



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

**Técnicas de Otimização e Análise Multicritério na Logística
de Operação de uma Empresa de Coleta e Destinação de
Resíduos**

LARISSA VICTORIA DOS SANTOS VELOSO
ORIENTADOR: PROF. NÉSTOR ALDO CAMPANA, D.Sc.

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM
ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF, 03 DE MAIO DE 2022.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA
LOGÍSTICA DE OPERAÇÃO DE UMA EMPRESA DE COLETA E
DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS**

LARISSA VICTORIA DOS SANTOS VELOSO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**NESTOR ALDO CAMPANA, D.Sc. (ENC/FT/UNB)
(ORIENTADOR)**

**DIRCEU SILVEIRA REIS JUNIOR, D.Sc. (ENC/FT/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ROSANA RODRIGUES NASCIMENTO, Esp. SHOPPING CENTER
MANAGEMENT PROGRAM –
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 03 DE MAIO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

VICTORIA DOS SANTOS VELOSO, LARISSA

Técnicas de Otimização e Análise Multicritério na Logística de Operação de uma Empresa de Coleta e Destinação de Resíduos

xii 63 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021).

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1. MODELAGEM MATEMÁTICA | 2. RESÍDUOS SÓLIDOS |
| 3. PESQUISA OPERACIONAL | 4. PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VELOSO, L.V.S. (2022). *TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA LOGÍSTICA DE OPERAÇÃO DE UMA EMPRESA DE COLETA E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 66p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: LARISSA VICTORIA DOS SANTOS VELOSO

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA LOGÍSTICA DE OPERAÇÃO DE UMA EMPRESA DE COLHEITA E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Larissa Victoria dos Santos Veloso
larissa.victoria.s.veloso@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus por ter me dado forças para enfrentar todas as dificuldades e conseguir chegar até aqui. Não foi uma jornada fácil, mas fico feliz por não ter desistido.

Também quero agradecer aos meus pais Jaqueline e Emídio por todo o apoio que eles me deram durante todos esses anos, obrigada por sempre me motivarem e não me deixarem desistir, não teria conseguido sem vocês. Quero agradecer também aos meus irmãos (Pedro Henrique, Maria Eduarda, Joaquim Felipe e Miguel Luís) por todo incentivo que me deram durante todos esses anos, sou muito grata por ter vocês na minha vida.

Quero agradecer também a todos os meus colegas de graduação que em algum momento contribuíram para minha formação. Em especial a minha amiga Nayana que sempre esteve comigo nos momentos bons e também nos momentos difíceis. As minhas amigas Myllena, Bárbara, Amanda, Bruna e Natália por me darem todo suporte nas matérias. Não teria conseguido sem a ajuda de vocês.

Além disso, eu gostaria de agradecer a empresa LUX TREE por ter me dado a oportunidade de aprender sobre o funcionamento de uma empresa de gestão de resíduos. Por fim, quero agradecer em especial o meu orientador Nestor Aldo Campana, por toda paciência, dedicação, disponibilidade e compreensão. Obrigada por ter sido o melhor orientador do mundo e por ter me dado todo o suporte necessário para conseguir chegar até aqui

TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE MULTICRITÉRIO NA LOGÍSTICA DE OPERAÇÃO DE UMA EMPRESA DE COLHEITA E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS

RESUMO

Com a finalidade de demonstrar a estrutura da logística de operação de uma empresa de colheita e destinação de resíduos, analisando e identificando os principais elementos da coleta de rejeitos, esse estudo recaiu sobre o emprego de conceitos da técnica de Análise de Prioridades Hierárquica (AHP) e programação linear inteira (PLI), mais propriamente aplicado ao módulo de rota. O modelo atual para determinar as rotas que serão feitas pelos caminhões em uma empresa de gestão de resíduos é carente de uma estrutura que leve em conta o planejamento necessário para conseguir atender todos os clientes mesmo quando um caminhão se encontra na manutenção. Por esse motivo apesar o modelo desenvolvido poder ser aplicado a outros módulos que também influenciam na operação de uma empresa de gestão de resíduos, foi dado um foco maior ao módulo rota. De início, esse estudo almejou fazer um modelo genérico levando em consideração 3 clientes, a sede da empresa e o aterro sanitário para a construção do modelo. Por não ter informações precisas sobre valores monetários que cada variável influencia na operação da empresa foram utilizados critérios que apesar de não serem quantificados possuem influência direta no custo. Contudo, por conta das características da complexidade desses modelos, o pacote computacional utilizado, o Excel 2016, não possibilitou aumentar o número de fatores em análise, devido a quantidade de restrições envolvidas. Por fim, os resultados encontrados mostraram que o modelo funcionou bem para as simulações feitas, mas que poderiam ser adicionadas mais restrições para ficar ainda mais próximo da realidade.

Palavras-chave

Modelagem matemática – Resíduos sólidos – Pesquisa operacional- Processo de Análise Hierárquica- Programação Linear Inteira

TECHNIQUES OF OPTIMIZATION AND MULTI-CRITERIA ANALYSIS IN THE OPERATION LOGISTICS OF A WASTE HARVESTING AND DISPOSAL COMPANY

ABSTRACT

In order to demonstrate the operational logistics structure of a waste collection and destination company, analyzing and identifying the main elements of undifferentiated waste collection, this fell on the use of concepts of the technique of Analysis of Hierarchical Priorities (AHP) and integer linear programming (PLI), more specifically applied to the rotation module. The current model to determine the routes that will be taken by trucks in waste management is careful with a structure that takes into account the same planning necessary to serve all customers when a truck is serviced. For this reason, although the model developed is applied to a company with other modules that can also work in the operation of a management module. At first, this study must be done in a generic model, taking into account 3 clients, the company's headquarters and the toilet for the construction of the model. As they influence the values used in the operation, they did not influence each company variable, although they have no influence on the values used by the company, they have not been quantified. However, due to the characteristics of the complexity of these models, the computational package used Excel 2016, it is not possible to increase the factors under analysis, due to the amount of involvement of the analyses. The results found finally, the results found by the model made, but it worked well for simulations that possibly will be added more elaborate to get even closer to reality.

KEYWORDS

Mathematical modeling – Solid waste – Operational research- Hierarchical Analysis Process – Integer Linear Programming.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS DA PESQUISA.....	3
2.1. Objetivo Geral.....	3
2.2. Objetivo Específico	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4. METODOLOGIA	9
4.1. Modelo de Identificação de Rota	9
4.1.1. Etapa 1: Rota mais indicada por pares	10
4.1.2. Etapa 2: Identificação de rota ideal	12
4.2. Modelo da Análise Multicritério da Etapa 1:	13
4.2.1. Passo 1 – Estabelecimento de hierarquias	13
4.2.2. Passo 2 – Definição de Prioridades e Julgamentos	14
4.2.3. Passo 3 – Consistência do modelo	18
4.3. Modelo da Programação Linear Inteira da Etapa 2.....	19
4.3.1. Formulação para resíduo rejeitos:	19
4.3.1.1. Variáveis de decisão:.....	19
4.3.1.2. Função objetivo:.....	19
4.3.1.3. Restrições:	20
4.3.2. Formulação para resíduo reciclável:.....	22
5. CASO DE ESTUDO	24
5.1. Considerações Gerais	24
5.2. Etapa 1:.....	25
5.3. Etapa II.....	41
5.3.1. Variáveis de decisão:.....	42
5.3.2. Função objetivo:.....	42
5.3.3. Restrições	43
5.3.4. Resultados	46
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	48
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4. 1. Representação esquemática da estrutura modelo de logística de operação. . 9	9
Figura 4. 2. Alvos a serem considerados na definição das rotas. 10	10
Figura 4. 3. Alternativas de percurso entre a sede da empresa e o cliente 1. 10	10
Figura 4. 4. Rotas diferentes entre alvos conforme sentido de circulação. 11	11
Figura 4. 5. Rotas preferenciais saindo da sede com destino aos diversos clientes. 12	12
Figura 4. 6. Rotas preferenciais saindo do cliente 1 com destino aos demais alvos (clientes e/ou aterro). 12	12
Figura 4. 7. Estrutura hierárquica proposta para determinar o melhor percurso entre dois alvos. 13	13
Figura 4. 8. Alvos considerados na definição das rotas de colheita de material reciclável. 23	23
Figura 5. 1. Localização relativa dos alvos considerados na definição das rotas. <i>Fonte:</i> <i>Imagem base obtida do Google Maps.</i> 25	25
Figura 5. 2. Alternativas de percurso entre a Sede da empresa e o Cliente 1. <i>Fonte:</i> <i>imagem base obtida do Google Map.</i> 26	26
Figura 5. 3. Alternativas de percurso entre a Sede da empresa e o Cliente 2. <i>Fonte:</i> <i>imagem base obtida do Google Map.</i> 26	26
Figura 5. 4. Alternativas de percurso entre a Sede da empresa e o Cliente 3. <i>Fonte:</i> <i>imagem base obtida do Google Map.</i> 27	27
Figura 5. 5. Alternativas de percurso entre o Cliente 1 e o Cliente 2. <i>Fonte: imagem</i> <i>base obtida do Google Map.</i> 27	27
Figura 5. 6. Alternativas de percurso entre o Cliente 1 e o Cliente 3. <i>Fonte: imagem</i> <i>base obtida do Google Map.</i> 28	28
Figura 5. 7. Alternativas de percurso entre o Cliente 1 e o Aterro Sanitário. <i>Fonte:</i> <i>imagem base obtida do Google Map.</i> 28	28
Figura 5. 8. Alternativas de percurso entre o Cliente 2 e o Cliente 3. <i>Fonte: imagem</i> <i>base obtida do Google Map.</i> 29	29
Figura 5. 9. Alternativas de percurso entre o Cliente 2 e o Aterro Sanitário. <i>Fonte:</i> <i>imagem base obtida do Google Map.</i> 29	29
Figura 5. 10. Alternativas de percurso entre o Cliente 3 e o Aterro Sanitário. <i>Fonte:</i> <i>imagem base obtida do Google Map.</i> 30	30
Figura 5. 11. Comparação Binária dos Critérios. 31	31

Figura 5. 12. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Sede e Cliente 1.	32
Figura 5. 13. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre a Sede e o Cliente 2.. ..	
.. Figura 5. 14. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Sede e Cliente 3.	33
Figura 5. 15. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Clientes 1 e 2. ...	35
Figura 5. 16. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Clientes 1 e 3. ...	36
Figura 5. 17. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Cliente 1 e Aterro.	37
Figura 5. 18. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Clientes 2 e 3. ...	38
Figura 5. 19. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Cliente 2 e Aterro.	39
Figura 5. 20. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Cliente 3 e Aterro.	40
Figura 5. 21. Rotas otimizadas para a frota de recolhimento de resíduos sólidos.....	47

ÍNDICE DE TABELAS.

