

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PLANEJAMENTO DE ROTEIROS DOS VEÍCULOS COLETORES DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

EDSON MARCO CANASSA

FLORIANÓPOLIS - 1992

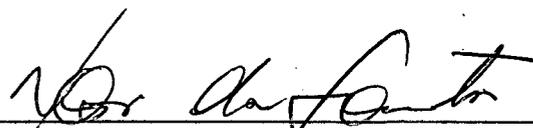
PLANEJAMENTO DE ROTEIROS DOS VEÍCULOS COLETORES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

EDSON MARCO CANASSA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

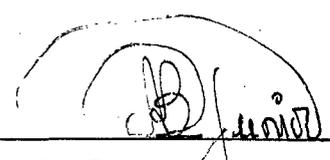
" MESTRE EM ENGENHARIA "

ESPECIALIZADA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

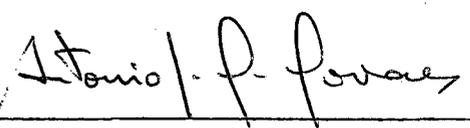


Neri dos Santos, Dr
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

BANCA EXAMINADORA



Armando Borges de Castilho Junior, Dr
Presidente



Antônio Galvão Novaes, Dr



Amir Mattar Valente, M.Sc.

Aos meus familiares

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho, e em especial:

Ao Prof. Dr. Armando Borges de Castilho Jr, pela eficiente orientação fornecida;

Aos Professores Dr Antonio Galvão de Novaes e Amir Mattar Valente, membros da banca examinadora, pelos comentários e sugestões que propiciaram o enriquecimento deste trabalho;

À COMCAP - Companhia de Melhoramentos da Capital, de Florianópolis - SC, que possibilitou a aplicação do modelo proposto;

Ao Engenheiro Edmar O. Arruda pela colaboração no fornecimento dos dados utilizados para elaboração da aplicação;

Ao Pós-graduando Odacir Gracioli, pela colaboração no desenvolvimento dos programas computacionais;

À Universidade Estadual de Maringá e a CAPES, que através dos seus programas institucionais propiciaram a realização deste;

À Universidade Federal de Santa Catarina, pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção;

Aos demais professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da UFSC, pelo apoio e colaboração que prestaram.

RESUMO

O Objetivo deste trabalho é apresentar um modelo eficiente para realizar o planejamento dos roteiros de coleta dos resíduos sólidos urbanos. Trata-se de um estudo que visa minimizar os percursos realizados pelos veículos coletores e melhorar a utilização da capacidade de carga dos mesmos.

Por outro lado, para que as condições reais existentes no processo de coleta fossem abordadas, considerou-se as seguintes situações: 1) as áreas de coleta das cidades de médio e grande porte produzem, geralmente, quantidades de resíduos superiores à capacidade de carga de um veículo coletor; 2) as entradas e saídas dos veículos coletores da rede podem ser realizadas por locais distintos; 3) os volumes de resíduos gerados variam em certos períodos do ano e em certos dias da semana; 4) as redes de coleta podem ser constituídas por ruas de sentido único (redes orientadas), por ruas de sentido duplo (redes não orientadas) ou por ambos os casos (redes mistas).

Para atender os objetivos e as considerações arroladas anteriormente, definiu-se pelo estabelecimento de um modelo composto por duas vias principais para a realização do planejamento. A primeira, através de um procedimento que pode ser totalmente informatizado. A segunda, visando o manuseio de redes que não possibilitam a construção de determinadas etapas no plano bidimensional, através de uma heurística parcialmente informatizada.

Para dar suporte e fundamentação aos procedimentos, foram pesquisados e definidos os algoritmos que proporcionam a construção das etapas do modelo de forma mais eficiente. Por sua vez, para testar a sua eficiência, realizou-se uma aplicação ao planejamento dos roteiros de coleta realizados entre as terças e sextas-feiras, na área central de Florianópolis, S.C., os quais são executados sobre uma rede do tipo orientada, possuindo 147 vértices, 238 arcos, 35.883 metros de comprimento e que gera em média, nestes dias, 30 ton/dia de resíduos sólidos. Como resultado, além da obtenção de uma ferramenta poderosa para o planejamento de roteiros, atingiu-se na aplicação, uma redução no comprimento dos percursos atuais de 13% .

ABSTRACT

The objective of this work is to develop an efficient model to realize the planning of the routes to be used for collecting urban solid wastes. It is a study that aims at minimizing the total mileage used by the collecting vehicles and improve the utilization of their charge capacity.

On the other hand, to take into consideration the real conditions existent in the collecting process the following situations were considered: 1) The collecting areas of cities of large and medium size produce quantities of wastes which are usually bigger than the charge capacity of a collecting vehicle; 2) Incoming and exits path used by collecting vehicles can be accomplished by different places; 3) The quantity of wastes produced, is different in some periods of the year and in some days of the week; 4) Collecting networks can be formed by one-way streets only (directed networks), for two-way streets (undirected networks) or for both cases (mixed networks).

To comply with the objectives and the considerations above mentioned, the model selected contained two principal ways of establish the planning. The first one, is through a procedure that can be totally run by computers. The second one, which allows for handling networks that do not permit the construction of certain stages of the bidimensional plan, uses heuristics partially run in computers.

To give support and fundamentation to the procedures, algorithms were investigated and defined so that they lead to the construction of the stages of the model by the most efficient mean. To test for the model's efficiency, an application for the planning of the collecting routes which occurs between Tuesday and Friday in the central area of Florianópolis - SC was realized. In this case the network is of the type directed, having 147 vertex, 238 arcs, 35.833 meters and contains about 30 ton/day of solid wastes. As result, in addition to having a powerfull instrument for the planning of routes, this case study has shown a redution of 13% in the present mileage.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE QUADROS.....	xv
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I	
1. GENERALIDADES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	8
1.1. INTRODUÇÃO.....	8
1.2. GERAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	9
1.2.1. DEFINIÇÕES DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	10
1.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	11
a) Resíduos domésticos.....	11
b) Resíduos comerciais e industriais.....	11
c) Resíduos hospitalares.....	11
d) Resíduos de varrição.....	11
e) Resíduos especiais.....	12
1.2.3. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	14
a) Composição.....	14
b) Massa ou Volume.....	16
c) Massa Específica.....	18
1.3. ACONDICIONAMENTO.....	18
1.4. COLETA.....	19
1.4.1. OBJETIVOS DA COLETA.....	19

1.4.2 TIPOS DE COLETA.....	20
a) Sistema convencional de coleta dos resíduos não contaminados.....	20
a1) Coleta ao longo das vias públicas.....	21
a2) Coleta de containers.....	21
b) Sistema Especial de Coleta.....	21
1.4.3 VEÍCULOS COLETORES.....	21
1.4.3.1. TIPOS DE VEÍCULOS COLETORES.....	21
a) Coletor de caçamba aberta.....	22
b) Coletor tipo prefeitura ou baú.....	22
c) Coletor Compactador.....	22
1.4.3.2. DETERMINAÇÃO DO VEÍCULO COLETOR.....	22
1.5. TRANSFERÊNCIA E TRANSPORTE.....	23
1.5.1. VEÍCULOS PARA TRANSPORTE A GRANDES DISTÂNCIAS.....	24
1.5.2. ESTAÇÃO DE TRAFERÊNCIA E TRANSBORDO.....	25
1.6. PROCESSAMENTO E RECUPERAÇÃO.....	25
1.6.1 INCINERAÇÃO.....	26
1.6.2. USINAS DE RECICLAGEM E COMPOSTAGEM.....	27
1.6.2.1 USINAS DE RECICLAGEM E COMPOSTAGEM DE GRANDE PORTE.....	28
1.6.2.2. USINAS DE RECICLAGEM E COMPOSTAGEM DE PEQUENO E MÉDIO PORTE.....	29
1.7. DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	29
1.7.1. ATERRO SANITÁRIO.....	30
1.8. CONCLUSÃO.....	31

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE ROTEIROS DE COLETA.....	32
2.1. INTRODUÇÃO.....	32
2.2. MÉTODOS QUE NÃO UTILIZAM TÉCNICAS MATEMÁTICAS.....	33
2.3. MÉTODOS QUE UTILIZAM TÉCNICAS MATEMÁTICAS.....	35
2.4. CONCLUSÃO.....	50

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: NOÇÕES BÁSICAS SOBRE GRAFOS, ALGORÍTMOS DE BUSCAS EM GRAFOS, E O PROBLEMA DE ASSOCIAÇÃO.....	52
3.1. INTRODUÇÃO.....	52
3.2. NOÇÕES BÁSICAS.....	53
Grafo.....	53
Grafo orientado.....	53
Grafo não orientado.....	54
Grafo misto.....	54
Grafo Valorado.....	55
Grafo bipartido.....	55
Ordem do grafo.....	55
Vértices sucessores.....	55
Vértices predecessores.....	55
Arcos e arestas adjacentes.....	56
Semi grau de Entrada.....	56
Semi grau de Saída.....	56
Grau de um vértice.....	56
Vértice fonte.....	57
Vértice sumidouro.....	57
Caminho.....	57
Caminho elementar.....	57
Caminho simples.....	57
Circuito.....	57
Percurso.....	57
Percurso euleriano.....	57
Percurso pré-euleriano.....	58
Grafo conexo.....	58
Grafo orientado fortemente conexo.....	58
Árvores.....	58
Árvore expandida de mínimo comprimento.....	58
Matriz de Adjacências.....	58
3.3. ALGORÍTMOS DE BUSCA DE MENORES CAMINHOS EM GRAFOS.....	61

3.3.1. ALGORÍTMO PARA ENCONTRAR O MENOR CAMINHO ENTRE DOIS PARES ESPECÍFICOS DE VÉRTICES OU ENTRE UM VÉRTICE E TODOS OUTROS.	62
3.3.2. ALGORÍTMO PARA ENCONTRAR O MENOR CAMINHO ENTRE TODOS OS PARES DE VÉRTICES DE UMA REDE.	64
3.4. O PROBLEMA DE ASSOCIAÇÃO.	67
3.4.1. ALGORÍTMO HÚNGARO.	67
3.5. CONCLUSÃO.	69

CAPÍTULO IV

4. MODELO: PLANEJAMENTO DE ROTEIROS DOS VEÍCULOS COLETORES DE RESÍDUOS SÓLIDOS.	70
4.1. INTRODUÇÃO.	70
4.2. OBJETIVOS DO MODELO.	71
4.3. ABRANGÊNCIA DO MODELO.	71
4.4. DESCRIÇÃO DO MODELO.	73
4.4.1. DETERMINAÇÃO DA REDE DE COLETA.	73
4.4.2. DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE ENTRADA E SAÍDA DA REDE DE COLETA.	75
4.4.3. CONSTRUÇÃO DA REDE "MULTI EULERIANA"	76
4.4.3.1. TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE ORIENTADA FORTEMENTE CONEXA EM UMA REDE "MULTI EULERIANA"	77
4.4.3.2. TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE NÃO ORIENTADA CONEXA EM UMA REDE "MULTI EULERIANA".	79
4.4.3.2.1. HEURÍSTICA PARA OBTENÇÃO DA ASSOCIAÇÃO DE MENOR COMPRIMENTO ENTRE OS VÉRTICES ÍMPARES DE UMA REDE NÃO ORIENTADA (DERIVADO DO ALGORÍTMO HÚNGARO).	81
4.4.3.3 TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE MISTA FORTEMENTE CONEXA EM UMA REDE "MULTI EULERIANA".	83
4.4.4. DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS QUE LIGAM OS VÉRTICES DE ENTRADAS AOS VÉRTICES DE SAÍDA.	84
4.4.5. CONSTRUÇÃO DOS PEQUENOS CICLOS.	87
4.4.6. CONSTRUÇÃO DA REDE DE CICLOS VÉRTICES.	89
4.4.7. CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE EXPANDIDA DE MÍNIMO COMPRIMENTO.	89

4.4.8. AGRUPAMENTO DOS PEQUENOS CICLOS EM VIAGENS DE COLETA.....	93
4.4.9. DECODIFICAÇÃO DAS VIAGENS DE COLETA.....	94
4.4.10. CONTROLE DO VOLUME DE RESÍDUOS COLETADOS.....	96
4.5. CONCLUSÃO.....	96

CAPÍTULO V

5. APLICAÇÃO DO MODELO : OTIMIZAÇÃO DOS ROTEIROS DA ÁREA CENTRAL DO MUNICÍPIO DE FLORIANÓPOLIS - SC.....	101
5.1. INTRODUÇÃO.....	101
5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O LOCAL DA APLICAÇÃO.....	103
5.3. DETERMINAÇÃO DA REDE DE COLETA.....	110
5.4. DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE ENTRADA E SAÍDA DA REDE DE COLETA.....	112
5.5. CONSTRUÇÃO DA REDE "MULTI EULERIANA".....	113
5.6. DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS QUE LIGAM OS VÉRTICES DE ENTRADA AOS VÉRTICES DE SAÍDA.....	116
5.7. CONSTRUÇÃO DOS PEQUENOS CICLOS.....	117
5.8. AGRUPAMENTO DOS PEQUENOS CICLOS EM VIAGENS DE COLETA.....	120
5.9. DECODIFICAÇÃO DAS VIAGENS DE COLETA.....	122
5.10. CONTROLE DO VOLUME DE RESÍDUOS COLETADOS.....	124
5.11. CONCLUSÃO.....	124

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	126
BIBLIOGRAFIA.....	130
ANEXOS.....	135
ANEXO 1 - MATRIZ DE DADOS DA REDE DE COLETA APRESENTADA NO ANEXO 2.	
ANEXO 2 - REDE DE COLETA.	

- ANEXO 3 - REDE DE COLETA, APÓS A DEFINIÇÃO DOS LOCAIS DE ENTRADA E SAÍDA.
- ANEXO 4 - REDE "MULTI EULERIANA".
- ANEXO 5 - DEFINIÇÃO DOS CAMINHOS ENTRE OS VÉRTICES DE ENTRADA E SAÍDA NAS PRIMEIRAS VIAGENS.
- ANEXO 6 - REDE "MULTI EULERIANA" DIVIDIDA EM PEQUENOS CICLOS.
- ANEXO 7 - VIAGEM DE COLETA N^o1
- ANEXO 8 - VIAGEM DE COLETA N^o2
- ANEXO 9 - VIAGEM DE COLETA N^o3
- ANEXO 10 - VIAGEM DE COLETA N^o4
- ANEXO 11 - VIAGEM DE COLETA N^o5
- ANEXO 12 - VIAGEM DE COLETA N^o6

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	- Diagrama simplificado mostrando as interrelações dos elementos funcionais no sistema gerencial de resíduos sólidos.....	9
Figura 2.1.	- Rede euleriana dividida em sub-redes.....	39
Figura 2.2.	- Rede de coleta.....	41
Figura 2.3.	- Rede euleriana.....	42
Figura 2.4.	- Rede euleriana dividida em pequenos ciclos.....	43
Figura 2.5.	- Rede de ciclos vértices.....	44
Figura 2.6.	- Árvore expandida de mínimo comprimento.....	45
Figura 2.7.	- Conjunto final de viagens.....	46
Figura 3.1.	- Grafo ou rede orientada.....	53
Figura 3.2.	- Grafo ou rede não orientada.....	54
Figura 3.3.	- Grafo ou rede mista.....	54
Figura 3.4.	- Grafo orientado.....	60
Figura 4.1.	- Fluxograma de passos do modelo.....	72
Figura 4.2.	- Rede orientada, após a definição dos locais de entrada e saída.....	78
Figura 4.3.	- Rede não orientada, após a definição dos locais de entrada e saída.....	80
Figura 4.4.	- Rede "multi euleriana" não orientada.....	85
Figura 4.5.	- Definição do caminho entre os vértices de entrada e saída da rede.....	86
Figura 4.6.	- Rede "multi euleriana", após a definição do caminho entre os vértices de entrada e saída, dividida em pequenos ciclos.....	88
Figura 4.7.	- Rede de ciclos vértices.....	90
Figura 4.8.	- Árvore Expandida de Mínimo Comprimento.....	91
Figura 4.9.	- Conjunto final de viagens de coleta.....	95
Figura 4.10.1.	- Rede de coleta.....	98

Figura 4.10.2.	- Rede "multi euleriana" construída sem considerar as alterações nos vértices de entrada e saída.....	99
Figura 4.10.3.	- Rede "multi euleriana" após a definição dos caminhos entre os vértices de entrada e saída dividida em pequenos ciclos.....	100
Figura 5.1.	- Fluxograma do modelo para redes que após a determinação dos pequenos ciclos não permitem a construção da rede de ciclos vértices no plano.....	102
Figura 5.2.	- Quantidade de resíduos sólidos coletados no município de Florianópolis (1991).....	104
Figura 5.3.	- Quantidade de resíduos sólidos coletados na região norte da ilha de Santa Catarina, no município de Florianópolis (1991).....	105
Figura 5.4.	- Mapa de posicionamento da área central do município de Florianópolis, SC.....	106
Figura 5.5.	- Quantidade de resíduos sólidos coletados na área central do município de Florianópolis (1990).....	107
Figura 5.6.	- Quantidade de resíduos sólidos coletados na área central do município de Florianópolis (1991).....	108
Figura 5.7.	- Quantidade de resíduos sólidos coletados diariamente na área central do município de Florianópolis (1991).....	109

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1.	- Tipos de resíduos e quantidades geradas em diferentes países.....	13
Quadro 1.2.	- Composição dos resíduos sólidos domiciliares em alguns países.....	15
Quadro 1.3.	- Composição média dos resíduos sólidos urbanos nos Estados Unidos em 1979.....	16
Quadro 1.4.	- Composição média dos resíduos sólidos urbanos brasileiros.....	17
Quadro 5.1.	- Relação de vértices fontes e vértices sumidouros pertencentes à rede apresentada no anexo 3.....	114
Quadro 5.2.	- Associação de menor comprimento entre os vértices fonte e os vértices sumidouros, conforme apresentado na rede do anexo 4.....	115
Quadro 5.3.	- Relação dos pequenos ciclos formados na rede do anexo 6 e suas respectivas massas de resíduos sólidos.....	117
Quadro 5.4.	- Composição das viagens com suas respectivas quantidades de resíduos.....	121
Quadro 5.5.	- Relação das viagens com suas respectivas sequências de vértices e comprimentos.....	122

INTRODUÇÃO

Desde o momento em que o ser humano abandonou a vida nômade e fixou-se em determinados locais, certas situações antes inexistentes começaram a surgir, entre as quais os problemas relacionados com a geração de resíduos sólidos.

Igualmente, com o processo de industrialização iniciado no século passado, e as mudanças de hábitos e costumes sociais consequentes destes, os problemas relacionados com os resíduos sólidos ocuparam um lugar de destaque no contexto da preservação do meio ambiente e da saúde das populações.

A melhoria do nível de vida ocorrida nas últimas décadas, os novos hábitos de consumo, o aparecimento dos descartáveis, o acentuado crescimento urbano, a falta de recursos financeiros, as dificuldades de locais para destinação final dos resíduos sólidos entre outros, agravaram acentuadamente estes problemas.

Os órgãos encarregados dos serviços de limpeza pública, para atender as necessidades emergentes e manter um nível adequado de limpeza das cidades, foram ampliando o seu universo de atribuições..

Assim, no Brasil, estes órgãos, dependendo das características de cada municipalidade, passaram a exercer as mais diversas funções, tais como [31]:

- acondicionamento, coleta, transporte, tratamento e/ou disposição final dos resíduos sólidos, provenientes de residências, estabelecimentos comerciais e industriais e de locais diversos (feiras, mercados, escolas, hospitais, etc);

- varrição de vias e logradouros públicos e remoção dos resíduos resultantes; podendo estes procedimentos serem realizados de forma manual ou mecanizada;

- remoção de galhos e folhas resultantes da poda de árvores e arbustos, e de restos de capinação da grama de parques e jardins públicos e privados;

- limpeza geral de monumentos, escadarias, abrigos, túneis, viadutos, pontes e outros locais públicos;

- remoção e destino final (incinerar ou enterrar) de animais mortos;

- remoção de entulhos de terrenos baldios;

- desobstrução de bocas de lobo, ramais e galerias de águas pluviais, de córregos e valas;

- capinação de vias e logradouros públicos.

Entretando, dados levantados em 1982 [22] sobre o aspecto da limpeza pública no país mostraram a precariedade dos sistemas existentes e a deficiência dos serviços, implicando em elevados custos operacionais. Esta coletânea evidenciou, entre outros pontos, que:

- os serviços de limpeza pública são executados em praticamente todos os municípios, sendo que aproximadamente 33% dos resíduos gerados não são coletados por estes serviços;

- há deficiências e deseconomias nos diversos sistemas de limpeza pública: a remuneração pelos serviços prestados não cobre, geralmente, os investimentos e o custeio dos serviços;

- há necessidade de treinamento de pessoal em todos os níveis para conhecimento e adoção de métodos e procedimentos que venham a permitir uma melhor eficiência dos serviços implantados;

- no que se refere à coleta e transporte, constatou-se que a manutenção e operação dos equipamentos são, de modo geral, deficientes, implicando em custos elevados de reposição;

- as soluções adotadas para as diversas fases dos serviços de limpeza urbana, principalmente no que se refere à transferência, transporte secundário e destinação dos resíduos, são equacionadas sem um planejamento que integre as várias fases dos serviços.

Entre as atribuições dos órgãos encarregados dos serviços de limpeza pública, a coleta é a que consome o maior volume de recursos. Conforme A. V. Chiplunkar, S. L. Mehndiratta e P. Khanna [10], na Índia, 40 a 50% do total dos recursos, utilizados nos serviços relacionados à gestão dos resíduos sólidos, são destinados para realização da coleta destes materiais.

Nos Estados Unidos, de acordo com J. W. Male e J. C. Liebman [25] uma grande parte do orçamento municipal é destinada aos serviços de limpeza pública, sendo que 75% a 85% destes recursos estão envolvidos somente com o processo de coleta.

Igualmente, no Brasil, a maior preocupação dos órgãos de gerenciamento dos serviços de limpeza pública, principalmente por seu alto custo e o grau de dificuldade de realização, é o processo de coleta.

O processo de coleta por sua vez, está relacionado com varios fatores, como: pessoal de coleta, frota de veículos coletores, relacionamento público, frequência e horário de coleta, determinação dos roteiros e outros. Desta forma, para o planejamento adequado deste processo, estes fatores devem ser estudados e dimensionados de maneira a obter um sistema que funcione de forma integrada. Assim, otimiza-se a utilização dos recursos e oferece a comunidade um serviço de boa qualidade.

Entre os fatores que compreendem o sistema de coleta, a determinação dos roteiros é ainda realizada, na maioria das cidades, de uma forma bastante empírica.

Quando se analisa o processo de coleta, verifica-se que para realizar o conjunto de viagens diárias de coleta, cada veículo percorre coletando, dentro de uma determinada área um conjunto de ruas ou trechos de ruas, até preencher sua capacidade de carga. Com o preenchimento da carga, o veículo é encaminhado a um local onde o seu compartimento de carga é descarregado. Se ainda houver resíduos não coletados, dentro desta área, a equipe com o veículo coletor encaminha-se para o local onde encerrou a viagem anterior e inicia outra viagem e, assim sucessivamente até o encerramento da coleta desta. Na execução de todo este processo, os veículos coletores percorrem grandes distâncias sem que a coleta dos resíduos seja realizada.

A ocorrência de percursos onde a coleta dos resíduos não é executada (percursos em vazio), segundo J. W. Male e J. C. Liebman [25] aparecem em duas situações distintas:

a - quando o veículo encaminha-se para o local de início de coleta e quando transporta os resíduos coletados para o local de descarga;

b - quando o veículo, realizando a coleta dentro de uma determinada área, necessita atravessar certos trechos de ruas, onde o mesmo já percorreu, coletando numa passagem anterior ou que não possuem resíduos disponíveis ao processo, para atingir trechos que possuem resíduos à disposição dos serviços de coleta.

Por outro lado verifica-se que na maioria das cidades, o volume de resíduos gerados diariamente ou em certos períodos do ano cresce sensivelmente. Esta variação, se mantidos fixos os roteiros planejados, promoverá um aumento no número de viagens de coleta e conseqüentemente no comprimento percorrido em vazio, além de dificultar a otimização da utilização da capacidade de carga dos veículos coletores.

Constata-se desta forma que no planejamento dos roteiros de coleta não basta otimizar os percursos que os veículos devem percorrer dentro de cada área, mas também, a utilização da capacidade de carga da frota de veículos.

Face a estas constatações este trabalho estabelece como objetivo global a elaboração de uma metodologia para determinar o conjunto de viagens, realizados pelos veículos coletores, dentro de uma área.

Por outro lado, como objetivos específicos, foram consideradas as seguintes situações:

a - entradas e saídas dos veículos, pelos mesmos locais ou por locais distintos;

b - as ruas da área a ser coletada podem ser constituídas somente por vias de mão única ou somente por vias de mão dupla ou por ambas, ou seja, utilizando a linguagem aplicada a teoria dos grafos, rede orientada ou rede não orientada ou rede mista, respectivamente.

c - variação no volume de resíduos coletados em certos dias da semana;

d - variação no volume de resíduos gerados em certos períodos do ano.

Por sua vez, este trabalho restringir-se-á ao planejamento dos roteiros dentro de uma área previamente definida e, portanto não abrangerá o problema de divisão da cidade em áreas. Uma proposta de divisão poderá ser verificada nos estudos realizados por P. Bertolazzi, L. Bianco e S. Ricciardelli [05].

Para atingir os objetivos propostos o trabalho foi estruturado em seis capítulos:

O primeiro capítulo apresenta resumidamente o sistema gerencial de resíduos sólidos urbanos, visando identificar a posição do processo de coleta e a importância do planejamento do mesmo dentro do contexto deste sistema.

O segundo capítulo revisa o conjunto de propostas e sugestões específicas de modelos para o planejamento de roteiros, ou seja, define o estado da arte no assunto.

O terceiro capítulo busca, através da teoria dos grafos, a fundamentação teórica necessária à formulação matemática para o desenvolvimento de determinadas etapas do modelo apresentado no capítulo seguinte.

O quarto capítulo apresenta o modelo de planejamento de coleta de resíduos sólidos, através de um algoritmo que permite a realização deste planejamento, em função de características específicas de certas redes de coleta, por dois caminhos possíveis.

O quinto capítulo, através do planejamento do processo de coleta da área central do município de Florianópolis - SC, avalia a eficiência do modelo.

O sexto e último capítulo relaciona as conclusões obtidas através do desenvolvimento e aplicação do modelo e as recomendações relativas a continuidade do trabalho, assim como, a sua adequação e utilização em planejamento de sistemas semelhantes.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

1.1. INTRODUÇÃO

As atividades gerenciais relacionadas com os resíduos sólidos, segundo G. Tchobanoglous [39], desde a geração até a disposição final dos mesmos, podem ser agrupadas em seis elementos funcionais, como apresentado na figura 1.1. Considerando cada elemento separadamente, é possível: (1) identificar os aspectos fundamentais e suas interrelações e (2) desenvolver, quando possível, relações quantificáveis para efeito de comparações técnicas, análises e avaliações. A separação em elementos funcionais é importante porque permite o desenvolvimento de uma estrutura que facilita a avaliação do impacto de alterações propostas e de futuros avanços tecnológicos. A combinação destes elementos, por sua vez, forma os conhecidos sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos.

A proposta deste capítulo é descrever brevemente estes elementos e apresentar algumas tecnologias utilizadas para a realização dos processos operacionais.

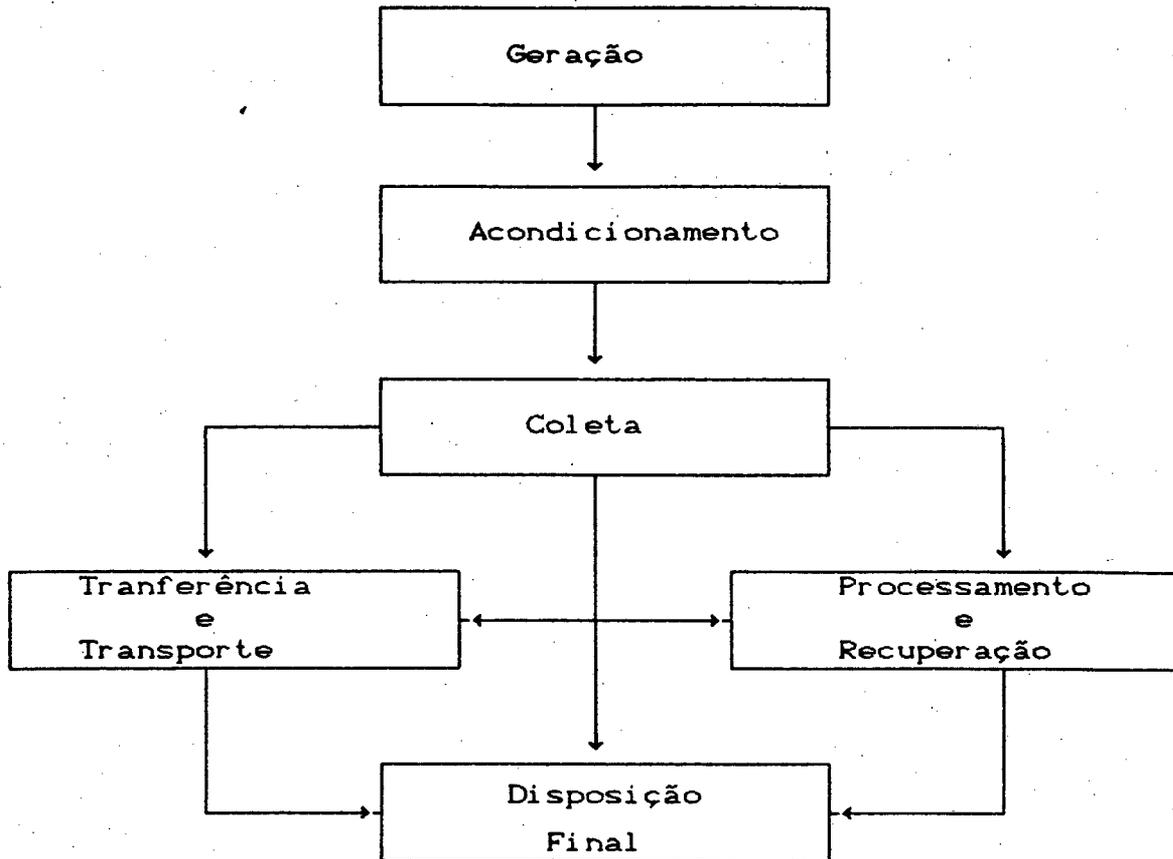


Figura 1.1. Diagrama simplificado mostrando as interrelações dos elementos funcionais no sistema gerencial de resíduos sólidos.

Fonte: TCHOBANOGLIOUS [39].

1.2. GERAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Considerada como a primeira fase a ser estudada no conjunto que constitui o sistema gerencial de resíduos sólidos, a geração compreende aquelas atividades nas quais os materiais são identificados como não tendo mais valor econômico positivo e então colocados à disposição dos serviços de coleta e eliminação. O importante na geração dos resíduos é precisar que existe um grau de identificação e este varia para cada indivíduo.

1.2.1. DEFINIÇÕES DE RESÍDUOS SÓLIDOS - Vários autores propõem diferentes definições para os resíduos sólidos gerados nas aglomerações urbanas. Assim, W. E. Oliveira [31] apresenta a seguinte definição para estes materiais: "São os resíduos das atividades humanas que normalmente se apresentam em estado sólido, semi-sólido ou semi-líquido e que seus proprietários ou produtores não mais os consideram com valor econômico suficiente para guardá-los".

Por outro lado, G. Tchobanoglous [39] coloca que "São todos os resíduos originados das atividades humanas e animais que são normalmente sólidos e que são descartados quando desnecessários ou indesejáveis".

Num trabalho elaborado para a Fundação Getúlio Vargas e coordenado por M. S. Pinto [37], propôs-se como definição de resíduos sólidos o seguinte: "Os resíduos podem ser objetos que não mais possuem valor ou utilidades, porções de materiais sem significação econômica, sobras de processamentos industriais ou domésticos a serem descartadas, enfim, qualquer coisa que se deseja jogar fora".

Por sua vez, A. Philipi Junior [35] propõe as seguintes definições:

- "São os materiais rejeitados que não possuem aproveitamento econômico imediato".

- "São todos materiais resultantes das atividades humanas de produção e de consumo, com exceção de dejetos e outros materiais sólidos refugados com um conteúdo de líquidos suficientes para fluir".

Da mesma forma que a definição, a classificação dos resíduos sólidos também possui uma conotação pessoal de cada autor, mas todos, por sua vez, classificam-os em função da sua fonte geradora.

1.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS - De acordo com M. M. Aisse, N. L. Obladen, A. Santos [01], quanto a origem, os resíduos urbanos podem ser classificados nos seguintes tipos principais: domésticos, Comerciais e industriais, de varrição, hospitalares e especiais.

a) **Resíduos domésticos** - São aqueles gerados nos domicílios residenciais, cujos componentes principais são: papel, papelão, vidro, lata, plásticos, restos de alimentos, folhas de plantas ornamentais, trapos e outros. Esporadicamente pode-se encontrar peças de mobiliário, aparelhos domésticos, etc.

b) **Resíduos comerciais e industriais** - A composição desses resíduos dependem basicamente da natureza do estabelecimento gerador. Nos escritórios e estabelecimentos comerciais são gerados grandes quantidades de papéis e nos restaurantes e hotéis, restos de alimentos.

Os resíduos industriais por sua vez, são aqueles que compreendem os resíduos provenientes das atividades de produção, cuja composição varia notavelmente segundo o tipo de industria. Estes resíduos, normalmente não são coletados pelo sistema de limpeza pública. São resíduos não considerados tóxicos ou perigosos, portanto, assimiláveis aos resíduos sólidos urbanos.

c) **Resíduos hospitalares** - São os resíduos sólidos que, em virtude de suas características, demandam cuidados e métodos especiais na sua coleta, transporte e disposição.

São os chamados resíduos patológicos, provenientes de hospitais, clínicas, casas de saúde e ambulatórios, compostos por curativos, restos de cirurgias, autópsias, seringas hipodérmicas, peças de vestuário descartáveis, pedaços de gaze, bandagens, restos de gesso e outros.

d) **Resíduos de varrição** - São os resíduos resultantes da limpeza de logradouros e vias públicas. A composição destes resíduos é bastante diversificada, pois a mesma depende de uma

Quadro 1.1. Tipos de resíduos e quantidades geradas em diferentes países.

Descrição	Quantidades aproximadas (milhões de ton/ano)				
	Países				
	1	2	3	4	5
Resíduos municipais (residenciais e comerciais)	20	20	12,5	95	150
Resíduos Industriais					
-Similar ao municipal.		8	32	19	
-Processo		13	16		
-Tratamento de efluentes		7			
-Perigosos	4-5	3	2		57
Total	50	31	50	140	270
Cinzas de combustíveis	12			13	
Resíduos de minas	60	80	42		1890
extração	50		75		
construção e demolição	3	96		75	
Agricultura	250	260	220	44	660
pneus	0.2	0.3	0.4		

- 1 - Reino Unido.
 2 - Alemanha Ocidental (antes da reunificação).
 3 - França.
 4 - Japão.
 5 - Estados Unidos da América.

1.2.3. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS - As características qualitativas e quantitativas destes resíduos dependem de inúmeros fatores. O volume ou a massa de resíduos, assim como sua composição e massa específica, diferem de um país para outro, de uma cidade para outra e dentro das próprias cidades, de um bairro para outro. Os fatores que mais influenciam nas características dos resíduos são: o grau de desenvolvimento econômico, as tradições culturais, localização geográfica, o perfil das atividades econômicas, densidade demográfica, distribuição das áreas verdes, etc.

Os resíduos sólidos urbanos apresentam uma estrutura tão variada e estão sujeitos a influência de inúmeros fatores, que torna difícil estabelecer correspondências universais entre populações, áreas, número de domicílios, etc., e a quantidade ou qualidade dos resíduos gerados.

Entretanto, o conhecimento das características destes materiais é de importância fundamental na definição das formas de acondicionamento, coleta, processamento e recuperação, transporte e destino final.

No processo de coleta, por exemplo, os resíduos especiais, face as suas peculiaridades, devem ser acondicionados, coletados, transportados e dispostos de forma separada dos outros resíduos.

No dimensionamento da frota de coleta, a composição e a massa específica, por sua vez, exercem grande influência na escolha do tipo de veículo coletor. Como exemplo, a utilização de veículos compactadores que reduz o volume dos resíduos, face ao alto percentual de componentes volumosos e de baixa densidade.

a) **Composição** - A composição dos resíduos é um parâmetro fundamental na determinação do tipo de destino final. Nos países desenvolvidos, em função do grande percentual de componentes que conferem a estes resíduos um elevado poder calorífico e face a baixa umidade, os técnicos indicam a incineração como uma das técnicas mais adequadas de destino final.

Quadro 1.2. Composição dos resíduos sólidos domiciliares em alguns países.

Componente	Países (cidades) (% em peso)				
	1	2	3	4	5
Finos	10-20	6.1		26,0	9.9
Papel	20-35	46.2	50	27,5	38.2
Vegetais e Putrecíveis	15-35	18.6	15	16,0	18.6
Texteis	1-5	-	2	2,0	7.6
Borracha, couro e madeira	-	5.6	-	-	2.2
Plásticos	3-6	12.7	8	4,0	6.1
Ferrosos	} 5-8	-	6	6,5	8.1
Não ferrosos			1		
Vidros	5-10	-	8	9,0	9.2
Miscelânea	-	10.8	10	8,0	-

1 - França (1979)

2 - Japão (1975)

3 - Suécia (1977)

4 - Alemanha (1981)

5 - Austria - Viena (1975)

Fontes: Wilson [40].

LE TRAITEMENT des déchets municipaux [08].

Quadro 1.3. Composição média dos resíduos sólidos urbanos nos Estados Unidos em 1979.

Componente	(% Peso)
Papel	55.0
Imprensa	12.0
Papelão	11.0
Outros	32.0
Metais	9.0
Ferrosos	7.5
Não Ferrosos	1.5
Plásticos	1.0
Vidros	9.0
Madeira	4.0
Folhas, Gramas, etc..	5.0
Matéria Orgânica (alimentos)	14.0
Miscelânea (Couro, Borracha, etc..)	3.0
Umidade	30.0
Total	100.0

Fonte: Pinto, M. S. [37]

Por outro lado, no que tange ainda aos processos de destino final, nos países em desenvolvimento, a exemplo do Brasil, os especialistas [38] da área indicam, face ao elevado percentual de matéria orgânica existente, o processo de separação dos componentes e a compostagem da matéria orgânica como uma das formas mais adequadas.

b) **Massa ou Volume** - A massa ou o volume diário de resíduos gerados por habitante é o principal parâmetro no dimensionamento da capacidade de carga da frota de coleta. No Brasil, segundo T. Yoshimura [02], cada habitante gera, em média, de 0,5 a 1kg de resíduos sólidos por dia. Pesquisadores da Universidade Estadual de Maringá [16] e [17], verificaram que no Paraná, as pequenas e médias cidades estão coletando quantidades de

resíduos abaixo da média prevista para o País. Os mesmos concluíram que, ou uma parte dos resíduos gerados nos municípios não são coletados ou grande parte destes é retirada por pessoas de baixa renda, antes de serem coletados.

Quadro 1.4. Composição média dos resíduos sólidos urbanos brasileiros.

