Bandeirantes, PR, 2006.

LUCENA, A. P. ; FALCÃO, E. C. ; SILVEIRA, T. A. Técnicas de geoprocessamento como suporte à relocação da comunidade Porto do Capim. In:, CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 24. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 2. EXPOSICARTA, 22. 2010, João Pessoa. **Anais...** Aracajú, 2010.

MALAY, et al. **Self-crossover and its application to the traveling salesman Problem**. New York: Springer Link Meta Press, 2004.

MALAKAHMAD, A.; KHALIL, N. D. Solid waste collection system in ipoh city. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUSINESS ENGINEERING AND INDUSTRIAL APPLICATION, 2011, Local. **Proceeding....** China: IEEE, 2011. p.174-179.

MARTÍNEZ, et al Genetic algorithms optimization for normalized normal constraint method under pareto construction. **Advances in Engineering Software**, v. 40, p. 260-267, 2009.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithm, numerical optimization, and constraints**. EUA: Eshelman,. 1996.

MILLER, J. Intelligent Transportation Systems Traveling Salesman Problem (ITS-TSP): a specialized tsp with dynamic edge weights and intermediate cities. IEEE Xplore, 2010.

NAPOLEÃO, R. P.; MATTOS, J. T. O uso de geotecnologias como subsidio à gestão dos recursos hídricos: Zoneamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Capivari In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. 2011, Curitiba. **Anais...**Curitiba: INPE, 2011. p. 4744.

ORTÚZAR, J. D., WILLUMSEN, L. G. **Modelling transport**, 2. ed. Willey, 1994.

PFEIFFER, S. C; CARVALHO, E. H. **Otimização de rotas para veículos coletores**. São Paulo: ReCESA, 2009.

PHILIPPI JÚNIOR, A.; BRUNA, G. C.; SILVEIRA, V. F. Planejamento territorial e ambiental. In: _____. **Saneamento, saúde e ambiente**: fundamento para o desenvolvimento sustentável. Barueri: Manole, 2004. p. 623-662.

QUISSINI, Carina Soldera et al. Informações de catadores sobre dificuldades relacionadas ao manejo de resíduos sólidos em centrais de triagem: estudo de caso do município de Caxias do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte, **Anais...** Belo Horizonte, MG, 2007. 1 CD ROM.

RIBEIRO, C. A. A. S. **Sistemas de Informações Geográficas**: introdução ao ArcView. Belo Horizonte, 2001. Apostila de curso.

RODRIGUES, M. Geoprocessamento: um retrato atual. **Revista Fator GIS**, Curitiba, ano 1, n. 2, p. 20-23, 1993.

ROSE, A. **Uma avaliação comparativa de alguns sistemas de informação geográfica aplicados aos transportes**. 2001. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001. p. 75.

ROSS, J; Sanches, L. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e atropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, 1994.

SÃO PAULO. **Política Estadual de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br/.../estadual/leis/2006%20Lei%2012300.Pdf>. Acesso em: 02 agosto. 2011, 22horas.

SCHNEIDER, A. M. **Algoritmo adaptativo genético para acompanhamento da trajetória de alvos móveis**. 1998. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SILVEIRA, T. A., CARNEIRO, A. F. T., PORTUGAL, J. L. Estruturação de bases cartográficas para Sistemas de Informação Geográfica (SIG). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife. **Anais...** Recife, 2008.

SORDI, de J. O. ; MEIRELES, M.; SANCHES, C. design science aplicada às pesquisas em administração: reflexões a partir do recente histórico de publicações internacionais . **Revista de Administração e Inovação**, v. 8, n. 1, p. 10-36, 2011.

SYSLO, M.; DEO, N.; KOWALIK, J.: **Discrete optimization algorithms with pascal programs**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1983.

TANOMARU, J. Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAIS, 21995. **Anais...** 1995.

TCHOBANOGLIOUS, G. **Solid wastes: engineering principles and management**. Tokyo: McGraw-Hill, 1977.

TORRES, Arturo H. **Teste de desempenho em aplicações SIG WEG**. Campinas: Instituto de Computação: UNICAMP, 2008.

VILHENA, A., D'ALMEIDA, M. L. O. (Coord.). Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. In: _____. **Ciência e ambiente**. São Paulo: IPT: CEMPRE, 2002. cap. 1, p. 25-40.

VEGA. **Tecnologia e serviço ao meio ambiente**. Disponível em <<http://www.vega.com.br/item.asp?Id=221>>. Acesso em: 25 ago. 2011.

YU, Y.; CHEN, Y.; LI, T. A New design of genetic algorithm for solving TSP. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON COMPUTATIONAL SCIENCES AND OPTIMIZATION, 4., 2011, Benjian, China, 2011.

YINGYING, Y.; CHEN, Y.; LI, T. **A new design of genetic algorithm for solving**. New York: ACM Digital library, 2011.