Tabela 4. 1. Estimativa de preferências via AHP para o par Sede-Cliente 1	11
Tabela 4. 2. Prioridades (preferencias) entre os alvos.....	11
Tabela 4. 3. Escala Fundamental de Saaty. Fonte: Saady (1991).....	14
Tabela 5. 1. Preferências Globais das Diversas Alternativas de Deslocamento.....	41
Tabela 5. 2. Quantidades de resíduo produzida e capacidade de transporte dos veículos.	41
Tabela 5. 3. Rotas otimizadas para a frota de recolhimento de resíduos sólidos	46
Tabela 5. 4. Quantidade de resíduos produzida e capacidade de transporte dos veículos	47

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

AHP	- Analytic Hierarchy Process
MCARP- LML	- Mixed Capacitated Arc Routing Problem With Limited Multi-Landfills
PG	- Cálculo Da Prioridade Ponderada Global
PLI	- Programação Linear Inteira
PML	- Prioridade Média Local PML
PRVC	- Problema De Roteamento De Veículos Capacitados

1. INTRODUÇÃO

É sabido que qualquer empresa com fins lucrativos procura organizar suas atividades de modo a assegurar sua sobrevivência no mercado e, naturalmente, obter o maior retorno financeiro sobre o investimento realizado. Sob esta perspectiva, o propósito fundamental é racionalizar.

Em outras palavras, a missão de racionalizar implica que as empresas precisam identificar qual o melhor conjunto de atividades a serem realizadas, assim como o modo mais eficiente de executá-las; criando deste modo a oportunidade de prestarem serviços de qualidade a seus clientes e, simultaneamente, promover a redução de custos, tempos de operação, mão de obra contratada, etc. Esta forma de operação certamente gera valores, não apenas financeiros, que garantirão o retorno esperado para todas as partes interessadas (proprietários, funcionários, clientes, fornecedores, etc.).

No caso específico das empresas de gestão de resíduos, elas são responsáveis por dar a destinação correta dos materiais produzidos por grandes geradores de resíduos sólidos. Cada tipo de resíduo sólido possui uma destinação correta diferente: os resíduos recicláveis devem retornar para indústria para serem reaproveitados, os resíduos orgânicos possuem como melhor destinação os pátios de compostagem e os rejeitos podem ser utilizados como fonte de energia térmica ou em último caso possuem como destinação os aterros sanitários.

Para essas empresas é importante que a menor quantidade de material seja levada para os aterros sanitários, pois o recebimento dos resíduos está sujeito à cobrança de uma taxa, de valor maior se comparada aos pátios de compostagem. Além disso, os materiais recicláveis possuem valor de venda. Desta maneira, as empresas de gestão de resíduos costumam operar galpões onde colaboradores são responsáveis por fazer a segregação do material e separar nas três frações de resíduos: recicláveis, orgânicos e rejeitos.

Além de funcionários para fazer a segregação são necessários colaboradores para: dirigir os caminhões, ajudantes do caminhão (responsáveis por fazer a coleta), operadores de prensa (responsáveis por transformar o material reciclável em fardos, pois assim há o aumento do seu valor de venda) e empilhadores (pessoas que organizam os fardos e os colocam ordenadamente em caçambas de caminhões para serem vendidos para indústria).

Porém, como as demandas de pessoal para essas funções nem sempre ocorrem de maneira simultânea, um mesmo funcionário pode exercer mais de uma função, conforme sua capacitação. Também, há a possibilidade da demanda apresentar efeito sazonal, isto é, ser variável ao longo do tempo. Assim, fica nítida a importância da empresa dispor de um modelo de otimização para a gestão do pessoal, de modo a operar com um número ideal de funcionários, para que não haja nem colaboradores a mais e nem a menos.

Além do modelo de gestão de funcionários, também existe a necessidade de um modelo de gestão de veículos, visando definir a roteirização dos caminhões de coleta de resíduos, ou seja, otimizar os percursos feitos pelos caminhões para que os gastos e tempos envolvidos sejam minimizados, respeitando determinadas restrições tais como: o tipo de coleta que irá ser realizado (orgânico reciclável ou rejeito); a distância entre os clientes; a quantidade de material coletado; a frequência das coletas contratadas por cada cliente; prioridades de atendimento; o tipo de via onde os veículos circularão, entre outros.

Destaca-se que a gestão de uma frota não se limita apenas à definição de rotas, mas também a estabelecer uma estratégia em termos de manutenção e/ou troca dos veículos.

No contexto apresentado as técnicas de otimização e/ou análise de decisão tais como programação dinâmica, programação linear, análise hierárquica, entre outras, se apresentam com elevadas capacidades para a organização das diversas atividades de uma empresa. Assim, este trabalho visa explorar o potencial dessas técnicas na construção de um modelo de logística de operação de uma empresa de gestão de resíduos sólidos.

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1. Objetivo Geral

A premissa fundamental deste trabalho é propor uma estrutura básica para a logística de operação de uma empresa dedicada à gestão de resíduos sólidos, sejam eles recicláveis ou não. Visando a facilidade de desenvolvimento e implantação, assim como eventual expansão no futuro, optou-se por um sistema modular.

Com base na experiência reunida foi definido a priori que essa estrutura básica devia contar com pelo menos três módulos: a) Econômico/Financeiro; b) Gestão de pessoal; e c) Identificação de rotas.

Módulo Econômico/Financeiro: a partir de uma análise de custos e benefícios combinada com técnicas de pesquisa operacional seria possível otimizar o manejo da frota, isto é, decidir ao longo do tempo sobre a conveniência de trocar um determinado veículo, ou continuar com seu uso fazendo as manutenções necessárias. Obviamente este módulo não restringe sua aplicação à frota e veículos de colheita de resíduos, mas também, pode ser estendido a outros maquinários e equipamentos da empresa de gestão de resíduos.

Módulo Gestão de Pessoal: este módulo, como os demais, será baseado no uso de métodos de otimização e/ou análise multicritério com a finalidade específica de identificar a equipe mínima de empregado para o funcionamento da empresa.

Módulo Identificação de Rota: a finalidade deste módulo é determinar a rota ideal dos caminhões para a fazer a coleta dos resíduos sólidos (orgânicos, recicláveis e rejeitos) e sua disposição final, da forma mais eficiente possível. Diante dos custos envolvidos nesta atividade, considera-se como o módulo de maior relevância.

2.2. Objetivo Específico

Apesar do modelo de logística de operação estar composto de diversos módulos, em função da importância relativa e do tempo disponível para a elaboração desta pesquisa, o trabalho se concentrou especificamente no desenvolvimento, formulação e teste do *Módulo Identificação de Rota*.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em uma empresa de gestão de resíduos existem três principais categorias que precisam ser otimizadas sendo elas: econômica, pessoal e rota. A parte econômica é importante ser otimizada, pois sabendo o momento ideal de trocar os veículos e fazer a manutenção preventiva há uma economia financeira, além de evitar transtornos causados por não poder utilizar os veículos, gerando assim atrasos nas coletas e aumento no consumo de combustível.

Já a parte pessoal é importante para que se saiba a quantidade mínima de funcionários para fazer com que o galpão funcione, pois desta maneira sempre terão funcionários disponíveis para ajudar em coletas extras, além de manter a organização e produção necessária para fazer a empresa funcionar.

Enquanto que o módulo rota possui uma importância ainda maior, pois os outros módulos dependem deste porque sabendo a rota que a empresa precisa fazer consegue-se determinar a quantidade de caminhões necessários, os dias ideais para agendar as manutenções, a quantidade de funcionários para acompanhar a coleta dos resíduos. Por essa razão, o presente trabalho fez a otimização da rota de veículos de uma empresa de gestão de resíduos.

Souza e Guardia (2007) utilizaram o modelo de roteamento e programação de veículos para determinar a melhor maneira de fazer a entrega de fardas aos postos de venda e encomendas na Marinha do Brasil. Foi utilizado o Software LINDO 6.1 para fazer as análises. Os autores perceberam uma limitação no pacote computacional utilizado, pois este leva bastante tempo para fazer a simulação quanto de se tem muitas variáveis, porém apesar disso a modelagem mostrou ser possível melhorar o modelo já existente de distribuição de uniformes. Vale ressaltar que talvez a demora para fazer a modelagem pode ter ocorrido por conta da época que o estudo foi feito.

Barão, et al. (2008) estudaram o melhor local para colocar postos de entrega de material voluntário de materiais recicláveis em Passo Fundo, levando em conta que os usuários devem percorrer a menor distância entre o sistema de posto mais perto. Para encontrar a melhor rota, o método adotado pelos autores foi a aplicação do problema do caixeiro viajante. Os autores utilizaram o aplicativo Lingo para determinar a sequência em que os pontos deveriam ser cumpridos e a matriz de precedentes para identificar de maneira mais precisa as vias que os veículos deveriam percorrer para atingir o ponto próximo de coleta.

Oliveira, et al. (2005) utilizaram o sistema de informações geográficas Spring 4.0 para criar a rota com a menor distância para o transporte florestal rodoviário. O Spring foi utilizado pelos autores para simular 8 rotas de transporte, considerando diferentes pontos de partidas, mas partindo para um mesmo destino. Os autores concluíram que a rota com a menor distância não foi a rota mais econômica e que o desempenho operacional foi o melhor critério para escolher a rota. Uma vantagem da utilização do Spring é porque ele é disponibilizado de maneira gratuita.

Silva, et al. (2019) aplicou o método de *Simulated Annealing* para estabelecer as rotas de uma empresa que faz a distribuição de bebidas. O método foi baseado na linguagem C de programação com o objetivo de encontrar rotas com menores distâncias percorridas por veículos, levando em conta as janelas de atendimento dos clientes e o potencial máximo dos veículos. Os autores consideraram dados de um dia de trabalho em três cidades de Minas Gerais. Anteriormente o PathFind era utilizado, porém os resultados encontrados demonstraram que o método proposto pelos autores teve uma redução de 38,8% na distância percorrida, resultando em uma diminuição nos custos.