Componente	(% Peso).
Plástico :	5,5 ± 1,5%
Duro 20%	
Mole 80%	
Borracha	1,0 ± 0,5%
Couro	1,0 ± 0,5%
Panos	3,0 ± 1,0%
Vidro	3,0 ± 1,0%
Metais :	3,0 ± 1,0%
Ferrosos 90%	
Não ferrosos 10%	
Cerâmica, pedras, ...	2,0 ± 1,0%
Papéis:	21,0 ± 7,0%
Papel 84%	
Papelão 16%	
Osso	< 0,5%
Madeira	1,5 ± 1,0%
Matéria Orgânica e Agregado fino	59,0 ± 15,0%
Total	100,0

Fonte: Rousseaux, P. [38]

De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas - IBGE [22], em 1980, no Brasil, a quantidade de resíduos coletados situava-se em 15.518.857 ton., das quais 67% correspondiam aos resíduos domiciliares. Na região sudeste do país são produzidas e coletadas as maiores quantidades de resíduos (62%), com um percentual de 37% gerado somente no estado de São Paulo. O quociente entre o total de resíduos coletado e população urbana do país foi estimado em 0,19t/hab/ano.

Entretando, a nível macrorregional verificou-se uma grande variação, uma vez que a região Sudeste apresentou um índice superior ao nacional, isto é, 0,22t/hab/ano, enquanto que as regiões Centro-oeste, Nordeste, Sul e Norte apresentaram, respectivamente, 0,19; 0,15; 0,14 e 0,12t/hab/ano.

c) **Massa Específica** - A massa específica dos resíduos sólidos, em função dos diferentes parâmetros que influenciam a geração dos mesmos, difere de uma cidade para outra, de um bairro para outro, e também de um dia para outro, ou seja, é uma variável extremamente aleatória. De acordo com Pinto Coelho [36], para os resíduos sólidos domésticos, coletados em recipientes plásticos, a massa específica varia entre 196 kg/m³ e 450 kg/m³, com um valor médio de 226 kg/m³.

1.3. ACONDICIONAMENTO

O acondicionamento constitui a primeira etapa do processo de remoção dos resíduos sólidos. Para isto, são utilizados diversos recipientes, tais como: vasilhas domiciliares, tambores, sacos plásticos, sacos de papel, containers comuns, containers basculantes, etc. Entre estes, os sacos plásticos são, na maioria das cidades brasileiras, os mais utilizados.

Na Dinamarca, relata Pinto Coelho [36], os sacos de papel grosso, resistentes a umidade são muito utilizados para o acondicionamento dos resíduos sólidos domiciliares. Esse tipo de embalagem permite a evaporação da umidade, o que não acontece com os sacos plásticos. Desta forma, a redução do peso dos resíduos é favorecida, como também o aumento da vida útil dos equipamentos de coleta, transporte e processamento destes resíduos.

Em algumas localidades do Canadá, Estados Unidos e Europa, de acordo com Pinto Coelho [36], os resíduos acondicionados ainda são depositados em pequenos abrigos fechados, com ventilação e drenagem, agrupando assim os detritos de um conjunto de casas, blocos residenciais ou quarteirão. Em alguns casos, um recipiente

de grandes dimensões, que constitui uma caçamba móvel de caminhão, é situado estrategicamente para receber os resíduos provenientes dos conjuntos prediais, residenciais ou mesmo centros de pequenos comércios ("Malls").

Em muitas cidades brasileiras, também são utilizados "containers" para armazenar os resíduos de conjuntos prediais, de supermercados, de feiras livres, escolas, etc.

1.4. COLETA

Os resíduos, após o seu acondicionamento, são depositados em locais apropriados ou nas vias públicas para serem posteriormente coletados.

A operação unitária de coleta consiste em remover os resíduos dos locais onde foram acondicionados. Portanto, esta operação engloba desde a partida do veículo, de sua garagem, e inclui todo o percurso gasto na viagem, sendo este produtivo ou não.

Inúmeros fatores estão relacionados com o processo de coleta, desde os aspectos sanitários e de segurança, até os econômicos e culturais.

Os resíduos colocados a disposição do sistema de coleta, antes de serem recolhidos pelos garis, em algumas cidades, são vasculhados por pessoas desprovidas de recursos, que além de se exporem diretamente a altos riscos de contaminação e doenças, ocasionam sérios problemas ao processo de coleta.

1.4.1. OBJETIVOS DA COLETA - Os resíduos sólidos em função de sua composição e de seu volume, passam a ocasionar problemas a partir dos locais onde são gerados.

Devido, frequentemente, a existência de matéria orgânica em sua composição, estes resíduos são utilizados como substrato para proliferação de moscas, mosquitos, baratas e roedores. Estes vetores são responsáveis por transmissão de inúmeras patologias aos seres humanos e aos animais. Além disso, a decomposição da matéria orgânica libera para o ambiente odores desagradáveis.

Quanto ao seu volume, pela inexistência de espaço disponível para armazená-los, estes resíduos ocasionam problemas onde são originados, principalmente nos casos de resíduos gerados em concentrações urbanas com elevada densidade demográfica.

Face aos problemas ocasionados por estes resíduos, os mesmos devem ser armazenados em recipientes apropriados e coletados.

A operação de coleta, desta forma, visa recolher todos os resíduos sólidos gerados pela comunidade, de forma organizada, segura e econômica e, depositá-los em locais de tratamento, ou em estações de transbordo, ou encaminhá-los para a disposição final. Desta maneira, o aspecto estético, de saúde pública e de conforto das vias públicas são mantidos ou melhorados, evitando a proliferação de vetores, riscos de acidentes, poluição do meio ambiente, etc.

1.4.2 TIPOS DE COLETA - A coleta normalmente divide-se em dois tipos, sendo:

- Sistema convencional de coleta de resíduos não contaminados.
- Sistema especial de coleta.

a) **Sistema convencional de coleta dos resíduos não contaminados** - Este tipo está associado a coleta dos resíduos domiciliares, comerciais, de limpeza das vias públicas, etc.

Em função do tipo de acondicionamento feito pela comunidade, pode ser realizado de duas formas:

- Coleta ao longo das vias públicas e,
- Coleta de containers.

a1) Coleta ao longo das vias públicas - Neste tipo de coleta, o veículo coletor percorre todas as ruas, onde os resíduos são colocados, normalmente em pequenos recipientes. É o processo encontrado, geralmente, em todas as cidades.

a2) Coleta de containers - Neste caso, o veículo coleta os resíduos armazenados em determinados pontos específicos, os quais, possivelmente preenchem a carga do veículo. Este tipo é utilizado para a coleta de resíduos de feiras livres, de supermercados, etc. Em alguns países desenvolvidos, a coleta dos resíduos domiciliares, também é realizada desta forma.

b) Sistema Especial de Coleta - Todos os resíduos contaminados, a exemplo dos resíduos dos serviços de saúde, radioativos, etc., são coletados por este sistema. Neste caso, os resíduos são acondicionados em recipientes específicos e coletados de forma separada. O processo utilizado é semelhante ao de coleta de containers.

1.4.3 VEÍCULOS COLETORES - De forma precária ou de acordo com a tecnologia mais moderna, a coleta dos resíduos sólidos urbanos vem sendo realizada em praticamente todos os municípios brasileiros. Os tipos de veículos coletores são os mais diversos, sendo ou não motorizados.

1.4.3.1. TIPOS DE VEÍCULOS COLETORES - Os veículos coletores podem ser divididos em dois tipos: motorizados e não motorizados. Os motorizados, por sua vez, podem ser divididos em compactadores e comuns. Os comuns, ainda poderão ser subdivididos em tratores, coletor de caçamba aberta e coletor com carrocerias tipo baú ou prefeitura.

Os veículos coletores não motorizados, são os que utilizam a tração animal como força motriz. Estes, são utilizados em algumas cidades do interior do país, ou ainda para coleta de resíduos em locais de difícil acesso aos veículos motorizados, a exemplo de alguns bairros favelizados do Rio de Janeiro [30].

a) **Coletor de caçamba aberta** - Este modelo tem como característica básica a caçamba construída em chapas de aço, com a parte superior aberta. Sua capacidade comporta, usualmente, de 5 a 10 metros cúbicos de resíduos [35].

b) **Coletor tipo prefeitura ou baú** - Este veículo coletor possui uma caçamba construída com chapa de aço, com sua capacidade variando entre 3,5 a 15,5 metros cúbicos. A parte superior é fechada por tampas côncavas [23].

c) **Coletor Compactador** - De acordo com A. Querzoli [23], estes equipamentos podem ter sistemas de carga descontínua (os mais comuns) ou contínua. "Nos primeiros é preciso parar o sistema de coleta quando o compactador entra em funcionamento, enquanto nos de carga contínua podem ser realizadas as operações de coleta e compactação conjuntamente".

Vários modelos e tamanhos deste tipo de coletor são fabricados, podendo os mesmos, face à composição dos resíduos, reduzir o seu volume por compactação a $1/3$ do volume inicial.

1.4.3.2. DETERMINAÇÃO DO VEÍCULO COLETOR - A escolha dos veículos coletores, na maioria das cidades brasileiras, é um processo ainda realizado de uma forma bastante empírica. G. L. Mansur [30], defende que o sistema de coleta de resíduos sólidos seja dimensionado de acordo com as peculiaridades de cada bairro, de cada região, de cada cidade. Conforme Mansur, "Não há sentido em ter um caminhão compactador em locais de baixa concentração de resíduos quando, muitas vezes, um caminhão comum poderia tranquilamente resolver o problema, com manutenção muito mais simples e com um investimento bem menor".

Técnicos da área [23], observam que para atender cidades com pequenas populações, os coletores tipo prefeitura são os mais indicados, enquanto que para as cidades maiores, os coletores compactadores são os aconselhados.

De acordo com os técnicos da COMLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana - RJ [30], o retrato fiel de uma coleta de resíduos sólidos nem sempre registra modernos veículos ou equipamentos complicados. No Rio de Janeiro, em alguns morros, os resíduos são coletados através da utilização de veículo com tração animal e, em outros, com a utilização de microtratores.

Conforme os técnicos da CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - SP [35], a escolha dos veículos coletores e as dimensões dos serviços, variam de acordo com o tamanho, características e condições das comunidades. É de máximo interesse analisar as peculiaridades, vantagens e desvantagens dos veículos coletores em relação às comunidades, aos serviços, aos funcionários, às condições da entidade responsável, enfim, características gerais de interesse sanitário, econômico, estético e de segurança.

1.5. TRANSFERÊNCIA E TRANSPORTE

A operação unitária de transporte compreende o deslocamento de ida do veículo ao local de disposição, para descarga dos resíduos, e o seu retorno ao primeiro ponto da próxima viagem de coleta. Esta operação inclui, conseqüentemente, o tempo total da viagem, desde o último ponto de coleta ao local de disposição e o retorno ao primeiro ponto de coleta da próxima viagem.

Quando for necessário, por questões econômicas, realizar a transferência dos resíduos do veículo coletor para um transportador, ocorrerão dois processos distintos de transporte: a) transporte do último ponto de coleta, como descrito acima, à estação de transferência e o retorno ao primeiro ponto da próxima viagem de coleta; b) transporte dos resíduos da estação de transferência ao local de destino final.

Quando os resíduos são reciclados em estações de tratamento ou incinerados, pode ocorrer ainda a necessidade de transportar os resíduos resultantes destes processos para um aterro sanitário.

1.5.1. VEÍCULOS PARA TRANSPORTE A GRANDES DISTÂNCIAS - A partir do momento em que os locais de disposição final dos resíduos sólidos situam-se muito distantes dos locais onde os mesmos foram gerados, o transporte destes, pelos próprios veículos coletores passa a ser extremamente oneroso. Desta forma, uma análise econômica, deve ser realizada para determinar a necessidade do transporte destes resíduos por veículos de grande capacidade.

Conforme A. Philippi [35], os serviços de limpeza pública das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, onde existem estações de transferência, utilizam principalmente, carretas tracionadas por cavalo mecânico. Essas carretas podem possuir sistemas de compactação, (fechadas na parte superior), ou sem compactação, (abertas na parte superior).

Os modelos com compactação possuem uma porta traseira, por onde os resíduos são introduzidos e compactados contra um painel que recua com os esforço do equipamento de carregamento. A capacidade nominal de carga destes veículos é de 26 (vinte e seis) toneladas.

Por sua vez, o veículo é descarregado, pelo acionamento do painel de ejeção acoplado a um pistão telescópico, após a abertura das portas traseiras ou laterais.

Os veículos sem compactação, ainda de acordo com A. Philippi [35], possuem uma carroceria formada por duas caçambas independentes, com a parte superior aberta, por onde é efetuado o carregamento. Estes veículos possuem capacidade nominal de aproximadamente 70 (setenta) metros cúbicos.

1.5.2. ESTAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA OU TRANSBORDO - Quando definido, através de análises econômicas, a utilização do transporte dos resíduos por veículos com capacidades maiores, a municipalidade deverá construir locais onde os veículos coletores transferirão os resíduos coletados aos veículos transportadores. Estes locais são denominados de estações de transbordo ou transferência.

A localização da estação de transferência, como apresentado por A. Philippi [35], deve ser realizada observando os seguintes itens:

- localizá-la o mais próxima possível do centro de massa da área a ser coletada;

- localização conveniente em relação às vias de transporte;

- construção em local que possibilite o mínimo de objeção da comunidade em relação às operações de transferência;

- localização em ponto onde a construção e operação sejam mais econômicas;

- possibilidades de adoção de soluções conjuntas, agrupando comunidades, no que concerne à disposição final dos resíduos sólidos.

Além destas preocupações, a administração de serviços públicos deverá atender condições de estética e higiene para a instalação e operação das estações de transferência.

1.6. PROCESSAMENTO E RECUPERAÇÃO

Conforme G. Tchobanoglous [39], a etapa de processamento e recuperação inclui todas as técnicas, equipamentos, e infraestruturas utilizadas para promover a eficiência de outros elementos funcionais e recuperar materiais utilizáveis, ou converter os resíduos em produtos ou em energia calorífica.

Como pode ser observado na etapa de geração, em função da composição dos resíduos, certas técnicas de processamento e recuperação foram as formas mais indicadas de destino final dos resíduos sólidos. Na realidade, o processo de incineração e o processo de reciclagem e compostagem, por mais eficientes que sejam sempre acabam gerando sub-produtos (resíduos de segunda geração). Desta forma o enquadramento dos mesmos como formas de destino final pode não ser o mais adequado.

Várias técnicas de processamento e recuperação foram desenvolvidas. G. Tchobanoglous [39], classificou-as em 5 (cinco) principais tipos: (1) redução mecânica de volume (compactação), (2) redução química de volume (incineração), (3) redução mecânica da granulometria (trituração), (4) separação dos componentes (manual ou mecânica), e (5) secagem e desumidificação.

Na prática, o que se observa na maioria dos sistemas de processamento e recuperação, é uma combinação destas técnicas. Estas por sua vez, são aplicadas praticamente em todas as etapas do sistema de gerenciamento de resíduos. Por exemplo, nas etapas de acondicionamento, coleta, transporte e destino final, a técnica de compactação dos resíduos pode ser utilizada.

1.6.1 INCINERAÇÃO - O tipo de processamento de redução mais utilizado é a incineração. Este tipo consiste na combustão, sob altas temperaturas, dos materiais componentes dos resíduos sólidos.

Pinto Coelho [36], descreve que os incineradores acolhem basicamente resíduos hospitalares, drogas apreendidas, documentos e papel moeda fora de circulação, resíduos de aeroporto e presídios, animais mortos e apreendidos em vias públicas, além da complementação com outros resíduos proveniente de regiões residenciais ou comerciais.

O processo de incineração, conforme Pinto Coelho [36], apesar de ser um dos mais eficientes processos de redução dos resíduos sólidos, teve seu uso restrito pela Environmental

Protection Agency (E.P.A.) na América do Norte, devido ao seu potencial poluidor.

1.6.2. USINAS DE RECICLAGEM E COMPOSTAGEM- As usinas de reciclagem e compostagem, também conhecidas por usinas de tratamento, têm como finalidade recuperar por meios mecânicos, pneumáticos, manuais, etc., os materiais passíveis de valorização e transformar a matéria orgânica em "composto orgânico".

Conforme Zulauf [41], uma das teses mais controvertidas dos últimos tempos, entre os ambientalistas, é a da conveniência do reaproveitamento, em maior ou menor escala, de resíduos urbanos de uma maneira geral.

As análises econômicas tem conduzido, invariavelmente, a apontar como destinação final, mais adequada, dos resíduos sólidos, exatamente aquela forma na qual a taxa de reciclagem é mais baixa: o aterro sanitário.

Estas análises, no entanto adotam uma perspectiva míope, uma vez que são, em geral, extremamente setoriais e consideram horizontes de planejamento curtos. Por outro lado não consideram as deseconomias provocadas pela retirada de recursos naturais do processo produtivo, e não atribuem valor às condições ambientais.

De acordo com Bundi e Wasmer [07], os motivos para a reciclagem estavam baseados em considerações financeiras ou visando a redução dos custos de produção. Hoje, a reciclagem é promovida também por outras razões: ela é vista como uma maneira de se reduzir a carga de poluentes ao meio ambiente e também face à constatação de que os recursos naturais (inclusive a energia) estão se exaurindo aceleradamente.

Além do mais, considerações econômicas e políticas não podem ser desprezadas: a reciclagem intensiva acarretaria uma redução na importação de matérias primas, contribuindo para balanças comerciais mais equilibradas e menor dependência de recursos do exterior.

As usinas de reciclagem e compostagem podem ser classificadas em: usinas de grande porte e usinas de pequeno e médio porte.

1.6.2.1 USINAS DE RECICLAGEM E COMPOSTAGEM DE GRANDE PORTE - No Brasil, segundo a FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos [19], as usinas de tratamento de grande porte, utilizam basicamente o processo "Dano", apresentando como característica principal, a promoção da compostagem acelerada da matéria orgânica em equipamentos denominados de "bioestabilizadores". Esse equipamento é constituído de um cilindro de chapas de aço, disposto na posição horizontal. Durante a alimentação de material sólido, o cilindro permanece girando lentamente de modo a favorecer o revolvimento e o avanço do material para a extremidade oposta à sua entrada. Normalmente, o tempo de residência dos componentes dos resíduos sólidos no bioestabilizador é de 2 a 5 dias, no qual, sob condições controladas de temperatura, oxigênio e umidade, o material é triturado e homogeneizado.

Para favorecer a bioestabilização da matéria orgânica, no interior do estabilizador, projeta-se uma corrente de ar no sentido inverso ao do movimento do material em decomposição.

O material é retirado do bioestabilizador na condição de semi-estabilizado e, em seguida, é enviado ao pátio de compostagem onde no prazo de 30 a 60 dias estará completamente humificado.

Antes do material semi estabilizado ser encaminhado ao pátio de compostagem, ele passa por um processo de limpeza, onde é peneirado e separado dos inertes. Estes inertes, por sua vez, são separados em materiais ferrosos e não ferrosos, através da utilização de eletro-imãs.

Os componentes de dimensões maiores, como pneus, caixas de madeira, caixas de papelão, etc., são retirados, em uma pequena esteira rolante, antes do material ser introduzido no bioestabilizador.

1.6.2.2. USINAS DE RECICLAGEM E COMPOSTAGEM DE PEQUENO E MÉDIO PORTE - As usinas de pequeno e médio porte consistem basicamente em um conjunto de equipamentos mecânicos onde os componentes recicláveis dos resíduos sólidos urbanos são separados da matéria orgânica.

Os resíduos, ao chegarem na usina, são depositados em um pátio de recepção ou em uma moega. Após, são colocados sobre uma correia, através de um processo de alimentação, manual ou mecânico, onde os mesmos são separados manualmente por um conjunto de operários. A matéria orgânica, remanescente do processo de separação, pode ou não ser triturada, sendo depois encaminhada para o pátio de compostagem. Neste local, a matéria orgânica é disposta em leiras, de acordo com certos parâmetros técnicos, e através de um processo de biodigestão aeróbia é transformada em composto orgânico.

J. H. Penido Monteiro [34], relata que há diversas tecnologias disponíveis no mercado para sistemas de reciclagem e compostagem, das mais simples às mais sofisticadas.

Entretanto, mesmo aquelas consideradas como simples apresentam, via de regra, uma tendência à inviabilidade de aplicação na grande maioria das cidades brasileiras, que são de pequeno a médio porte. Esta inviabilidade deve-se, principalmente, à indisponibilidade de recursos financeiros para fazer frente aos investimentos iniciais, e da carência de pessoal com nível técnico suficiente para supervisionar, operar, fazer a manutenção e controlar a operação dos equipamentos eletromecânicos.

1.7. DESTINO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.

De acordo com J. O. Peixoto [33], a forma mais econômica de proceder-se a destinação final de resíduos sólidos, é mediante a efetiva participação da população nesse processo, através da separação nas próprias residências, no comércio, ou na indústria, dos materiais passíveis de serem reaproveitados.

Posteriormente, realiza-se a coleta destes materiais previamente selecionados, objetivando encaminhá-los diretamente para as indústrias aptas a recuperá-los.

A adoção deste procedimento pode trazer, face a redução do volume e alteração da frequência de coleta, sensíveis reduções nos custos dos serviços de coleta dos resíduos domiciliares e de destino final, visto a redução da quantidade de resíduos a eliminar.

Como apresentado, algumas experiências de implantação deste processo de "coleta seletiva", já foram realizadas, mostrando bons resultados.

Atualmente, a técnica mais utilizada para o destino final dos resíduos sólidos urbanos é o aterro sanitário. Infelizmente, em grande parte das cidades brasileiras ainda os resíduos são atirados a céu aberto, causando com isto impactos ambientais preocupantes.

1.7.1. ATERRO SANITÁRIO - A forma considerada mais econômica utilizada como destino final dos resíduos sólidos, como apresentado por J. O. Peixoto [33], são os chamados aterros sanitários ou sua versão mais simplificada os "aterros controlados".

A. Reis Filho [30], explica que no "aterro controlado", é feita uma cobertura dos resíduos, mas não uma cobertura total e sistemática. Nestes aterros existe um controle, mas não é um real aterro sanitário, porque não foi projetado e construído dentro dos critérios sanitários e de engenharia, além de também não ser operado dentro dos mesmos critérios.

M. H. Andrade Orth [30], afirma que os chamados "aterros controlados" não existem, o que existe é um lixão controlado, e que os aterros sanitários devem ser construídos e operados dentro do maior rigor técnico.

O aterro sanitário consiste basicamente no confinamento dos resíduos sólidos compactados, através da cobertura destes com uma camada de terra. Este método exige ainda o controle dos líquidos e gases resultantes da evolução bio-físico-química dos resíduos em contato com a água das precipitações e os microorganismos. Estes gases combustíveis, podem ser depois de tratados, utilizados como fonte geradora de energia.

1.8. Conclusão

O presente capítulo apresentou, em forma resumida as etapas que compõem o sistema de gerenciamento de resíduos sólidos. Assim, foram descritos os fatores que influenciam decisivamente nos processos de geração, no acondicionamento e, igualmente na coleta dos resíduos sólidos urbanos. Por outro lado, procedeu-se uma análise dos principais elementos dos processos de transferência e de transporte destes resíduos, assim como nas etapas fundamentais de processamento e de recuperação dos mesmos. Finalmente, verificou-se em função de vários parâmetros, as técnicas mais utilizadas para a disposição final destes resíduos.

Desta forma, este capítulo apresentou a composição do sistema, as principais funções e necessidades de cada etapa e, as interligações entre estas. Observa-se que a etapa de coleta, em função das suas características, é a mais dispendiosa do ponto de vista econômico, a qual, por sua vez, engloba o procedimento de roteamento, objeto de estudo deste trabalho e que na maioria das vezes é realizado de forma bastante empírica.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: MODELOS PARA DETERMINAÇÃO DE ROTEIROS DE COLETA.

2.1. INTRODUÇÃO

A operação de coleta de resíduos sólidos, conforme foi apresentado no capítulo I, normalmente utiliza dois processos distintos: 1) coleta ao longo das vias públicas; 2) coleta em pontos previamente determinados.

A coleta ao longo das vias públicas é o processo largamente usado para se coletar a maioria dos resíduos sólidos urbanos. O outro tipo, por sua vez, é utilizado para a coleta de resíduos considerados contaminados (radioativos, de serviços de saúde, industriais, etc.) e também de grandes volumes, normalmente acondicionados em containers (feiras, supermercados, escolas, etc).

Pretende-se neste capítulo, fazer uma revisão dos métodos utilizados para o planejamento de roteiros de coleta de resíduos que são recolhidos ao longo das vias públicas. Embora muitos artigos sobre planejamento de serviços públicos tenham sido publicados, um número relativamente pequeno destes considera o planejamento de roteiros. Porém, tenta-se aqui reunir os trabalhos desenvolvidos, agrupando-os segundo uma ordem crescente no nível de aplicações de técnicas matemáticas.

2.2. MÉTODOS QUE NÃO UTILIZAM TÉCNICAS MATEMÁTICAS

Nesta seção serão apresentadas duas propostas baseadas na experiência particular dos proponentes e na aplicação de alguns recursos técnicos. Porém nenhuma técnica matemática é utilizada para o estabelecimento dos roteiros na malha de ruas de uma cidade. Trata-se antes de métodos intuitivos, baseados em parâmetros topográficos e geográficos dos setores ou áreas a serem coletadas.

Em um trabalho realizado para a CETESB, A. Philippi Junior [35] propõe que a escolha dos roteiros a percorrer pelos veículos coletores de resíduos sólidos urbanos, deve ser realizada baseando-se nos estudos das ruas, observando o grau de intensidade do tráfego, tipo de pavimentação, acidentes da área, declividades existentes e outros parâmetros. Então, com uma planta da cidade e a densidade demográfica das quadras, juntamente com outros fatores, calcula-se os roteiros e o tempo gasto na coleta.

O roteiro, segundo o autor, deve iniciar o mais próximo possível da garagem ou local de agrupamento de pessoal. As ruas de mão única e de tráfego intenso não devem ser coletadas nas horas de maior movimento.

Deve-se fazer esforços para iniciar os roteiros nos pontos altos. A coleta em ruas com declividade deve ser realizada em ambos os lados da rua com o veículo se deslocando no sentido do ponto mais alto para o mais baixo.

Quarteirões não convencionais devem possuir itinerários específicos, sempre que necessário.

Na existência de mais de um local para destino final, deve-se tentar situar os pontos de descarga dos veículos coletores o mais próximo possível do centro das áreas servidas pela coleta. Na impossibilidade, a meta é minimizar a distância de transporte, já que o tempo gasto na descarga é incluído no tempo não produtivo, o qual deve ser minimizado.

Com base na planta da cidade fixam-se as áreas de atuação do serviço de coleta. Na sequência, o encarregado da área deve acompanhar o caminhão de coleta durante dois ou três dias, escolhendo o trajeto mais razoável. Para isto, usa-se de preferência os declives de rua, visando completar a carga no horário previsto, e tendo o menor período improdutivo.

Uma variante do método descrito acima foi desenvolvido por Fernando A. Paraguassú de Sá e Otavio Delcio F. Veras [32].

Conforme os autores, para elaboração dos roteiros, deve-se utilizar uma planta da área em estudo, de preferência na escala 1:5000. Sobre esta planta se sobrepõe uma folha de papel transparente na qual se desenha com linha cheia os segmentos produtivos, ou seja, os trechos de ruas onde há resíduos para serem coletados. Os segmentos não produtivos, ou seja, nos trechos de ruas onde não há resíduos para serem coletados (apenas deslocamento do veículo), são desenhados com linhas pontilhadas. Nas ruas onde o veículo coletor não tem acesso, e os garis vão buscar os resíduos, os trechos de ruas devem ser anotados com linhas contínuas mais finas, para diferenciar dos outros trechos considerados anteriormente.

No caso de áreas onde ocorrer a necessidade de se realizar vários roteiros, conforme especificam os proponentes, deve-se utilizar uma folha transparente para cada roteiro, fazendo uma diferenciação também por cores no traçado de cada roteiro.

Após a confecção completa do desenho sobre o papel transparente, fazem-se várias cópias do mesmo, e sobre cada uma desenha-se uma alternativa de conjunto de roteiros. Completado o conjunto de alternativas, escolhe-se a que fornece a menor distância a ser percorrida pelos veículos coletores.

2.3. MÉTODOS QUE UTILIZAM TÉCNICAS MATEMÁTICAS

Nesta seção são apresentadas as propostas que realizam uma combinação de aplicações de técnicas matemáticas com o conhecimento sobre os serviços de coleta. Estes métodos objetivam desenvolver programas computacionais para resolver o "problema dos m-carreiros chineses".

O "problema do carteiro chinês" consiste em achar um caminho de comprimento (custo) mínimo que passe ao menos uma vez por cada aresta da rede¹. Este problema, segundo H. Mation [27], foi elaborado pela primeira vez por Euler em 1736 e por esta razão sua solução é denominada de "caminho euleriano". Da mesma forma são atribuídos a Euler os teoremas que possibilitam verificar, a priori, as condições de existência de solução do mesmo.

Vários trabalhos foram desenvolvidos com este objetivo. O primeiro autor que apresentou solução para redes não orientadas², conforme Gondran [21], foi o de Mei-Ko Kwan, publicado em 1962, do qual originou o nome de "problema do carteiro chinês".

¹ Considerando o processo de coleta de resíduos sólidos, a rede compreende todos os trechos de ruas onde o veículo coletor necessita passar para coletar os resíduos depositos. Por sua vez, as arestas são os trechos de ruas componentes da rede.

² Relacionadas com a coleta de resíduos sólidos, as redes não orientadas são as áreas de coleta onde todos os trechos de ruas, por onde os veículos coletores devem passar, são de mão dupla, ou seja, a coleta pode ser realizada em qualquer sentido. As redes orientadas, por sua vez, são as áreas onde todos os trechos de ruas são de sentido único e as redes mistas são as que possuem ambos os tipos de trechos.

O surgimento de modelos para a solução do "problema do carteiro chinês" teve um grande impulso com o desenvolvimento da teoria de "Matching" elaborada por J. Edmonds e E. L. Johnson [14]. Neste trabalho, além do desenvolvimento da teoria de "Matching", os autores propuseram soluções, do referido problema, para redes não orientadas, redes orientadas e redes mistas. Mas, no caso de redes mistas, apresentaram somente solução para redes onde todos os vértices³ possuam grau par.

Por sua vez, a resolução do mesmo problema para redes mistas que contém vértices com grau ímpar foi apresentada por E. Mineaka [28].

No Brasil, vários trabalhos relacionados com o desenvolvimento ou aplicação de técnicas matemáticas à resolução do "problema do carteiro chinês" foram realizados e, entre os quais, alguns foram elaborados especificamente para solucionar o problema de otimização da coleta de resíduos sólidos urbanos.

Entre estes, cita-se o trabalho de J. R. Banegas Chaves [03], que apresentou um modelo heurístico aplicado a redes mistas. Nestes estudos, o autor experimentou o modelo na otimização da coleta de resíduos sólidos do jardim Santa Mônica, situado na cidade de Florianópolis.

Da mesma forma, H. C. Bueno da Costa [12], propôs um modelo aplicado a qualquer tipo de rede e, efetuou algumas demonstrações destas técnicas utilizando-se dos dados reais das cidades de Fortaleza e Aracaju.

Por outro lado, H. Mation [27], apesar de não ter proposto nenhum modelo, utilizou as técnicas de resolução do "problema do carteiro chinês" para redes orientadas, na otimização da coleta do bairro de Botafogo, na cidade do Rio de Janeiro

³ Os vértices, no caso de uma rede de coleta, são as esquinas. Denomina-se vértice de grau par as esquinas onde um número par de trechos de ruas se encontram, e de grau ímpar as esquinas onde um número ímpar de trechos de ruas se encontram.

Os valiosos estudos apresentados nos parágrafos precedentes, quando de suas aplicações, propuseram soluções para quaisquer tipo de redes, mas por outro lado, considerando o processo de coleta, só abrangeram problemas onde uma única viagem do veículo seria suficiente para recolher todo volume de resíduos gerados. Nas cidades de pequeno porte ou em áreas de grandes e médias cidades que geram um volume de resíduos igual ou menor que a capacidade de carga de um veículo coletor, estas propostas resolvem o referido problema. Porém, para cidades ou áreas onde o volume de resíduos ultrapassa a capacidade de carga do veículo, somente a resolução do "problema do carteiro chinês" não é suficiente para otimizar o conjunto de roteiros de coleta.

Então, para solucionar o problema de roteiros para cidades ou áreas de coleta onde o volume de resíduos gerados ultrapassa a capacidade de carga de um único veículo coletor, ou seja, resolver o problema dos m-carteiros chineses, apresenta-se a seguir as propostas que obtiveram, até o presente momento, os melhores resultados.

No ano de 1975, J. C. Liebman, J. W. Male e M. Wathne [24] consideraram que o problema total de planejamento de roteiros de veículos coletores de resíduos sólidos pode ser dividido em três partes: 1) divisão da área total em áreas menores, cada uma gerando a carga de um veículo coletor; 2) determinação, em cada setor, do percurso; 3) Agregação dos setores e respectivas viagens. Determinando, assim, o turno diário de trabalho para cada veículo e sua guarnição.

Este conjunto de setores associados, que determinam o tempo de um dia de trabalho de um veículo e sua guarnição, foi denominado de roteiro. Este roteiro, por sua vez, poderia incluir uma ou mais viagens à estação de transbordo ou ao local de disposição final dos resíduos.

Para o cumprimento do proposto, elaboraram o seguinte procedimento:

1. Determinação da rede de coleta - Os trechos de ruas sobre os quais devem ser coletados os resíduos, são as arestas da rede, e suas intersecções são os vértices. Se ocorrer coleta em ambos os lados do trecho simultaneamente, e este não for de mão única, então será representado por uma simples aresta não orientada. Se a coleta for realizada separadamente em cada lado do trecho, então este será representado por dois arcos com sentidos opostos (arestas orientadas);

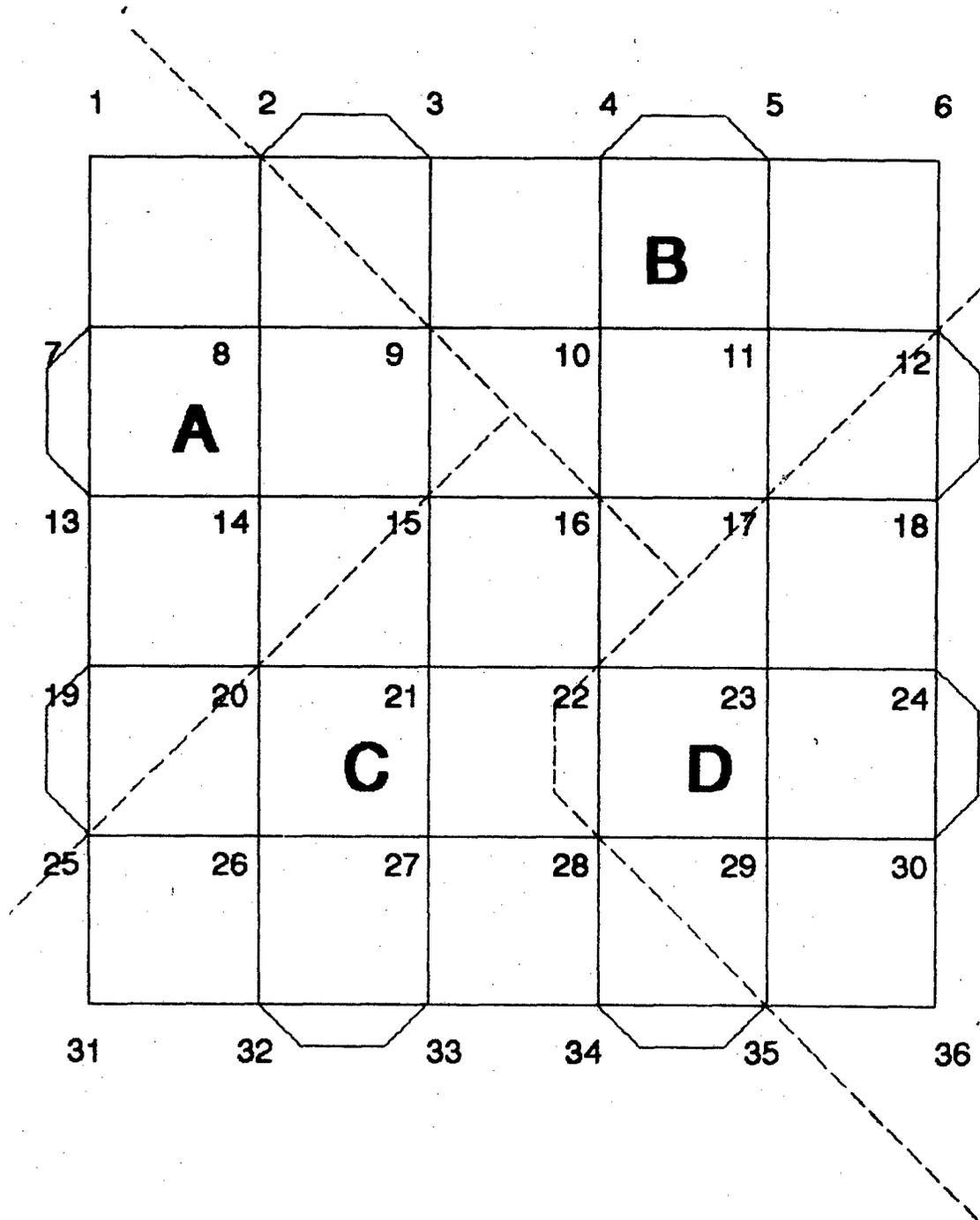
2. Transformar a rede definida no passo (1), em uma rede euleriana⁴ - Esta transformação, conforme os autores, pode ser realizada através da aplicação da teoria dos grafos⁵ ou de programação linear.

3. Dividir a rede euleriana em sub redes - Numa rede euleriana, todos os vértices possuem grau par. Desta forma, é possível dividi-la em sub redes pelos seus vértices, sem acrescentar nenhuma aresta, desde que os mesmos possuam mais do que um par de arestas. A fig.2.1 mostra uma rede euleriana não orientada dividida em sub redes.

Quando tratar-se de redes eulerianas orientadas, deve-se levar em consideração que os vértices, além de serem de grau par, devem possuir o número de arcos entrantes igual ao número de arcos que saem. Então para que as sub-áreas continuem sendo redes eulerianas, o traçamento dos limites de cada sub-área não pode romper este equilíbrio.

⁴ ver capítulo III.

⁵ Idem.



A, B, C e D -> sub-redes.

Figura 2.1. Rede euleriana dividida em sub-redes.

Em 1978, J. W. Male e J. C. Liebman [25], desenvolveram uma nova proposta para a otimização dos roteiros dos veículos coletores, fundamentados na seguinte heurística: o menor valor possível da somatória das distâncias, percorridas por todos os veículos de coleta sobre uma rede, é o comprimento mínimo que pode ser atravessado por um veículo, se ele tiver capacidade para coletar toda a rede em uma única viagem.

Mas, como o volume de resíduos gerados nestas áreas é normalmente superior a capacidade de carga de um único veículo coletor, consideraram que adicionalmente a estas distâncias mínimas, em algumas das m viagens de coleta os veículos poderão ter que passar sobre alguns trechos de ruas (coletadas por outros veículos) simplesmente para encontrar o início de seu circuito de coleta. Assim, concluíram que os trechos de ruas, componentes de uma rede de coleta, são reatravessados por dois motivos: em primeiro lugar para definir a rede de menor comprimento (rede euleriana), e em segundo lugar para definir os caminhos que levam, o veículo, ao início do percurso de coleta e do seu fim ao local de descarga.