Bilber (2012) estudou as rotas para o recolhimento de resíduos modelando o problema como MCARP- LML, (Mixed Capacitated Arc Routing Problem With Limited Multi-Landfills), que seria o problema de roteamento considerando vários aterros com limitação de descargas. O autor utilizou um método aproximado para a solução do problema apresentado, o método apresentado é considerado meta-heurística. Apesar de ser um método aproximado apresentou um resultado 3% superior aos da solução encontrada pelo software CPLEX, utilizado para encontrar soluções exatas.

Sosa et al. (2007) utilizou a meta-heurística para desenvolver soluções do problema de rotas de veículos por meio da busca dispersa. Os resultados obtidos mostraram que o método de busca dispersa é eficaz, mas poderia ser ainda melhor se fosse utilizado combinado com outras metas-heurísticas, como por exemplo a Busca Tabu.

Da Conceição (2018) utilizou o método AHP (Analytic Hierarchy Process) para escolher a alternativa mais adequada para o manejo de resíduos sólidos de maneira mais sustentável. A autora criou quatro alternativas de rotas tecnológicas para serem comparadas de acordo com os critérios sociais, econômicos e ambientais e também à subcritérios relacionados. A melhor solução encontrada pela autora foi preferível levando em conta apenas os critérios sociais e ambientais, pois em relação ao critério econômico ocupou o terceiro lugar nas preferências. Essa metodologia se mostrou eficiente para

tomada de decisão, pois permitiu levar em conta diversos fatores de acordo com as preferências pessoais.

Colvero (2014) analisou os aspectos socioambientais e técnico econômicos de duas possíveis rotas para gestão de resíduos sólidos urbanos na cidade Ocidental. A primeira rota é levando em conta a coleta seletiva onde parte dos resíduos coletados passam por uma central de triagem, enquanto que a segunda rota os resíduos restantes são levados para o aterro sanitário. O autor fez uma análise documental levantando dados de coletas e de rotas tecnológicas dos resíduos sólidos urbanos da cidade ocidental, apesar da alternativa de coleta seletiva ser melhor para o meio ambiente esta se mostrou ser uma alternativa mais de duas vezes mais cara do que a alternativa do aterro sanitário.

Silva (2014) estudou a melhor rota de bicicleta integrada com o transporte público levando em conta as escolhas de cada um dos ciclistas, para isso foi feita uma combinação de diversas técnicas sendo elas: análise de conteúdo, simulação por vídeo, avaliação multicritério e técnica de grupo focal. O método de avaliação multicritério foi utilizado para avaliar as rotas. O trabalho concluiu que a infraestrutura e segurança pública são os principais critérios escolhidos pelos ciclistas.

Guimarães (2012) analisou uma resolução do 3L-CVRP, utilizando o método heurístico para resolução do problema do roteamento em dois estágios. O primeiro estágio junta os clientes que possuem o mesmo volume de demanda, enquanto que o segundo estágio faz um refinamento da rota inicial. O autor combinou o problema de limite de ocupação com a volumétrica do veículo e utilizou o software comercial para a resolução. Para a obtenção de resultados o autor fez três testes sendo eles: considerando o método exato e heurístico para fazer comparação entre os resultados e percebeu que os resultados foram tão eficazes quanto eficientes. No segundo teste o autor utilizou o software para o problema dos carregamentos de containers e do Bin Packing tridimensional, mostrando novamente a eficiência do software. O último estágio comparou o 3L-CVRP com outros trabalhos e concluiu que os resultados produzidos foram superiores em relação a eficácia levando em conta algumas instâncias.

De Bittencourt et al. (2013) utilizaram um sistema computacional para resolver o problema de roteamento de veículos capacitados (PRVC) levando em conta a meta-heurística Busca Dispersa, após isso os autores compararam a solução obtida pelo sistema com a solução manual para a rota de uma entrega de um frigorífico em Juiz de Fora - MG.

O método manual foi feito com o auxílio do Google Maps, o sistema computacional mostrou uma economia de 8% com relação a solução manual.

Martins et al. (2014) utilizaram técnicas de programação matemáticas e a ferramenta Solver do Excel para escolher a melhor rota para a coleta seletiva de resíduos sólidos na cidade de Sousa no sertão da Paraíba, a ferramenta do Google Earth para determinar a distância e posicionamento das ruas para indicar os pontos de coleta. Os resultados mostraram uma diminuição nos custos.

Da Silva et al. (2020) aplicaram o problema do carteiro chinês na coleta de resíduos urbanos na cidade de Recife PE. O programa foi utilizado para determinar a rota ótima em um grafo Euleriano. Após o desenvolvimento foi feita a comparação da rota atual com a rota encontrada e chegou-se a conclusão que a rota nova possui um distância de 12,7% a menos do Engenho do Meio e 8,86% do Cordeiro (Bairros escolhidos para testar a aplicação do programa).

Fortunato (2013) analisou a escolha de rotas para o recolhimento de resíduos sólidos urbanos em Oeiras usando a abordagem do tipo “cluster-first, route-second” esse método resume-se em dividir o primeiro conselho em várias zonas equilibradas. Os resultados encontrados mostraram ser positivos, pois foi possível notar 10% de melhoria na distância total percorrida em uma semana e 13% analisando o tempo total.

Ozeki et al. (2000) estudaram a roteirização em uma indústria de leite utilizando um método com solução hierárquica aproximada. Os autores desenvolveram uma ferramenta para ajudar a tomar decisão da quantidade de vezes que cada um dos fornecedores deveria ser visitado, determinar a quantidade de visitas durante a semana e as rotas de cada dia da semana. Com a implementação do sistema a empresa irá diminuir R\$7.200,00 reais por mês.

Caccalano e da Cunha (2015) utilizaram um modelo heurístico baseado em métodos de inserção com aplicação no abastecimento de linhas de produção. A solução encontrada mostrou um resultado melhor do que a solução manual. Além disso, o tempo gasto para encontrar as soluções foi menor do que o tempo gasto na execução da solução manual. Outra vantagem da escolha desse método é ele estar disponível para excel e este é uma ferramenta disponível em diversos ambientes.

Baba et al. (2004) empregou a otimização da colônia de formigas no problema de programação e roteirização de veículos para o transporte de pessoas portadoras de

deficiência com o objetivo de aumentar o número de solicitações atendidas com o menor custo. Os resultados mostraram que a utilização da colônia de formigas é eficiente.

4. METODOLOGIA

Conforme já citado o objetivo geral desta pesquisa é propor uma estrutura básica para um modelo de logística operacional de uma empresa dedicada à gestão de resíduos sólidos. A figura 4.1 representa esquematicamente essa estrutura, onde se destacam os principais módulos, ou seja, *Identificação de Rotas*, *Econômico/Financeiro*, e *Gestão de Pessoal*.

Em atendimento ao objetivo específico, este capítulo destina-se a descrever como será o desenvolvimento e implantação do módulo “*Identificação de Rotas*”. Essencialmente consistirá de duas etapas, sendo que a primeira contempla a utilização de técnicas de análise hierárquica (AHP) com a finalidade de definir qual é o melhor percurso entre pares de alvos (sede da empresa de gestão de resíduos, clientes produtores de resíduos, aterro sanitário, etc). Posteriormente, numa segunda etapa foi desenvolvido um modelo de otimização visando identificar a rota total dos veículos que fazem a coleta dos resíduos, isto desde o ponto de partida até o destino final. Na realidade serão dois modelos, um para a coleta de resíduo reciclável e outro para o caso de resíduo não reciclável. Nesta segunda etapa será utilizada a técnica de programação linear inteira.

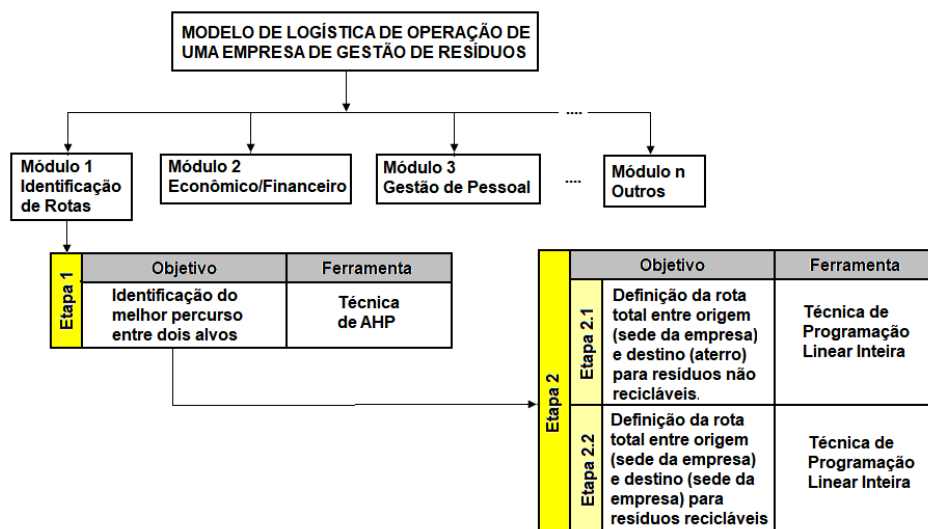


Figura 4. 1. Representação esquemática da estrutura modelo de logística de operação.

4.1. Modelo de Identificação de Rota

A figura 4.2 ilustra esquematicamente os alvos (ou entes) presentes na situação a tratar. Tem-se a sede da empresa que é o ponto de partida de todas as rotas, independentemente do tipo de veículo utilizado. No caso dos veículos que recolhem material reciclável, a sede da empresa será, também, o ponto final da rota. Além disso, estão os diversos

clientes, cujos resíduos devem ser coletados. Por último destaca-se o aterro sanitário, que será o ponto final das rotas dos veículos que recolhem material não reciclável.

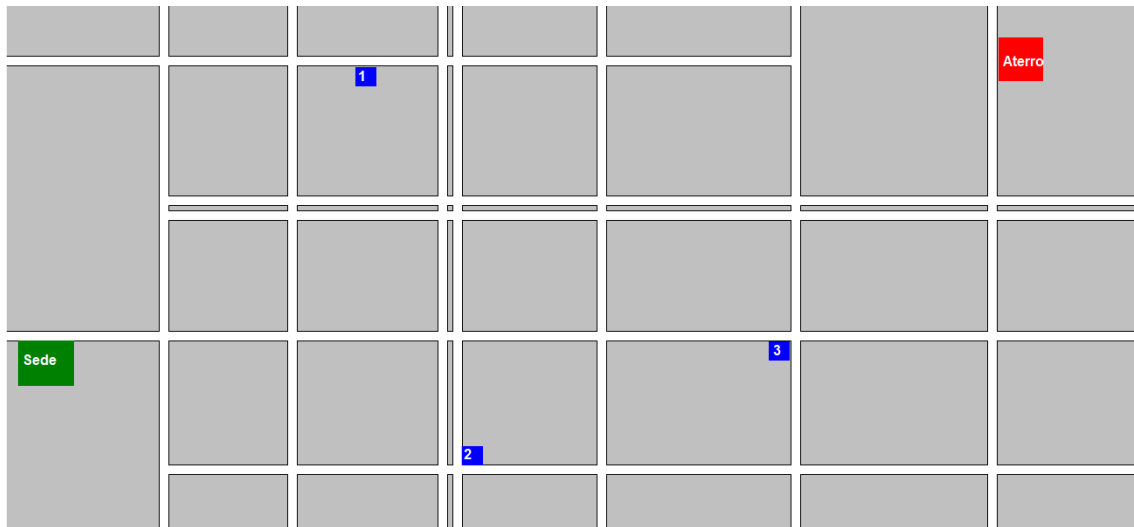


Figura 4. 2. Alvos a serem considerados na definição das rotas.

4.1.1. Etapa 1: Rota mais indicada por pares

Inicialmente deve-se determinar qual seria rota mais indicada considerando pares de alvos isoladamente. Por exemplo, o veículo que sai da sede da empresa com destino ao cliente nro.1 tem várias alternativas de percursos conforme mostra a figura 4.3. Conforme os diversos atributos dessas vias (distância, velocidade máxima de circulação, largura, declividade, estado do asfalto, frequência de congestionamento, presença de fiação aérea de baixa altura, altura dos viadutos, etc) pode-se aplicar a técnica AHP (Processo de análise hierárquica) para determinar a prioridade ou preferência das diversas alternativas.

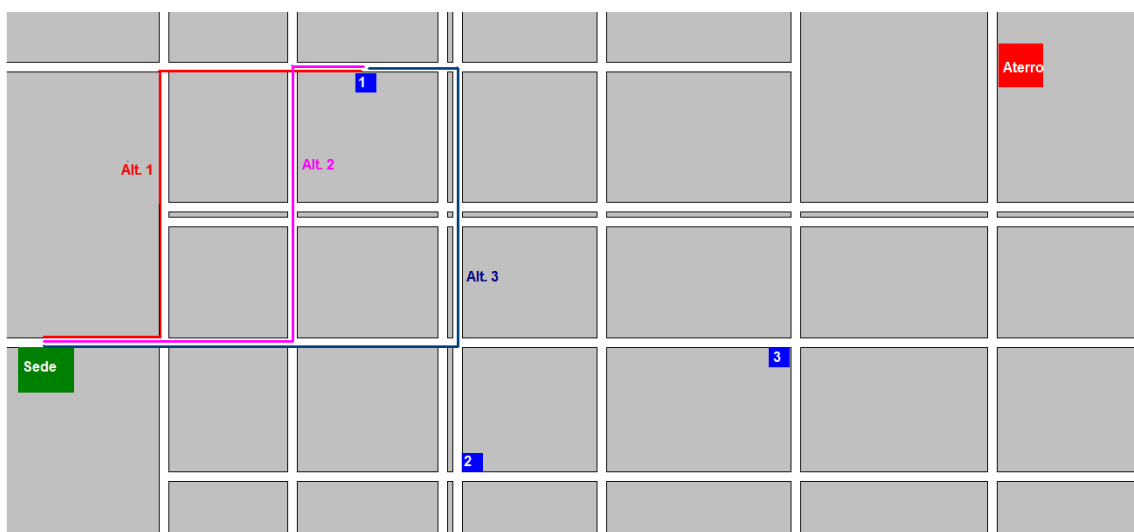


Figura 4. 3. Alternativas de percurso entre a sede da empresa e o cliente 1.

O resultado deste processo seria a escolha da rota de maior preferência entre esses dois alvos. Por exemplo, supondo o resultado fictício apresentado na tabela 4.1, a escolha seria a favor da alternativa 2.

Tabela 4. 1. Estimativa de preferências via AHP para o par Sede-Cliente 1

Trecho	Preferências das alternativas		
	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3
Sede - Cliente 1	0,20	0,67	0,13

Observação: é importante destacar que em função de diversos aspectos (sentido de circulação da via, horário, etc) a rota preferencial saindo da sede com destino ao cliente nro 1 não necessariamente é a mesma no sentido oposto. Um exemplo desta situação está destacado na cor vermelha na tabela 4.2; e representado graficamente na figura 4.4.

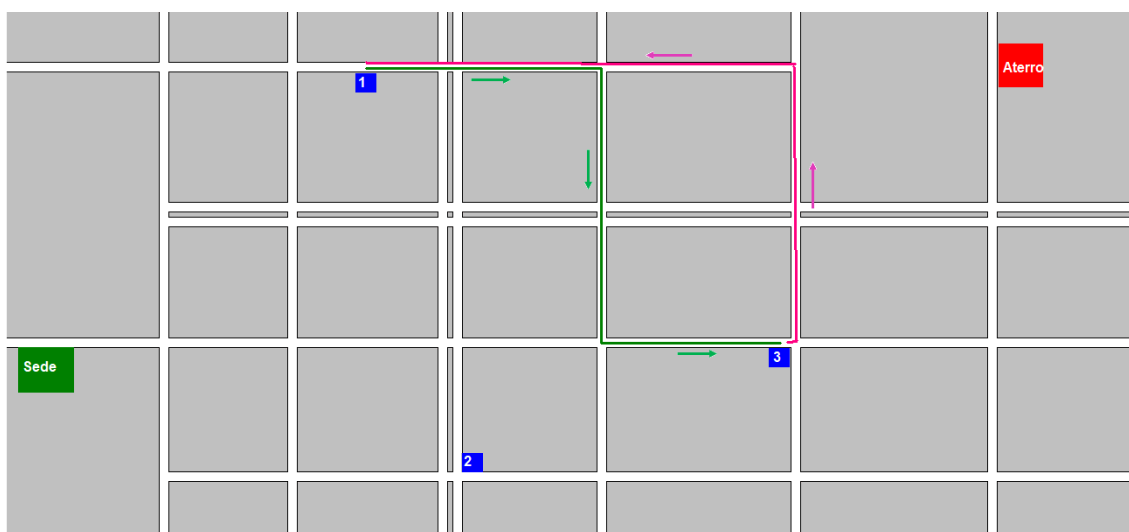


Figura 4. 4. Rotas diferentes entre alvos conforme sentido de circulação.

Se este procedimento a AHP for aplicado para todos os pares de alvos, a Informação obtida poderia ser resumida numa tabela como a seguinte.

Tabela 4. 2. Prioridades (preferencias) entre os alvos.

	Preferências das rotas				
	Sede	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Aterro
Sede	(*)	0,67	0,45	0,80	(*)
Cliente 1	0,67	(*)	0,87	0,39	0,45

Cliente 2	0,53	0,87	(*)	0,63	0,68
Cliente 3	0,80	0,39	0,56	(*)	0,71
Aterro	0,78	(*)	(*)	(*)	(*)

(*) alternativas inviáveis.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram graficamente os resultados apresentados nas duas primeiras linhas da tabela 4.2, respectivamente.

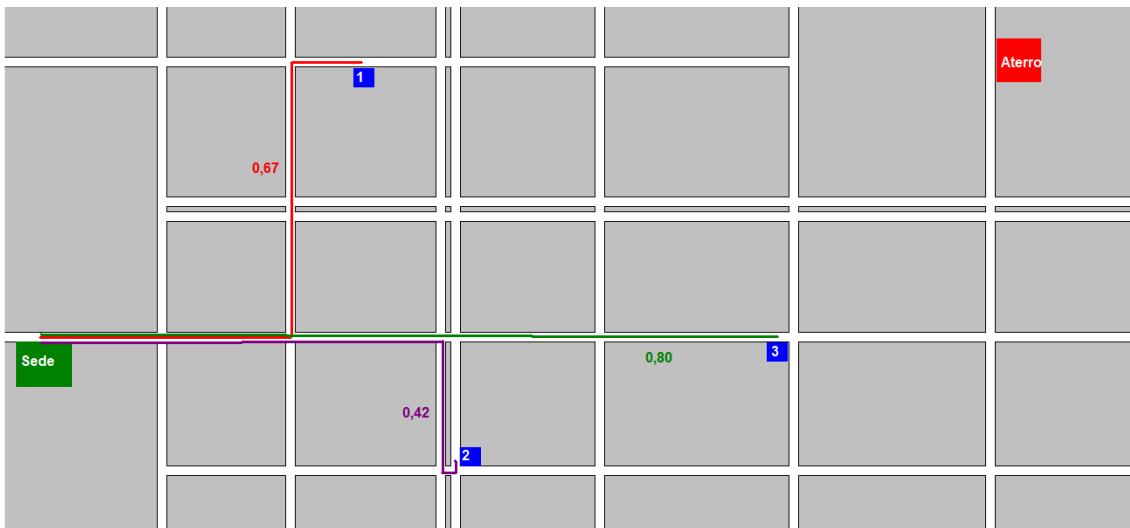


Figura 4. 5. Rotas preferenciais saindo da sede com destino aos diversos clientes.