Face a estas considerações, para a otimização do conjunto de viagens de coleta sobre uma determinada área, os autores propuseram que após a definição da rede (fig. 2.2), sejam realizados os seguintes procedimentos:

- 1 - Construir a rede euleriana - Esta fase do procedimento resolve o "problema do carteiro chinês", considerando como se uma única viagem fosse suficiente para recolher todo o volume de resíduos gerados na rede (fig 2.3);

- 2 - Dividir a rede euleriana em pequenos ciclos - Este procedimento é possível de ser realizado na rede euleriana face a existência na mesma de vértices somente de grau par. Cada pequeno ciclo, então, é composto por duas ou mais arestas (trechos de rua) (fig.2.4). Concluindo a construção dos pequenos ciclos, estes

passam a ser considerados vértices ou ciclos vértices, onde cada um é composto por um conjunto de trechos de ruas e acumula um volume de resíduos, que são gerados no período entre as coletas;

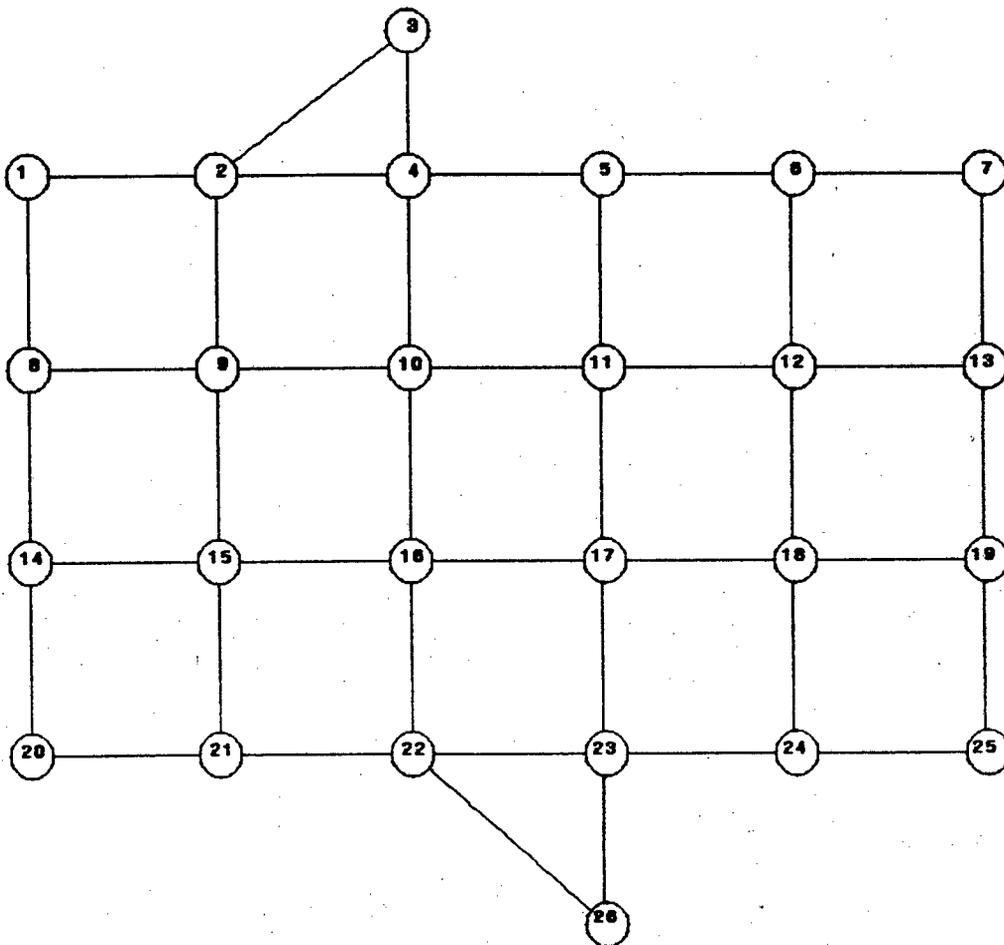
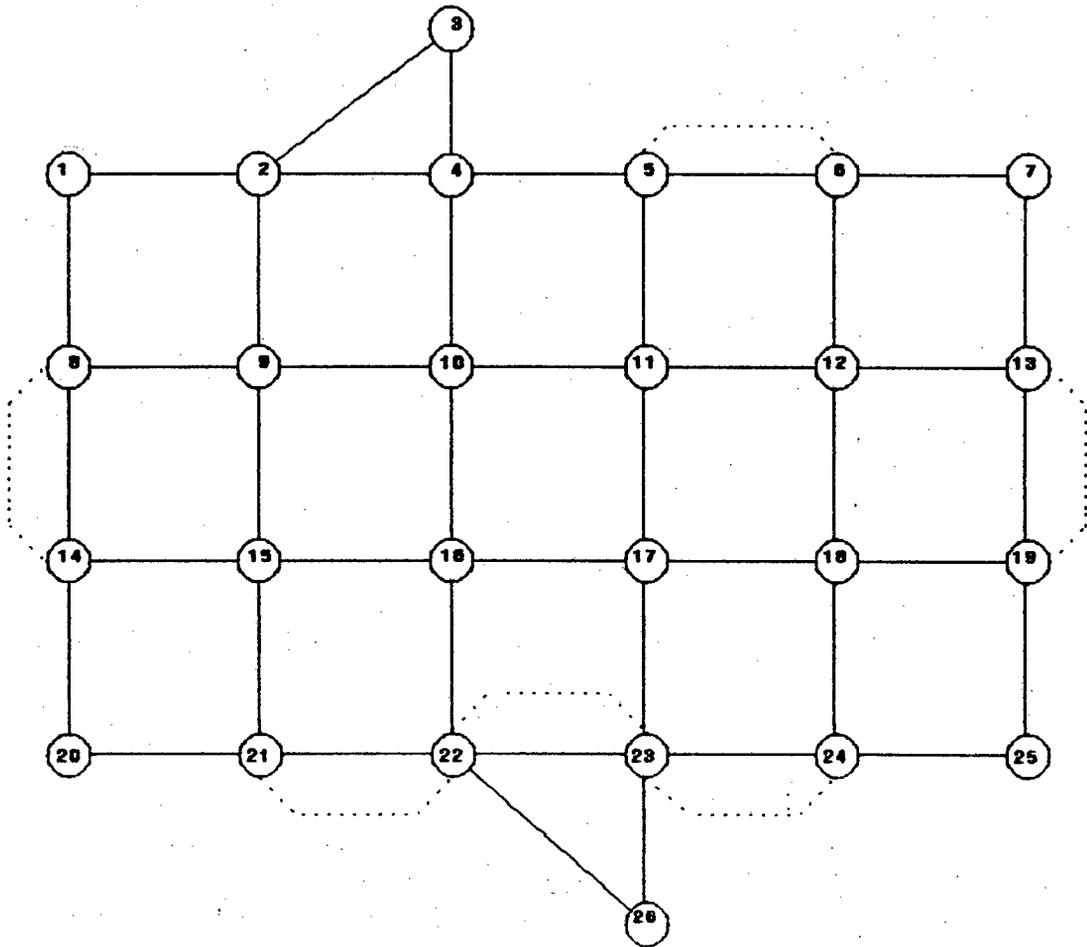


Figura 2.2. Rede de coleta



Ruas que devem ser retravessadas pelo veículo coletor.

Figura 2.3. Rede euleriana.

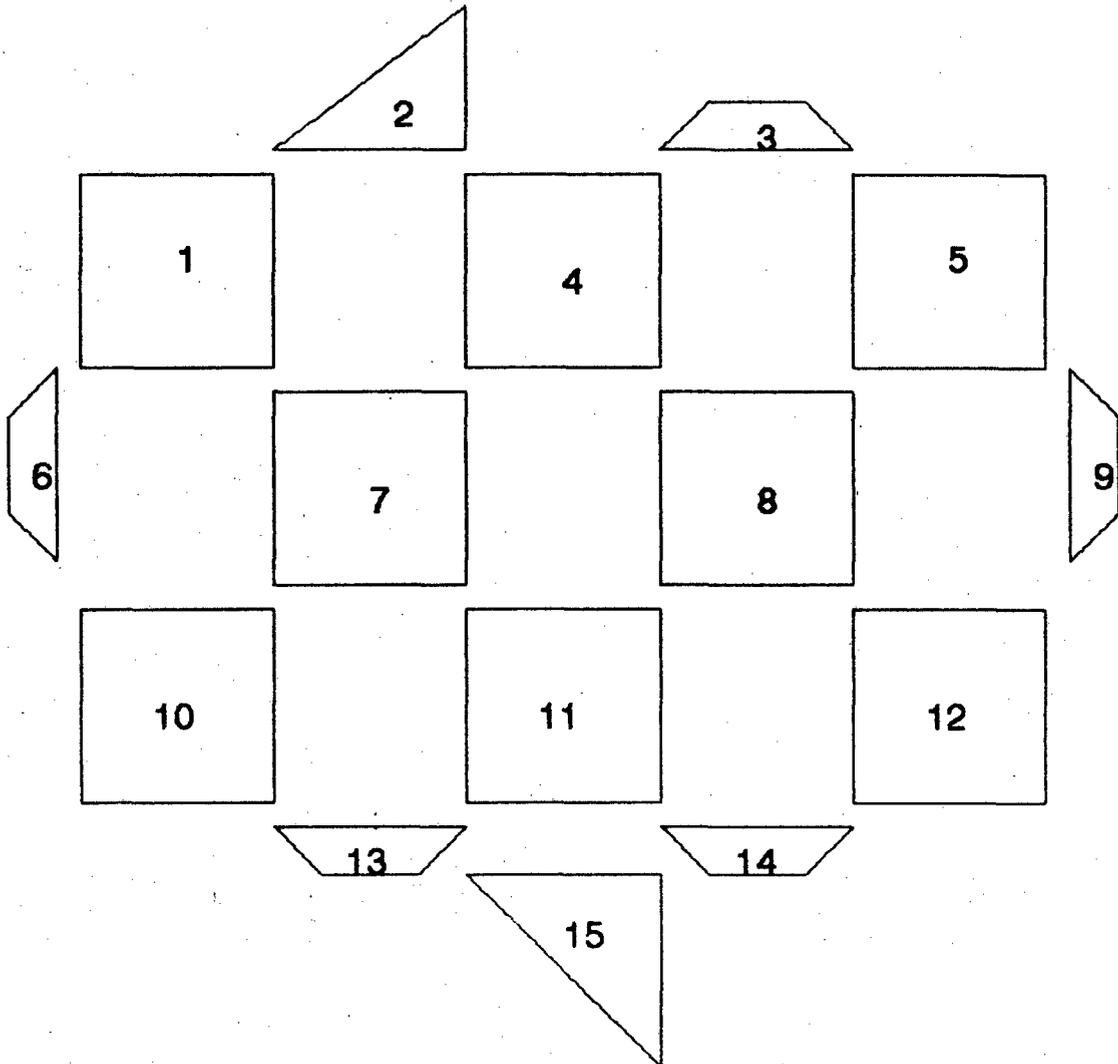


Figura 2.4. Rede euleriana dividida em pequenos ciclos.

3 - Construir a rede de ciclos vértices - Este procedimento realiza a conexão dos ciclos vértices adjacentes entre si por arestas de comprimento zero, constituindo, desta forma, uma rede de ciclos vértices. Após, a construção da rede, defini-se um vértice artificial como sendo o local de entrada e saída dos veículos coletores (fig. 2.5).

Local de entrada e saída da rede pelos veículos coletores.

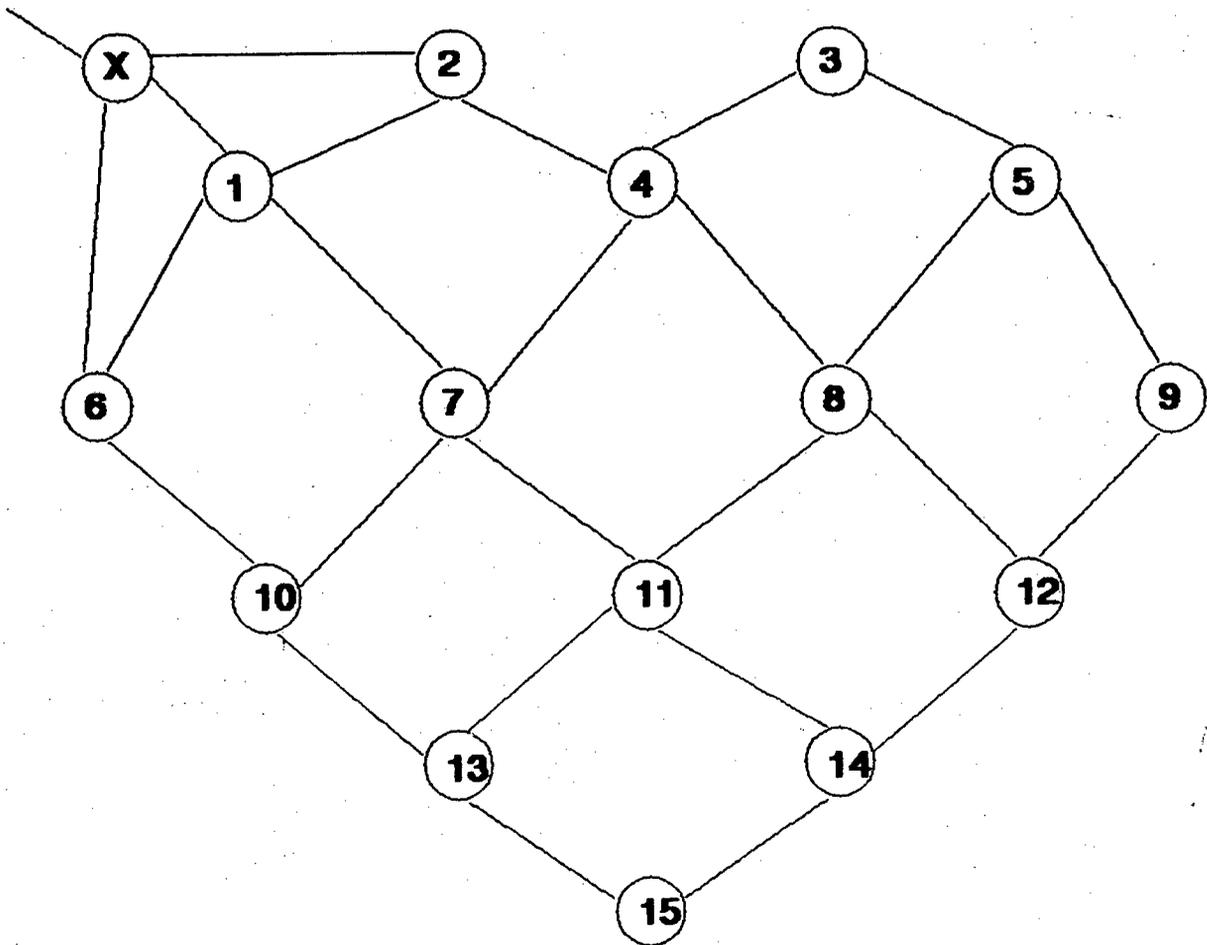


Figura 2.5. Rede de ciclos vértices.

4 - Construir a árvore expandida de mínimo comprimento - Nesta etapa, considerando como raiz, o vértice artificial de entrada e saída da rede, definido anteriormente na elaboração da rede de ciclos vértices, constroe-se uma árvore expandida de mínimo comprimento (fig.2.6);

A construção da árvore tem por objetivo reduzir as distâncias que são duplicadas pelos veículos coletores quando os mesmos são dirigidos para o início da sua viagem de coleta e quando os mesmo encerram a viagem e são encaminhados para o local de descarga.

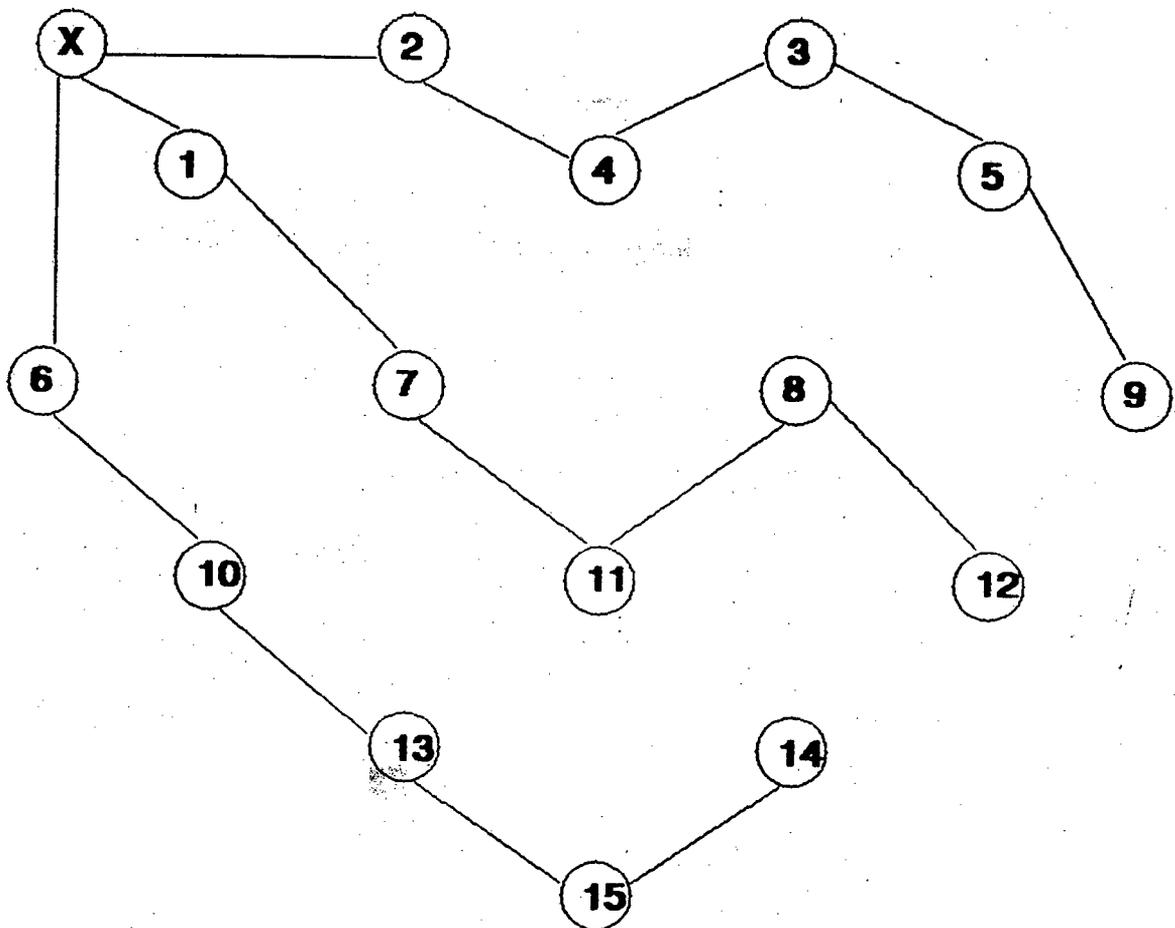


Figura 2.6 Árvore expandida de mínimo comprimento.

Na construção da árvore considera-se o volume de resíduos gerados em cada ciclo vértice. Pois, cada ramo, definido por este procedimento, incorpora um número de ciclos vértices, onde o volume de resíduos gerados seja suficiente para preencher a carga de um veículo coletor. Assim, cada ramo da árvore passa a ser definido como uma viagem.

5 - Decodificar a árvore em viagens e representá-la sobre a rede original - Uma vez construída a árvore expandida de mínimo comprimento, partindo-se do ciclo vértice artificial e seguindo, em cada ramo, o sentido de cada pequeno ciclo e os vértices de conexões entre estes, determina-se as várias viagens que os veículos devem realizar sobre a rede (fig.2.7).

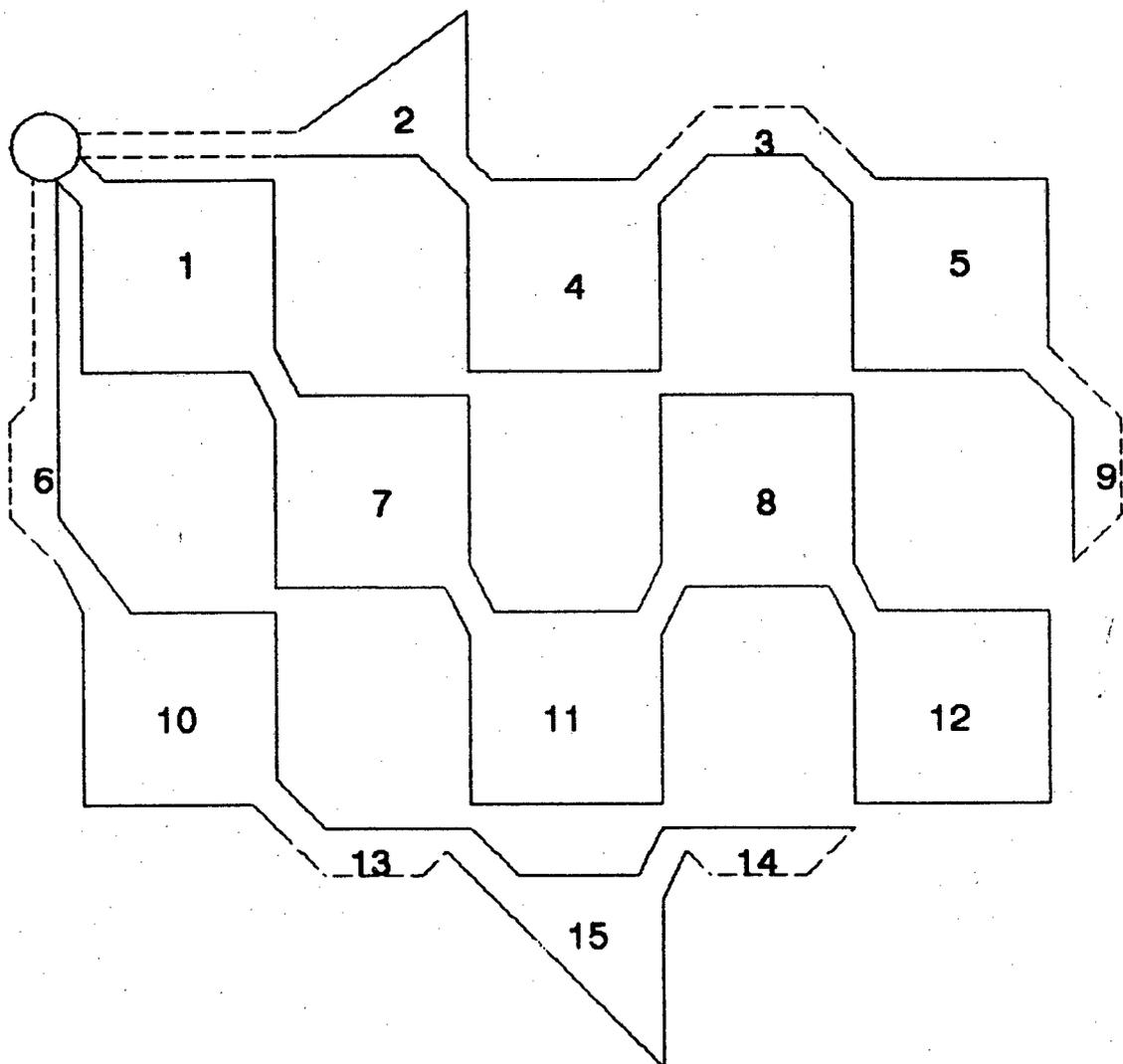


Figura 2.7 Conjunto final de viagens.

Por outro lado, em 1981, A. V. Chiplunkar, S. L. Mehndiratta e P. Khanna [10], com o objetivo de reduzir os custos de coleta de resíduos sólidos da cidade de Bombay na Índia, realizaram uma nova proposta heurística para solução do "problema dos m-carteiros chineses". Esta proposição, conforme os autores, promove algumas modificações no algoritmo desenvolvido por J. W. Male e J. C. Liebman e incorpora algumas características existentes nas grandes cidades dos países em desenvolvimento, tais como:

1. a rede de coleta de resíduos é geralmente de natureza mista, isto é, consistindo de ruas de mão única e de ruas de mão dupla;

2. redefinições de roteiros de coleta para acomodar mais do que uma viagem a um veículo coletor. Um roteiro de um veículo, compreendendo duas viagens de coleta, é definido como o caminho sequencial que engloba o seguinte percurso: garagem, setor de coleta para uma primeira viagem, local de disposição, novamente setor de coleta para a segunda viagem, local de disposição e, garagem;

3. inclusão de um número apropriado de garagens/vértices iniciais para começar a coleta e um número adequado de vértices de saída da rede de coleta para o(s) local(is) de disposição;

4. uma extensão do serviço àqueles pontos que requerem uma frequência de coleta mais do que uma vez ao dia;

5. uma consideração sobre entrar e sair do área de coleta por vértices diferentes.

Os passos envolvidos na obtenção da solução do problema, incorporando as considerações propostas pelos autores são:

- 1 - Construir a rede euleriana - Considera-se, para efeito de resolução desta etapa, que uma única viagem seria suficiente para coletar todos os resíduos gerados na rede. Em outras palavras isto significa resolver o problema do carteiro chinês associado à rede de coleta;

- 2 - Dividir a rede obtida em um número de sub-redes - Esta etapa é realizada conforme a proposta elaborada por J. C. Liebman, J. W. Male e M. Wathne [24]. Considera-se, também, para esta divisão, o número de locais de descarga;

3 - Dividir as sub redes em pequenos ciclos - O processo utilizado para realizar esta etapa é o mesmo apresentado anteriormente por J. W. Male e J. C. Liebman. Neste caso, considerando a aplicação à redes mistas e redes orientadas, o conhecimento do sentido para percorrer cada pequeno ciclo é necessário para posterior definição do sentido total do percurso da viagem. O volume gerado de resíduos em cada ciclo é também estimado.

São considerados, para efeito de estimativa do volume de resíduos, somente os pontos que geram cargas parciais, enquanto que os pontos que geram cargas completas não serão incluídos. Por sua vez, os pontos que geram cargas completas de resíduos serão coletados separadamente;

4 - Construir a rede de ciclos vértices para cada sub-área - Da mesma forma como proposto por Male e Liebman, em cada sub-área, representar cada pequeno ciclo por um vértice. Ligar, utilizando-se de arestas fictícias de comprimento zero, os ciclos vértices adjacentes entre si e o vértice artificial (vértice inicial e final). Determinam-se o(s) vértice(s) mais próximo(s) do local de descarga como local(is) de entrada e saída da rede;

5 - Construir a árvore expandida de mínimo comprimento para cada sub área - O processo utilizado pelos autores para realizar esta etapa é o mesmo proposto por J. W. Male e J. C. Liebman;

6 - Decodificar a árvore expandida de mínimo comprimento, em cada sub área - Idem proposta de J.W. Male e J.C. Liebman.

Conforme os proponentes, o "problema do carteiro chinês" é um problema de programação inteira e, então, pode ser resolvido eficientemente por um computador. Os passos remanescentes, porém, são melhores manuseados heurísticamente. Pode-se, assim, de acordo com os autores, acomodar os fatores convenientes à coleta conforme a natureza da área a ser coletada.

O problema de programação inteira que converte a rede de coleta em uma rede euleriana foi formulado pelos autores da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } \sum c_e \cdot x_e \quad (e = 1, 2, \dots, M) \dots\dots\dots (1)$$

Sujeito a

$$x_e \text{ ser inteira} \dots\dots\dots (2)$$

$$w_n \text{ ser inteira} \dots\dots\dots (3)$$

$$x_e \geq 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$w_n \geq 0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum a_{ne} x_e - 2w_n = b_n \quad (n = 1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots (6)$$

Onde

c_e = Comprimento da aresta/arco e;

x_e = número de vezes que reatravessa a aresta/arco e;

w_n = um inteiro que garante que cada vértice n tenha grau par;

a_{ne} = matriz de incidência definida como

$$a_{ne} \begin{cases} 1 & \text{se a aresta/arco e encontrar o vértice n} \\ 0 & \text{por outro lado} \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

b_n = o grau do vértice n, definido como

$$b_n \begin{cases} 0 & \text{se o vértice n for de ordem par} \\ 1 & \text{se o vértice n for de ordem impar} \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

2.4. CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados vários métodos de planejamento de roteiros de coleta de resíduos sólidos, onde os dois primeiros (A. Phillipi Jr e F. A. Paraguaçu) foram baseados exclusivamente no conhecimento empírico dos proponentes.

Os métodos subsequentes, por sua vez, propuseram soluções utilizando-se de técnicas matemáticas acopladas a certos procedimentos heurísticos. Estes procedimentos, então, foram desenvolvidos objetivando ou ampliar o número de variáveis a serem analisadas ou incorporar algumas variáveis específicas associadas ao local de sua aplicação.

De acordo com este "processo evolutivo", verifica-se que a proposta de J. C. Liebman, J. W. Male e M. Wathne [24], após a construção da rede euleriana, estabelece uma divisão da mesma em sub-redes, onde em cada uma o volume de resíduos gerados é igual ou inferior à capacidade de carga do veículo coletor.

Apesar de otimizar o roteiro dentro de cada sub-rede, verifica-se que este procedimento otimiza somente o percurso, realizado pelo veículo, dentro de cada área e, não incorpora a otimização dos deslocamentos realizados pelo veículos coletores, quando de suas idas ao local de início de coleta e do fim da coleta ao local de descarga.

Por sua vez, o trabalho de J. W. Male e J. C. Liebman [25], através da construção da árvore expandida de mínimo comprimento, propõe a otimização destes deslocamentos. Porém, o mesmo apresenta solução somente para redes não orientadas e cujos locais de entrada e saída, pelos veículos coletores, estejam posicionados no mesmo vértice.

Por outro lado, o modelo apresentado por A. V. Chiplunkar, S. L. Mehndiratta e P. Khanna [10], pode ser aplicado a redes mistas, redes onde a entrada e saída posicionam-se em locais

(vértices) distintos e, redes onde os resíduos podem ser descarregados em mais do que um local.

Constata-se que, apesar do estado evolutivo das propostas, três aspectos importantes não foram considerados pelos autores.

Em primeiro lugar, em nenhuma das propostas foram consideradas as alterações que ocorrem, no grau dos vértices de entrada e saída, quando o veículo entra e sai da rede por vértices diferentes.

Em segundo lugar, como poderá ser observado quando da aplicação dos modelos a redes mistas ou redes orientadas, a rede de ciclos vértices dificilmente poderá ser construída no plano.

E finalmente, a variação diária e as variações sazonais no volume dos resíduos gerados em cada área, como ocorrem nos processos reais de coleta, em nenhuma das proposta foi considerado.

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: NOÇÕES BÁSICAS SOBRE GRAFOS, ALGORÍTMOS DE BUSCAS EM GRAFOS, E O PROBLEMA DE ASSOCIAÇÃO.

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por finalidade apresentar as noções fundamentais da teoria dos grafos e os algoritmos de buscas e de associação que serão utilizados como suporte teórico para o desenvolvimento do modelo proposto no capítulo IV. Por outro lado busca o referencial teórico e as ferramentas necessárias para responder as indagações que as análises da revisão bibliográfica suscitaram.

3.2. NOÇÕES BÁSICAS

Nesta seção são apresentados os conceitos básicos e definições que serão utilizadas no presente trabalho.

Grafo - De acordo com Berge [04]: um grafo G é definido como um par (X, A) , onde:

(1) X é um conjunto $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ de elementos chamados vértices, e

(2) A é uma família $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ de elementos do produto cartesiano $X \times X$, chamados de arcos. Esta família permite ser denotada pelo conjunto $A = \{1, 2, \dots, n\}$ de seus índices.

Conforme Christofides [11], Um grafo G é uma coleção de pontos ou vértices. x_1, x_2, \dots, x_n (denotado pelo conjunto X) e uma coleção de linhas a_1, a_2, \dots, a_n (denotado pelo conjunto A), unindo todos ou alguns destes pontos. O grafo G será então completamente descrito e denotado pela dupla (X, A) .

Grafo orientado - Se todas as linhas tem direção, o que usualmente é mostrado por uma seta, elas são chamadas de arcos e o grafo resultante é denominado de grafo orientado [11].

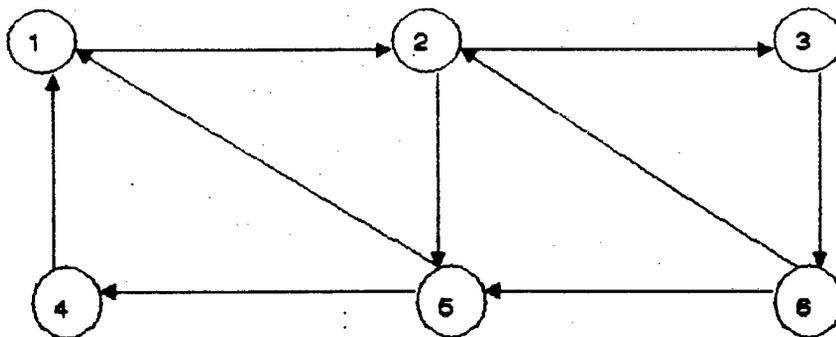


Figura 3.1. Grafo ou rede orientada.

Grafo não orientado - Se todas as linhas estão sem orientação, então elas são chamadas de arestas e o grafo resultante é denominado de grafo não orientado [11].

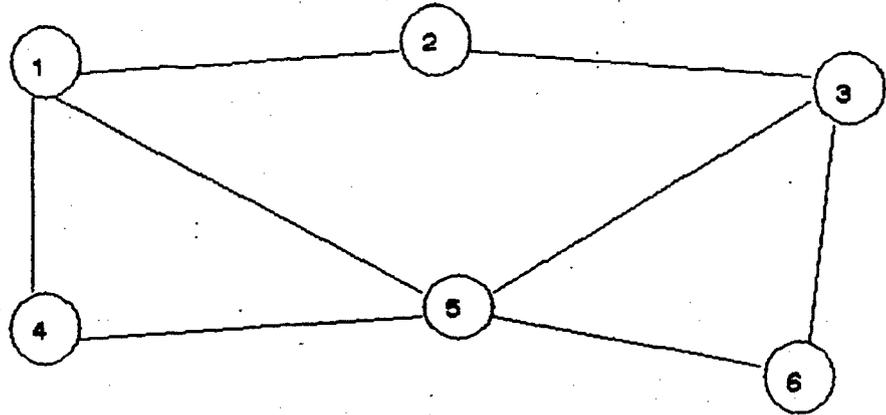


Figura 3.2. Grafo ou rede não orientada.

Grafo misto - Se existirem linhas orientadas e linhas não orientadas, ou seja se o grafo for composto tanto por arcos como por arestas, então o grafo resultante é denominado de grafo misto [28].

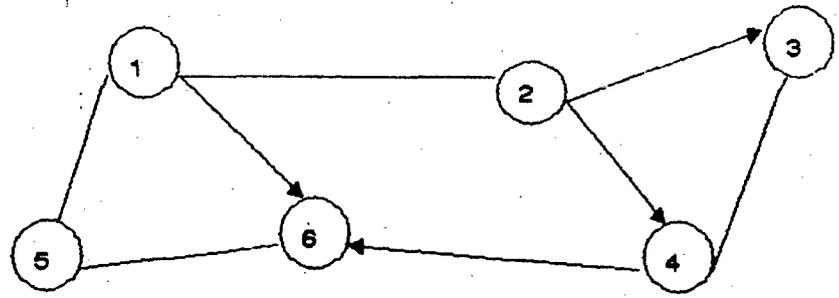


Figura 3.3. Grafo ou rede mista.

Grafo Valorado - Diz-se que um grafo é valorado se existirem uma ou mais funções relacionando X e/ou A com conjunto de números [06]:

$$f: X \rightarrow P$$

$$x_i \rightarrow p_i \quad \text{ou seja, } p_i = f(x_i)$$

$$g: A \rightarrow Q$$

$$a_i \rightarrow q_i \quad \text{ou seja, } q_i = f(a_i)$$

Essas funções definem grandezas, tais como, custos, distâncias, capacidades, etc., que são associadas aos arcos e/ou arestas e/ou vértices do grafo.

Grafo bipartido - O grafo $G = [X, A]$ é dito bipartido se o conjunto de vértices X for dividido em dois subconjuntos disjuntos X_1 e X_2 tal que cada um dos arcos ou arestas tenha um ponto extremo em X_1 e outro ponto extremo em X_2 . [09]

Ordem do grafo - O número de vértices, denotado por N , em um grafo é denominado de ordem do grafo. [04]

Vértices sucessores - Um vértice x_j é denominado sucessor de um vértice x_i se existir um arco tendo x_i como seu vértice inicial e x_j como seu vértice final [04]. O conjunto de todos os vértices sucessores do vértice x_i é denotado por $\Gamma^+(x_i)$.

Vértices predecessores - Um vértice x_i é denominado predecessor de um vértice x_j se existir um arco tendo x_i como seu vértice inicial e x_j como seu vértice final [04]. O conjunto de todos os vértices predecessores do vértice x_i é denotado por $\Gamma^-(x_i)$.

Desta maneira o conjunto de vizinhos do vértice x_i pode ser inteiramente denotado por

$$\Gamma(x_i) = \Gamma^+(x_i) \cup \Gamma^-(x_i)$$

Arcos e arestas adjacentes - Dois arcos (ou duas arestas) são ditos adjacentes se eles tiverem no mínimo um ponto extremo em comum [04].

Semi grau de Entrada - Num grafo orientado defini-se como semi grau de entrada de um vértice x_i , e representa-se como $dg^-(x_i)$, ao número total de arcos que tem o vértice x_i como seu vértice final [09].

Semi grau de Saída - Num grafo orientado define-se como semi grau de saída de um vértice x_i , e representa-se como $dg^+(x_i)$, ao número de arcos que tem o vértice x_i como seu vértice inicial. [11]

Grau de um vértice - O grau do vértice x_i é o número de arcos (ou arestas) que possuem x_i como um de seus pontos extremos. Utiliza-se a notação $dg(x_i)$ para representar o grau do vértice x_i . [04]

O grau de um vértice pode ser par ou ímpar se o número de arcos (ou arestas) incidentes ao mesmo for par ou ímpar.

O grau de um vértice x_i pode ser completamente denotado pela soma de seus semi graus, onde [06]:

$$dg(x_i) = dg^-(x_i) + dg^+(x_i)$$

Como em um grafo cada arco (ou aresta) é incidente em dois vértices, ele contribui duas vezes na soma dos graus dos vértices. assim, tem-se

$$\sum_{i=1}^n dg(x_i) = 2a.$$

Verifica-se, então, que a soma dos graus dos vértices de um grafo é duas vezes o número de seus arcos (ou arestas).

Se V_1 e V_2 são conjuntos de vértices de um grafo G , sendo vértices de grau par e de grau ímpar, respectivamente, então o lado

$$\text{esquerdo da equação } \sum_{i=1}^n dg(x_i) - \sum_{j \in V_2} dg(x_j) = \sum_{k \in V_1} dg(x_k)$$

será sempre par. Isto estabelece o seguinte resultado: o número de vértices de grau ímpar em um grafo será sempre par [09].

Vértice fonte - Denomina-se vértice fonte, todo vértice x_i de um grafo orientado, que possua o semi grau de entrada maior do que o semi grau de saída $\langle dg^-(x_i) \rangle > \langle dg^+(x_i) \rangle$ [28].

Vértice sumidouro - Denomina-se vértice sumidouro, todo vértice x_i de um grafo orientado que possua o semi grau de entrada menor que o semi grau de saída $\langle dg^-(x_i) \rangle < \langle dg^+(x_i) \rangle$ [28].

Caminho - Um caminho em um grafo orientado, é qualquer sequência de arcos, onde o vértice final de um arco é o vértice inicial do próximo [11].

Caminho elementar - É um caminho que não usa o mesmo vértice duas vezes [03].

Caminho simples - É um caminho no qual não se usa o mesmo arco (aresta) mais do que uma vez [26].

Circuito - Um circuito é um caminho simples, no qual os vértices inicial e final coincidem [06].

Percurso - o termo percurso é genérico para caminhos, circuitos e ciclos [06].

Percurso euleriano - é o percurso que utiliza todas as arestas da rede uma única vez [06].

Percurso pré-euleriano - é o percurso que utiliza todas as arestas da rede ao menos uma vez [06].

Grafo conexo, - Um grafo é denominado conexo se para todos vértices distintos x_i e x_j existe um caminho ligando x_i e x_j [21].

Grafo orientado fortemente conexo - Um grafo orientado é fortemente conexo se, para todos pares distintos de vértices x_i e x_j , existe um caminho orientado de x_i para x_j como também de x_j para x_i [09].

Árvores - Um dos conceitos mais importantes da teoria dos grafos e que aparece frequentemente em áreas superficialmente conectadas a grafos, é o de árvore [11].

Definições:

uma árvore não orientada será:

(I) um grafo conexo de n vértices e $(n-1)$ arestas;

ou (II) um grafo conexo sem circuitos;

ou (III) um grafo que todos os pares de vértices estão conectados com um e somente um caminho elementar.

Árvore expandida de mínimo comprimento - Considerando um grafo conexo não orientado $G(X, A)$ com custos associados às arestas (x_i, x_j) . Uma das árvores expandidas de G que pode ser encontrada e cuja somatória dos comprimentos de suas arestas seja mínimo é denominada de árvore expandida de mínimo comprimento. Vários algoritmos foram desenvolvidos para construção desta árvore, onde, o primeiro destes foi elaborado, segundo Christofides [11], por Kruskal. Gondran [21], também apresenta uma série de algoritmos que determinam esta árvore.

Matriz de Adjacências - A matriz de adjacências de um grafo G é denotada por $A = [a_{ij}]$, onde: $a_{ij} = 1$ se o arco (x_i, x_j) existe em G e $a_{ij} = 0$ se o arco (x_i, x_j) não existe em G [11].

A matriz de adjacências define completamente a estrutura de um grafo. A soma dos elementos na linha x_i da matriz define o semi grau de saída do vértice x_i e a soma dos elementos da coluna x_j , o semi grau de entrada do vértice x_j . O grupo de colunas que tem valor 1 na linha x_i mostra o conjunto de sucessores $\{\Gamma\alpha^+(x_i)\}$ do vértice x_i , e o grupo de linhas que possui valor 1 na coluna x_j mostra o conjunto de predecessores $\{\Gamma\alpha^-(x_j)\}$ do vértice x_j .

A matriz de adjacências ocupa um volume de N^2 informações, e no caso de grafos esparsos o volume de informações M necessárias a serem armazenadas é bem inferior a este volume, pois, conforme Gondran [21], $M \ll N^2$ para grafos orientados e $M \ll \frac{1}{2} N(N+1)$ para o caso de grafos não orientados. Como para efeitos computacionais é interessante reduzir o número de espaços em vazios a serem armazenados, Gondran propôs o seguinte: criar duas tabelas, $\alpha(\cdot)$, de dimensão $N+1$, e $\beta(\cdot)$, de dimensão M para o caso de grafos orientados e de dimensão $2M$ para o caso de grafos não orientados. Para cada vértice x_i , a tabela β listas os seus sucessores, iniciando pelo número de entrada $\alpha(x_i)$. Assim todas as informações correlatas ao vértice x_i estará contida entre as entradas $\alpha(x_i)$ e $\alpha(x_i+1) - 1$ da tabela $\beta(\cdot)$.

De onde obtém-se

$$da^+(x_i) = \alpha(x_i+1) - \alpha(x_i) \text{ (no caso de grafos orientados)}$$

$$da(x_i) = \alpha(x_i+1) - \alpha(x_i) \text{ (no caso de grafos não orientados)}$$

$$\alpha(x_i) = \sum_{x_j=1}^{x_i-1} da^+(x_j) + 1$$

No caso de grafos valorados, as informações dos valores dos arcos ou arestas poderam ser armazenadas na tabela $p(\cdot)$ em correspondência com a tabela $\beta(\cdot)$.

Exemplo: Considerando o grafo da fig. 3.4, onde $N = 4$ e $M = 6$.

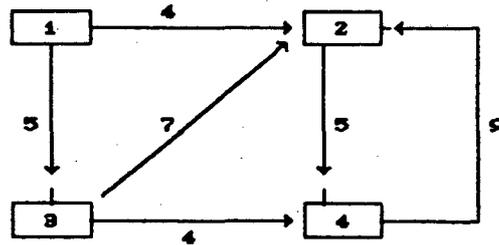


Figura 3.4. Rede orientada

	1	2	3	4	5
$\alpha(\cdot)$	1	3	4	6	7

	1	2	3	4	5	6	7
$\beta(\cdot)$	2	3	4	2	4	2	
$p(\cdot)$	4	5	5	7	4	9	

Verifica-se que para grafo orientado a tabela $\beta(\cdot)$ armazena o conjunto de todos os sucessores dos seus vértices, e para grafos não orientados esta tabela armazena tanto o conjunto de sucessores como de predecessores, pois neste caso $\Gamma^+ = \Gamma^-$. Para o caso de grafos orientados, quando for necessário achar o conjunto de seus predecessores, deve-se transformar a matriz que está na forma de linha para a matriz na forma de coluna. Assim, após a transformação, a tabela $\beta(\cdot)$ fornecerá o conjunto de todos os predecessores dos vértices do grafo.

3.3. ALGORÍTMOS DE BUSCA DE MENORES CAMINHOS EM GRAFOS

Nesta seção são apresentados os algoritmos considerados mais eficientes para a determinação dos menores caminhos existentes entre os vértices de uma rede.

Os problemas de travessias em grafo são os mais antigos da teoria dos grafos, e o de encontrar o menor caminho é o mais típico deles [21].

Definição

Dado um grafo valorado G que possui um valor l_{ij} associado a cada arco $a_{ij} \in A$, o problema de encontrar o menor caminho entre dois vértices quaisquer, caso ele exista, é encontrar o caminho μ_{ij} de x_i a x_j cujo comprimento total

$$L(\mu_{ij}) = \sum_{a_{ij} \in \mu_{ij}} l_{ij} \quad \text{seja mínimo. [21]}$$

Para resolver este problema existem vários algoritmos, dependendo das características do grafo, como:

- (1) $l_{ij} \geq 0$ para todos $a \in A$;
- (2) $l_{ij} = 0$ para todos $a \in A$;
- (3) G e l_{ij} arbitrários;
- (4) G sem circuitos;

e dependendo do problema a ser considerado, como:

- (1) encontrar o menor caminho entre um vértice e outro;
- (2) encontrar o menor caminho entre um vértice e todos os outros;
- (3) encontrar o menor caminho entre todos os pares de vértices.

3.3.1. ALGORÍTMO PARA ENCONTRAR O MENOR CAMINHO ENTRE DOIS PARES ESPECÍFICOS DE VÉRTICES OU ENTRE UM VÉRTICE E TODOS OUTROS.

Conforme Christofides [11], o mais eficiente algoritmo para solucionar o problema de menor caminho entre dois vértices foi elaborado por Dijkstra (Gondran [21] atribui este algoritmo a Moore e Dijkstra).

Seja l_{ij} o comprimento (valor) do arco a_{ij} se $a_{ij} \in A$.

Defina $\pi^*(x_i)$ o menor caminho de 1 a x_i ; neste caso em particular $\pi^*(x_1) = 0$.

O algoritmo procederá por $N-1$ iterações e ao iniciar cada iteração o conjunto de vértices será dividido em duas partes S e $\bar{S} = X - S$, com $1 \in S$.

Cada vértice $x_i \in X$ tem um comprimento (valor) $\pi(x_i)$ com as seguintes propriedades:

(1) Se $x_i \in S$, então $\pi(x_i) = \pi^*(x_i)$.

(2) Se $x_i \in \bar{S}$, então

$$\pi(x_i) = \min_{\substack{x_k \in S \\ x_k \in \Gamma^-(x_i)}} (\pi(x_k) + l_{ki})$$

O valor $\pi(x_i)$ é o comprimento do menor caminho de 1 até x_i sujeito as condições de que todos estes vértices exceto x_i estão em S .

Algoritmo [21]

(a) Início

$$\bar{S} = \{2, \dots, N\}, \quad \pi(1) = 0, \quad \pi(x_i) = \begin{cases} l_{1i} & \text{se } x_i \in \Gamma\sigma^+(x_1), \\ \infty & \text{por outro lado.} \end{cases}$$

(b) Encontra x_j pertencente a \bar{S} tal que $\pi(x_j) = \min_{x_i \in \bar{S}} \pi(x_i)$

Fazer $\bar{S} \leftarrow \bar{S} - \{x_j\}$

Se $|\bar{S}| = 0$, fim. Por outro lado ir para (c).

(c) Para todo $x_i \in \Gamma\sigma^+(x_j)$ e $x_i \in \bar{S}$, fazer

$$\pi(x_i) \leftarrow \min(\pi(x_i), \pi(x_j) + l_{ji}) \quad \text{e ir para (b).}$$

O estágio (c) permite ajustar o valor de $\pi(x_i)$ ($x_i \in \bar{S}$) para fazer $x_j \in S$.

O algoritmo encontra, um após outro, os vértices próximos do vértice 1. Ele forma uma árvore com raiz no vértice 1, determinando o menor caminho do vértice 1 a todos os outros vértices da rede.

Quando o objetivo for encontrar o menor caminho entre dois vértices específicos x_i e x_j , inicia-se pela raiz x_1 e interrompe o procedimento no momento em que o vértice x_j pretendido for alcançado [11].

Para determinar os arcos (ou arestas) que compõe o menor caminho, necessário no passo (c), armazenar em um vetor $p(x_i)$ os arcos que forem sendo agrupados para formar cada menor caminho entre o vértice raiz e os outros.

3.3.2. ALGORÍTMO PARA ENCONTRAR O MENOR CAMINHO ENTRE TODOS OS PARES DE VÉRTICES DE UMA REDE

Quando se deseja encontrar o menor caminho entre todos os pares de vértices, o algoritmo que realiza esta tarefa com maior rapidez, conforme Christofides [11], é o de Floyd.

Este algoritmo baseia-se sobre uma sequência de n transformações de uma matriz de valores (comprimento) L , tal que na k ésima iteração, a matriz representa os menores valores entre todos os pares de vértices, com a restrição que no caminho entre x_i e x_j (para qualquer x_i e x_j) exista somente vértices do conjunto restrito (x_1, x_2, \dots, x_k) como intermediários.

Algoritmo

Assume-se que:

$$l_{ij} = \begin{cases} = 0, & \text{quando } i = j \\ = \infty, & \text{se não existir o arco } a_{ij}. \\ = \text{comprimento do arco,} & \text{para os outros.} \end{cases}$$

Início

Passo 1. Fazer $k = 0$.

Iterações

Passo 2. Fazer $k = k + 1$.

Passo 3. Para todo $i \neq k$ de forma que $l_{ik} \neq \infty$ e todo $j \neq k$ de forma que $l_{kj} \neq \infty$, realizar a operação:

$$l_{ij} = \min [l_{ij}, (l_{ik} + l_{kj})]$$

Teste de finalização

Passo 4.

(a) Se qualquer $l_{ii} < 0$ então existe um circuito negativo contendo o vértice x_i , e não existe solução possível e o algoritmo termina.

(b) Se todo $l_{ii} \geq 0$, e $k = n$, a solução foi encontrada e a matriz L mostrará todos os menores caminhos entre todos os pares de vértices.

(c) Se todo $l_{ii} \geq 0$, e $k < n$, voltar ao passo 2.

Quando desejar encontrar os vértices que compõem o menor caminho, além do seu comprimento, Christofides [11] propõem uma técnica que envolve a introdução no algoritmo, junto com a matriz L , de uma matriz $\Theta = [\theta_{ij}]$ $n \times n$ de armazenamento da sequência de arcos que compõe os menores caminhos entre quaisquer dois pares de vértices. A matriz Θ é inicializada com $\theta_{ij} = x_i$ para todo x_i e x_j .

Desta forma, no passo 3, após o cálculo da equação de valor realiza-se a gravação da rota, que será:

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \theta_{kj}, & \text{se } (l_{ik} + l_{kj}) < l_{ij} \\ \text{não altera nada, se } l_{ij} \leq (l_{ik} + l_{kj}) \end{cases}$$

Com a introdução da matriz de armazenamento da sequência de vértices da rota, o algoritmo de Floyd terá a seguinte forma:

Início ,

Passo 1. Fazer $k = 0$.

Fazer $\theta_{ij} = x_i$ para todo x_i e $x_j \in X$.

Iterações

Passo 2. Fazer $k = k + 1$.

Passo 3. Para todo $i \neq k$ de forma que $l_{ik} \neq \infty$ e todo $j \neq k$ de forma que $l_{kj} \neq \infty$, realizar a operação:

$$l_{ij} = \min [l_{ij}, (l_{ik} + l_{kj})]$$

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \theta_{kj}, & \text{se } (l_{ik} + l_{kj}) < l_{ij} \\ \text{não altera nada, se } l_{ij} \leq (l_{ik} + l_{kj}) \end{cases}$$

Teste de finalização

Passo 4.

(a) Se qualquer $l_{ii} < 0$ então existe um circuito negativo contendo o vértice x_i , e não existe solução possível e o algoritmo termina.

(b) Se todo $l_{ii} \geq 0$, e $k = n$, a solução foi encontrada e a matriz L mostrará todos os menores caminhos entre todos os pares de vértices. E a matriz θ mostrará todos os vértices do menor caminho entre todos os pares de vértices.

(c) Se todo $l_{ii} \geq 0$, e $k < n$, voltar ao passo 2.

3.4. O PROBLEMA DE ASSOCIAÇÃO

O problema de associação é um caso especial do problema de "matching", no qual se deseja associar cada um dos vértices do conjunto $X_1 \subset X$, a cada um dos vértices de um outro conjunto $X_2 \subset X$, e que $X_1 \cap X_2 = \emptyset$ e $|X_1| = |X_2| = n$, com o objetivo de minimizar ou maximizar a distância (custo, capacidade, etc.) total.

Para resolver este problema Gillett [20] propôs a aplicação do algoritmo conhecido por método ou algoritmo húngaro, criado pelo matemático húngaro D. König, que realiza um número de operações sobre uma matriz formada pelas distâncias (custos, capacidades, etc) entre todos os vértices de um conjunto com todos os outros do outro conjunto.

3.4.1. ALGORÍTMO HÚNGARO

Passo 1

Se desejar maximizar o total de capacidade, troca-se o sinal de cada elemento da matriz e passa-se ao passo 2; caso desejar minimizar ir diretamente ao passo 2.

Passo 2

Subtrair o menor elemento da linha i de cada elemento da linha ($i = 1, 2, \dots, m$).

Passo 3

Subtrair o menor elemento da coluna j de cada elemento da coluna ($j = 1, 2, \dots, m$).

Passo 4

Examinar sucessivamente as linhas. Para a primeira linha com exatamente um zero desmarcado, marca-lo com () e marcar os outros zeros da mesma coluna com um X, de forma que outra atribuição não seja feita para esta coluna. Repetir este procedimento até não existir mais linhas com zeros desmarcados ou que possua ao menos dois zeros.

Passo 5

Examinar sucessivamente as colunas para escolher os zeros desmarcados e marca-los com (<) para denotar uma atribuição. Marcar com um X os outros elementos zeros da mesma linha de modo que outra atribuição não seja feita para esta linha. Repetir o procedimento até que cada coluna não tenha zeros desmarcados ou tenha ao menos dois zeros desmarcados.

Passo 6

Repetir os passos 4 e 5 sucessivamente até que ocorrer uma das três condições:

(A) Todas as linhas possuem uma atribuição (<).

(B) Existem ao menos dois zeros desmarcados em cada linha e/ou em cada coluna.

(C) Não existem sobras de zeros desmarcados, e uma completa atribuição não foi realizada.

Passo 7

Se (A) ocorrer, a atribuição esta completa e será uma associação otimizada.

Se (B) ocorrer, arbitrariamente faz-se uma atribuição (<) para um dos zeros e marca-se com X os outros zeros da mesma linha e/ou mesma coluna, e então volta-se ao passo 4.

Se ocorrer (C) encaminha-se ao passo 8.

Passo 8

Marcam-se com (***) todas as linhas que não possuem nenhuma atribuição (<).

Passo 9

Marca-se com (***) as colunas ainda não marcadas que possuem um zero nas linhas marcadas.

Passo 10

Marca-se as linhas ainda não marcadas que possuem atribuições nas colunas marcadas.

Passo 11

Repetir os passos 9 e 10 até terminar o processo de marcação.

Passo 12

Passar linhas tracejadas sobre todas as linhas não marcadas e sobre todas as colunas marcadas. Isto será suficiente para cobrir cada zero da matriz reduzida ao menos uma vez.

Passo 13

Examinar todos os elementos que não possuem nenhuma linha sobre eles. Selecionar o menor deles, subtraí-lo de todos os elementos desmarcados e adicioná-lo aos elementos das colunas marcadas. Retornar ao passo 4.

3.5. CONCLUSÃO

Foram apresentados neste capítulo os conceitos e as definições principais da teoria dos grafos, os algoritmos considerados mais eficientes na busca dos menores caminhos e o algoritmo de associação que serão utilizados como bases fundamentais para a elaboração do modelo proposto no capítulo seguinte.

CAPÍTULO IV

4. MODELO: PLANEJAMENTO DE ROTEIROS DOS VEÍCULOS COLETORES DE RESÍDUOS SÓLIDOS

4.1. INTRODUÇÃO

Conforme apresentado no capítulo I, existem basicamente dois procedimentos para realizar a coleta de resíduos sólidos urbanos, sendo:

a - coleta ao longo de todos os trechos de ruas que geram resíduos;

b - coleta de containers, ou seja, coleta ponto a ponto.

A metodologia proposta neste capítulo restringir-se-á ao estudo de processos de coleta que são realizados ao longo de todos os trechos de ruas.

4.2. OBJETIVOS DO MODELO

O modelo proposto tem por objetivos:

- a) ,minimizar o comprimento total do percurso que deve ser percorrido pelo(s) veículo(s) coletor(es);
- b) realizar o planejamento sobre qualquer tipo de rede (orientada, não orientada e mista);
- c) possibilitar o planejamento de processos onde as entradas e as saídas realizadas pelos veículos coletores na rede ocorram em vértices distintos;
- d) obter um sistema que seja suficientemente flexível quanto a alteração do número como do comprimento das viagens.

O modelo atende, assim: as variações que ocorrem na quantidade e no volume de resíduos sólidos gerados e dispostos aos serviços de coleta; as cidades que possuem a(s) garagem(ns) situadas em pontos diferentes dos locais de descarga dos veículos coletores.

4.3. ABRANGÊNCIA DO MODELO

Como será detalhado na descrição do modelo, determinados tipos de redes, em função de certas peculiaridades, não permitem o desenvolvimento, de forma manual, de algumas etapas, conforme propostas por J. W. Male e J. C. Liebman [25]. Mas, considerando que a maioria das redes reais estão enquadradas nestes tipos, e que o planejamento das mesmas é parte desta proposição, então, além de uma proposta que pode ser totalmente informatizada, será incluído um complemento heurístico que pode ser manuseado visando o planejamento destes tipos de redes.

Por outro lado, não será estudado o planejamento do processo de coleta dos outros tipos de resíduos (hospitalares, radioativos, de processos industriais, armazenados em grandes containers e de grande porte) e nem o procedimento de divisão da área total da cidade em grandes áreas.

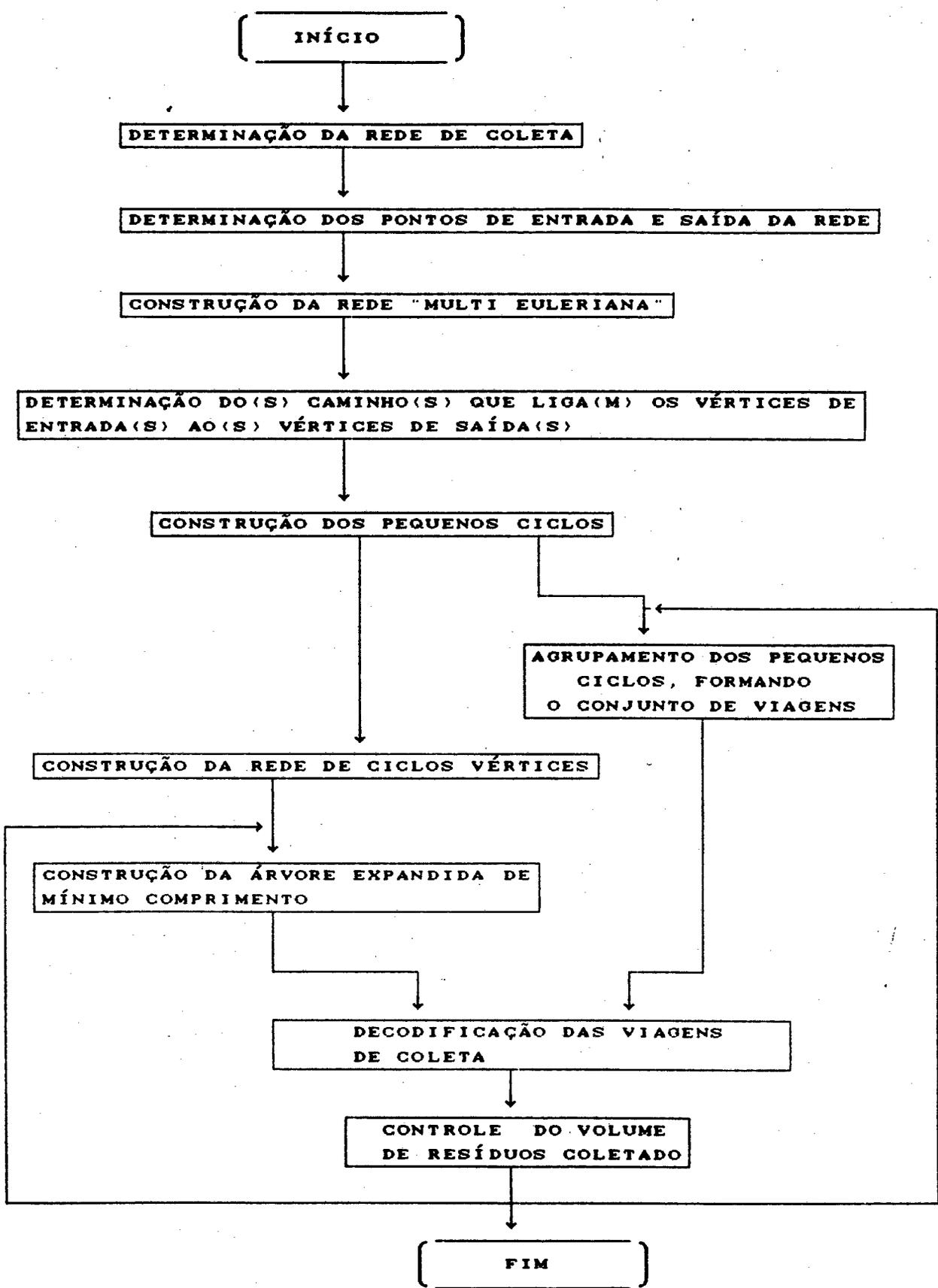


Figura 4.1. Fluxograma de passos do modelo

4.4. DESCRIÇÃO DO MODELO

Conforme fluxograma apresentado na figura 4.1. o modelo proposto engloba dois caminhos possíveis para realizar o planejamento do processo de coleta.

Estes caminhos, por sua vez, definem procedimentos que podem ser realizados totalmente ou parcialmente informatizados após a definição da rede de coleta e dos locais de entrada e saída da mesma.

4.4.1. DETERMINAÇÃO DA REDE DE COLETA

Uma rede, como definida no capítulo anterior, é composta por aresta e/ou arcos e vértices. As arestas e/ou os arcos, no caso da rede de coleta, serão os segmentos ou trechos de ruas onde é necessário o veículo passar para realizar a coleta. Os vértices, por sua vez, são as esquinas, ou seja, os pontos de intersecção de dois ou mais trechos de rua.

A definição dos trechos de ruas que farão parte da rede de coleta e dos sentidos de atravessamento dos mesmos, é um procedimento que está relacionado principalmente com os seguintes fatores: higiene e limpeza; custos; segurança e esforço da equipe de garis.

Como o objetivo principal do processo de coleta é a manutenção da higiene e limpeza das comunidades urbanas, por princípio, todos os resíduos gerados devem ser coletados. Assim, todos os trechos de ruas onde os resíduos são colocados pela comunidade à disposição do sistema de coleta deveriam fazer parte da rede.

Por outro lado, se esta for composta somente pelos trechos de ruas onde os resíduos são colocados pela comunidade,

pode-se perder a oportunidade de reduzir os comprimentos dos roteiros. Assim, a inclusão de certos trechos, que não exigem que o veículo coletor passe pelos mesmos, mas que sirvam de ligação entre determinados trechos pertencentes ao roteiro, poderá auxiliar na redução do comprimento total do conjunto de viagens. Igualmente, certos trechos de comprimento reduzido onde ocorre a disposição de resíduos, poderão ser suprimidos da rede e os seus resíduos alocados a outros.

Portanto, na definição do conjunto de trechos de ruas que farão parte da rede, é de importância fundamental realizar análises, tanto de inclusão de certos trechos onde a coleta não é necessária, quanto de retirada de pequenos trechos onde os resíduos gerados possam ser alocados a outros.

Considerando que o processo de coleta é realizado, em sua maior parte, manualmente, a preocupação com a segurança e a redução do esforço físico da equipe de trabalho é um fator importante na definição do sentido de certos trechos.

Assim, por exemplo, objetivando a redução de custos e a segurança da equipe de garis, no caso de trechos de ruas de mão dupla onde a coleta pode ser realizada em ambos os lados simultaneamente, o sentido de atravessamento destes deve ser, sempre que possível, o que favoreça o posicionamento do maior número de embalagens com resíduos do lado direito do veículo coletor.

E, visando a redução do esforço físico da equipe de garis, para o caso de ruas com inclinações acentuadas, deve-se preferivelmente realizar a coleta no sentido de cima para baixo.

Em função das considerações arroladas nos parágrafos precedentes, para o caso de redes mistas ou redes não orientadas, pode-se definir o sentido de alguns trechos de ruas, que previamente eram de duplo sentido.

4.4.2. DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE ENTRADA E SAÍDA DA REDE DE COLETA

Nas médias e grandes cidades, o volume de resíduos sólidos gerados em cada área a ser coletada, normalmente ultrapassa a capacidade de carga de um veículo coletor. Então, para que todos os resíduos sólidos gerados sejam coletados, é necessário que um ou mais veículos realizem várias viagens de coleta sobre a área. Assim, para realizar o serviço de coleta, cada veículo precisa entrar e sair da rede várias vezes. A entrada e a saída da rede poderá ou não ser efetuada pelo mesmo local (vértice). Normalmente, na maioria das cidades, a(s) garagem(ns) dos veículos coletores está(ão) localizada(s) em lugar(es) distinto(s) do(s) local(is) de descarga(s) dos resíduos.

Em sua primeira viagem de coleta, o veículo coletor sai da garagem, entra na rede, percorre um conjunto de trechos de ruas, até preencher sua capacidade de carga, e transporta os resíduos até o local de descarga. Nas viagens sucessoras, o veículo sai do local de descarga, após esvaziar seu compartimento de carga, entra na rede, percorre um conjunto de trechos de ruas até preencher sua capacidade de carga, como na viagem anterior, e transporta os resíduos até o local de descarga. E assim, sucessivamente, até terminar o seu turno diário de trabalho.

Neste processo, normalmente, na primeira viagem, o veículo coletor entra na rede por um determinado local (vértice) e sai por outro. Enquanto que nas viagens sucessoras, usualmente, o veículo entra e sai pelo mesmo local (vértice).

A definição do local de entrada na rede é um problema relacionado, basicamente, com os custos de deslocamento do veículo coletor vazio, desde seu ponto de partida até o primeiro trecho a ser coletado. O local de saída, por sua vez, com os custos de deslocamento desde o último trecho de coleta até o local de descarga e o retorno ao início da próxima viagem.

A escolha do local de destino final e da garagem que estarão relacionados com uma determinada área de coleta é um problema que pode ser resolvido satisfatoriamente através da aplicação de formulações matemáticas, como o algoritmo de programação linear inteira proposto por J. A. Ferreira e J. C. A. Figueiredo [18].

Então, definidos a garagem e o local de descarga dos veículos que estarão relacionados com a área de coleta, pode-se determinar os pontos de entrada e de saída da rede.

4.4.3. CONSTRUÇÃO DA REDE "MULTI EULERIANA"

A transformação de uma rede conexa qualquer em uma rede, que permite a realização de um percurso euleriano de menor comprimento, é conhecida como a resolução do "problema do carteiro chinês". J. W. Male e J. C. Liebman [25] denominaram de "rede unicursal" a rede resultante deste procedimento. Alguns autores denominaram esta rede de "rede euleriana" ou "grafo euleriano".

Considerando as modificações ocorridas nos vértices de entrada e saída da rede, conforme descrito na etapa 4/4.2, denominar-se-á de rede "multi euleriana" a rede que permite a realização simultânea de um conjunto de percursos, cujo comprimento total de reatrevessamento seja mínimo.

As redes reais de coleta, podem ser constituídas somente por ruas de mão dupla, ou somente por ruas de mão única, ou por ambos os tipos. Assim, apresenta-se a seguir, os algoritmos que proporcionam a solução particular para cada tipo de rede.

4.4.3.1. TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE ORIENTADA FORTEMENTE CONEXA, EM UMA REDE " MULTI EULERIANA"

Para que uma rede orientada fortemente conexa seja transformada em uma rede euleriana, é necessário que seus vértices, tanto fontes como sumidouros, sejam convertidos em vértices onde o semi grau de saída seja igual ao semi grau de entrada.

Esta transformação, de acordo com o procedimento de resolução do problema do "carteiro chinês", é realizada através da duplicação dos menores caminhos existentes entre os vértices fontes e os vértices sumidouros, de maneira que o comprimento total do conjunto duplicado seja minimizado.

Como deseja-se construir a rede "multi euleriana", antes de iniciar o procedimento, deve-se incorporar as modificações ocorridas nos graus dos vértices de entrada e saída da rede. A definição prévia dos locais de entrada e saída na rede em pontos distintos, promoverá uma modificação no grau destes vértices. Por exemplo, na figura 4.2., o vértice 1 que era um vértice completo de grau par, após a definição do mesmo como local de entrada, passou a ser um vértice fonte de grau ímpar, com oferta igual a 1. Por outro lado, o vértice 26 que era um vértice fonte de grau ímpar, com oferta igual a 1, após a definição do mesmo como local de saída, passou a ser um vértice completo. Verifica-se, desta maneira, que só é possível determinar os conjuntos de vértices fontes e de vértices sumidouros após a definição dos locais de entrada(s) e saída(s).

Definidos os conjuntos de vértices fontes e sumidouros e com o auxílio de algoritmos de busca de menores caminhos, como os de Dijkstra ou Floyd, apresentados no capítulo III, pode-se encontrar todos os menores caminhos existentes entre cada vértice fonte e todos os vértices sumidouros.

Conhecido o conjunto dos menores caminhos, conforme descrito acima, para determinar a associação de comprimento mínimo entre os vértices fontes e vértices sumidouros aplica-se o

algoritmo Húngaro, também conhecido como algoritmo de transporte, apresentado no capítulo III. E, finalmente, para a construção da rede "multi euleriana", duplicam-se os trechos, pertencentes aos caminhos de mínimo comprimento, definidos pela aplicação deste algoritmo.

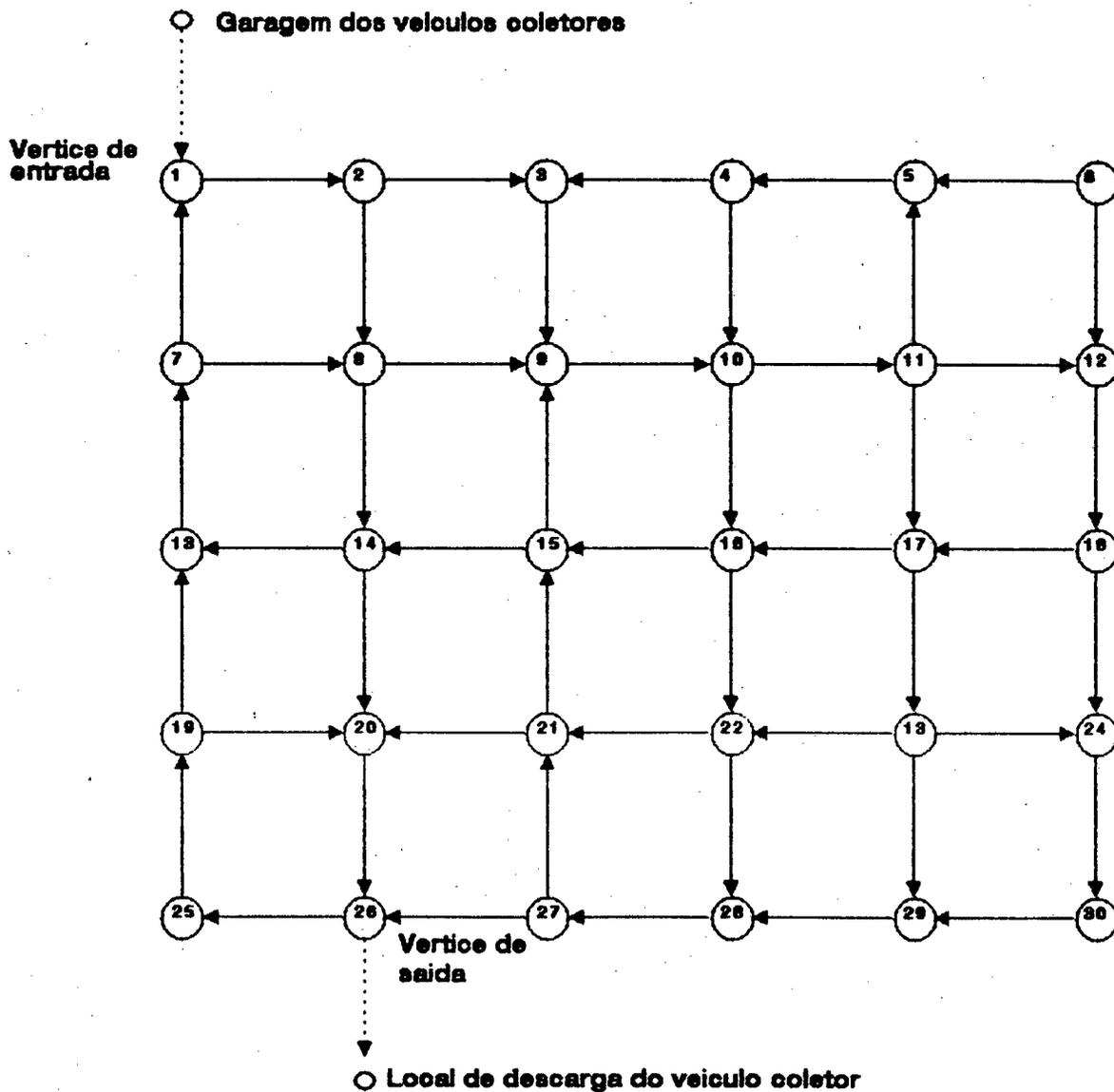


Figura 4.2. Rede orientada, após a definição dos locais de entrada e saída.

4.4.3.2. TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE NÃO ORIENTADA CONEXA EM UMA REDE "MULTI EULERIANA"

A construção de uma rede euleriana, a partir de uma rede não orientada conexa, é realizada, de acordo com o procedimento de resolução do problema do "carteiro chinês", através da transformação de todos os vértices de grau ímpar em vértices de grau par.

Assim, para atingir o proposto acima, associam-se aos pares os vértices ímpares e duplica-se o conjunto de arestas existentes entre os mesmos, cujo comprimento total desta associação seja o mínimo.

Da mesma forma que para redes orientadas, no caso de construção da rede "multi euleriana" a partir de uma rede não orientada, deve-se incorporar previamente ao início do procedimento as modificações ocorridas nos graus dos vértices de entrada(s) e saída(s) da rede. Por exemplo, observa-se na figura 4.3. que o vértice 1 que era de grau par, após a sua definição como local de entrada, passou a ser de grau ímpar, enquanto que o vértice 26, que era de grau ímpar, após a sua definição como local de saída, passou a ser de grau par.

Portanto, somente após a determinação dos vértices de entrada(s) e saída(s), pode-se definir todos os vértices de grau ímpar da rede.

Então, após a definição dos vértices de grau ímpar, através da utilização de um algoritmo de busca de menores caminhos, podem-se achar todos os menores caminhos entre estes vértices.

Para encontrar, o conjunto de menores caminhos, que associa aos pares os vértices de grau ímpar da rede, de forma que o comprimento total deste conjunto seja o mínimo, aplica-se o algoritmo desenvolvido por J. Edmonds e E. L. Johnson [14] que soluciona o problema de "matchig" para redes valoradas.

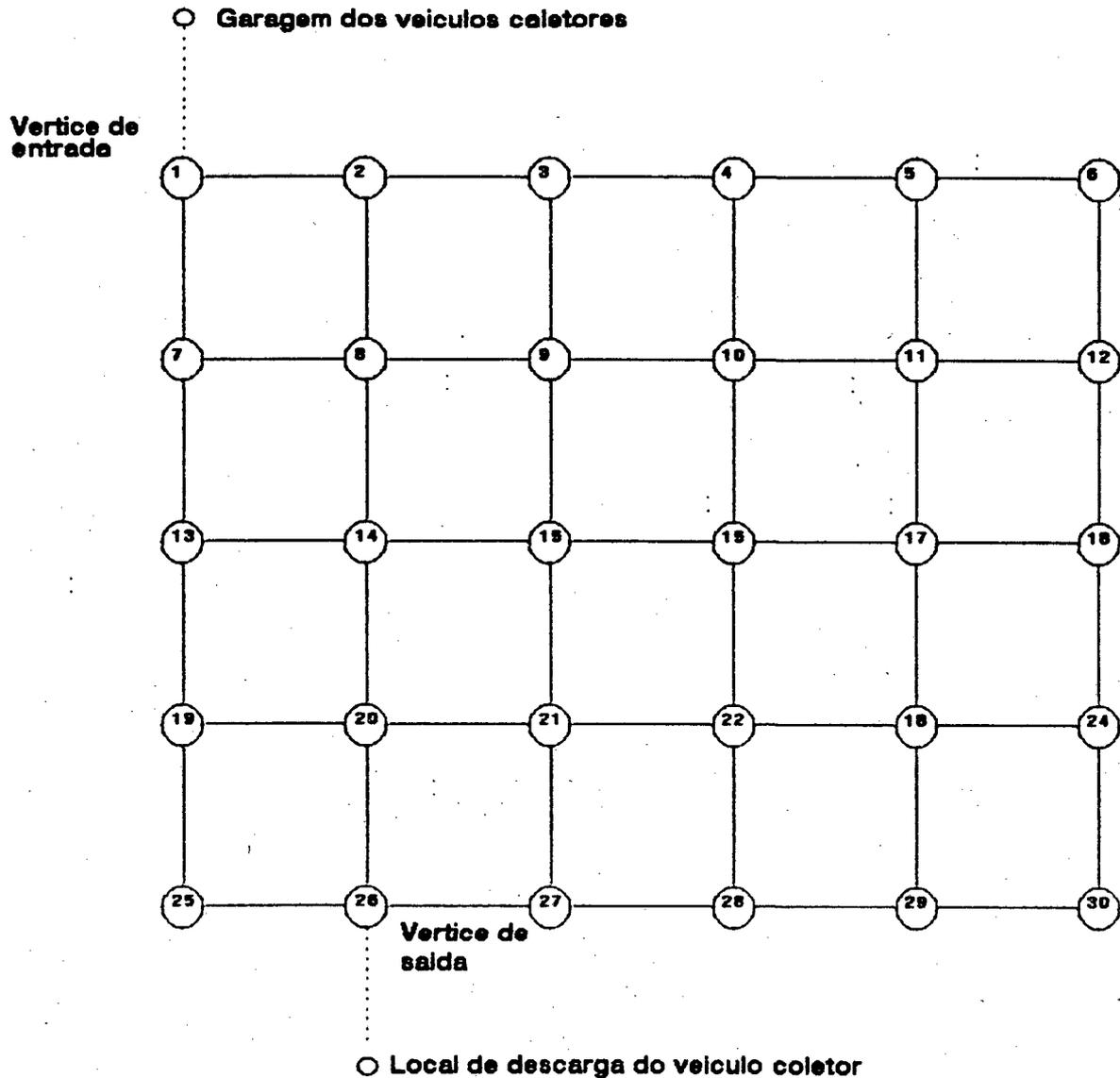


Figura 4.3. Rede não orientada, após a definição dos locais de entrada e saída.