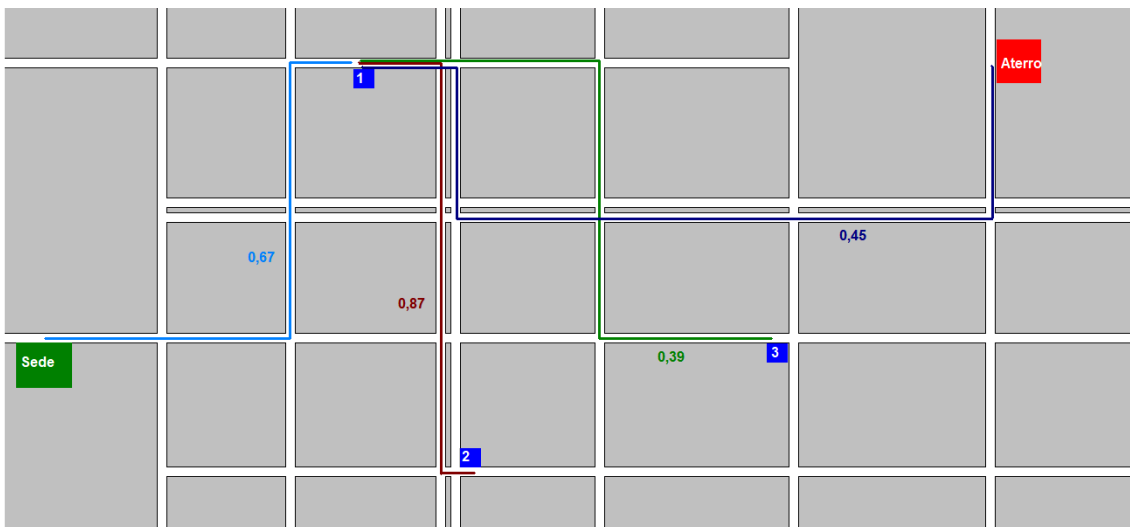


Figura 4. 6. Rotas preferenciais saindo do cliente 1 com destino aos demais alvos (clientes e/ou aterro).

4.1.2. Etapa 2: Identificação de rota ideal

Após a identificação do melhor trajeto entre cada par de alvos é que pretende-se aplicar a técnica de **PLI** (Programação Linear Inteira) para determinar qual seria a rota ideal dos

veículos da empresa de modo a maximizar a preferência do percurso total. Nesta etapa seriam incorporadas as diversas restrições operacionais, tais como: todos os clientes devem ser atendidos, isto é, a totalidade do resíduo produzido deve ser colhida; cada cliente deve ser visitado por uma única vez e por um único veículo; não superar a capacidade máxima de transporte de cada veículo; o veículo deve chegar ao cliente no horário fixado por este; o destino final deve ser o aterro para veículos com material não reciclável ou a sede da empresa para os veículos que recolhem material reciclável; etc.

4.2. Modelo da Análise Multicritério da Etapa 1:

Na técnica AHP (Procedimento de análise hierárquica) a construção do modelo de análise multicritério é feita numa sequência de três passos, a seguir apresentados.

4.2.1. Passo 1 – Estabelecimento de hierarquias

O problema é estruturado em níveis hierárquicos, como forma de buscar uma melhor compreensão e avaliação do mesmo. Uma hierarquia, segundo Saaty (1991), “é uma abstração da estrutura de um sistema para estudar as interações funcionais de seus componentes e seus impactos no sistema total”. A construção de hierarquias é uma etapa fundamental do processo de raciocínio humano.

Os componentes mínimos de uma hierarquia são três: a) objetivo; b) conjunto de critérios, isto é, os quesitos segundo os quais devem-se avaliar as alternativas (dependendo da complexidade do problema, podem ser utilizadas múltiplas camadas de critérios, a partir da estruturação destes em sub-critérios); e c) conjunto de alternativas viáveis (representam a possibilidade de decisão).

Inicialmente propõe-se uma estrutura de decisão hierárquica em três níveis, como ilustrada na figura 4.7. Com ela pretende-se identificar o melhor percurso entre dois alvos levando em consideração todos os critérios avaliados como relevantes.

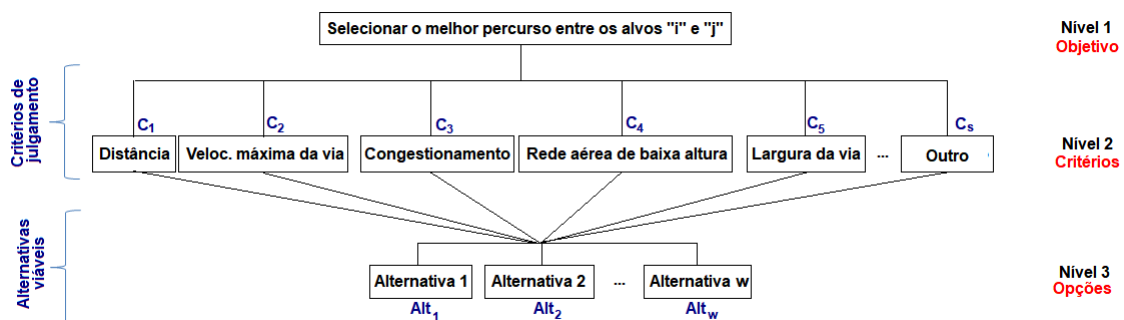


Figura 4. 7. Estrutura hierárquica proposta para determinar o melhor percurso entre dois alvos.

Não haverá restrição quanto ao tipo de critérios a ser considerado já que uma das vantagens da AHP é a possibilidade de modelar um problema usando critérios quantitativos (acumulativos ou não) e qualitativos ou categorizados, além de incorporar aspectos subjetivos, assim como o grau de certeza ou incerteza envolvido no problema.

4.2.2. Passo 2 – Definição de Prioridades e Julgamentos

O estabelecimento de prioridades baseia-se na habilidade do ser humano de perceber o grau de relacionamento entre diversos elementos inseridos num determinado contexto, por meio de julgamentos paritários. Esse procedimento é conhecido por comparação par a par (*pairwise comparison*), sendo utilizado para estimar a escala em que os elementos de cada nível da estrutura hierárquica são medidos, para posteriormente avaliar o desempenho de cada alternativa em relação aos critérios definidos.

Em outras palavras, o método baseia-se na comparação (no segundo nível da estrutura hierárquica) entre pares de critérios (e subcritérios, se existirem), e na construção de uma matriz para cada uma das comparações realizadas, onde os valores numéricos que a compõem representam a preferência relativa de um critério em relação ao outro e são definidos com base na Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos, apresentada na tabela 4.3.

Posteriormente essa comparação se aplica do terceiro nível da estrutura hierárquica entre pares de alternativas, em função dos diversos critérios definidos.

Tabela 4. 3. Escala Fundamental de Saaty. Fonte: Saady (1991).

Escala	Valor	Recíproco	Comentário
Igual importância	1	1	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
Importância moderada	3	1/3	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
Mais importante	5	1/5	A experiência ou o juízo favorecem uma atividade em relação à outra.
Muito importante	7	1/7	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra.

Importância extrema	9	1/9	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança.
Valores intermediários	2, 4, 6, 8	1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Quando se procura uma condição entre duas definições.

Como citado em parágrafo anterior, as comparações par a par resultam numa matriz quadrada (**A**), onde o número (a_{ij}) na linha i e na coluna j corresponde à importância do critério C_i em relação ao critério C_j . Essa matriz de comparação (**A**) pode ser expressa como:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{j1} & a_{j2} & a_{j3} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Saaty (1991) estabeleceu três condições para os valores de cada elemento a_{ij} da matriz (**A**):

$$se\ a_{ij} = \alpha \rightarrow a_{ji} = \frac{1}{\alpha} \text{ (com } \alpha \neq 0)$$

$$se\ C_i \text{ é julgado com igual importância relativa que } C_j \rightarrow a_{ij} = a_{ji} = 1$$

$$a_{ii} = 1 \text{ para todo } i$$

Em resumo, do processo de comparação par a par no nível 2 da estrutura hierárquica teríamos como resultado uma matriz quadrada de ordem $s \times s$ (onde “s” representa a quantidade de critérios considerados, representada por:

$$\begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & C_3 & \dots & C_s \\ C_1 & 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1s} \\ C_2 & 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2s} \\ C_3 & 1/a_{13} & 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_s & 1/a_{1s} & 1/a_{2s} & 1/a_{3s} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Entretanto, do processo de comparação par a par no nível 3 da estrutura hierárquica teríamos como resultado uma série de “s” matrizes quadradas de ordem $w \times w$ (onde “w” representa a quantidade de alternativas viáveis consideradas. As alternativas são comparadas conforme cada critério estabelecido. Assim, essas matrizes seriam:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{Alt}_1 & \mathbf{Alt}_2 & \dots & \mathbf{Alt}_w \\ \mathbf{Alt}_1 & 1 & a_{12} & \dots & a_{1w} \\ \mathbf{Alt}_2 & 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Alt}_w & 1/a_{1w} & 1/a_{2w} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_2 & \mathbf{Alt}_1 & \mathbf{Alt}_2 & \dots & \mathbf{Alt}_w \\ \mathbf{Alt}_1 & 1 & a_{12} & \dots & a_{1w} \\ \mathbf{Alt}_2 & 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Alt}_w & 1/a_{1w} & 1/a_{2w} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

.....

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{Alt}_1 & \mathbf{Alt}_2 & \dots & \mathbf{Alt}_w \\ \mathbf{Alt}_1 & 1 & a_{12} & \dots & a_{1w} \\ \mathbf{Alt}_2 & 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Alt}_w & 1/a_{1w} & 1/a_{2w} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Obtidas todas as matrizes de comparação deve-se executar a fase final do método que é a estimativa da prioridade de cada alternativa, conforme seguinte procedimento:

a) Normalização das matrizes: consiste em calcular o somatório dos elementos de cada coluna e, logo, dividir cada elemento da coluna pelo respectivo somatório.

Matriz original: $A = [a_{ij}]$

Matriz normalizada: $A_N = [a_{Nij}]$ com $a_{Nij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}}$; $i=1,2,\dots,n$; $j=1,2,\dots,n$

b) Cálculo da prioridade média local (PML): as PMLs são as médias dos elementos das linhas das matrizes normalizadas; e compõem o chamado de vetor de prioridades local (M). Estima-se assim:

$$M = [m_k] \text{ com } m_k = \frac{\sum_{i=1}^n a_{Nij}}{n}; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, n$$

Para exemplificar, considera-se a matriz normalizada correspondente ao segundo nível hierárquico, isto é, a comparação par a par de critérios (A_{Ncrit}) e estima-se o vetor da PML correspondente (M_{crit}). Neste caso $n=s$ (quantidade de critérios):

$$A_{Ncrit} = \begin{bmatrix} & \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & \mathbf{C}_3 & \dots & \mathbf{C}_s \\ \mathbf{C}_1 & a_{N11} & a_{N12} & a_{N13} & \dots & a_{N1s} \\ \mathbf{C}_2 & a_{N21} & a_{N22} & a_{N23} & \dots & a_{N2s} \\ \mathbf{C}_3 & a_{N31} & a_{N32} & a_{N33} & \dots & a_{N3s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{C}_s & a_{Ns1} & a_{Ns2} & a_{Ns3} & \dots & a_{Nss} \end{bmatrix} \rightarrow M_{crit} = \begin{bmatrix} & \mathbf{m}_k \\ m_1 = (a_{N11} + a_{N12} + \dots + a_{N1s})/s \\ m_2 = (a_{N21} + a_{N22} + \dots + a_{N2s})/s \\ m_3 = (a_{N31} + a_{N32} + \dots + a_{N3s})/s \\ \dots \\ m_s = (a_{Ns1} + a_{Ns2} + \dots + a_{Nss})/s \end{bmatrix}$$

Analogamente o cálculo da PML pode ser feito com as matrizes do terceiro nível hierárquico, ou seja, a comparação par a par das alternativas com base em cada critério:

$$A_{Nalt(c1)} = \begin{bmatrix} & \mathbf{C}_1 & \mathbf{Alt}_1 & \mathbf{Alt}_2 & \dots & \mathbf{Alt}_w \\ \mathbf{Alt}_1 & a_{N11} & a_{N12} & \dots & a_{N1w} \\ \mathbf{Alt}_2 & a_{N21} & a_{N22} & \dots & a_{N2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Alt}_w & a_{Nw1} & a_{Nw2} & \dots & a_{Nww} \end{bmatrix} \rightarrow M_{alt(c1)} = \begin{bmatrix} & \mathbf{m}_k \\ ma_{11} = (a_{N11} + a_{N12} + \dots + a_{N1w})/w \\ ma_{12} = (a_{N21} + a_{N22} + \dots + a_{N2w})/w \\ \dots \\ ma_{1w} = (a_{Nw1} + a_{Nw2} + \dots + a_{Nww})/w \end{bmatrix}$$

$$A_{Nalt(c2)} = \begin{bmatrix} & \mathbf{C}_2 & \mathbf{Alt}_1 & \mathbf{Alt}_2 & \dots & \mathbf{Alt}_w \\ \mathbf{Alt}_1 & a_{N11} & a_{N12} & \dots & a_{N1w} \\ \mathbf{Alt}_2 & a_{N21} & a_{N22} & \dots & a_{N2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Alt}_w & a_{Nw1} & a_{Nw2} & \dots & a_{Nww} \end{bmatrix} \rightarrow M_{alt(c2)} = \begin{bmatrix} & \mathbf{m}_k \\ ma_{21} = (a_{N11} + a_{N12} + \dots + a_{N1w})/w \\ ma_{22} = (a_{N21} + a_{N22} + \dots + a_{N2w})/w \\ \dots \\ ma_{2w} = (a_{Nw1} + a_{Nw2} + \dots + a_{Nww})/w \end{bmatrix}$$

....

$$A_{Nalt(cs)} = \begin{bmatrix} & \mathbf{C}_s & \mathbf{Alt}_1 & \mathbf{Alt}_2 & \dots & \mathbf{Alt}_w \\ \mathbf{Alt}_1 & a_{N11} & a_{N12} & \dots & a_{N1w} \\ \mathbf{Alt}_2 & a_{N21} & a_{N22} & \dots & a_{N2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Alt}_w & a_{Nw1} & a_{Nw2} & \dots & a_{Nww} \end{bmatrix} \rightarrow M_{alt(cs)} = \begin{bmatrix} & \mathbf{m}_k \\ ma_{s1} = (a_{N11} + a_{N12} + \dots + a_{N1w})/w \\ ma_{s2} = (a_{N21} + a_{N22} + \dots + a_{N2w})/w \\ \dots \\ ma_{sw} = (a_{Nw1} + a_{Nw2} + \dots + a_{Nww})/w \end{bmatrix}$$

Calculados os vetores de PML para cada matriz, estes podem ser reunidos e constituir uma matriz:

$$M_{alt} = \begin{bmatrix} ma_{11} & ma_{21} & \dots & ma_{s1} \\ ma_{12} & ma_{22} & \dots & ma_{s2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ ma_{1w} & ma_{2w} & \dots & ma_{sw} \end{bmatrix}$$

c) **Cálculo da prioridade ponderada global (PG):** o vetor da PG é obtido pela multiplicação da matriz das PMLs das alternativas e o vetor de PML dos critérios. Isto é, combinam-se as prioridades do segundo nível com as prioridades do terceiro nível da estrutura hierárquica.

O resultado deste processo é um único valor de preferência para cada alternativa. Matematicamente o vetor da PG (**P**) é dado por:

$$P = |p_l| ; l = 1, 2, \dots, w$$

$$p_l = \sum_{t=1}^s ma_{tl} * m_t; l = 1, 2, \dots, w$$

onde p_l é a prioridade ponderada global da alternativa “ l ”; ma_{tl} é a prioridade média local da alternativa “ l ” em relação ao critério “ t ” (valores obtidos da matriz \mathbf{M}_{alt}); m_t é a prioridade média local do critério “ t ” (valores obtidos da matriz \mathbf{M}_{crit}); “ s ” é a quantidade de critérios e “ w ” a quantidade de alternativas viáveis considerada.

4.2.3. Passo 3 – Consistência do modelo

Pelo fato do método AHP contemplar avaliações subjetivas ou julgamentos de valor, é possível a ocorrência de algumas avaliações inconsistentes. Assim, Saaty (1991) propõe o cálculo de um parâmetro denominado Razão de Consistência (**RC**) que mede o grau de consistência dos Julgamentos realizados.

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

Para os resultados serem considerados satisfatórios deve-se observar: **RC < 0,10**

O índice de Consistência (**IC**) avalia o grau de inconsistência da matriz de julgamentos paritários, e é estimado por:

$$IC = \frac{|\lambda_{max} - N|}{N - 1}$$

Onde λ_{max} e N são o maior autovalor e a ordem da matriz de julgamentos paritários, respectivamente.

$$\lambda_{max} = \text{valor médio de } \frac{A \cdot M}{M}$$

Onde A é a matriz de julgamentos paritários e M o vetor de prioridade média local correspondente.

O índice Aleatório (**IA**) representa o índice de consistência referente a um grande número de comparações efetuadas par a par. É calculado para matrizes quadradas de ordem N pelo *Laboratório Nacional de Oak Ridge* dos EUA e seus valores estão na tabela 4.4.

Tabela 4. 4. Valores do Índice Aleatório IA. Fonte: Saady (1991).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Assim, este modelo de AHP será aplicado reiteradas vezes considerando todas as combinações de pares de alvos. O que vai diferenciar uma aplicação de outra é apenas a quantidades de alternativas de percurso viáveis que podem existir entre os diversos pares de alvos. Obviamente, os critérios usados nos julgamentos permanecerão os mesmos.

4.3. Modelo da Programação Linear Inteira da Etapa 2

4.3.1. Formulação para resíduo rejeitos:

4.3.1.1. Variáveis de decisão:

x_{ijk} : decisão de ir ($x_{ij}=1$), ou não ($x_{ij}=0$) do alvo (sede da empresa ou cliente) i para o alvo (cliente ou aterro) j , com o veículo k .

$$i=1,2,\dots,n$$

$$j=1,2,\dots,n$$

$$k=1,2,\dots,m$$

4.3.1.2. Função objetivo:

Maximizar a preferência total (Z) do percurso feito pelos veículos da empresa para recolher o resíduo não reciclável.

$$\max Z = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m d_{ij} \cdot x_{ijk}$$

Sendo:

Z : preferência ou prioridade total do percurso percorrido por todos os veículos

n : quantidade de alvos ($n=\text{sede}+\text{aterro}+\text{clientes} = 1+1+3=5$)

m : quantidade de veículos aptos para transportar resíduo não reciclável.

d_{ij} : prioridade do percurso entre os alvos i e j (valor constante na tabela 3)

Observação 1: o subíndice “1” será sempre a sede da empresa, enquanto o subíndice “n” indicará sempre o aterro sanitário. Os demais valores de subíndices corresponderão aos diversos clientes. Para o exemplo hipotético da figura 1 tem-se:

$i=1$ ou $j=1$: sede da empresa

$i=2$ ou $j=2$: cliente 1

$i=3$ ou $j=3$: cliente 2

$i=4$ ou $j=4$: cliente 3

$i=n=5$ ou $j=n=5$: aterro sanitário

4.3.1.3. Restrições:

Restrição 1: Visa garantir que apenas um veículo “k” visite cada cliente “i” e, obviamente, que esse cliente seja visitado uma única vez. É a denominada restrição de passagem, expressa por:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ijk} = 1; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

Restrição 2: Garantia que para chegar no alvo destino deve-se partir de apenas um outro alvo

$$\sum_{i=1}^{n-1} x_{ijk} = 1; \quad j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$$

Restrição 3: Garantia de que cada alvo será atendido uma única vez (evitar viagens de ida e volta para o mesmo alvo)

$$x_{ijk} + x_{jik} \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n - 1; j = 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$$

Restrição 4: Tipo de variável

$$x_{ijk} \in \{0; 1\} \text{ (binária)} \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$$

Restrição 5: Os veículos devem necessariamente circular, isto é, não pode ter como origem e destino o mesmo alvo:

$$x_{iik} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$$

Restrição 6: Os veículos devem necessariamente ter como origem a sede da empresa.

$$\sum_{j=2}^{n-1} x_{1jk} = 1 \quad ; k = 1, 2, \dots, m$$

Restrição 7: Os veículos devem necessariamente ter ponto final da rota o aterro sanitário.

Assim, para evitar a permanência de um veículo num determinado alvo (cliente) sem cumprir a exigência de finalizar a rota no aterro sanitário estabelece-se a restrição:

$$\sum_{i=2}^n x_{ink} = 1 \quad ; k = 1, 2, \dots, m$$

Restrição 8: Os veículos não podem sair da sede da empresa e ir diretamente (vazios) ao aterro sanitário.

$$x_{1nk} = 0; k = 1, 2, \dots, m$$

Restrição 9: Os veículos não podem transportar uma carga maior a sua capacidade.