Assim como para redes orientadas, a construção da rede "multi euleriana" para redes não orientadas, é realizada através da duplicação dos trechos de ruas componentes da associação dos vértices ímpares definida pelo algoritmo de "matching".

Destaca-se aqui, que durante o desenvolvimento deste trabalho, verificou-se que promovendo algumas alterações no algoritmo húngaro, desenvolvido por D. König [20], obtém-se os mesmos resultados que o algoritmo de "matchig" na determinação do conjunto de menores caminhos. Desta forma, mesmo não podendo garantir formalmente que o algoritmo converge sempre para uma solução otimizada, deixa-se registrada a idéia.

4.4.3.2.1. HEURÍSTICA PARA OBTENÇÃO DA ASSOCIAÇÃO DE MENOR COMPRIMENTO ENTRE OS VÉRTICES ÍMPARES DE UMA REDE NÃO ORIENTADA (DERIVADO DO ALGORÍTIMO HÚNGARO).

PASSO 1. Construir a matriz L^* ($m \times m$) de menores caminhos entre todos os vértices ímpares, onde $l_{ii}^* = \infty$.

PASSO 2. Subtrair o menor elemento da linha i de cada elemento da linha ($i = 1, 2, \dots, m$).

PASSO 3. Subtrair o menor elemento da coluna j de cada elemento da coluna ($j = 1, 2, \dots, m$).

PASSO 4. Examinar sucessivamente as linhas, iniciando pela linha 1. Para a primeira linha com exatamente um zero desmarcado, marca-lo como $\langle \rangle$ e também marcar, com um X os outros zeros das linhas e colunas correspondentes a marcação l_{ij}^* , ou seja marcar os zeros das linhas i e j , e também das colunas i e j .

PASSO 5. Examinar sucessivamente as colunas. Para a primeira coluna com exatamente um zero desmarcado, marca-lo como $\langle \rangle$ e também marcar, com um X os outros zeros das linhas e colunas correspondentes a marcação l_{ji}^* , ou seja marcar os zeros das linhas i e j , e também das colunas i e j .

PASSO 6. Repetir os passos 4 e 5 sucessivamente até ocorrer uma das seguintes situações:

(A) Exatamente metade das colunas e linhas da matriz foram marcadas com {}.

(B) Existem linhas e colunas desmarcadas e em cada linha ou coluna existem dois ou mais zeros desmarcados.

(C) Existem linhas desmarcadas, e não existem sobras de zeros.

PASSO 7. Se ocorrer (A), a atribuição foi concluída e será uma associação "otimizada"¹.

Se ocorrer (B), faz-se arbitrariamente uma atribuição {} para um dos zeros da primeira linha ainda não marcada, que possua dois zeros e, marca-se com X os outros zeros das linhas e colunas correspondentes, conforme passo 4, e volta-se ao passo 4.

Se ocorrer (C), ir ao passo 8.

PASSO 8. Marcam-se com (*) todas as linhas que não possuam nenhuma atribuição {}.

PASSO 9. Marcam-se com (*) as colunas ainda não marcadas que possuam um zero nas linhas marcadas.

PASSO 10. Marcam-se com (*) as linhas ainda não marcadas que possuam atribuições nas colunas marcadas.

PASSO 11. Repetir os passos 9 e 10 até terminar o processo de marcação.

PASSO 12. Passar linhas tracejadas sobre todas as linhas não marcadas e sobre todas as colunas marcadas. Isto será suficiente para cobrir cada zero da matriz ao menos uma vez.

¹ Colocou-se aqui, a palavra otimizada entre aspas, por não poder, até o momento, afirmar formalmente que o algoritmo sempre converge para este tipo de solução.

Passo 13. Examinar todos os elementos que não possuam nenhuma linha sobre eles. Selecionar o menor deles e subtrair-lo de todos os elementos de cada linha que contenha no mínimo um elemento descoberto. Adicionar o mesmo elemento a todo elemento em cada coluna que tenha uma linha sobre ele. Retornar ao passo 4.

4.4.3.3 TRANSFORMAÇÃO DE UMA REDE MISTA FORTEMENTE CONEXA, EM UMA REDE "MULTI EULERIANA"

A transformação de uma rede mista fortemente conexa em uma rede euleriana, é um procedimento considerado, até o presente, extremamente complexo.

Vários trabalhos foram desenvolvidos com este objetivo, entre eles destacam-se: J. Edmonds [14], que pode ser aplicado a redes onde todos os vértices possuam grau par; E. Mineaka [28] que resolve o referido problema para qualquer tipo de rede mista, mas considerado inviável para redes com grande número de arestas; J. R. Banegas Chaves [03] que transforma a rede mista em uma rede totalmente orientada e usa o procedimento de solução para este tipo de rede, mas que não fornece soluções ótimas para todos os tipos de redes; e a proposta existente na aplicação realizada por A. V. Chiplunkar [10], conforme mostrado no capítulo II.

Da mesma forma que para os tipos de redes orientadas e não orientadas, para a construção da rede "multi euleriana" a partir de uma rede mista, as modificações ocorridas nos graus dos vértices de entrada e saída também devem ser incorporadas antes do início do procedimento.

A identificação das alterações, propostas no parágrafo anterior, quando da utilização da teoria de programação linear, pode ser realizada através da inclusão de arcos artificiais incidentes a estes vértices. Estas inclusões objetivam viabilizar a construção do conjunto de equações lineares que contemple tais modificações.

Por outro lado, utilizando-se de um dos modelos propostos, como por exemplo: Banegas Chaves [03], após a transformação da rede mista em uma rede orientada e a incorporação das modificações ocorridas nos graus dos vértices de entrada e saída, aplica-se o mesmo procedimento utilizado para rede orientadas.

Utilizando a teoria dos grafos ou a teoria de programação linear obter-se-á o conjunto de arcos e/ou arestas que devem ser duplicados para que a rede "multi euleriana" seja construída.

4.4.4. DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS QUE LIGAM OS VÉRTICES DE ENTRADAS AOS VÉRTICES DE SAÍDA

Definida a rede multi euleriana (figura 4.4.), pode-se escolher um caminho ou vários caminhos, dependendo do número de entradas e saídas da rede, que ligue(m) o(s) vértice(s) de entrada(s) ao(s) vértice(s) de saída(s). Na figura 4.5. as linhas grossas mostram uma possibilidade de construção do caminho entre o vértice de entrada e o vértice de saída da rede.

Verifica-se que o leque de opções de construções deste(s) caminho(s) é muito grande, mas independente do(s) caminho(s) escolhido(s), sempre será possível, com os arcos e/ou as arestas remascentes, construir o conjunto completo de ciclos, conforme será proposto na etapa seguinte.

Deve-se observar, quando das escolhas dos caminhos, que os mesmos devem possuir uma quantidade de resíduos inferior ou igual à capacidade de carga do veículo coletor.

Para verificar se os caminhos escolhidos foram os que possibilitaram o menor comprimento de reatrevessamento de arestas, na construção do conjunto de viagens, é necessário testar todas as opções de construções destes percursos. Mas, dependendo das dimensões da rede, será uma tarefa difícil.

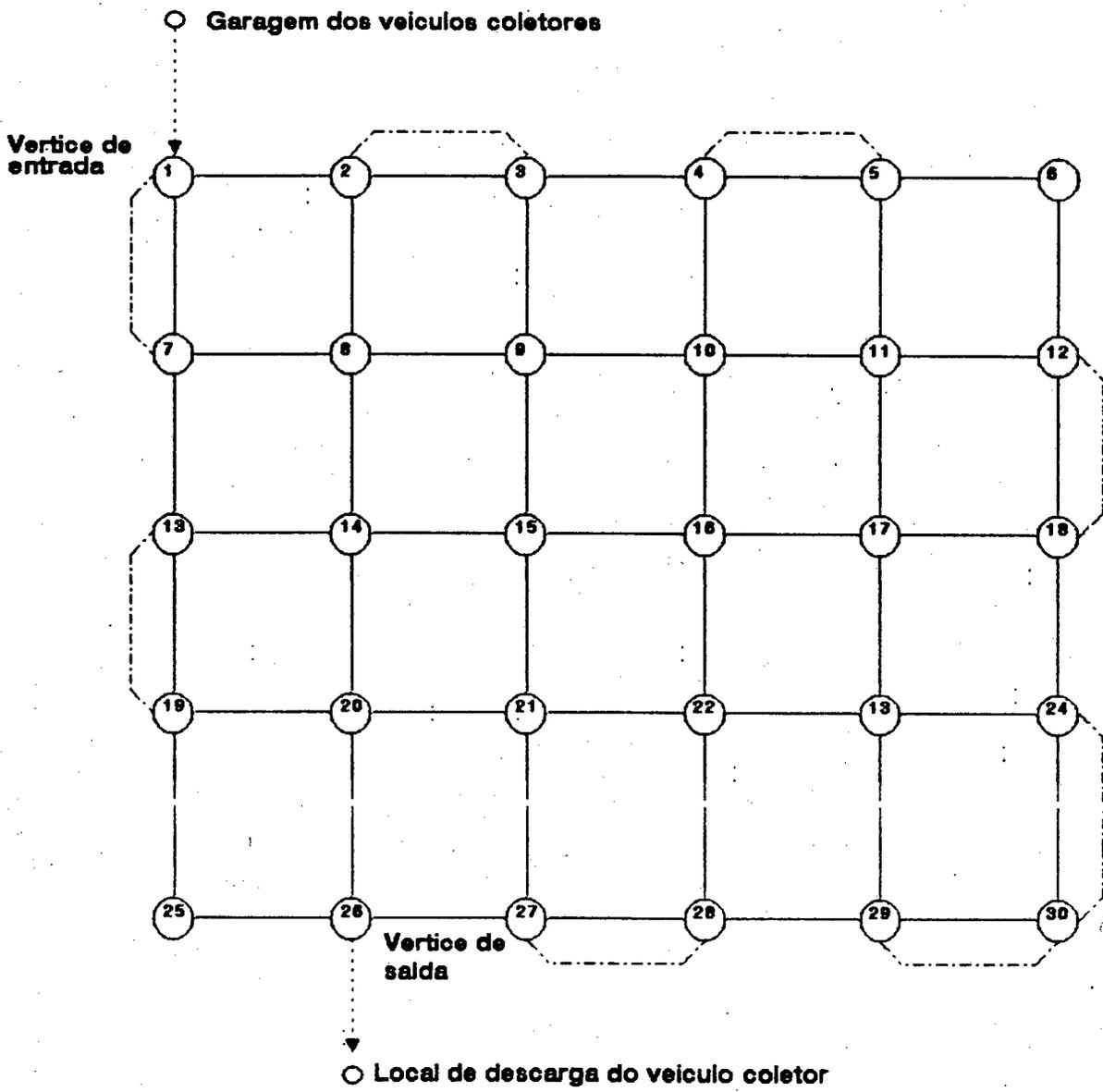


Figura 4.4. Rede "multi euleriana" não orientada.

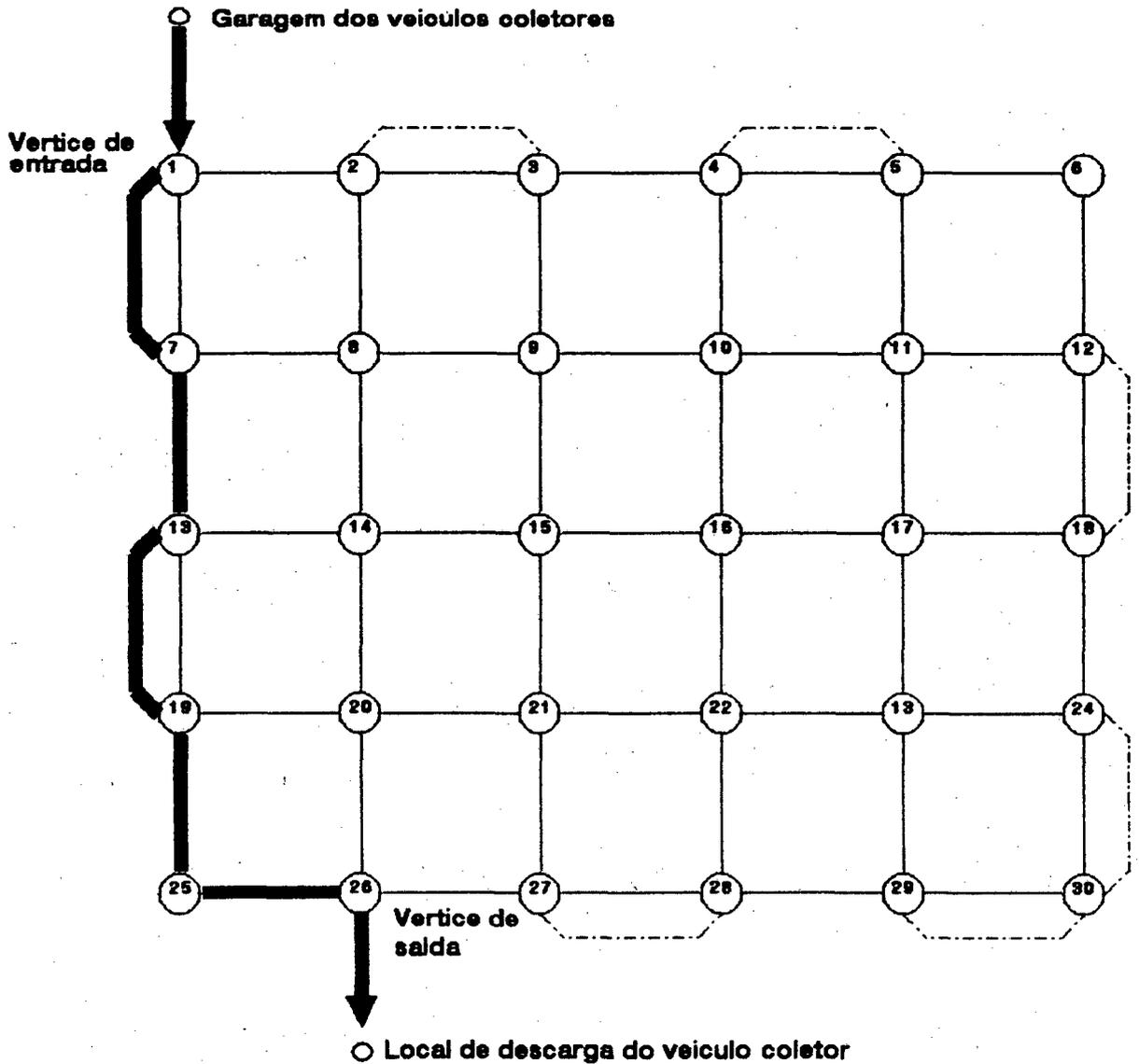


Figura 4.5 Definição do caminho entre os vértices de entrada e saída da rede.

Por outro lado, pode-se também verificar que no resultado final, a variação do comprimento total das arestas duplicadas, somente na ligação dos ciclos que constituirão o conjunto de viagens, em relação ao comprimento total a ser reatrevessado, é insignificante.

Portanto, em termos práticos, qualquer caminho (ou caminhos) escolhido proporcionará um baixo valor no comprimento total dos arcos e/ou arestas reatrevessadas.

4.4.5. CONSTRUÇÃO DOS PEQUENOS CICLOS

Após a definição do(s) caminho(s) que liga(m) o(s) vértice(s) de entrada(s) aos de saída(s), exclui-se da rede as arestas/arcos que fazem parte deste(s) caminho(s) e, com as arestas/arcos remanescentes constroem-se pequenos ciclos, como proposto por J. W. Male e J. C. Liebman [25].

A figura 4.6. mostra a rede euleriana, definida na figura 4.4., após a exclusão das arestas pertencentes ao caminho entre os vértices de entrada e de saída, dividida em pequenos ciclos.

Na construção dos pequenos ciclos, determina-se a qual ciclo pertencerão os resíduos gerados nos arcos/arestas duplicados.

Quando da definição das viagens que deverão ser realizadas pelos veículos coletores, como será descrito em etapa posterior, os remanejamentos destes volumes de resíduos a outros ciclos, objetivando o balanceamento das cargas, poderão ser executados.

Outro fator importante, determinado nesta etapa, é o sentido em que o ciclo deve ser percorrido. O conhecimento deste é necessário para a definição do sentido que o veículo coletor deve percorrer para realizar a viagem.

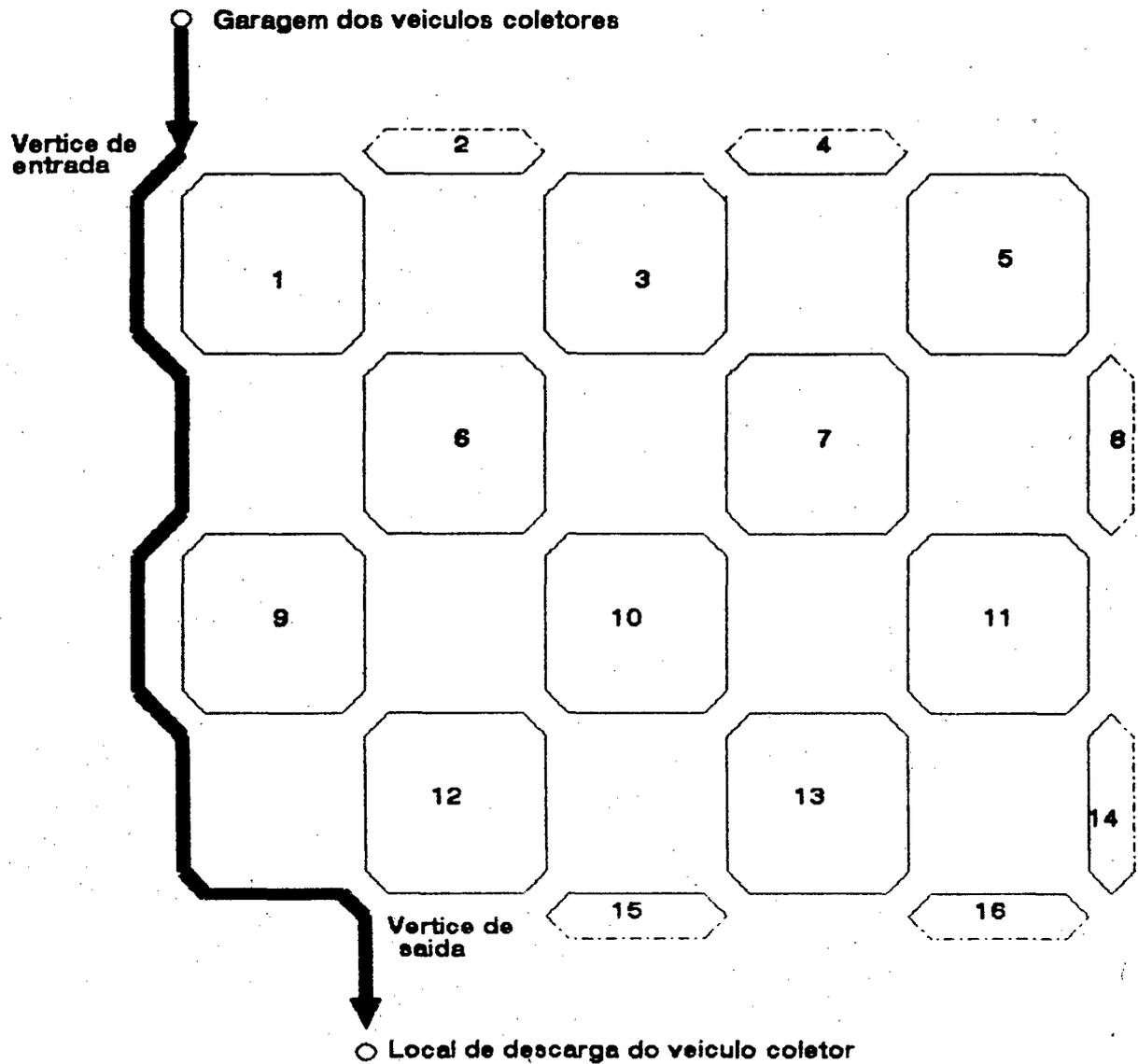


Figura 4.6. Rede "multi euleriana", após a definição do caminho entre os vértices de entrada e saída, dividida em pequenos ciclos.

4.4.6. CONSTRUÇÃO DA REDE DE CICLOS VÉRTICES

Considera-se nesta fase, cada pequeno ciclo como um vértice (ciclo vértice), o qual contém um conjunto de trechos de ruas e um determinado volume de resíduos a ser coletado. Cada ciclo vértice é conectado a outros ciclos vértices. Quando conectado a ciclos vértices adjacentes, utilizam-se arcos fictícios de comprimento (custo) zero. Por outro lado, quando houver a necessidade de conectar os ciclos vértices não adjacentes pode-se utilizar de arcos fictícios com comprimento igual ao dos arcos e/ou arestas pertencentes aos ciclos existentes entre eles. A ligação de todos os ciclos vértices constituirá uma rede, que será denominada de rede de ciclos vértices (fig. 4.7).

4.4.7. CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE EXPANDIDA DE MÍNIMO COMPRIMENTO

Como proposto no início deste capítulo, o principal objetivo da metodologia é reduzir ao máximo possível a distância total reatransversada pelos veículos coletores. Verifica-se, porém, que os trechos de ruas são reatransversados por duas razões: (1) para transformar a rede original de coleta numa rede "multi euleriana"; (2) para prover um meio que permita a cada veículo coletor ir do último trecho de coleta ao vértice de saída da rede, e deste (ou de um outro vértice) ao primeiro trecho da próxima viagem de coleta.

Os trechos de ruas reatransversados para criar a rede "multi euleriana" foram incluídos na construção dos caminhos e dos ciclos vértices, conforme descrito nas etapas 4.5.4. e 4.5.5, portanto não sendo mais objeto de análise desta etapa.

A minimização do comprimento total do conjunto de trechos que serão duplicados para possibilitar ao veículo coletor ir do último trecho de coleta ao vértice de saída da rede, e deste ao primeiro trecho da próxima viagem de coleta, de acordo com o modelo proposto por J. W. Male e J. C. Liebman, é realizada através da construção da árvore expandida de mínimo comprimento.

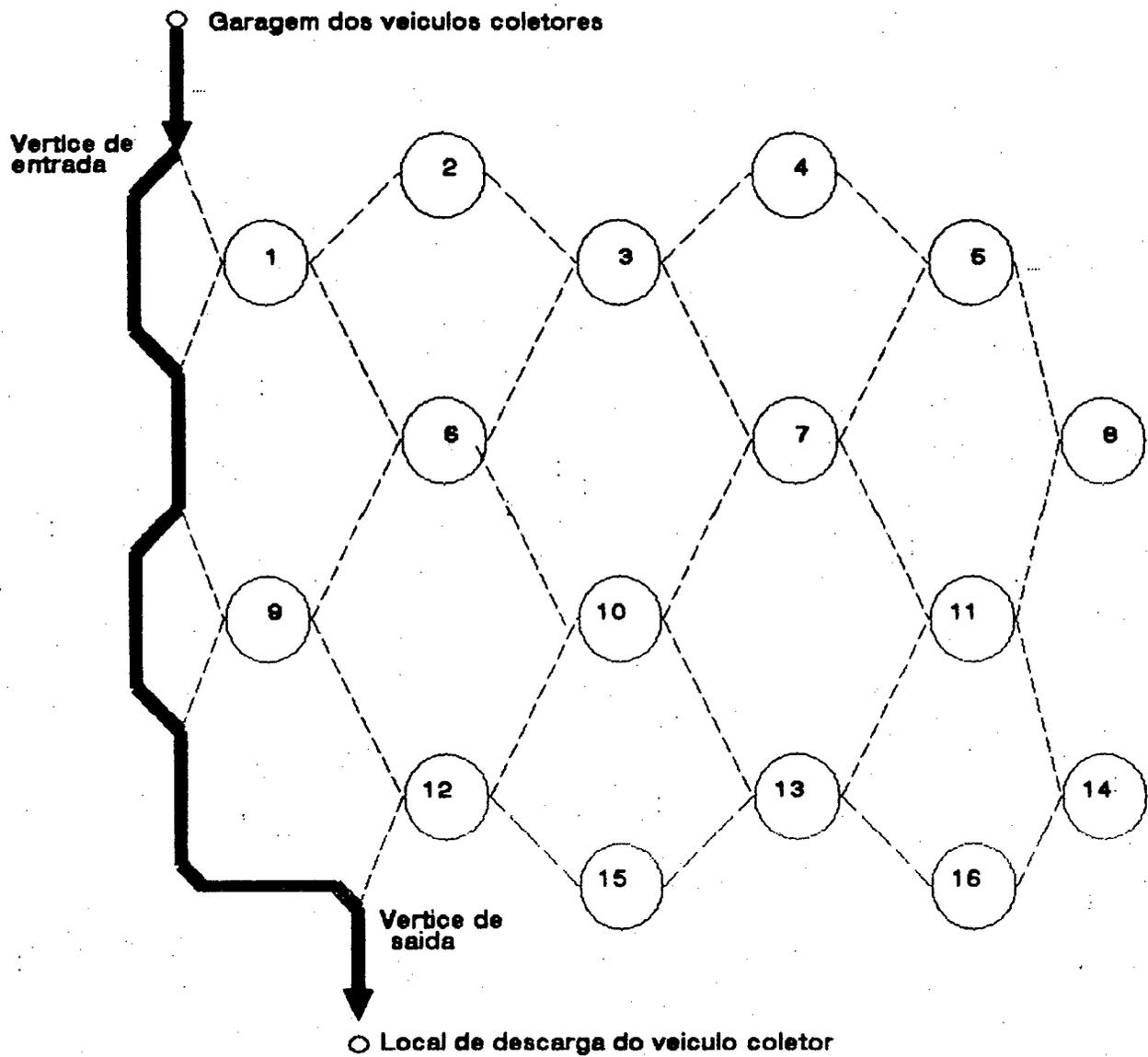
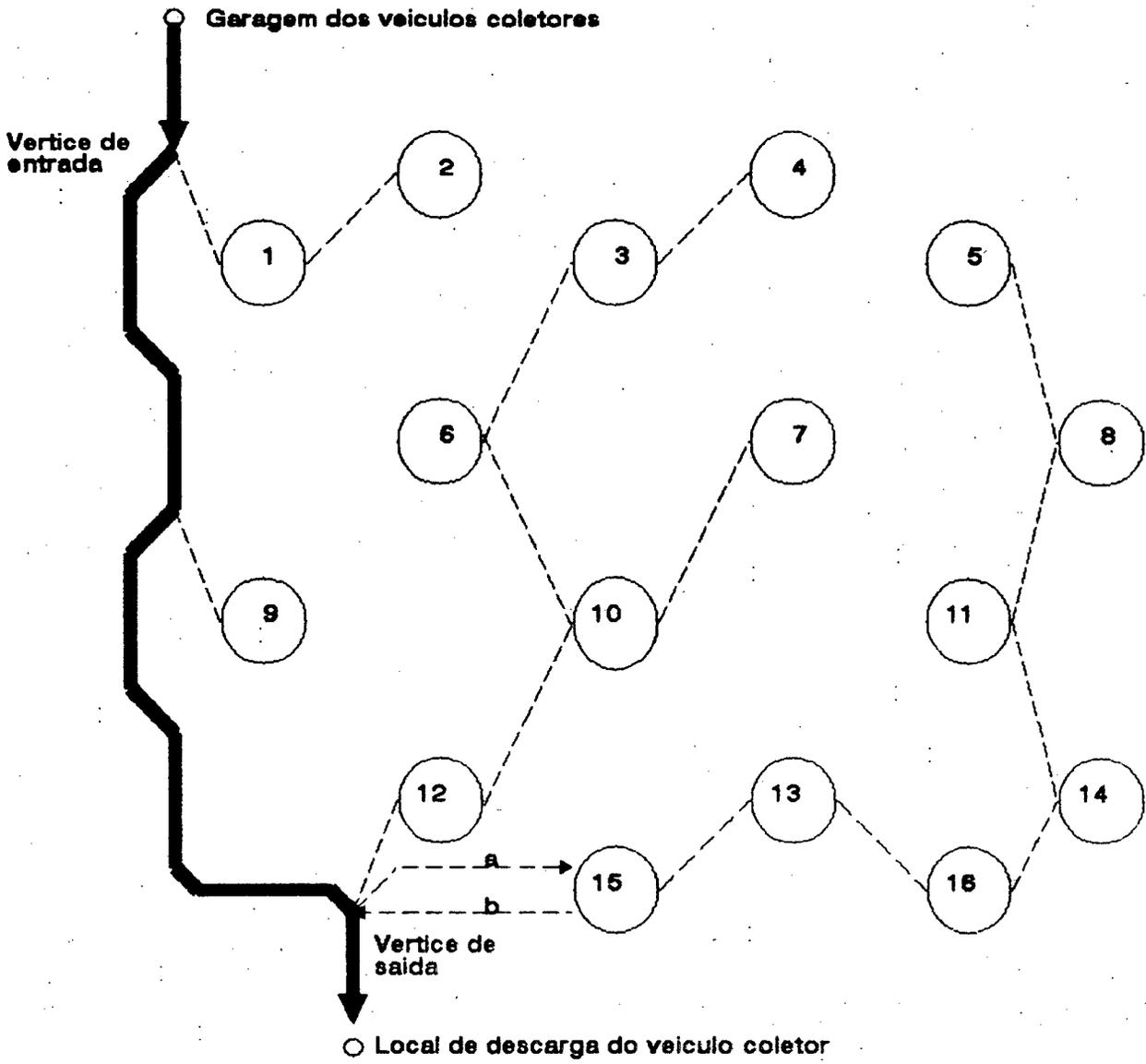


Figura 4.7. Rede de ciclos vértices.



a e b - arestas duplicadas para a construcao da arvore expandida de minimo comprimento.

Figura 4.8. Árvore Expandida de Mínimo Comprimento.

Foi proposto nas etapas anteriores, antes da construção dos pequenos ciclos, escolher o(s) caminho(s) entre os locais de entrada(s) e saída(s) da rede. Como, normalmente os resíduos gerados ao longo de cada caminho não são suficientes para preencher a carga do veículo coletor. Então, torna-se necessário acoplar, a este(s) caminho(s), um conjunto de ciclos, cuja quantidade de resíduos gerados nos mesmos, possa completar a capacidade de carga do veículo. Em outras palavras, isto significa ampliar o(s) caminho(s).

Definidos os pequenos ciclos que serão acoplados ao(s) caminho(s) entre os locais de entrada(s) e saída(s), estes são excluídos da rede. Com os ciclos remanescente constroem-se um conjunto de árvores expandidas de comprimento mínimo (o número de árvores será igual ao número de locais de saídas da rede). Esta(s) árvore(s) terá(ão) sua(s) raiz(es) conectada(s) no(s) vértice(s) de saída(s).

Desta forma, o acoplamento dos pequenos ciclos ao(s) caminho(s) que liga(m) a(s) entrada à(s) saída(s) da rede na(s) primeira(s) viagem(ns) de cada veículo coletor e a construção da(s) árvore(s) expandida(s) minimizarão o comprimento do conjunto de trechos reatransversados quando do transporte realizado pelo veículo para encontrar o local de início de coleta e de ir ao local de descarga.

Um fator relevante a ser considerado nesta etapa é que, normalmente, a frota de coletores é composta por veículos com várias capacidades de carga. E, portanto, na construção das árvores expandidas de mínimo comprimento, deve-se levar em conta estas restrições, pois, em nenhuma viagem, que será definida sobre cada ramo da(s) árvore(s), o volume de resíduos gerados pode ultrapassar a capacidade de carga do veículo coletor. Portanto, em função da capacidade de carga do veículo coletor e do volume de resíduos gerados em cada ciclo vértice, é que será determinado o número de ciclos que farão parte de cada ramo da(s) árvore(s) (fig. 4.8.).

Igualmente, no caso de cidades ou de certas áreas da cidade onde ocorrem variações diárias no volume de resíduos gerados, para que o processo seja otimizado, torna-se necessário realizar a construção de um conjunto de árvores expandidas de comprimento mínimo para cada dia.

4.4.8. AGRUPAMENTO DOS PEQUENOS CICLOS EM VIAGENS DE COLETA

No caso de redes mistas ou orientadas, após a construção dos pequenos ciclos, como descrito na etapa 4.5.5, a construção dos ciclos vértices - etapa 4.5.6 - e da rede de ciclos vértices no plano, poderá ser inviável. Portanto, quando, a partir da construção dos pequenos ciclos, realiza-se o planejamento de forma manual, pode-se, através da conexão dos pequenos ciclos em ciclos maiores, construir o conjunto de viagens. Torna-se possível realizar a construção deste conjunto de viagens, obtendo-se excelentes resultados, em função da grande redução no número de parâmetros a serem analisadas.

Observa-se que as duplicações de arestas e/ou arcos na construção da(s) árvore(s), concentram-se próximo ao(s) vértice(s) raiz(es). Assim, quando da realização desta etapa, uma maior atenção deve ser dada à distribuição dos ciclos que se localizam nas proximidades deste(s) vértice(s).

Como na etapa de construção da árvore expandida de mínimo comprimento, nesta etapa também constroem-se, considerando a variação diária do volume de resíduos sólidos gerados, vários conjuntos de viagens. As figuras apresentadas a partir do anexo 2 mostram este procedimento de forma mais detalhada.

4.4.9. DECODIFICAÇÃO DAS VIAGENS DE COLETA

Quando realiza-se o procedimento de maneira informatizada ou quando é possível construir a rede de ciclos vértices no plano, uma vez que a(s) árvore(s) de mínima capacidade tenha(m) sido encontrada(s) e que a(s) mesma(s) é(são) constituída(s) por vários ramos, sendo que cada ramo é definido como uma viagem, expande-se os ciclos vértices em pequenos ciclos e realiza-se a conexão dos mesmos conforme definido pelas árvores.

Assim, os ciclos vértices em cada ramo serão combinados em uma viagem, a qual terá sua raiz conectada em um local de saída da rede. Desta forma, a sequência, de trechos de rua que serão atravessados pelo veículo coletor, criará um circuito que estará incidente ao local de descarga² (a figura 4.8. mostra a árvore expandida de mínimo comprimento, após ser decodificada).

Por outro lado, quando não é possível construir a rede de ciclos vértices, após o agrupamento dos pequenos ciclos em ciclos maiores (constituído viagens de coleta), e respeitando a orientação de cada pequeno ciclo, determina-se o percurso que o veículo deve realizar.

Nesta fase, é importante o conhecimento das condições de fluxo de veículos sobre certos trechos, em determinados horários, para definir a sequência de ciclos a serem percorridos durante a viagem. No caso de coleta noturna, onde o fluxo de veículos sobre a rede é pequeno, pode-se optar por um caminho que ofereça o mínimo de manobras ao veículo coletor.

E, finalmente, transferem-se os dados obtidos para um mapa da área em estudo.

² Destaca-se que, após a primeira viagem de coleta, os veículos iniciarão suas próximas viagens saindo do local de descarga, para onde retornarão, também, após o encerramento das mesmas.

4.4.10. CONTROLE DO VOLUME DE RESÍDUOS COLETADOS

Para que o processo de coleta seja otimizado, além da definição do conjunto de roteiros que minimizam os comprimentos reatransversados pelos veículos, é necessário otimizar a utilização da capacidade de carga dos veículos coletores.

Então, para que esta utilização seja otimizada, é imprescindível a realização de um controle efetivo do volume de resíduos coletados, tanto na implantação do processo como durante a operação.

Quando da implantação, após a realização das primeiras viagens, pode ser detectado que o volume coletado difere do volume estimado. Ocorrendo este fato, é necessário detectar se a variação é generalizada ou concentra-se em alguns pontos da rede. Definida esta variação, promove-se as correções nos volumes estimados e, caso a variação seja generalizada, constroem-se novamente a(s) árvore(s) expandida(s) de mínimo comprimento ou, caso a variação concentra-se em determinados pontos da rede, simplesmente transfere-se alguns pequenos ciclos entre as viagens pré-definidas.

Da mesma forma, para que as variações sazonais no volume de resíduos sejam controladas durante a realização do processo, torna-se necessário, além das estimativas de volume de resíduos gerados em determinados períodos do ano, um acompanhamento efetivo do volume realmente coletado. Este controle, por sua vez, fornecerá, constantemente, parâmetros para tomadas de decisões a respeito do processo.

4.5. CONCLUSÃO

1) O modelo apresentado constitui-se numa ferramenta para o planejamento dos roteiros de coletas de resíduos sólidos urbanos, realizados pelo considerado sistema convencional, ou seja, coleta de resíduos ao longo das vias públicas.

2) Em relação aos modelos propostos por J. W. Male [25] e A. V. Chiplunkar [10], foram implementadas alterações para possibilitar:

a) a realização de um procedimento manual para o planejamento, após a construção dos pequenos ciclos, de redes que não possibilitam a construção da rede de ciclos vértices no plano e, conseqüentemente da árvore expandida de mínimo comprimento.

b) a realização de um controle efetivo do volume dos resíduos coletados e as alterações necessárias nas dimensões das viagens, objetivando otimizar a capacidade de carga da frota.

c) a identificação das alterações ocorridas nos graus dos vértices de entradas e saídas e da influência destas sobre a construção da rede "multi euleriana"

Nos casos reais, pode-se encontrar redes onde os locais de entrada e saída estão posicionados nos mesmos vértices, mas também pode-se encontrar redes onde estes locais posicionam-se em vértices distintos.

Os modelos propostos por J. W. Male [25] e por A. V. Chiplunkar [10] consideram somente as redes cujos locais de entrada e saída estão definidos nos mesmos vértices. Portanto aplicando estes modelos à redes onde estes locais posicionam-se em vértices distintos, para promover uma completa construção, como mostrado nas figuras 4.10.1 a 4.10.3, haverá a necessidade de duplicar mais alguns trechos de ruas. Estes trechos são duplicados ou para construir o caminho que liga os vértices de entrada e saída ou para construir o conjunto de pequenos ciclos.