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^{n-1} RC_j \cdot x_{ijk} \leq Cmax_k; k = 1, 2, \dots, m$$

Sendo:

RC_j : a carga (peso ou volume) de resíduo recolhida do cliente j . Como o veículo sai da empresa vazio $RC_i = 0$.

$Cmax_k$: é a capacidade (peso ou volume) máxima de carga do veículo k .

Observação 2: a quantidade de rejeito gerada (diariamente ou segundo o Δt adotado) por cada cliente (RC_i) na realidade é uma variável aleatória, entretanto, nesta formulação será considerada como uma quantidade determinística. Em outras palavras,

com base no histórico de cada cliente será estimada a quantidade média de resíduo orgânico produzida diariamente (ou segundo o Δt escolhido) e esta média será o valor atribuído à RC_i .

Restrição 10: Os veículos devem necessariamente recolher todo o resíduo produzido pelos clientes.

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=2}^{n-1} RC_j \cdot x_{ijk} = \sum_{j=2}^{n-1} RC_j$$

Restrição 11: Restrição de continuidade da rota para assegurar que se o veículo “k” chega ao alvo (cliente) “j”, esse veículo deveria sair do mesmo alvo “j” para o alvo (cliente ou aterro) seguinte “h”. Assim, definiu-se:

$$\sum_{i=1}^n x_{ijk} - \sum_{h=1}^n x_{jhk} = 0; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$$

Observação 3: o subíndice “h” representa o alvo seguinte, após um veículo “k” ter atendido o alvo anterior “j”. Esta restrição impede a permanência do veículo em determinado cliente, sem que fosse cumprido o compromisso de se deslocar até o próximo alvo (cliente) ou de finalizar a rota no aterro.

4.3.2. Formulação para resíduo reciclável:

Para esta situação a representação esquemática dos alvos (ou entes) envolvidos é a da figura 4.8, onde o aterro sanitário foi excluído, pois para os veículos que recolhem material reciclável, a sede da empresa será o ponto inicial e, também, o ponto final da rota.

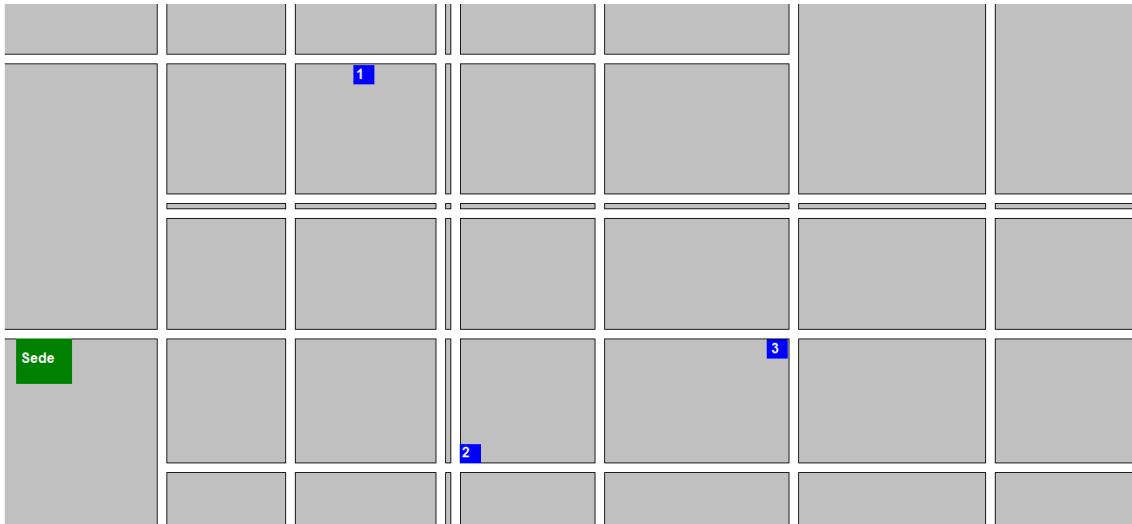


Figura 4. 8. Alvos considerados na definição das rotas de colheita de material reciclável.

A formulação (variáveis de decisão, função objetivo, e restrições) é idêntica ao caso anterior, com exceção da restrição **c7**. No caso do resíduo reciclável o destino final da rota dos veículos que recolhem este tipo de material é a própria sede da empresa. Assim, a citada restrição deve ser substituída por:

$$\sum_{i=2}^n x_{i1k} = 1 \ ; k = 1, 2, \dots, m$$

5. CASO DE ESTUDO

5.1. Considerações Gerais

A fim de demonstrar as capacidades e limitações do modelo de roteirização de frota proposto será feita uma aplicação tomando como base dados reais de uma empresa dedicada à gestão de resíduos sólidos de Brasília, que opera uma frota de 7 veículos diferentes para atender a aproximadamente 40 clientes, geradores dos diversos tipos de resíduos (recicláveis, rejeitos e orgânicos compostáveis). Entretanto, em função do tempo disponível para a realização deste Projeto Final e das limitações (especificamente no que diz respeito da quantidade máxima de variáveis de decisão e de restrições permitidas) dos softwares disponíveis de forma gratuita, optou-se por restringir a abrangência da otimização e considerar apenas três clientes e uma frota de apenas dois veículos.

A coleta de resíduos em empresas de gestão de resíduos emprega conceitos comuns de sistemas de coletas seletivas, com dias da semana reservados para cada coleta específica e um veículo apropriado para cada tipo de coleta. Além das limitações quanto à quantidade de clientes e tamanho da frota considerada, o estudo de caso contemplará somente a coleta de resíduos não recicláveis. Deste modo, os veículos a serem considerados são dois caminhões compactadores, pois possuem características específicas para a coleta de resíduos orgânicos e rejeitos. São capazes de virar contêineres com resíduos dentro do caminhão de uma maneira mais fácil por ser adaptado. A capacidade máxima de transporte dos veículos contemplados é de 10.700 kg (aproximadamente 17 m³) e 9.500 kg (aproximadamente 15 m³).

Pelos fatos já explicitados, na aplicação do modelo de roteirização proposto serão considerados cinco alvos: a) a sede da empresa de gestão de resíduos (que se constitui na origem de todas as rotas); b) três clientes (ou geradores de resíduos não recicláveis); e c) o aterro sanitário da Brasília (que será o destino final de todas as rotas).

A figura 5.1 mostra de maneira esquemática a localização dos alvos presentes na situação a tratar. Reiterando, tem-se o ponto de partida de todas as rotas que é a sede da empresa, e como se trata de identificar a melhor rota para a coleta de rejeitos (ou não recicláveis), o ponto final da rota será o aterro sanitário de Brasília. Além disso, a imagem mostra a localização dos três clientes cujos resíduos deverão ser coletados.

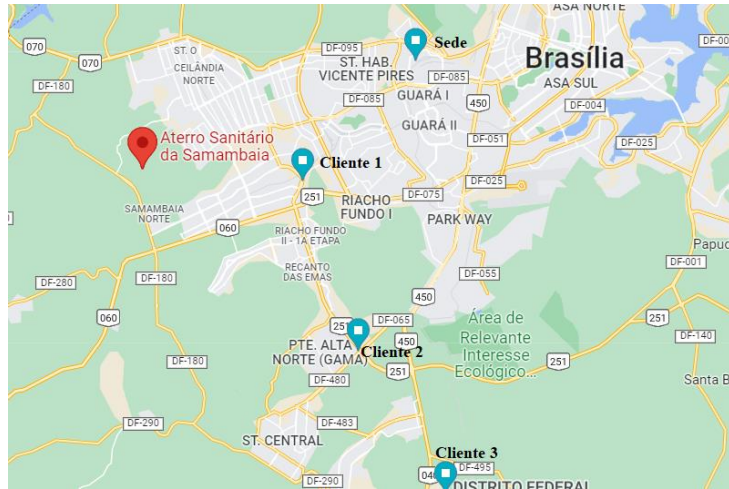


Figura 5. 1. Localização relativa dos alvos considerados na definição das rotas. *Fonte: Imagem base obtida do Google Maps.*

5.2. Etapa 1:

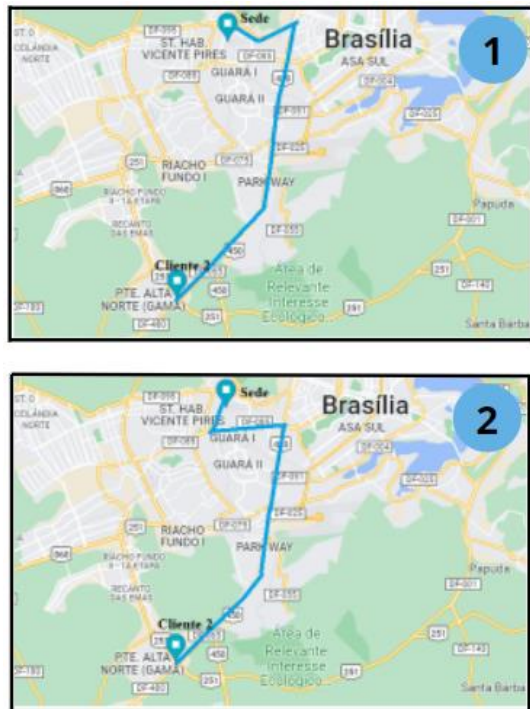
Inicialmente foram selecionados os critérios que seriam utilizados nos julgamentos e determinação das prioridades dos diferentes percursos. São eles: a) distância do percurso; b) velocidade média de deslocamento; c) ocorrência, ou não, de congestionamentos; d) estado de conservação do asfalto da via; e e) tipologia da via (mão simples ou dupla).

Posteriormente, identificaram-se os possíveis percursos para o deslocamento dos veículos de coleta de resíduos entre pares de alvos e estimado o valor dos diferentes critérios para cada um deles. As figuras 5.2 a 5.10 mostram esses percursos. No caso particular desta aplicação consideraram-se três opções de percursos entre cada par de alvos, mas isso não deve ser entendido como uma regra, isto é, na realidade a quantidade de alternativas para o deslocamento dos veículos entre os diferentes pares de alvos pode ser diferente.