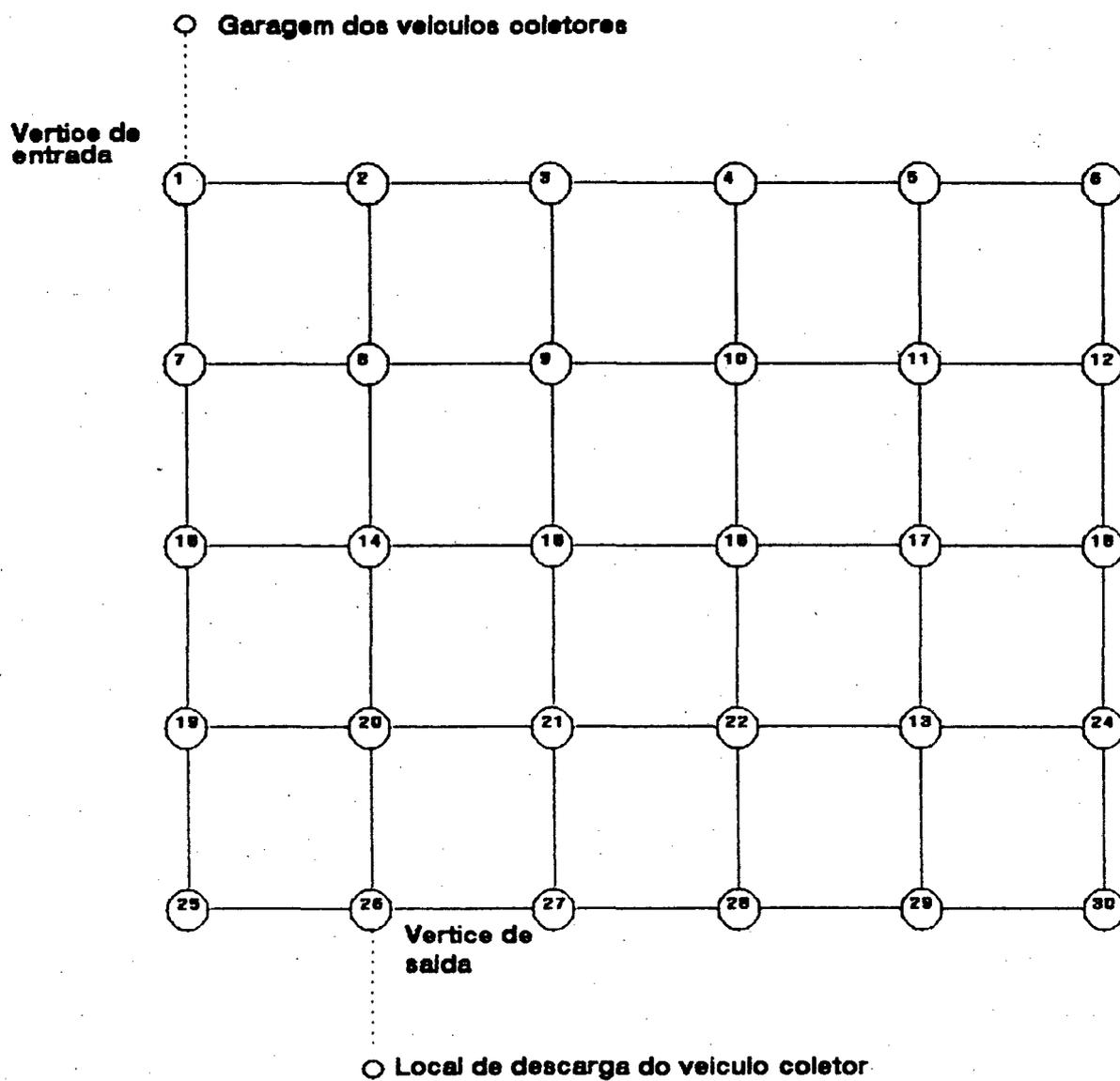


Figura 4.10.1. Rede de coleta.

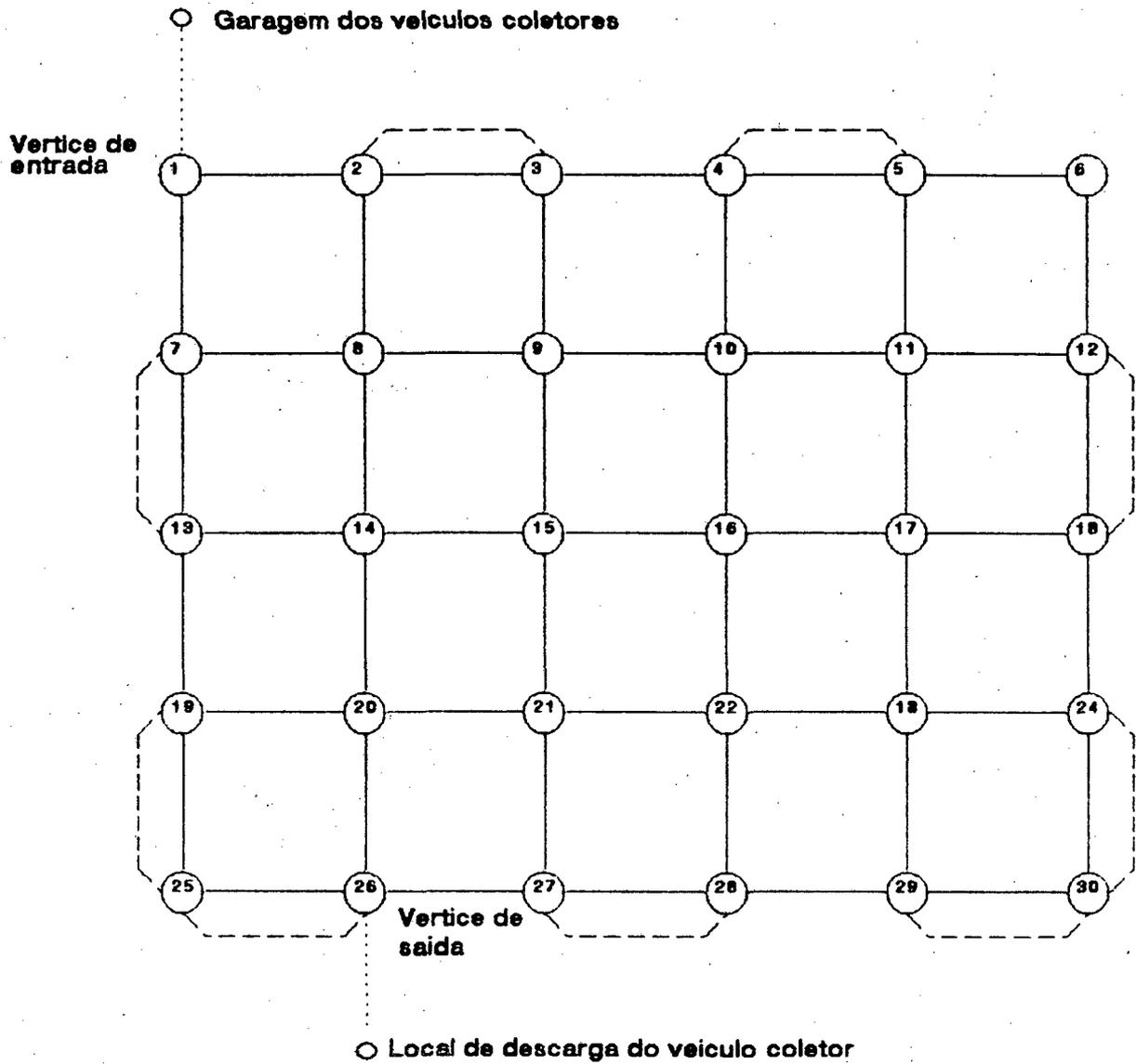


Figura 4.10.2. Rede "multi euleriana" construida sem considerar as alterações nos vértices de entrada e saída.

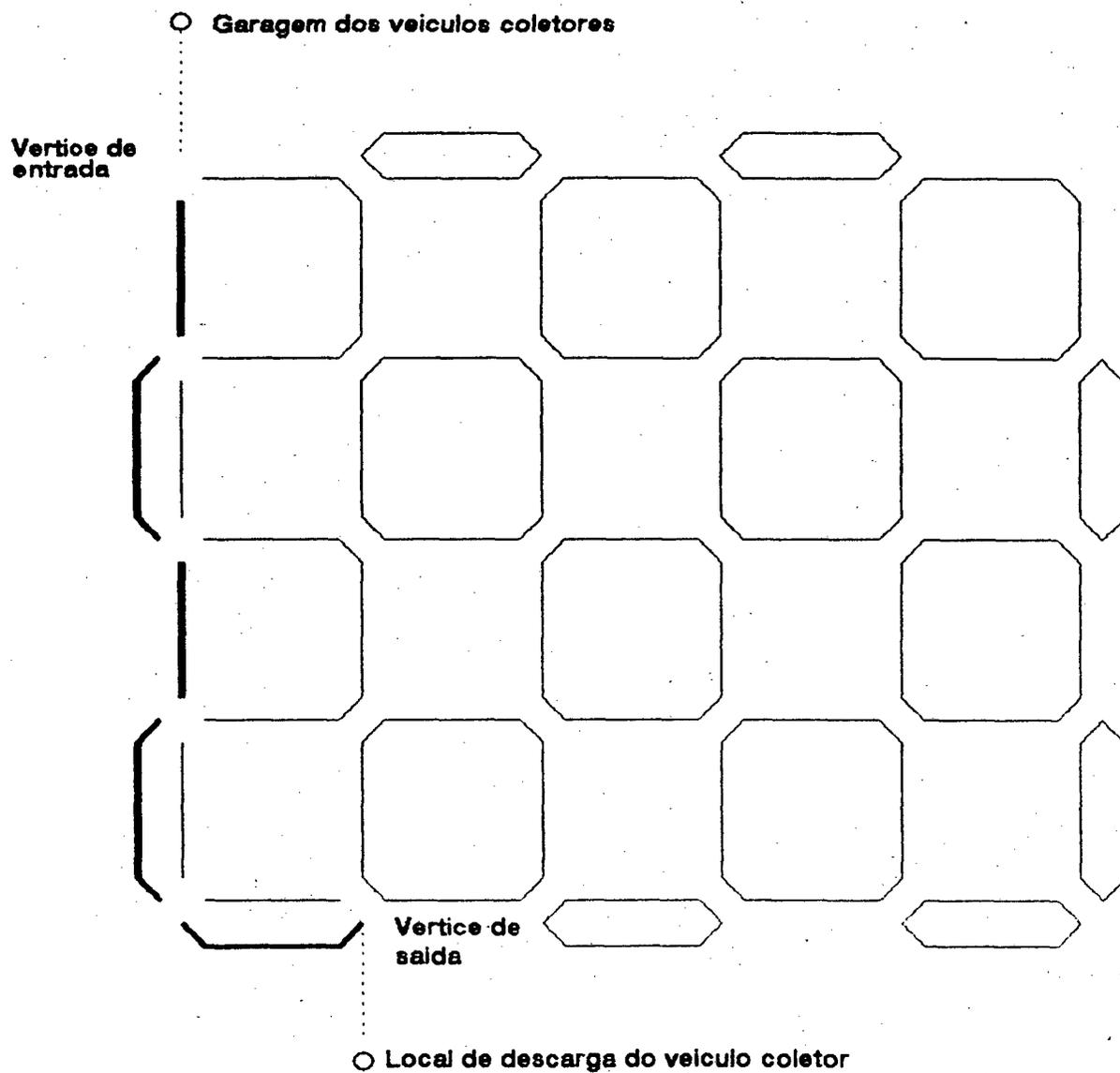


Figura 4.10.3. Rede "multi euleriana" após a definição dos caminhos entre os vértices de entrada e saída dividida em pequenos ciclos.

CAPÍTULO V

5. APLICAÇÃO DO MODELO : OTIMIZAÇÃO DOS ROTEIROS DA ÁREA CENTRAL DO MUNICÍPIO DE FLORIANÓPOLIS - SC.

5.1. INTRODUÇÃO

De acordo com o modelo proposto no capítulo IV, dois tipos de situações podem ocorrer: (a) redes que possibilitam a construção da rede de ciclos vértices no plano e (b) redes que não possibilitam esta construção. Como os exemplos utilizados por alguns autores, que desenvolveram trabalhos semelhantes, compreendiam redes do tipo (a), neste capítulo será realizada a aplicação do modelo sobre uma rede do tipo (b). A figura 5.1 apresenta o fluxograma do processo de planejamento para redes deste tipo quando, após a construção dos pequenos ciclos, o procedimento é realizado de forma manual. Desta forma, objetivando demonstrar a eficiência da metodologia apresentada, definiu-se aplicar o modelo desenvolvido sobre a área central de coleta da cidade de Florianópolis.

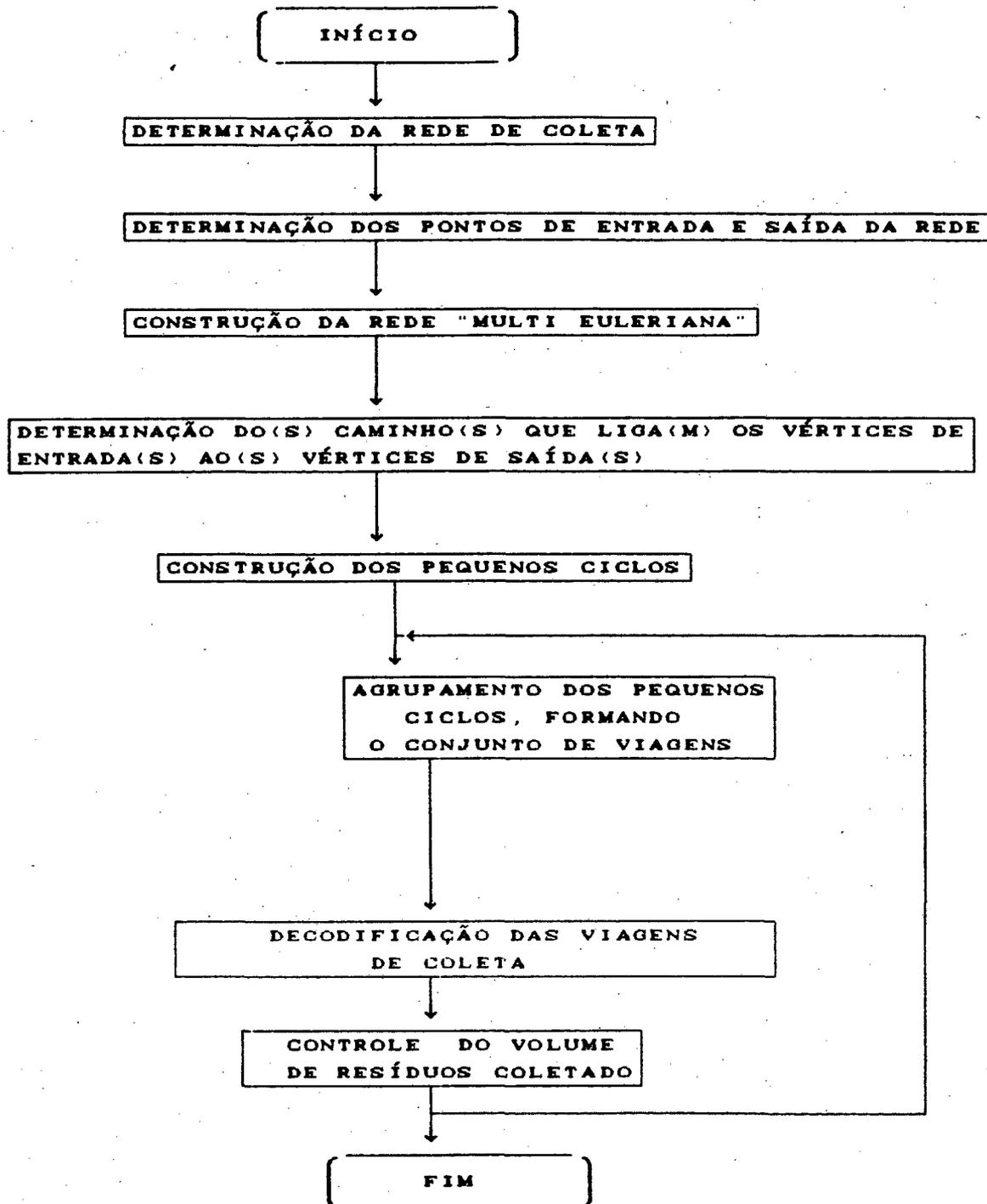


Figura 5.1. Fluxograma do modelo para redes que após a determinação dos pequenos ciclos não permitem a construção da rede de ciclos vértices no plano.

5.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE O LOCAL DA APLICAÇÃO

O município de Florianópolis em função de suas características de cidade turística sofre uma variação acentuada no volume de resíduos sólidos gerados em determinados períodos do ano. Conforme pode ser observado na figura 5.2, o volume de resíduos coletado no ano de 1991 variou de aproximadamente 5000 toneladas nos meses de janeiro e dezembro, considerado período de alta temporada turística, para aproximadamente 4.200 toneladas nos meses de março a setembro, considerado período de baixa temporada turística.

Em determinadas regiões do município, como nas praias do norte da ilha (Daniela, Jurerê, Canasvieiras, Pontas das Canas, Inglêses e Santinho), esta sazonalidade torna-se mais acentuada. De acordo com o gráfico mostrado na figura 5.3, no ano de 1991 o volume de resíduos coletados nesta região variou de aproximadamente 300 toneladas nos períodos de baixa temporada turística para aproximadamente 1.080 toneladas no mês de janeiro, considerado ápice do período da alta temporada turística.

A área central da cidade, de acordo com mapa apresentado na figura 5.4, está compreendida entre as avenidas Mauro Ramos, Jornalista Rubens de Arruda Ramos (Beira Mar Norte), Paulo Fontes e rua José da Costa. Esta área, conforme gráficos apresentados nas figuras 5.5 e 5.6, nos anos de 1990 e 1991, respectivamente, não mostrou uma curva de variação semelhante a região norte da ilha, mas sim uma variação aleatória.

Por outro lado, através do gráfico apresentado na figura 5.7, verifica-se que a quantidade de resíduos, coletados nesta área, varia acentuadamente em determinados dias da semana. Observa-se que nas segundas-feiras são coletados em média aproximadamente 55 toneladas, no período compreendido entre as terças e as sextas aproximadamente 30 toneladas/dia e aos sábados aproximadamente 13 toneladas.

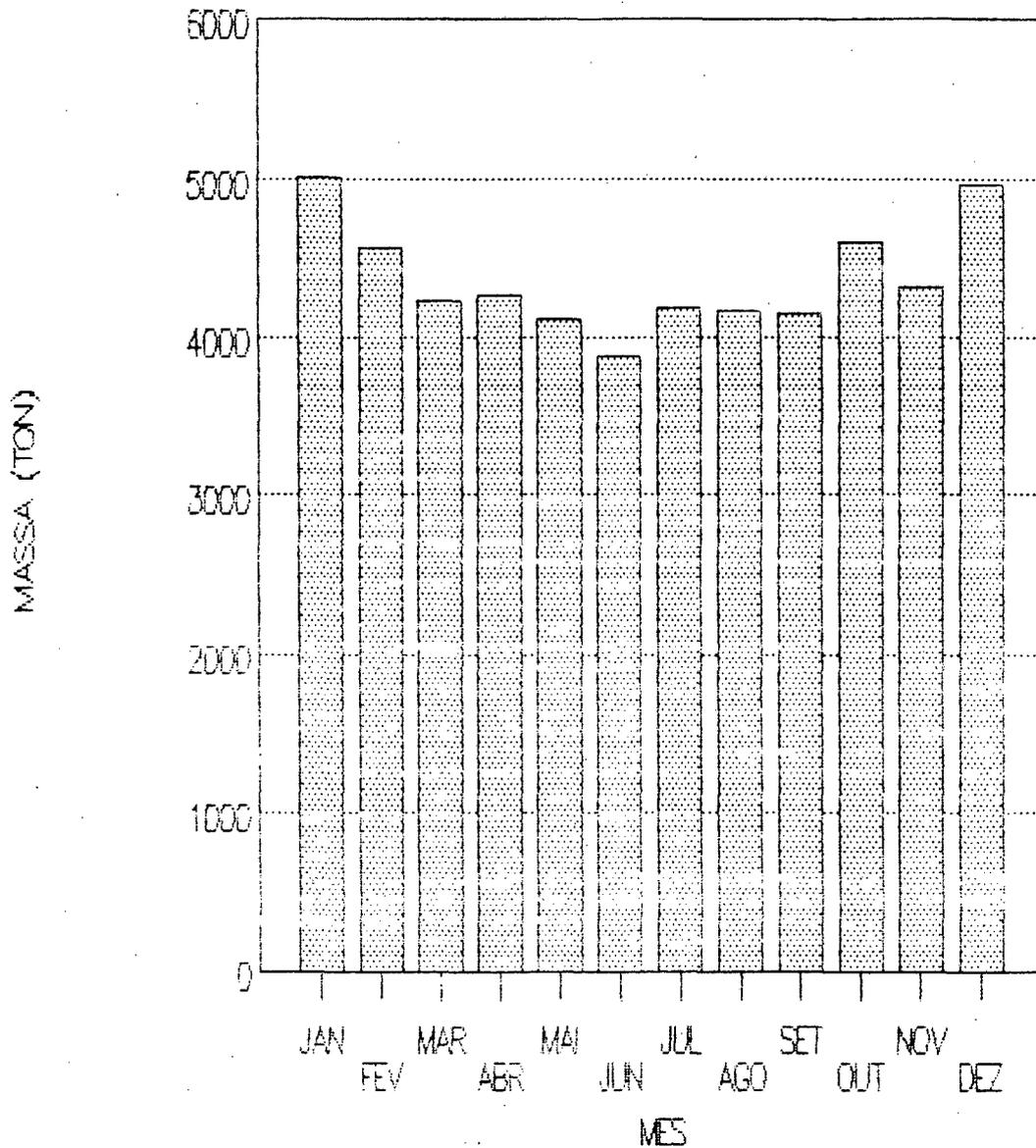


Figura 5.2. Quantidade de resíduos sólidos coletados no município de Florianópolis (1991).

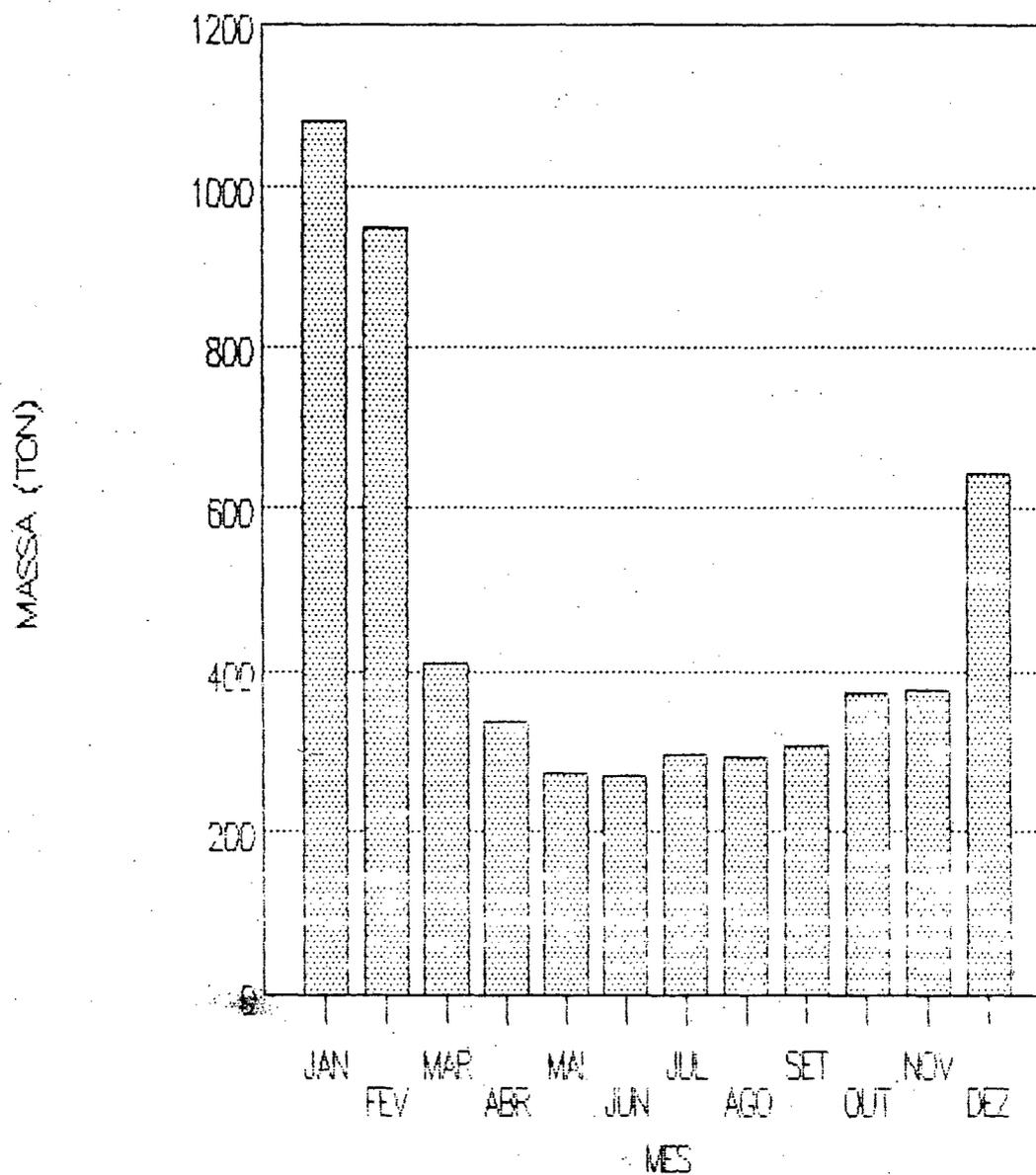


Figura 5.3. Quantidade de resíduos sólidos coletados na região norte da ilha de Santa Catarina, no município de Florianópolis (1991).

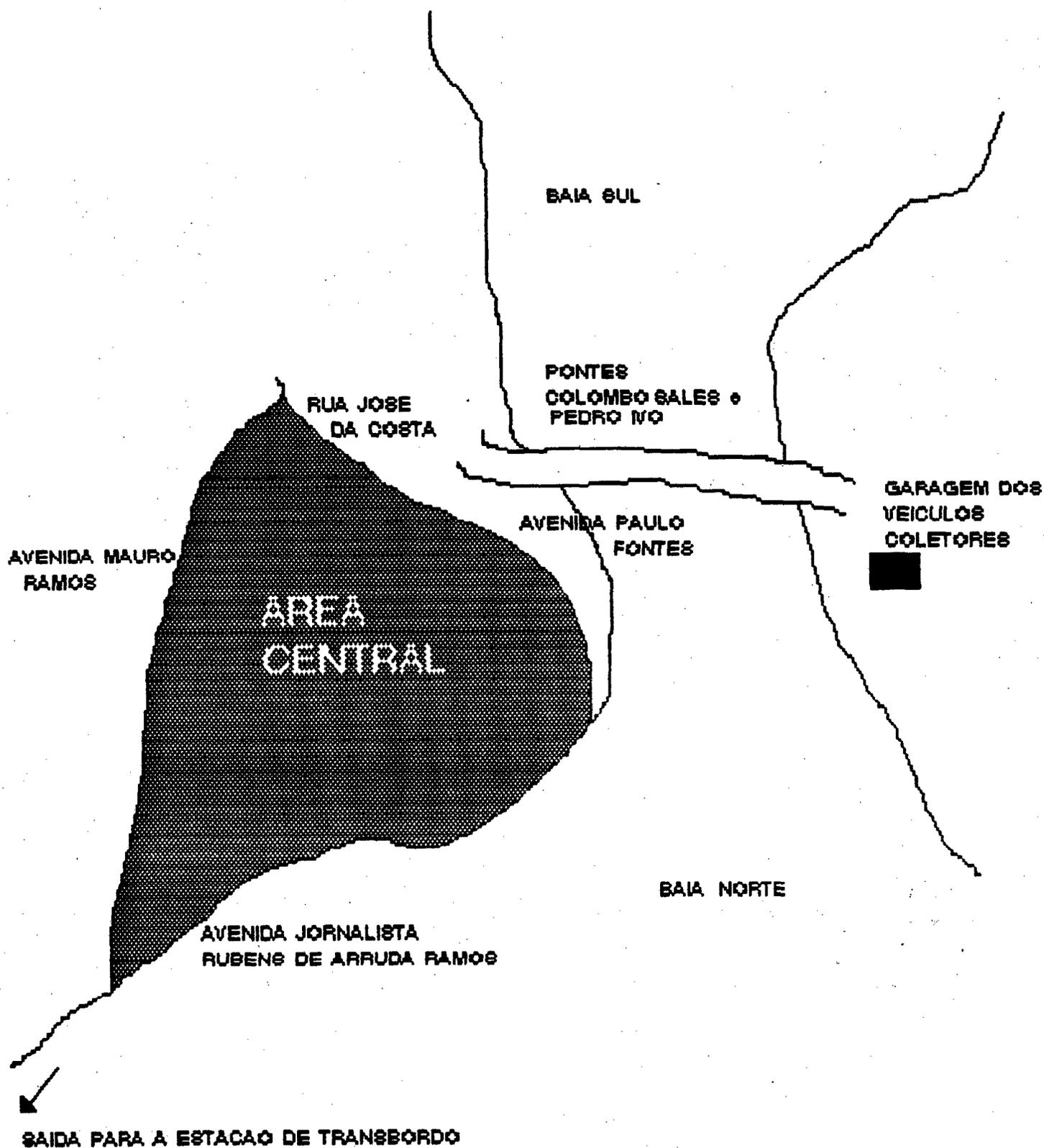


Figura 5.4. Mapa de posicionamento da área central do município de Florianópolis, SC.

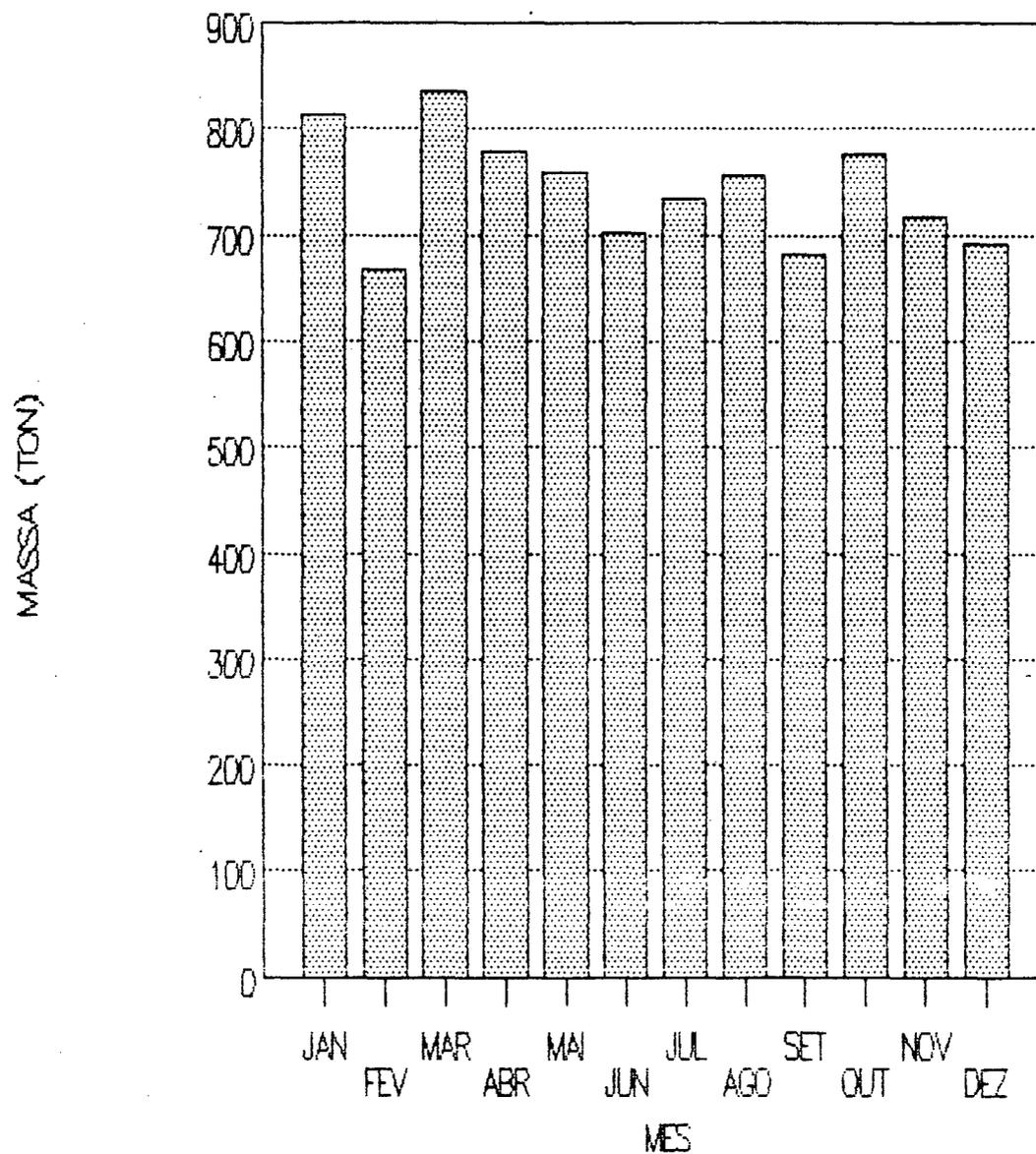


Figura 5.5. Quantidade de resíduos sólidos coletados na área central do município de Florianópolis (1990).

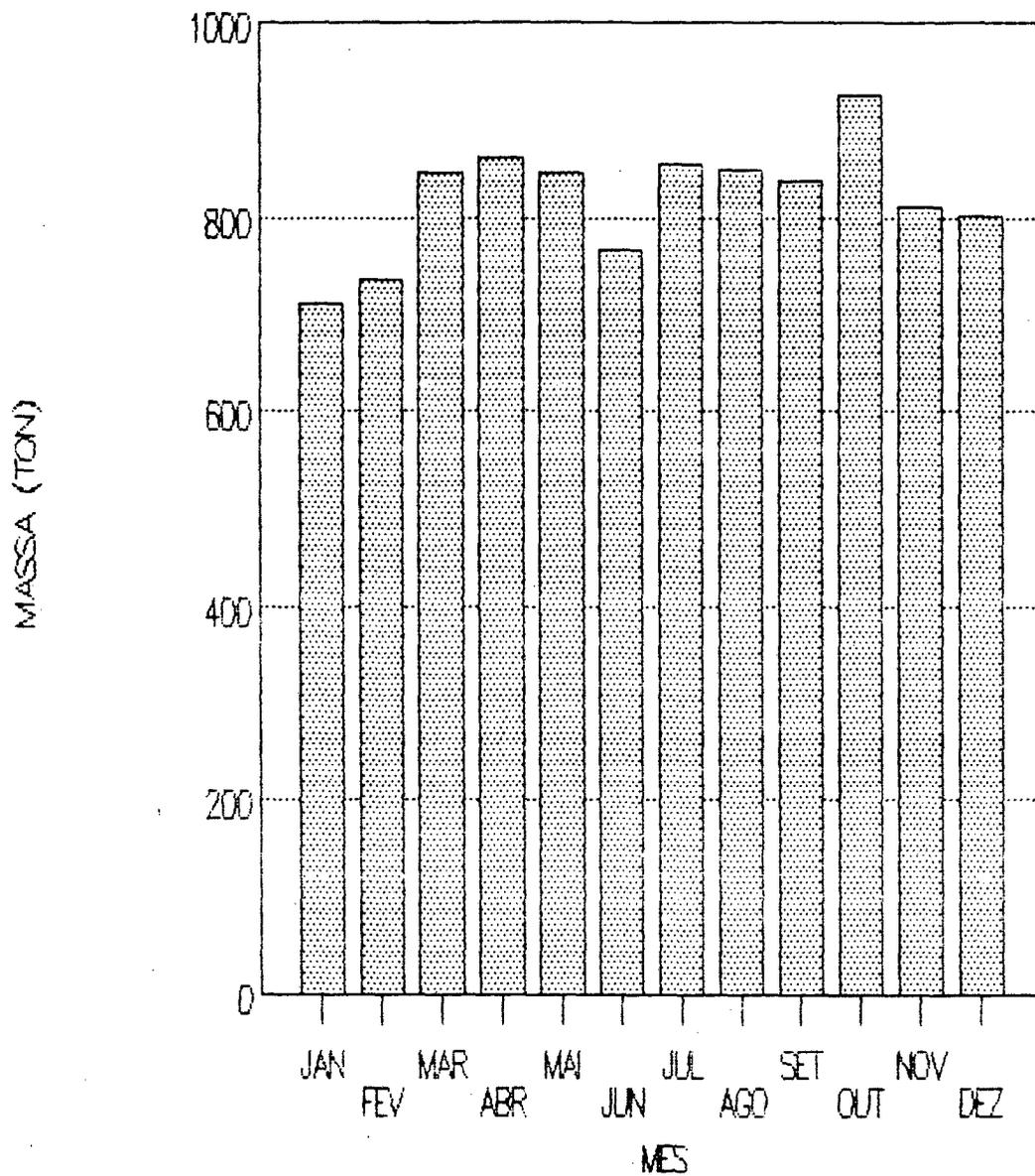


Figura 5.6. Quantidade de resíduos sólidos coletados na área central do município de Florianópolis (1991).

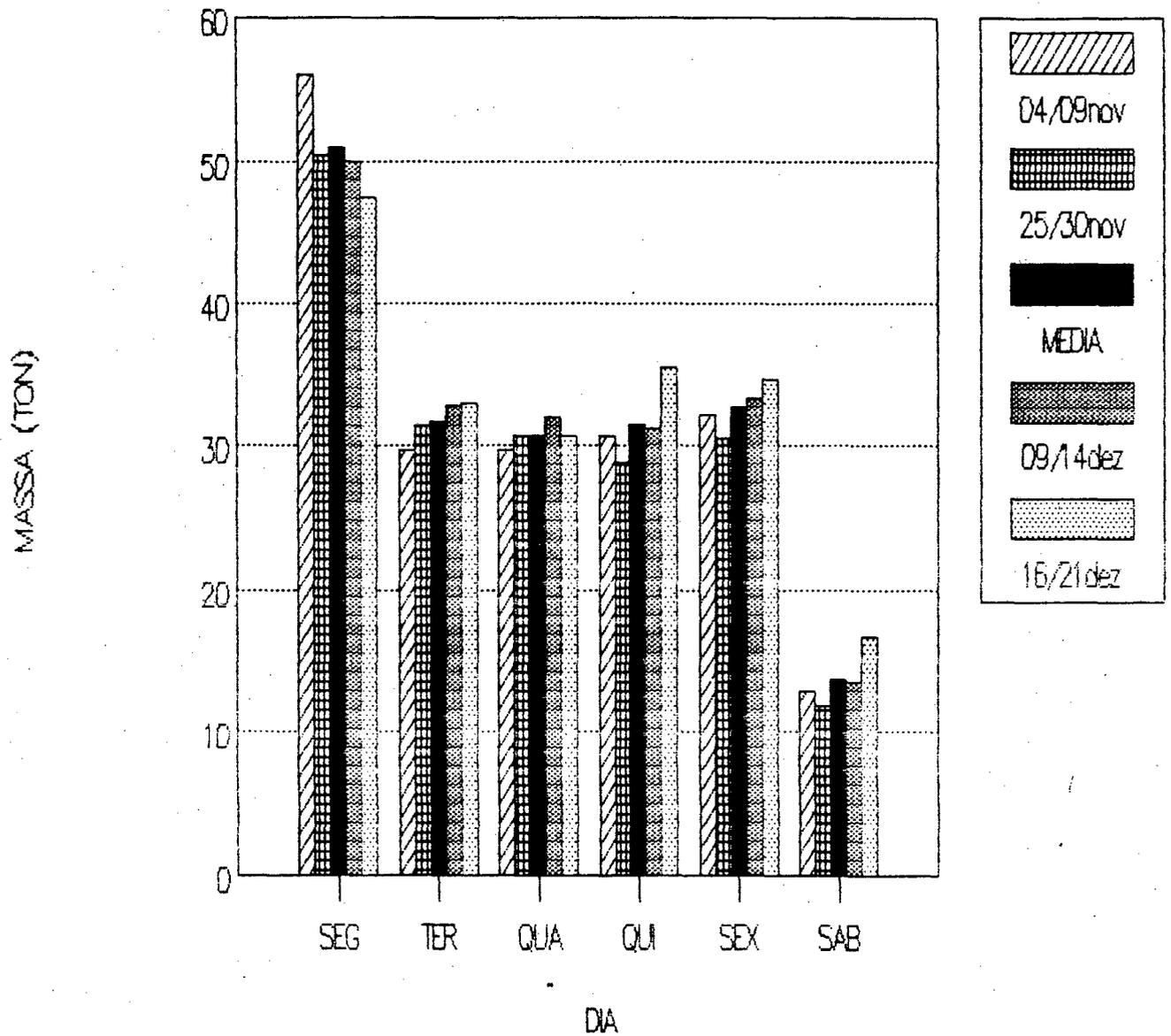


Figura 5.7. Quantidade de resíduos sólidos coletados diariamente na área central do município de Florianópolis (1991).

Estas quantidades, conforme a Comcap¹, apresentam este perfil em função de: a) os resíduos coletados nas segundas-feiras são a somatória da geração do domingo, da segunda-feira e uma parte do sábado; b) a quantidade coletada aos sábados é menor que nos outros dias em função de grande parte dos resíduos gerados neste dia ser colocada à disposição do serviço de coleta nas segundas-feiras, e também pelo fato da área comercial ter suas atividades parcialmente paralisadas.

Esta variação na quantidade de resíduos gerados conduz a constatação, considerando que a capacidade de carga dos veículos coletores seja aproximadamente constante², da necessidade de um planejamento dinâmico do processo de coleta, ou seja, da definição de uma programação diária das viagens de coleta.

Nesta área, face a quantidade de resíduos gerados e da capacidade de carga dos veículos coletores (aproximadamente 6(seis) toneladas), são definidas 9(nove) viagens nas segundas-feiras, 6(seis) das terças às sextas e 2(duas) aos sábados.

5.3. DETERMINAÇÃO DA REDE DE COLETA

A rede de coleta, de acordo com a definição apresentada no capítulo IV, é composta por arcos e/ou arestas (trechos de ruas) e vértices (esquinas). Cada trecho, por sua vez, poderá conter um certo volume diário de resíduos.

A escolha dos trechos de ruas que deverão compor a rede de coleta, conforme relatado no capítulo anterior, é uma etapa do processo que depende do conhecimento que os envolvidos no planejamento dos roteiros tem sobre a área, e de algumas análises

¹ Companhia de Melhoramentos da Capital - Engenheiro Edmar O. Arruda - Assessor do Departamento de limpeza pública da Comcap.

² A variação na capacidade de carga dos veículos dependerá do tipo de veículo e da densidade dos resíduos sólidos coletados.

que relacionem custo e benefício (tempo de coleta, comprimento de reatransversamento, segurança e esforço físico da equipe de garis).

Em função da ausência de determinados dados sobre os roteiros realizados pelos veículos que coletam os resíduos sólidos da área em estudo, foi necessário junto com os técnicos responsáveis pela coleta, realizar as seguintes complementações: (a) munidos de um mapa da área, acompanhar todos os atuais roteiros (setembro de 1991); (b) estimar os volumes de resíduos que são dispostos diariamente em cada trecho; (c) analisar as possíveis retiradas de certos pequenos trechos (com transferência dos resíduos gerados nos mesmos para outros trechos) e a introdução de trechos onde não ocorrem nem a geração nem a alocação de resíduos.

Como pode ser observado nos valores das quantidades de resíduos alocadas (ver anexo 1) a cada trecho de coleta, em determinados trechos aparecerá uma grande quantidade, apesar de gerarem poucos resíduos. Este fato ocorre devido a transferência dos resíduos de determinados trechos a outros, em função dos seguintes fatores: (a) certos trechos de ruas, por fazerem parte do "calçadão" não possibilitam a passagem do veículo coletor; (b) alguns trechos de pequenos comprimentos, objetivando reduzir a distância total de reatransversamento, não são passados pelos veículos coletores e, portanto, foram retirados da rede de coleta.

Realizado o trabalho, acima descrito, determinou-se a rede de coleta orientada que é apresentada no anexo 2. O anexo 1 mostra a matriz de dados desta rede.

Analisando esta etapa verifica-se que parte dela depende muito da intuição dos planejadores e do conhecimento das possibilidades de transferir certas quantidades de resíduos de uns trechos para outros.

5.4. DETERMINAÇÃO DOS PONTOS DE ENTRADA E SAÍDA DA REDE DE COLETA

Para efeito de demonstração da metodologia proposta, e não tornar repetitivo o procedimento, apresenta-se aqui o planejamento dos roteiros a serem realizados pelos veículos no período de terças às sextas-feiras, isto é, a realização de 6(seis) viagens por 3(três) veículos.

O processo atual de coleta, nestes dias da semana, é realizado por 3(três) veículos. Dois veículos partem da garagem diretamente para a área considerada, enquanto que o terceiro realiza serviços primeiramente em outra área e depois coleta os resíduos desta.

Considerando o posicionamento do local de garagem, do local de descarga (ver figura 5.4) e do número de viagens (seis) necessárias ao recolhimento de todos os resíduos gerados, dois veículos, em suas primeiras viagens, deverão entrar e sair da rede por locais (vértices) diferentes. Nas viagens sucessivas, estes veículos, entrarão e sairão da rede pelos mesmos locais (vértices). O terceiro veículo, que realiza coleta nesta área ou vindo de uma outra área ou do local de descarga, inicia e termina sua viagem sobre a rede no mesmo local (vértice).

Então, como os vértices 1 e 3 da rede apresentada no anexo 2, posicionam-se nos locais que oferecem menores distâncias da garagem e melhores condições de acesso a rede, foram os vértices escolhidos como pontos de entradas da primeira viagem, do primeiro e do segundo veículo, respectivamente. Da mesma forma que os vértices 1 e 3 estão para a garagem, os vértices 145 e 121 estão para o local de descarga, então, os mesmos foram escolhidos como locais de saídas destas viagens.

As 4(quatro) viagens restantes, por iniciarem e retornarem ao mesmo local (estação de transbordo), foram alocadas, em função de sua proximidade e condições de acesso a rede, da seguinte forma: duas entrando e saindo no vértice 145 e duas no vértice 121. A rede apresentada no anexo 3 define estes locais.

Face as definições dos locais de entradas e saídas da rede, os vértices 1 e 3 que eram vértices sumidouros com demanda igual a 1 passaram a ser vértices de grau par com o semi-grau de entrada igual ao semi-grau de saída, os vértices 121 e 145 que possuíam o semi-grau de entrada igual ao semi-grau de saída passaram a ser vértices sumidouros com demanda igual a 1.

5.5. CONSTRUÇÃO DA REDE "MULTI EULERIANA"

Como a rede de coleta definida foi convertida numa rede totalmente orientada, conforme mostrado no anexo 2, a transformação da mesma numa rede multi "multi euleriana", será realizada utilizando o mesmo processo de resolução aplicado ao problema do "carteiro chinês" para redes orientadas.

Considerando as alterações promovidas pelas definições dos locais (vértices 1, 3, 121 e 145) de entradas e saídas da rede, pelos veículos coletores em suas primeiras viagens, retiram-se os vértices 1 e 3 da relação de vértices sumidouros e inclui-se os vértices 121 e 145 com demanda igual a 1. O quadro 5.1. mostra a relação dos vértices fontes e vértices sumidouros com suas respectivas ofertas e demandas.

Aplicando-se o algoritmo de busca de menores caminhos (Dijkstra ou Floyd) entre cada vértice do conjunto de fontes a todos os vértices do conjunto de sumidouros e, em seguida, o algoritmo de Konig, obtém-se a associação de menor comprimento entre os vértices fontes e os vértices sumidouros. O quadro 5.2. apresenta a associação de menor comprimento entre estes vértices.

Definida a associação de menor comprimento entre os vértices fontes e vértices sumidouros, duplicam-se os arcos pertencentes aos caminhos componentes desta associação. Assim, fica estabelecida a rede "multi euleriana", apresentada no anexo 4.

QUADRO 5.1. Relação de vértices fontes e vértices sumidouros pertencentes à rede apresentada no anexo 3.

Vértices fontes	Oferta	Vértices sumidouros	Demanda
2	1	5	1
4	1	15	1
6	1	18	1
8	1	27	1
9	1	29	1
24	1	42	2
30	1	44	1
36	1	47	1
37	1	58	1
41	1	62	1
45	1	63	1
46	1	66	1
52	1	73	1
55	1	74	1
57	1	76	1
65	1	77	1
72	1	80	1
82	1	88	1
83	1	89	1
85	1	93	1
94	1	98	1
97	1	108	1
107	2	110	1
109	1	117	1
118	1	121	1
125	1	122	1
126	1	129	1
130	1	131	1
133	1	136	1
135	1	145	1

QUADRO 5.2. Associação de menor comprimento entre os vértices fontes e os vértices sumidouros, conforme apresentado na rede do anexo 4.

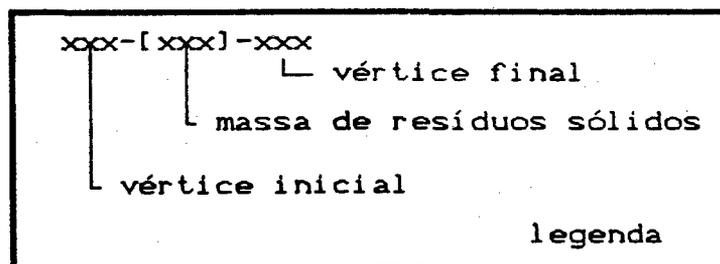
Vértices fontes	Vértices sumidouros	Caminho	Distância (metros)
2	5	12 - 9 - 6	268
4	74	38 - 39 - 41 - 54 - 70 - 71 - 73	1.170
6	15	5 - 10	472
8	29	-	400
9	62	17 - 21 - 30 - 46	870
24	73	4 - 38 - 39 - 41 - 54 - 70 - 71	1.110
30	63	46 - 62	491
36	42	-	60
37	42	36	214
41	76	54 - 70 - 71 - 73 - 74	886
45	27	33	132
46	47	62 - 63	443
52	44	-	120
55	77	69 - 71 - 73 - 74 - 76	724
57	58	-	64
65	66	-	66
72	93	-	84
82	131	115	710
83	18	82	130
85	80	-	70
94	108	-	150
97	98	101	190
107	88	95 - 90 - 89	314
107	89	95 - 90	270
109	110	-	50
118	122	119 - 121	252
125	136	-	70
126	117	123	264
130	129	-	102
133	145	132	194
135	121	-	240
Total			10.580

5.6. DETERMINAÇÃO DOS CAMINHOS QUE LIGAM OS VÉRTICES DE ENTRADA AOS VÉRTICES DE SAÍDA

A escolha dos caminhos a serem percorridos pelos veículos que entram e saem da rede, em suas primeiras viagens por vértices distintos, é um procedimento que depende de decisões particulares de cada planejador.

A rede "multi euleriana", normalmente, apresenta um grande conjunto de possibilidades de construções destes caminhos. Assim, de acordo com o modelo, para verificar se a escolha de um determinado caminho pode influenciar no comprimento total de reatransessamento, é importante analisar um conjunto de possibilidades, e determinar os que permitem o menor destes comprimentos. Entretanto, o analista, normalmente, verificará que quase todos ou todos os caminhos escolhidos convergem para o mesmo resultado.

Conforme pode ser visualizado na rede do anexo 5, foram definidos dois caminhos, compostos pelos seguintes vértices:



Caminho 01 :

1-[250]-8-[150]-29-[50]-50-[50]-49-[150]-30-[20]
 -46-[50]-62-[100]-82-[300]-115-[150]-131-[50]-132-[00]-145.

Caminho 02 :

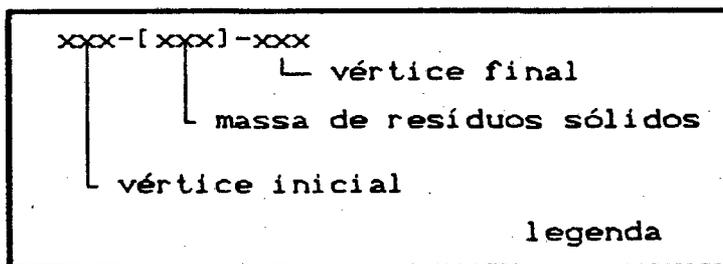
3-[2500]-7-[200]-11-[00]-7-[100]-4-[00]-38-[00]-
 39-[00]-41-[00]-54-[00]-70-[00]-71-[00]-73-[00]-74-[00]-76-[100]
 -77-[100]-90-[50]-89-[100]-95-[110]-107-[100]-119-[00]-121

5.7. CONSTRUÇÃO DOS PEQUENOS CICLOS

Definidos os caminhos das 2(duas) viagens que ligam os vértices de entradas ao vértice de saída da rede, excluem-se os mesmos da rede. Com os arcos remanescentes são construídos os pequenos ciclos. O anexo 6 apresenta a rede "multi euleriana" dividida em ciclos, cuja constituição é mostrada no quadro 5.3.

Como pode ser observado no anexo 6, o conjunto de ciclos, constituídos pelos arcos da rede, formam uma estrutura entrelaçada. Este tipo de estrutura, inviabiliza a construção da rede de ciclos vértices no plano bidimensional. Portanto, de acordo com o modelo, agrupam-se os pequenos ciclos, formando ciclos maiores. Assim, não são realizadas as etapas intermediárias como proposto para o sistema totalmente informatizado.

Quadro 5.3. Relação dos pequenos ciclos formados na rede do anexo 6 e suas respectivas massas de resíduos sólidos (1ª parte).



Número do ciclo	Circuito	Massa (Kg)
1	8-[00]-29-[60]-22-[150]-13-[50]-8	260
2	2-[40]-12-[20]-9-[150]-17-[50]-21-[100]- 16-[80]-14-[80]-2	520
3	5-[150]-9-[30]-6-[20]-5	200
4	5-[350]-10-[50]-15-[300]-6-[00]-5	700
5	31-[200]-28-[100]-31	300

Quadro 5.3. Relação dos pequenos ciclos formados na rede do anexo 6 e suas respectivas massas de resíduos sólidos (2ª parte).

Número do ciclo	Circuito	Massa (Kg)
6	23-[100]-32-[50]-45-[20]-33-[100]-23	270
7	4-[300]-38-[100]-26-[100]-25-[100]-24 -[100]-4	700
8	37-[100]-36-[100]-42-[100]-37	300
9	39-[100]-41-[50]-54-[50]-40-[100]-39	300
10	69-[100]-71-[100]-73-[50]-69	250
11	70-[100]-71-[50]-72-[50]-93-[200]-109 -[00]-110-[300]-70	700
12	56-[50]-65-[50]-66-[300]-56	400
13	62-[100]-63-[50]-81-[150]-83-[50]-82 -[100]-62	450
14	85-[50]-80-[100]-86-[150]-85	300
15	101-[160]-104-[80]-102-[70]-101	310
16	106-[50]-111-[200]-116-[200]-126-[150]- 123-[300]-106	900
17	123-[50]-117-[100]-125-[100]-136-[100]- 123	350
18	118-[50]-119-[00]-121-[100]-122-[50]- 118	200
19	132-[00]-145-[80]-133-[70]-132	150
20	128-[50]-127-[50]-128	100
21	112-[50]-114-[100]-127-[100]-130-[50]- 129-[200]-124-[100]-143-[50]-144-[00]- 143-[50]-113-[100]-112	800
22	5-[00]-10-[00]-15-[200]-23-[400]-21-[50]- 17-[50]-9-[00]-6-[00]-5	700
23	61-[100]-65-[00]-66-[50]-67-[50]-75 -[50]-68-[120]-64-[50]-61	420
24	21-[200]-30-[00]-46-[100]-30-[300]-21	600
25	46-[00]-62-[50]-46	50
26	46-[00]-62-[00]-63-[100]-47-[200]-46	300

Quadro 5.3. Relação dos pequenos ciclos formados na rede do anexo 6 e suas respectivas massas de resíduos sólidos (3ª parte).

Número do ciclo	Circuito	Massa (Kg)
27	40-[100]-38-[100]-39-[00]-41-[00]-54 -[100]-70-[300]-134-[250]-40	850
28	18-[50]-82-[50]-18	100
29	82-[00]-115-[00]-114-[200]-100-[200]-82	400
30	115-[00]-131-[100]-133-[00]-132-[00]-128 -[100]-115	200
31	96-[50]-97-[50]-101-[100]-98-[150]-112 -[100]-105-[100]-111-[50]-106-[50]-103 -[100]-96	750
32	120-[00]-135-[300]-121-[00]-122-[250]-125 -[00]-136-[500]-145-[00]-132-[100]-130 -[00]-129-[200]-126-[00]-123-[00]-117 -[100]-118-[00]-119-[300]-120	1750
33	90-[00]-89-[100]-88-[100]-142-[30]-107 -[00]-95-[00]-90	230
34	44-[300]-67-[300]-55-[100]-69-[00]-71 -[00]-73-[100]-74-[200]-76-[200]-94 -[200]-108-[200]-120-[300]-109-[00]-110 -[100]-146-[00]-147-[100]-146-[100]-134 -[400]-135-[00]-121-[100]-119-[200]-107 -[100]-95-[200]-90-[100]-77-[100]-68 -[200]-65-[100]-56-[200]-52-[350]-44	4250
35	34-[100]-43-[100]-35-[100]-36-[00]-20 -[100]-36-[00]-42-[100]-53-[100]-55 -[00]-69-[100]-54-[00]-70-[00]-71-[00]-73 -[00]-74-[00]-76-[00]-77-[200]-78 -[300]-79-[200]-57-[50]-58-[50]-59 -[100]-48-[100]-60-[50]-61-[300]-33 -[200]-27-[300]-52-[00]-44-[100]-34	2650

Quadro 5.3. Relação dos pequenos ciclos formados na rede do anexo 6 e suas respectivas massas de resíduos sólidos (4ª parte).

Número do ciclo	Circuito	Massa (Kg)
36	19-[400]-34-[200]-24-[00]-4-[00]-38 -[00]-39-[200]-37-[00]-36-[00]-42 -[200]-41-[00]-54-[00]-70-[00]-71 -[00]-73-[00]-74-[50]-91-[100]-72 -[00]-93-[100]-92-[00]-137-[100]-138 -[00]-137-[00]-92-[100]-94-[00]-108 -[200]-107-[00]-95-[00]-90-[00]-89 -[00]-88-[50]-139-[100]-140-[00]-139 -[00]-87-[100]-141-[200]-96-[50]-85 -[00]-80-[50]-79-[50]-81-[100]-84 -[150]-97-[00]-101-[00]-98-[50]-99 -[100]-83-[00]-82-[00]-18-[100]-50 -[100]-29-[100]-16-[50]-13-[50]-2 -[00]-12-[00]-9-[00]-17-[00]-21-[00]-30 -[00]-46-[00]-62-[00]-63-[00]-47 -[00]-51-[150]-31-[100]-32-[200]-57 -[00]-58-[100]-48-[200]-45-[00]-33 -[00]-27-[100]-19	3900

5.8. AGRUPAMENTO DOS PEQUENOS CICLOS EM VIAGENS DE COLETA

Considerando a impossibilidade de construir a rede de ciclos vértices no plano, agrupa-se um número de pequenos ciclos aos dois caminhos que ligam os vértices de entrada aos vértices de saída. Este agrupamento é realizado respeitando a capacidade de carga dos veículos coletores. Com os ciclos remanescentes constroem-se as 4(quatro) viagens restantes.

Este procedimento tem por objetivo minimizar o transporte realizado pelos veículos para atingirem o início das viagens de coleta e para transportarem os resíduos ao local de descarga e, também otimizar a utilização da capacidade de carga dos veículos coletores. Desta maneira são definidos os conjuntos de ciclos pertencentes a cada viagem de coleta. O quadro 5.10 apresenta o conjunto de ciclos pertencente a cada viagem de coleta e a carga média estimada em cada uma delas.

Quadro 5.4. Composição das viagens com suas respectivas quantidades de resíduos.

Número da viagem	Ciclos	Carga prevista (Kg)
1	1 - 2 - 3 - 4 - 13 - 22 - 24 25 - 26 - 28 e o caminho 1	5200
2	7 - 27 e o caminho 2	4910
3	6 - 8 - 9 - 10 - 12 - 18 - 23 33 - 35	5020
4	15 - 16 - 17 - 19 - 20 - 21 31 - 32	5110
5	5 - 14 - 29 - 30 - 36	5100
6	11 - 34	4950

5.9. DECODIFICAÇÃO DAS VIAGENS DE COLETA

O conjunto de viagens formado pelo agrupamento dos pequenos ciclos permite a realização de vários tipos de percursos. Na escolha do percurso que o veículo deve realizar, dentro de cada ciclo, conforme descrito no capítulo IV, deve-se levar em consideração o grau de dificuldade que o mesmo apresenta (manuseio do veículo coletor, esforço físico da equipe de coleta, etc). O quadro 5.5 relaciona a sequência dos vértices que devem ser percorridos pelos veículos coletores para realizarem as viagens definidas e, apresentadas nos anexos de 7 a 12.

Quadro 5.5. Relação das viagens com suas respectivas sequências de vértices e comprimentos (1ª parte).

Número da Viagem	Sequência de vértices	Comprimento (metros)
1	1 8 29 22 13 8 29 50 49 30 46 62 63 47 46 62 46 30 21 17 9 6 5 10 15 6 5 10 15 23 21 16 14 2 12 9 6 5 9 17 21 30 46 62 63 81 83 82 62 82 18 82 115 131 132 145	9102
2	3 7 11 7 4 38 39 41 54 70 134 40 38 26 25 24 4 38 39 41 54 70 71 73 74 76 77 90 89 95 107 119 121	5097
3	121 122 118 119 107 95 90 77 78 79 57 58 59 48 60 61 65 66 56 65 66 67 75 68 64 61 33 23 32 45 33 27 52 44 34 43 35 36 20 36 42 37 36 42 53 55 69 54 40 39 41 54 70 71 73 71 73 69 74 76 77 90 89 88 142 107 119 121	8054

Quadro 5.5. Relação das viagens com suas respectivas seqüências de vértices e comprimentos (2ª parte).

Número da Viagem	Seqüência de vértices	Comprimento (metros)
4	145 132 130 129 124 143 144 143 113 112 105 111 106 103 96 97 101 104 102 101 98 112 114 127 128 127 130 129 126 123 106 111 116 126 123 117 125 136 123 117 118 119 120 135 121 122 125 136 145 133 132 145	6747
5	145 132 128 115 114 100 82 18 50 29 16 13 2 9 17 21 30 46 62 63 47 51 31 28 31 32 57 58 48 45 33 27 19 34 24 4 38 39 37 36 42 41 54 70 71 73 74 91 72 93 92 137 138 137 92 94 108 107 95 90 89 88 139 140 139 87 141 96 85 80 86 85 80 79 81 84 97 101 98 99 83 82 115 131 133 132 145	12311
6	121 119 107 95 90 77 68 65 56 52 44 67 55 69 71 72 93 109 110 70 71 73 74 76 94 108 120 109 110 146 147 146 134 135 121	5820

5.10. CONTROLE DO VOLUME DE RESÍDUOS COLETADOS

O processo de controle do volume de resíduos coletados na cidade de Florianópolis, é realizado através da pesagem dos veículos, com suas respectivas cargas, em uma balança posicionada na entrada da estação de transbordo.

Conforme pode ser observado no anexo 6, da mesma forma como foram construídas as viagens de coleta, caso seja detectado diferenças entre o volume coletado e o estimado, pode-se transferir determinados pequenos ciclos de uma viagem para outra.

Este procedimento de transferência, em função da disposição entrelaçada dos pequenos ciclos, é realizada com bastante facilidade, sem alterar praticamente em nada o comprimento final de reatrevessamento.

5.11. CONCLUSÃO

Conforme descrito no início deste capítulo, a metodologia abrange o planejamento de dois tipos de redes (com e sem possibilidade de construção da rede de ciclos vértices no plano). Optou-se pela aplicação do modelo à uma rede do segundo tipo face a existência de metodologias semelhantes que utilizaram como exemplo aplicações sobre redes do primeiro tipo.

A coleta dos resíduos, nesta área da cidade, entre às terças e as sextas-feiras, é realizada, conforme apresentado anteriormente, por três veículos coletores que percorrem sobre a área, em seis viagens, 54.182 metros.

Utilizando-se, também de seis viagens para coletar os resíduos da mesma área, de acordo com os resultados obtidos com a aplicação do modelo, o percurso total realizado passa a ser de 47.131 metros. Deste percurso, 10.580 metros são duplicações dentro da coleta (22.45% do percurso total) e 668 metros são duplicações necessárias para que o veículo atinja os trechos iniciais de coleta

e leve os resíduos ao local de descarga (1.42% do percurso total). Comparando com o percurso realizado atualmente (setembro de 1991 - 54.182 metros) obtém-se uma redução de 7.051 metros, ou seja, de 13.01%.

A transformação da rede em 36 pequenos ciclos, reduz o número de parâmetros necessários a serem analisados para a montagem das viagens. Desta forma, a construção do conjunto de viagens e a transferência de ciclos entre estas viagens, caso haja necessidade para balancear a carga dos veículos coletores, constitui-se num processo simples. Assim, a sugestão de A. V. Chiplunkar [10], quanto a utilização de um procedimento manual na realização das etapas subsequentes à construção da rede "multi euleriana", pode ser desenvolvida obtendo-se bons resultados.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi apresentado um modelo que objetiva auxiliar os administradores de empresas públicas e privadas nas decisões relativas ao planejamento dos roteiros de coletas dos resíduos sólidos urbanos. Procurou-se, além da aplicação de metodologias científicas e de técnicas matemáticas, na proposição do modelo, utilizar-se do conhecimento empírico dos profissionais com larga experiência na área em questão.

O processo de coleta, conforme abordado no capítulo I, é o processo que engloba, geralmente, a maior parte dos recursos alocados aos serviços de limpeza pública. Por sua vez, grande parcela destes recursos é desperdiçada em função da ineficiência no planejamento deste, principalmente no que tange a elaboração dos roteiros de coleta e no controle do volume de resíduos coletados.

Na perspectiva de otimizar este planejamento, definiu-se como objetivo, a minimização dos percursos realizados pelos veículos e a melhoria da utilização da capacidade de carga dos mesmos. Dentro desta linha de trabalho, foram consideradas certas situações que, normalmente, são encontradas na maioria das cidades, tais quais : os locais de garagem dos veículos podem estar situados

em pontos diferentes dos locais de descarga; as ruas pertencentes a área de coleta podem ser somente de mão única ou somente de mão dupla ou ambos os tipos e, o volume de resíduos sólidos gerado sofre variações diárias ou sazonais.

Para atender os objetivos e as considerações arroladas no parágrafo anterior, definiu-se o estabelecimento de dois caminhos. O primeiro, através de um procedimento que pode ser totalmente informatizado. O segundo, visando o manuseio de redes que não possibilitam a construção da rede de ciclos vértices no plano, através de uma heurística parcialmente informatizada.

Quanto a minimização do percurso, verificou-se que em duas situações distintas do processo ocorrem duplicações de trechos de ruas : duplicação para realizar a coleta dos resíduos e, para prover um meio que permita a cada veículo ir do último trecho de coleta ao vértice de saída da rede, e deste (ou de um outro vértice) ao primeiro trecho da próxima viagem.

Assim, a construção da rede "multi euleriana" e da árvore expandida de mínimo comprimento pelo primeiro caminho, e a construção da rede "multi euleriana" e o agrupamento dos pequenos ciclos em ciclos maiores pelo segundo, minimizam o conjunto de trechos duplicados.

Igualmente, face a construção da rede "multi euleriana", ambos os caminhos consideram as mudanças ocorridas nos graus dos vértices de entradas e saídas, quando estes posicionam-se em locais distintos na rede. Conforme verificado no capítulo IV, quando da definição dos caminhos entre estes vértices e dos pequenos ciclos, se estas alterações não forem consideradas, determinados trechos deverão ser duplicados para possibilitar ou a construção dos caminhos ou dos pequenos ciclos.

Por outro lado, a divisão da rede em pequenos ciclos e, conseqüentemente, a construção da árvore expandida de mínimo comprimento ou do acoplamento direto dos pequenos ciclos em ciclos maiores, confere ao modelo uma flexibilidade na manipulação do

tamanho (em termos de comprimento do percurso) das viagens. Esta elasticidade, por sua vez, permite atender as variações ocorridas nas quantidades de resíduos gerados (peso e volume), mantendo, constantemente, a capacidade de carga otimizada e o comprimento dos percursos minimizados.

Para dar suporte e fundamentação aos procedimentos, foram pesquisados e definidos os algoritmos, conforme apresentado no capítulo II, que proporcionam a construção das etapas do modelo, de forma mais eficiente. Por sua vez, para possibilitar a aplicação do modelo, procedimento semi-informatizado, foi desenvolvido um programa computacional que gera como saída o conjunto de trechos de ruas que devem ser duplicados para a construção da rede "multi euleriana". Este programa, para atender as modificações que ocorrem no grau dos vértices de entrada e saída da rede, possui um dispositivo que, após a entrada dos dados da rede e a definição dos vértices ímpares e/ou fontes e sumidouros, permite incluir novos vértices nesta relação e/ou a eliminação de existentes.

Conforme apresentado no capítulo V, a aplicação do modelo ao planejamento dos roteiros de coleta realizados entre às terças e sextas-feiras, na área central do município de Florianópolis - SC, evidenciou a sua eficiência. Os roteiros em questão, por sua vez, são realizados sobre uma rede do tipo orientada, possuindo 147 vértices, 238 arcos e 35.883 metros de comprimento total. De um percurso de 54.182 metros realizado por três veículos coletores em seis viagens, mantendo-se o mesmo número de viagens, obteve-se como resultado final otimizado, um percurso de 47.131 metros, ou seja, uma redução de aproximadamente 13% em relação ao sistema existente. Considerando a possibilidade de redução de uma viagem, em função da otimização da capacidade de carga dos veículos, este comprimento poderá ser menor que o calculado..

O procedimento de transformação da rede "multi euleriana" em pequenos ciclos, no caso do roteiro da área em estudo, dividiu a rede em 36 pequenos ciclos. Desta forma, com a redução do número de parâmetros a serem analisados, tornou-se possível a construção

do conjunto de viagens e, se houver necessidade de balancear a carga dos veículos coletores, a alteração nas suas dimensões, através da transferência de ciclos entre as mesmas.

Embora o modelo aqui apresentado tenha sido desenvolvido com base em algumas simplificações, verifica-se através dos resultados obtidos que este pode contribuir sobremaneira no planejamento dos roteiros de coleta de resíduos sólidos urbanos. Por outro lado, quando procede-se a equivalência do percurso minimizado em termos econômicos, percebe-se que a diminuição de custos, não avaliada neste trabalho, pode proporcionar economias importantes, em termos de horas de trabalho e por quilômetro rodado, nas empresas gerenciadoras dos sistemas de limpeza pública.

Como complementação deste trabalho, sugere-se a realização de estudos adicionais visando a implementação total do modelo em um programa computacional. Atendendo, desta maneira, o primeiro caminho a ser trilhado pelo modelo. Da mesma forma, apesar dos resultados obtidos com as experiências desenvolvidas durante a elaboração deste trabalho, fica estabelecido um novo desafio quanto a comprovação de que as modificações implementadas no algoritmo húngaro (propostas no capítulo IV), para otimizar a associação entre os vértices ímpares de uma rede não orientada, fazem o mesmo sempre convergir para um resultado otimizado.

Considerando que o processo de coleta é parte integrante do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos, conforme apresentado no capítulo I, recomenda-se, também, a avaliação dos benefícios, qualitativos e quantitativos, que podem ser obtidos quando da integração do procedimento de coleta otimizado com as demais etapas componentes deste sistema.

E, finalmente, sugere-se a adequação e a aplicação do modelo em sistemas semelhantes, como os de distribuição de bens de consumo (distribuição de butijões de gás, revistas e jornais, correspondências, etc...).

BIBLIOGRAFIA

- [01] AISSE, Miguel Mansur et al. Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos. [Brasília]:CNPq, [198?], 107p.
- [02] AS OFERTAS Para a Coleta de Lixo. Dirigente Municipal, v.21, n.1, p.28-31, jan.1990.
- [03] BANEGAS CHAVES, J. R. Uma metodologia para o problema do carteiro chinês em redes mistas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1985. 88p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção) - UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 1985.
- [04] BERGE, Claude. Graphs. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1989. 413p.
- [05] BERTOLAZZI, P., BIANCO, L., RICCIARDELLI, S. A Method for Determining the Optmal Districting in Urban Emergency Services. Comput & Operations Research, v.4, p.1-12, 1977.
- [06] BOAVENTURA NETTO, P. O. Teoria e Modelos de Grafos. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1979. 249p.
- [07] BUNDI, U., WASMER, H. R. Reciclagem: Bases Fundamentais e Conceituação. Revista Limpeza Publica, n.7, p.34-39, [198?].

- [08] LE TRAITEMENT des déchets municipaux. Guide à l'usage des responsables locaux. Ed. Luxembourg, 1981. 94p.
- [09] CHEN, Wai-Kai. Applied Graph Theory. London: North-Holland Publishing Company, 1971. 484p.
- [10] CHIPLUNKAR, A. V., MEHNDIRATTA, S. L., KHANNA, P. Optimization of Refuse Collection Systems. Journal of The Environmental Engineering Division, p.1203-1210, dez. 1981.
- [11] CHRISTOFIDES, Nicos. Graph Theory: An Algorithmic Approach. London: Academic Press, 1975. 400p.
- [12] COSTA, H. C. B., Rotas para distribuição de bens e serviços - Proposta de um sistema de informação. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1982. 132p. Dissertação (mestrado em Ciências) - UFPb, Departamento de Sistemas de Computação, 1982.
- [13] DIFÍCIL Solução Para o Lixo de Florianópolis. Dirigente Municipal, v.19, n.6, p.18-19, jun. 1988.
- [14] EDMONDS, J., JOHNSON, E. L. Matching, Euler tours and chinese postman. Mathematical Programming, V.5., p.88-124, 1973.
- [15] EIGENHEER, E. M. Experiência Piloto de coleta seletiva de lixo Engenharia Sanitária, v.25, n.3, p.355-357, jul/set.1986.
- [16] ESTUDO de Viabilidade Técnico/Econômica para Aproveitamento de resíduos Sólidos Urbanos em Cidades do Paraná com até 50 mil Habitantes. SUDESUI/ Fundação Universidade Estadual de Maringá, 1988.
- [17] ESTUDO de Viabilidade Técnico/Econômica Para Aproveitamento de Resíduos Urbanos no Estado do Paraná. SEIC/ Fundação Universidade Estadual de Maringá, 1986.

- [18] FERREIRA, J.A. FIGUEIREDO, J. C. A. Estudo de otimização do sistema origem-destino da coleta domiciliar da CONLURB. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, 1978, Santo Domingo. Anais... 48p.
- [19] FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS. Disposição do Lixo no Brasil e suas Perspectivas. Brasília: SEPLAN, 1977.
- [20] GILLETT, Billy E. Introduction to Operations Research. New York: McGraw-Hill. 1976. 617p.
- [21] GONDRAN, M. Graphs and Algorithms. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1984. 650p.
- [22] GUSMÃO, R. P. Diagnóstico Brasil - a ocupação e o meio ambiente. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. 170p.
- [23] HÁ SEMPRE Uma Boa Opção para o lixo Urbano. Dirigente Municipal, v.19, n.7, jul.1988.
- [24] LIEBMAN, J. C., MALE, J. W., WATHNE, M. Minimum Cost in Residential Refuse Vehicle Routes. Journal of The Environmental Engineering Division, p.399-412, jun. 1975.
- [25] MALE, J. W., LIEBMAN, J. C., Districting and Routing for Solid Waste Collection. Journal of The Environmental Engineering Division, p.1-14, fev.1978.
- [26] MARSHALL, C. W., Applied Graph Theory. New York: John Wiley and Sons. 1971. 322p.
- [27] MATION, H., Caminhos eulerianos de mínimo custo em grafos orientados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL/ I CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PESQUISA OPERACIONAL E ENGENHARIA DE SISTEMAS, 1982, Rio de Janeiro. Anais... V.2, p.483-492.

- [28] MINIEKA, Edward. The Chinese Postman Problem For Mixed Networks. Manegement Science, V.25, n.7, p.643-648, jul.1979.
- [29] O LIXO que não é lixo. Dirigente Municipal. v.20, n.9, p.22-25, set.1989.
- [30] O LIXO urbano no Brasil. Alternativas para evitar o Caos. Engenharia Sanitária, v.26, n.1, p.13-26, jan-mar. 1987.
- [31] OLIVEIRA, W. E. Objetivos da limpeza pública. Revista DAE, n.143, v.45, p.352-355, dez.1985.
- [32] PARAGUASSÚ DE SÁ, A. F., VERAS O. D. F. Algumas regras práticas para a elaboração e implantação de roteiros de coleta. Rio de Janeiro: CONLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana, 1986. 36p.
- [33] PEIXOTO, J. O. Destino Final de Resíduos Sólidos, Nem Sempre Uma Opção Econômica. Engenharia Sanitária, v.27, n.1, p.15-18, jan/mar.1988.
- [34] PENIDO MONTEIRO, J. H., MANSUR, G. L. Projeto de Usina de Reciclagem e Compostagem Para Cidades de Pequeno e Médio Portes. Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, v.26, n.1, p.75-82, jan/mar.1987.
- [35] PHILIPPI JUNIOR, A. Sistema de Resíduos Sólidos : Coleta e Transporte no Meio Urbano. São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1986. 182p.
- [36] PINTO COELHO, P. E. F. Lixo ou Luxo. Revista de Engenharia Sanitária, v.28, n.1, p.42-48, jan/mar. 1989.
- [37] PINTO, M. S. A coleta e a disposição do lixo no Brasil. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1979.

- [38] ROUSSEAU, P. Estudo da Distribuição Granulométrica dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Florianópolis. Florianópolis: Departamento de Engenharia Sanitária, UFSC, 1989. 22p.
- [39] TCHOBANOGLIOUS, G. Solid Wastes: Engineering Principles and management. Issues. Tokyo: McGraw-Hill, 1977.
- [40] WILSON, D. C. Waste Management - Planing, Evaluation, Technologies. New York: Oxford University Press, 1981. 530p.
- [41] ZULAUF, W. E. Resíduos Sólidos - Desenvolvimento e Meio Ambiente. Revista Limpeza Pública, n.7, p.4-7, [198?]

ANEXOS

MATRIZ DE DADOS DA REDE DE COLETA APRESENTADA
 NO ANEXO 02

anexo 01

NUMERO DO ARCO	VERTICE INICIAL	VERTICE FINAL	COMPRIMENTO (metro)	MASSA (Kg)
1 -	1 -	8 -	456 -	250
2 -	2 -	12 -	80 -	40
3 -	3 -	7 -	60 -	2500
4 -	4 -	38 -	250 -	300
5 -	5 -	9 -	180 -	150
6 -	5 -	10 -	320 -	350
7 -	6 -	5 -	52 -	20
8 -	7 -	4 -	100 -	100
9 -	7 -	11 -	80 -	200
10 -	8 -	29 -	400 -	150
11 -	9 -	6 -	104 -	30
12 -	9 -	17 -	175 -	150
13 -	10 -	15 -	100 -	50
14 -	11 -	7 -	80 -	0
15 -	12 -	9 -	32 -	20
16 -	13 -	2 -	80 -	50
17 -	13 -	8 -	90 -	50
18 -	14 -	2 -	70 -	80
19 -	15 -	6 -	260 -	300
20 -	15 -	23 -	180 -	200
21 -	16 -	13 -	100 -	50
22 -	16 -	14 -	80 -	80
23 -	17 -	9 -	182 -	50
24 -	17 -	21 -	120 -	50
25 -	18 -	50 -	140 -	100
26 -	18 -	82 -	80 -	50
27 -	19 -	34 -	265 -	400
28 -	20 -	36 -	70 -	100
29 -	21 -	16 -	80 -	100
30 -	21 -	17 -	120 -	50
31 -	21 -	30 -	250 -	200
32 -	22 -	13 -	245 -	150
33 -	23 -	21 -	180 -	400
34 -	23 -	32 -	120 -	100
35 -	24 -	4 -	40 -	100
36 -	25 -	24 -	95 -	100
37 -	26 -	25 -	162 -	100
38 -	27 -	19 -	80 -	100
39 -	27 -	52 -	320 -	300
40 -	28 -	31 -	190 -	100
41 -	29 -	16 -	370 -	100
42 -	29 -	22 -	146 -	60
43 -	29 -	50 -	120 -	50
44 -	30 -	21 -	250 -	300
45 -	30 -	46 -	180 -	20
46 -	31 -	28 -	305 -	200
47 -	31 -	32 -	52 -	100
48 -	32 -	45 -	80 -	50
49 -	32 -	57 -	205 -	200
50 -	33 -	23 -	150 -	100
51 -	33 -	27 -	72 -	200
52 -	34 -	24 -	224 -	200
53 -	34 -	43 -	86 -	100

MATRIZ DE DADOS DA REDE DE COLETA APRESENTADA
NO ANEXO 02

anexo 01

NUMERO DO ARCO	VERTICE INICIAL	VERTICE FINAL	COMPRIMENTO (metro)	MASSA (Kg)
54 -	35 -	36 -	108 -	100
55 -	36 -	20 -	70 -	0
56 -	36 -	42 -	60 -	100
57 -	37 -	36 -	154 -	100
58 -	38 -	26 -	90 -	100
59 -	38 -	39 -	50 -	100
60 -	39 -	37 -	94 -	200
61 -	39 -	41 -	108 -	100
62 -	40 -	38 -	166 -	100
63 -	40 -	39 -	104 -	100
64 -	41 -	54 -	106 -	50
65 -	42 -	37 -	100 -	100
66 -	42 -	41 -	90 -	200
67 -	42 -	53 -	100 -	100
68 -	43 -	35 -	98 -	100
69 -	44 -	34 -	72 -	100
70 -	44 -	67 -	280 -	300
71 -	45 -	33 -	60 -	20
72 -	46 -	30 -	170 -	100
73 -	46 -	62 -	145 -	50
74 -	47 -	46 -	180 -	200
75 -	47 -	51 -	40 -	0
76 -	48 -	45 -	120 -	200
77 -	48 -	60 -	154 -	100
78 -	49 -	30 -	230 -	150
79 -	50 -	29 -	120 -	100
80 -	50 -	49 -	114 -	50
81 -	51 -	31 -	200 -	150
82 -	52 -	44 -	120 -	350
83 -	53 -	55 -	120 -	100
84 -	54 -	40 -	112 -	50
85 -	54 -	70 -	240 -	100
86 -	55 -	69 -	82 -	100
87 -	56 -	52 -	40 -	200
88 -	56 -	65 -	90 -	50
89 -	57 -	58 -	64 -	50
90 -	58 -	48 -	188 -	100
91 -	58 -	59 -	70 -	50
92 -	59 -	48 -	120 -	100
93 -	60 -	61 -	80 -	50
94 -	61 -	33 -	364 -	300
95 -	61 -	65 -	134 -	100
96 -	62 -	46 -	145 -	50
97 -	62 -	63 -	166 -	100
98 -	62 -	82 -	140 -	100
99 -	63 -	47 -	132 -	100
100 -	63 -	81 -	100 -	50
101 -	64 -	61 -	70 -	50
102 -	65 -	56 -	90 -	100
103 -	65 -	66 -	66 -	50
104 -	66 -	56 -	160 -	300
105 -	66 -	67 -	64 -	50

MATRIZ DE DADOS DA REDE DE COLETA APRESENTADA
NO ANEXO 02

anexo 01

NUMERO DO ARCO	VERTICE INICIAL	VERTICE FINAL	COMPRIMENTO (metro)	MASSA (Kg)
106 -	67 -	55 -	274 -	300
107 -	67 -	75 -	70 -	50
108 -	68 -	64 -	168 -	120
109 -	68 -	65 -	74 -	200
110 -	69 -	54 -	96 -	100
111 -	69 -	71 -	126 -	100
112 -	70 -	71 -	140 -	100
113 -	70 -	134 -	426 -	300
114 -	71 -	72 -	64 -	50
115 -	71 -	73 -	176 -	100
116 -	72 -	93 -	84 -	50
117 -	73 -	69 -	140 -	50
118 -	73 -	74 -	100 -	100
119 -	74 -	76 -	124 -	200
120 -	74 -	91 -	90 -	50
121 -	75 -	68 -	122 -	50
122 -	76 -	77 -	116 -	100
123 -	76 -	94 -	150 -	200
124 -	77 -	68 -	64 -	100
125 -	77 -	78 -	200 -	200
126 -	77 -	90 -	104 -	100
127 -	78 -	79 -	300 -	300
128 -	79 -	57 -	188 -	200
129 -	79 -	81 -	80 -	50
130 -	80 -	79 -	80 -	50
131 -	80 -	86 -	252 -	100
132 -	81 -	83 -	210 -	150
133 -	81 -	84 -	100 -	100
134 -	82 -	18 -	80 -	50
135 -	82 -	62 -	140 -	100
136 -	82 -	115 -	490 -	300
137 -	83 -	82 -	50 -	50
138 -	84 -	97 -	100 -	150
139 -	85 -	80 -	70 -	50
140 -	86 -	85 -	222 -	150
141 -	87 -	141 -	210 -	100
142 -	88 -	139 -	50 -	50
143 -	88 -	142 -	210 -	100
144 -	89 -	88 -	44 -	100
145 -	89 -	95 -	160 -	100
146 -	90 -	77 -	104 -	100
147 -	90 -	89 -	40 -	50
148 -	91 -	72 -	254 -	100
149 -	92 -	94 -	160 -	100
150 -	92 -	137 -	30 -	0
151 -	93 -	92 -	250 -	100
152 -	93 -	109 -	250 -	200
153 -	94 -	108 -	150 -	200
154 -	95 -	90 -	150 -	200
155 -	95 -	107 -	80 -	110
156 -	96 -	85 -	100 -	50
157 -	96 -	97 -	80 -	50

MATRIZ DE DADOS DA REDE DE COLETA APRESENTADA
NO ANEXO 02

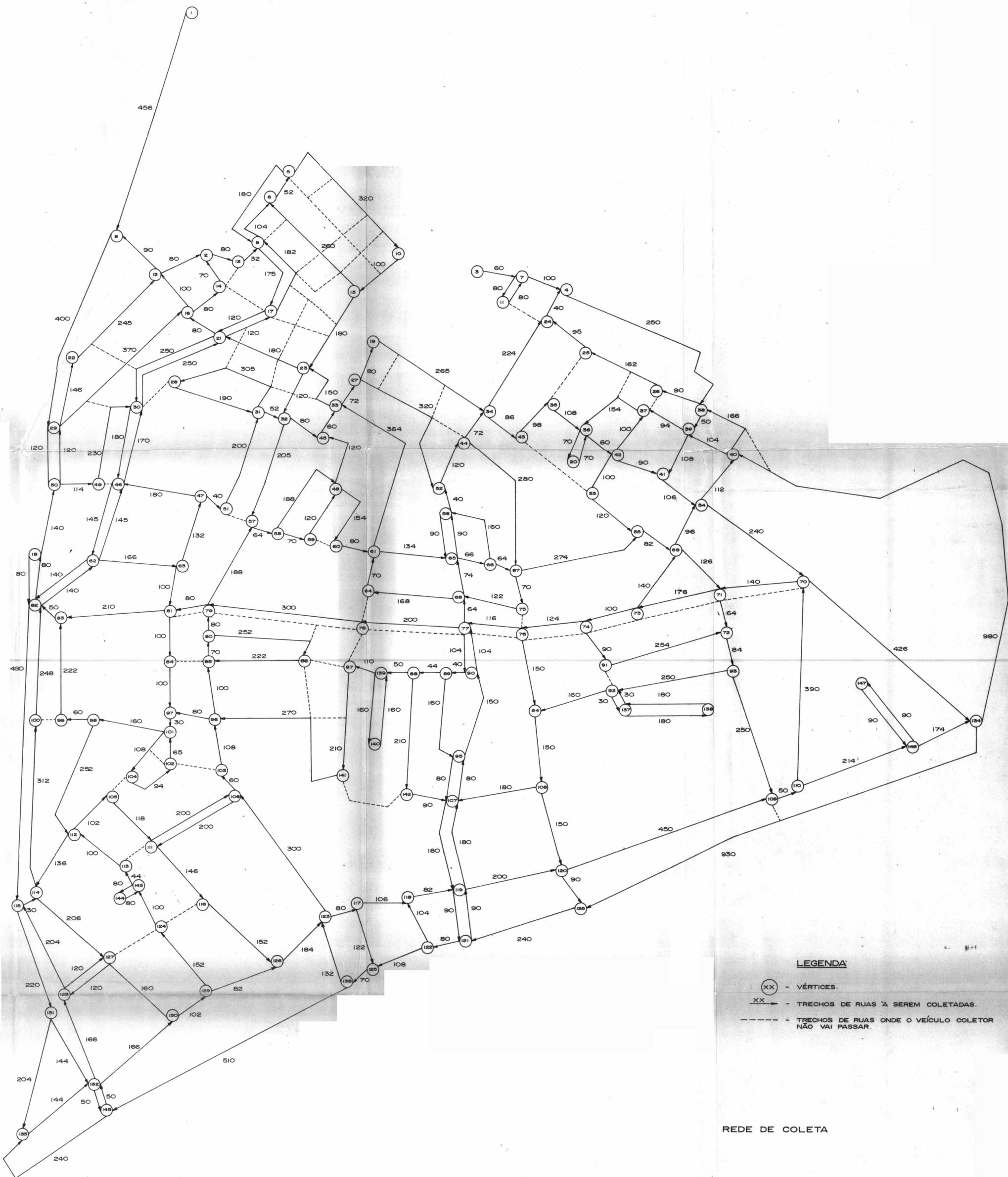
anexo 01

NUMERO DO ARCO	VERTICE INICIAL	VERTICE FINAL	COMPRIMENTO (metro)	MASSA (Kg)
158 -	97 -	101 -	30 -	50
159 -	98 -	99 -	60 -	50
160 -	98 -	112 -	252 -	150
161 -	99 -	83 -	222 -	100
162 -	100 -	82 -	248 -	200
163 -	101 -	98 -	160 -	100
164 -	101 -	104 -	108 -	160
165 -	102 -	101 -	65 -	70
166 -	103 -	96 -	108 -	100
167 -	104 -	102 -	94 -	80
168 -	105 -	111 -	118 -	100
169 -	106 -	103 -	60 -	50
170 -	106 -	111 -	200 -	50
171 -	107 -	95 -	80 -	100
172 -	107 -	119 -	180 -	100
173 -	108 -	107 -	180 -	200
174 -	108 -	120 -	150 -	200
175 -	109 -	110 -	50 -	0
176 -	110 -	70 -	390 -	300
177 -	110 -	146 -	214 -	100
178 -	111 -	106 -	200 -	50
179 -	111 -	116 -	146 -	200
180 -	112 -	105 -	102 -	100
181 -	112 -	114 -	136 -	50
182 -	113 -	112 -	100 -	100
183 -	114 -	100 -	312 -	200
184 -	114 -	127 -	206 -	100
185 -	115 -	114 -	30 -	0
186 -	115 -	131 -	220 -	150
187 -	116 -	126 -	152 -	200
188 -	117 -	118 -	106 -	100
189 -	117 -	125 -	122 -	100
190 -	118 -	119 -	82 -	50
191 -	119 -	107 -	180 -	200
192 -	119 -	120 -	200 -	300
193 -	119 -	121 -	90 -	0
194 -	120 -	109 -	450 -	300
195 -	120 -	135 -	90 -	0
196 -	121 -	119 -	90 -	100
197 -	121 -	122 -	80 -	100
198 -	122 -	118 -	104 -	50
199 -	122 -	125 -	108 -	250
200 -	123 -	106 -	300 -	300
201 -	123 -	117 -	80 -	50
202 -	124 -	143 -	100 -	100
203 -	125 -	136 -	70 -	100
204 -	126 -	123 -	184 -	150
205 -	127 -	128 -	120 -	50
206 -	127 -	130 -	160 -	100
207 -	128 -	115 -	204 -	100
208 -	128 -	127 -	120 -	50
209 -	129 -	124 -	152 -	200

MATRIZ DE DADOS DA REDE DE COLETA APRESENTADA
 NO ANEXO 02

anexo 01

NUMERO DO ARCO	VERTICE INICIAL	VERTICE FINAL	COMPRIMENTO (metro)	MASSA (Kg)
210 -	129 -	126 -	82 -	200
211 -	130 -	129 -	102 -	50
212 -	131 -	132 -	144 -	50
213 -	131 -	133 -	204 -	100
214 -	132 -	128 -	166 -	0
215 -	132 -	130 -	166 -	100
216 -	132 -	145 -	50 -	0
217 -	133 -	132 -	144 -	70
218 -	134 -	40 -	980 -	250
219 -	134 -	135 -	930 -	400
220 -	135 -	121 -	240 -	300
221 -	136 -	123 -	132 -	100
222 -	136 -	145 -	510 -	500
223 -	137 -	92 -	30 -	0
224 -	137 -	138 -	180 -	100
225 -	138 -	137 -	180 -	0
226 -	139 -	87 -	110 -	0
227 -	139 -	140 -	160 -	100
228 -	140 -	139 -	160 -	0
229 -	141 -	96 -	270 -	200
230 -	142 -	107 -	90 -	30
231 -	143 -	113 -	44 -	50
232 -	143 -	144 -	80 -	50
233 -	144 -	143 -	80 -	0
234 -	145 -	132 -	50 -	0
235 -	145 -	133 -	240 -	80
236 -	146 -	134 -	174 -	100
237 -	146 -	147 -	90 -	0
238 -	147 -	146 -	90 -	100
TOTAL -----			35883	30290



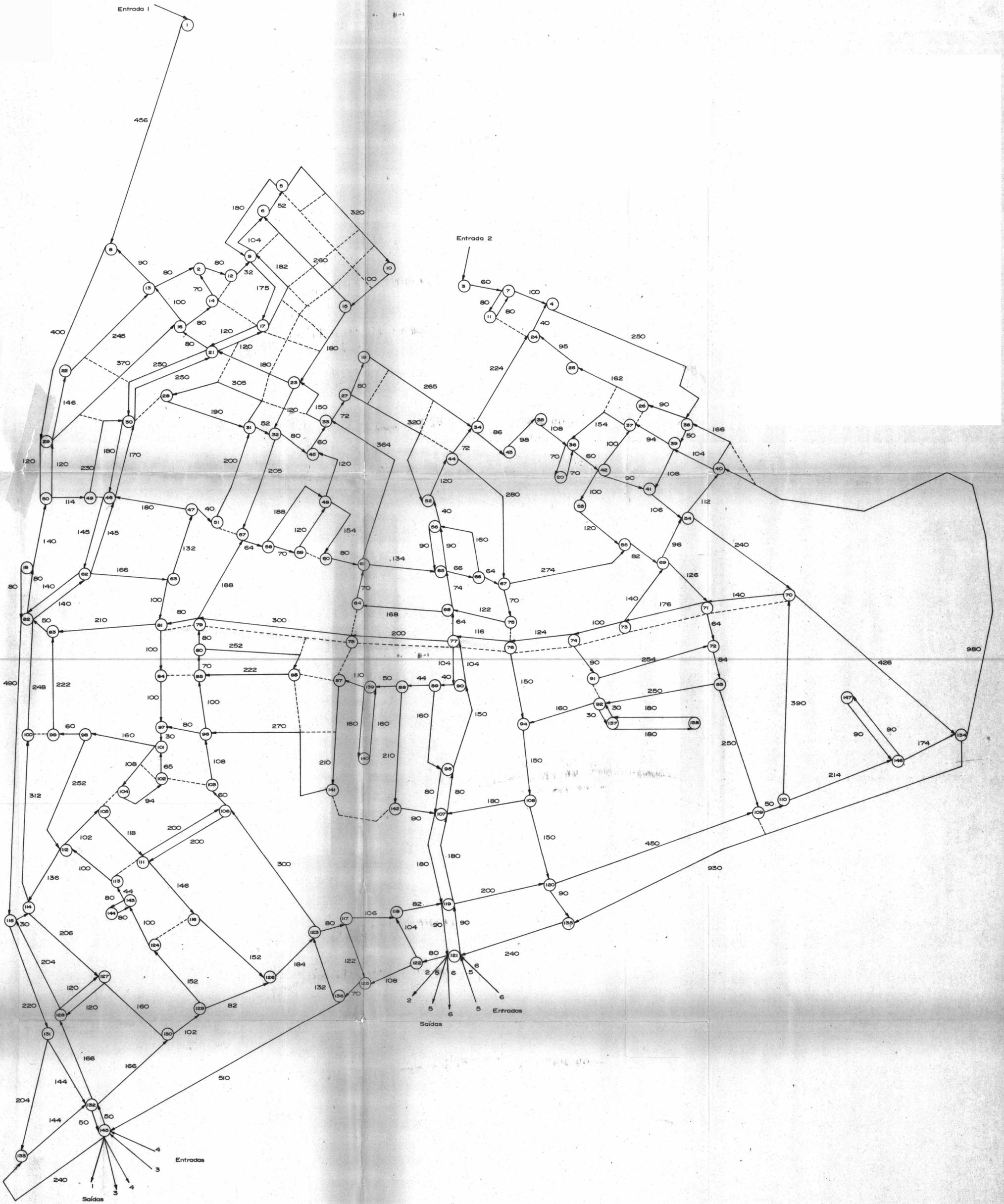
LEGENDA:

⊙ - VÉRTICES.

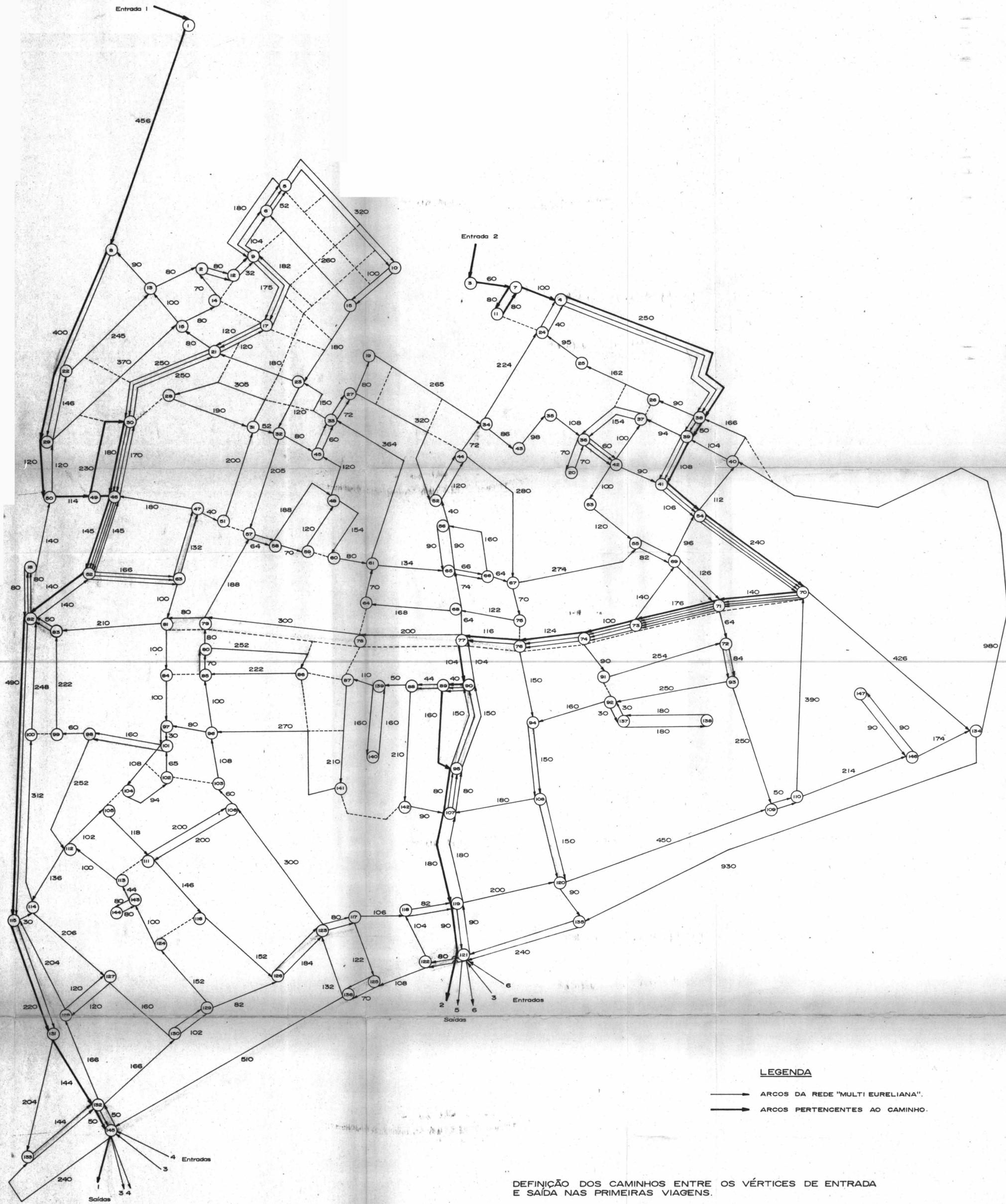
— XX — TRECHOS DE RUAS A SEREM COLETADAS.

- - - - - TRECHOS DE RUAS ONDE O VEÍCULO COLETOR NÃO VAI PASSAR.

REDE DE COLETA



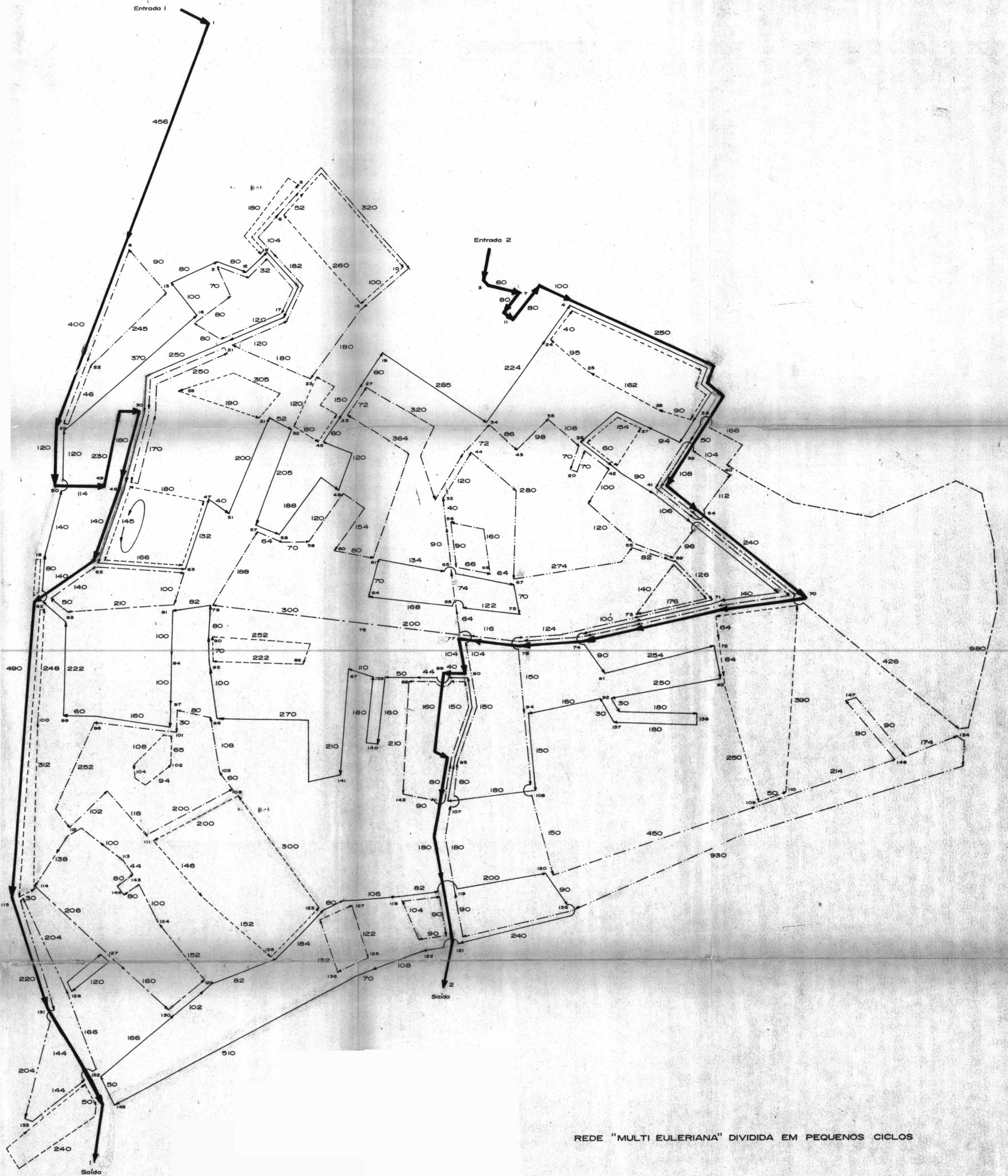
REDE DE COLETA, APÓS A DEFINIÇÃO DOS LOCAIS DE ENTRADA E SAÍDA.



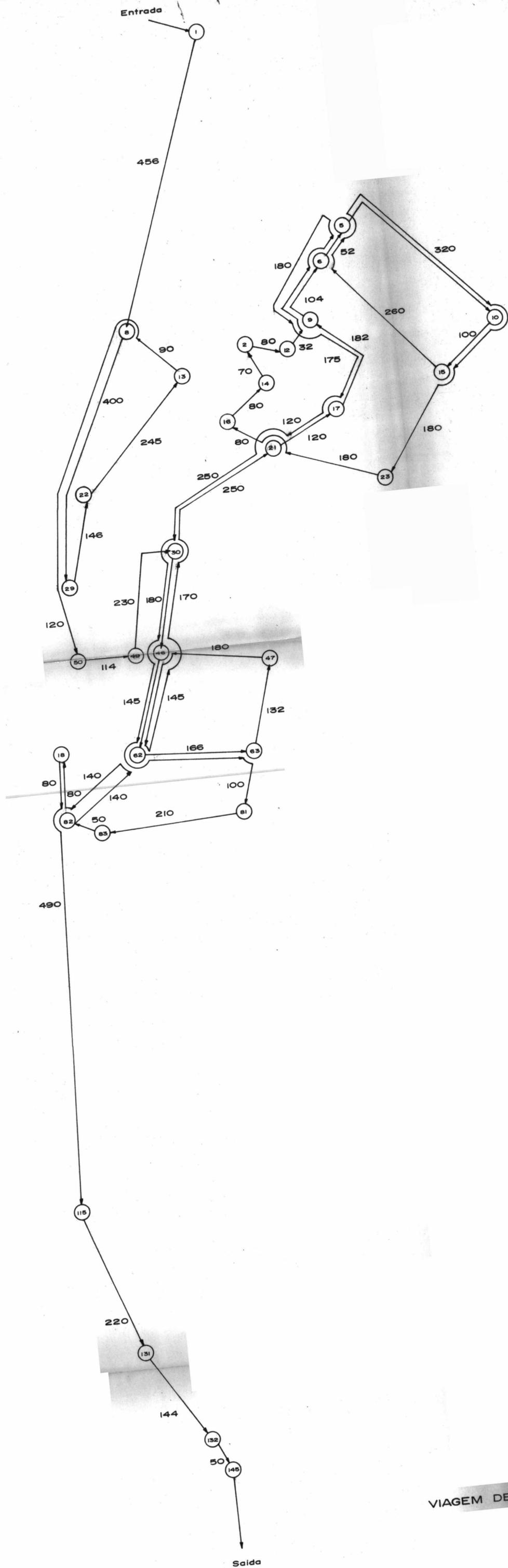
LEGENDA

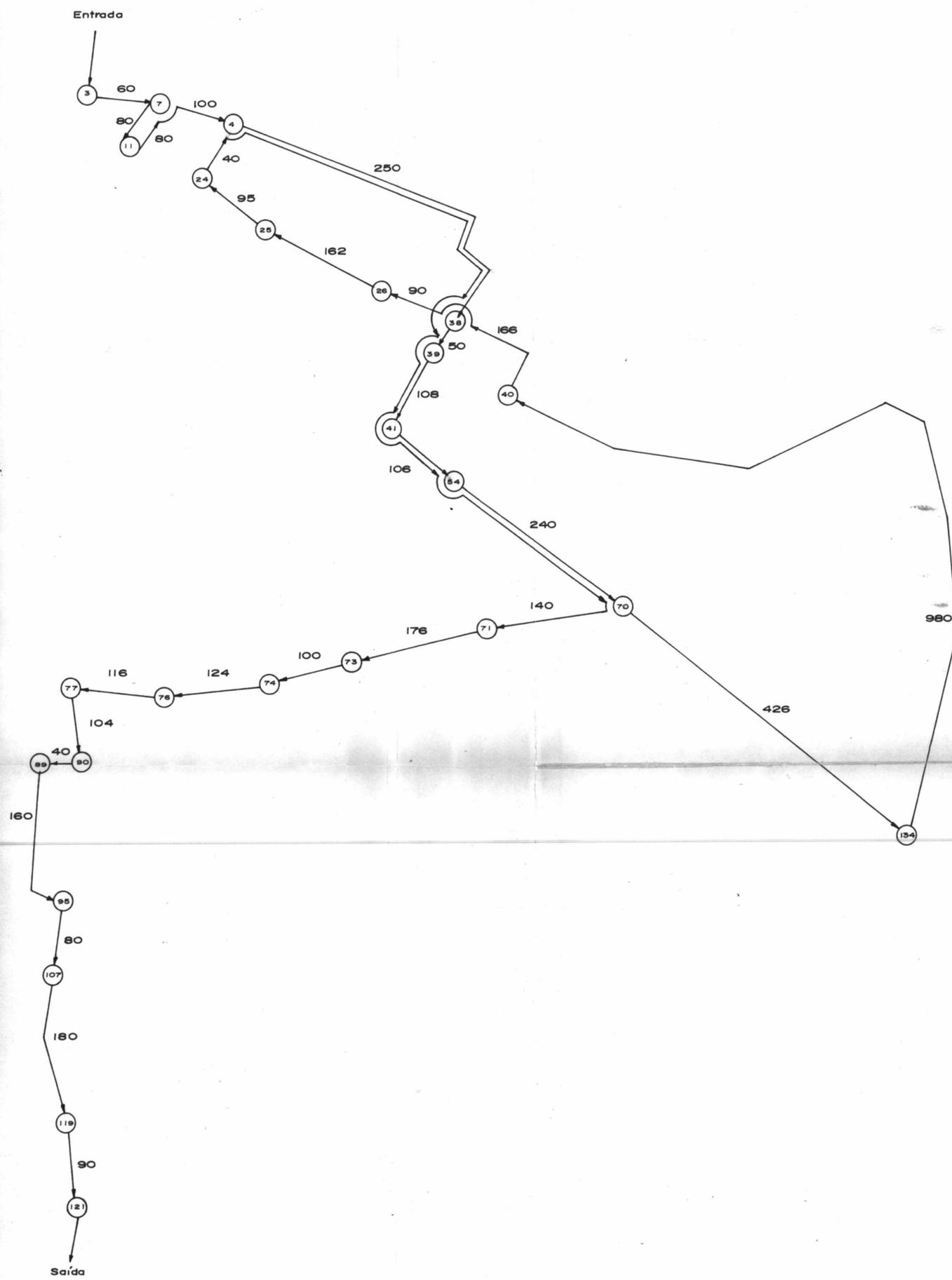
- ARCOS DA REDE "MULTI EURELIANA".
- ARCOS PERTENCENTES AO CAMINHO.

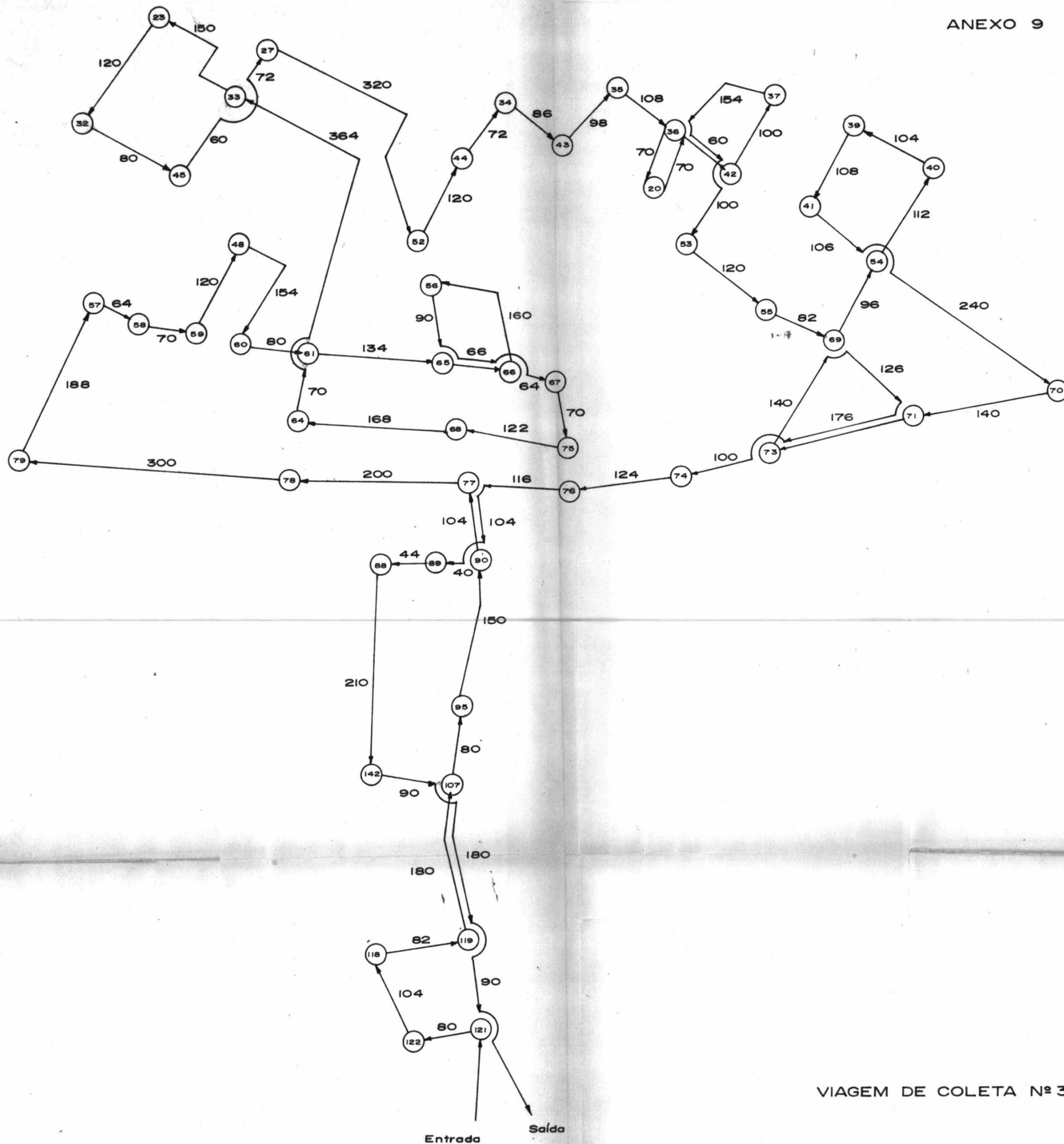
DEFINIÇÃO DOS CAMINHOS ENTRE OS VÉRTICES DE ENTRADA E SAÍDA NAS PRIMEIRAS VIAGENS.



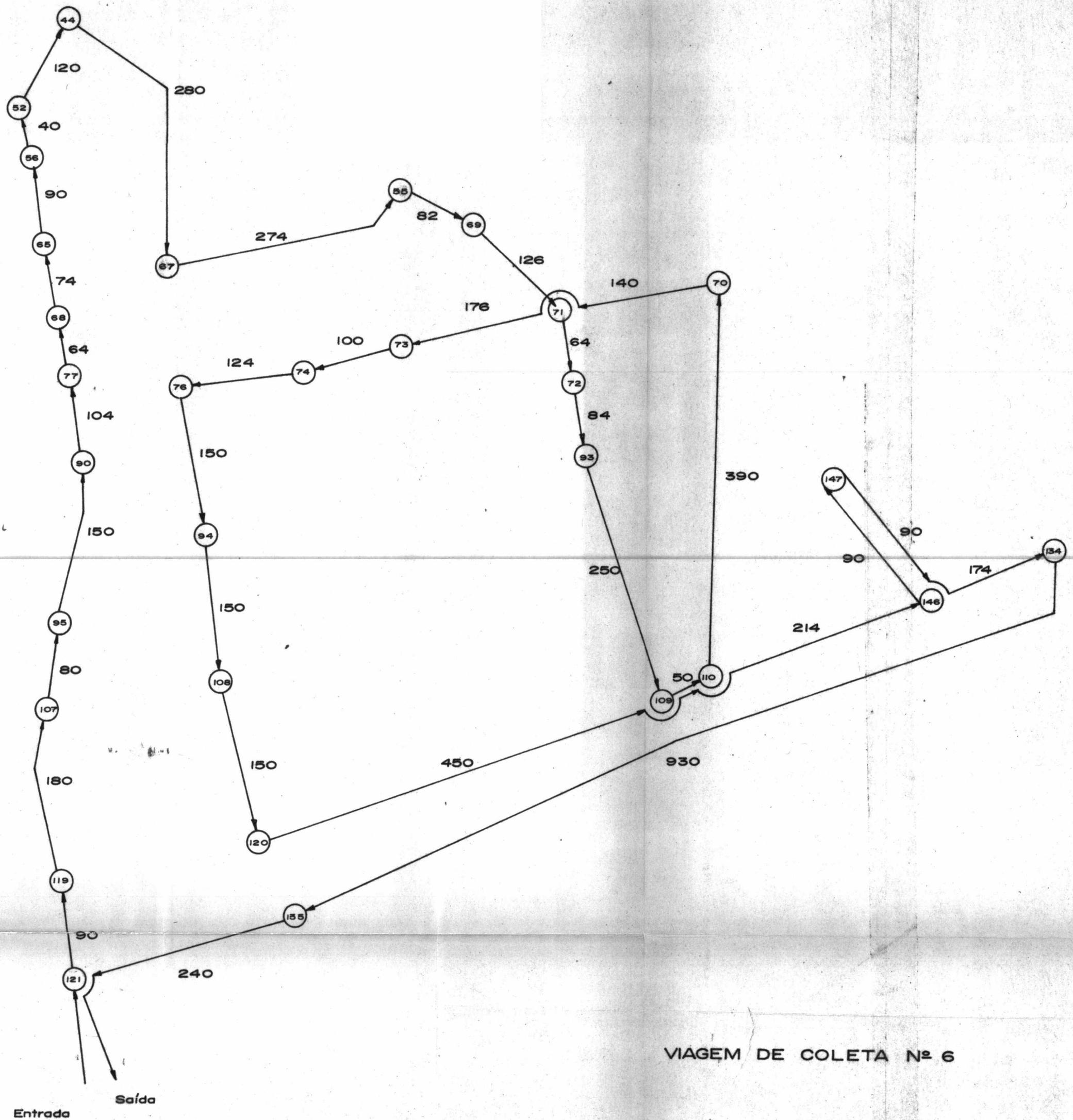
REDE "MULTI EULERIANA" DIVIDIDA EM PEQUENOS CICLOS







VIAGEM DE COLETA Nº 3



VIAGEM DE COLETA Nº 6