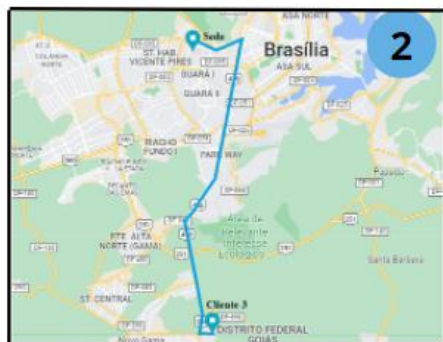
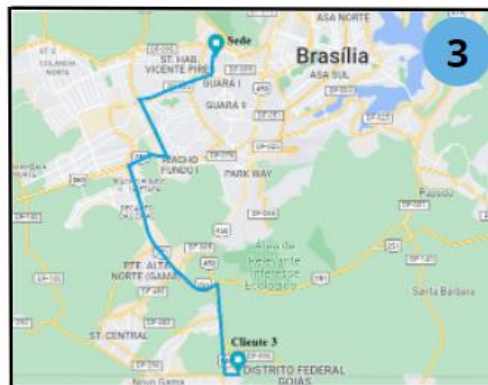
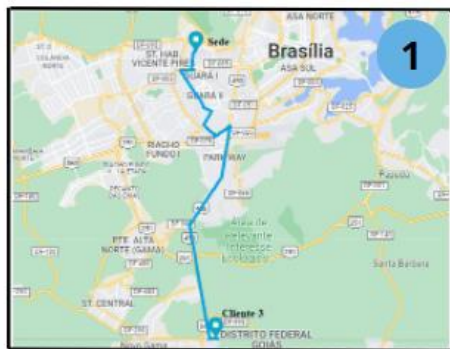
Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	32,6	14,9	17,1
V (km/h)	49,0	44,7	48,9
Ocorre congestionamento	Não	Não	Sim
Asfalto Conservado	Sim	Sim	Sim
Ida e Volta	Sim	Não	Sim

Figura 5. 2. Alternativas de percurso entre a Sede da empresa e o Cliente 1. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



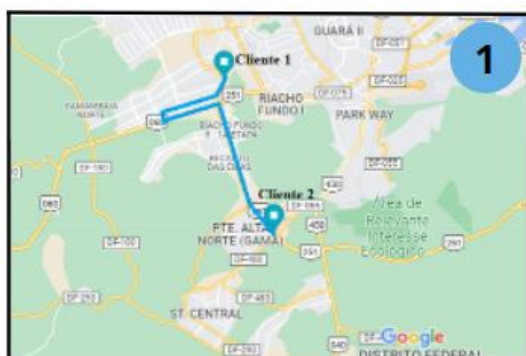
Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	29,3	30,7	29,8
V (km/h)	65,1	68,2	57,7
Ocorre congestionamento	Não	Não	Não
Asfalto Conservado	Sim	Sim	Sim
Ida e Volta	Sim	Sim	Não

Figura 5. 3. Alternativas de percurso entre a Sede da empresa e o Cliente 2. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	39,0	38,3	42,2
V (km/h)	54,4	62,1	49,7
Ocorre congestionamento	Não	Não	Não
Asfalto Conservado	Sim	Sim	Sim
Ida e Volta	Não	Sim	Sim

Figura 5. 4. Alternativas de percurso entre a Sede da empresa e o Cliente 3. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



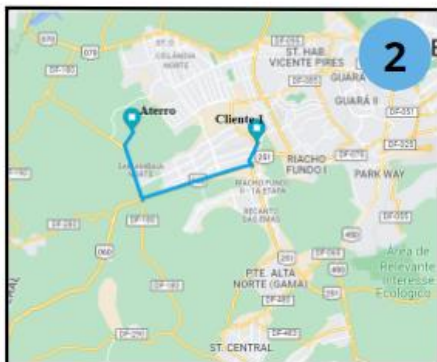
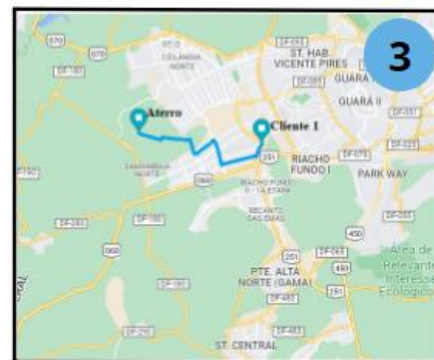
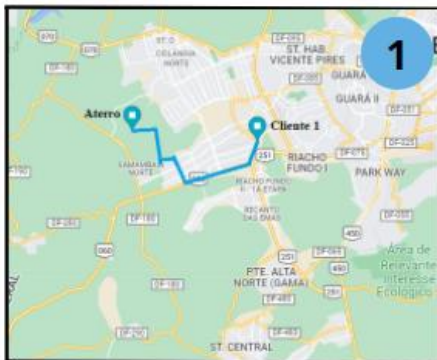
Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	18,5	12,4	29,5
V (km/h)	48,2	35,4	59,0
Ocorre congestionamento	Sim	Sim	Não
Asfalto Conservado	Não	Não	Sim
Ida e Volta	Sim	Não	Sim

Figura 5. 5. Alternativas de percurso entre o Cliente 1 e o Cliente 2. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



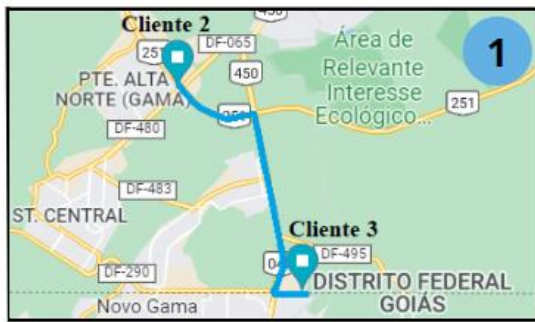
Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	26,7	37,8	35,7
V (km/h)	45,8	42,0	45,6
Ocorre congestionamento	Sim	Sim	Sim
Asfalto Conservado	Não	Não	Não
Ida e Volta	Sim	Sim	Não

Figura 5. 6. Alternativas de percurso entre o Cliente 1 e o Cliente 3. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



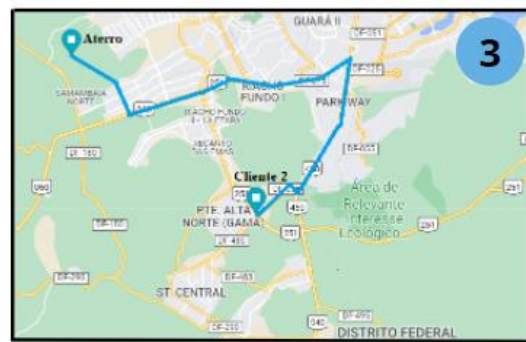
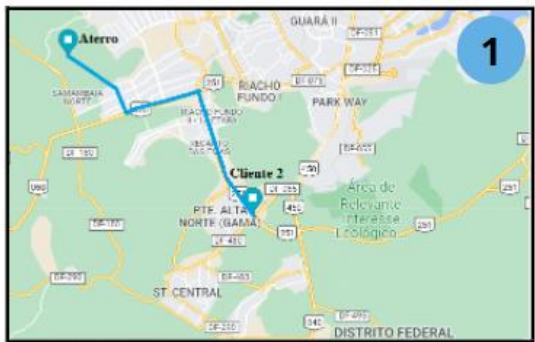
Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	18,6	19,2	16,7
V (km/h)	33,8	50,1	27,8
Ocorre congestionamento	Não	Não	Não
Asfalto Conservado	Sim	Sim	Sim
Ida e Volta	Não	Não	Não

Figura 5. 7. Alternativas de percurso entre o Cliente 1 e o Aterro Sanitário. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	14,8	23,8	23,3
V (km/h)	63,4	43,3	43,7
Ocorre congestionamento	Não	Não	Não
Asfalto Conservado	Sim	Sim	Sim
Ida e Volta	Sim	Sim	Não

Figura 5. 8. Alternativas de percurso entre o Cliente 2 e o Cliente 3. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	28,4	41,8	43,3
V (km/h)	37,9	36,9	47,2
Ocorre congestionamento	Não	Não	Não
Asfalto Conservado	Sim	Não	Sim
Ida e Volta	Não	Não	Não

Figura 5. 9. Alternativas de percurso entre o Cliente 2 e o Aterro Sanitário. Fonte: imagem base obtida do Google Map.



Critérios	Alternativas		
	1	2	3
D (km)	40,3	50,9	43,0
V (km/h)	42,4	50,8	42,7
Ocorre congestionamento	Não	Não	Não
Asfalto Conservado	Sim	Sim	Sim
Ida e Volta	Não	Não	Não

Figura 5. 10. Alternativas de percurso entre o Cliente 3 e o Aterro Sanitário. *Fonte: imagem base obtida do Google Map.*

Destaca-se que tanto o Procedimento de Análise Hierárquica utilizado na Etapa I assim como o modelo de Programação Linear Inteira da Etapa II foram implementados numa planilha eletrônica utilizando o software Excel. Esta opção deu agilidade ao processo de simulação matemática, ao mesmo tempo que evita a possibilidade de erro. Em outras palavras, logo após ingressar os dados básicos (valores dos critérios para as diferentes alternativas de deslocamento consideradas) os mesmos eram transferidos automaticamente para o modelo da Etapa I e os resultados deste (preferências dos diferentes percursos) igualmente transferidos sem intervenção do operador para o modelo da Etapa II, responsável pela identificação da rota total dos veículos de coleta de resíduos sólidos.

Outro aspecto que merece explicitar é que os critérios “Distância” e “Velocidade Máxima da Via” são representados por variáveis de tipo quantitativo, então seus valores podem ser utilizados diretamente como medida da importância relativa na comparação binária. Já para os demais critérios foi utilizada a escala fundamental de Saady para definir as importâncias relativas.

Esclarece-se que todas as alternativas consideradas para o deslocamento dos veículos entre os diversos alvos possuem a possibilidade de ir e voltar pelo mesmo trajeto. Sendo assim ir do cliente “i” para o cliente “j” ou vice-versa pode ser realizado pelo mesmo caminho.

A figura 5.11 mostra as matrizes de comparação binária (segundo a escala fundamental de Saady e a normalizada, respectivamente) para o primeiro nível da estrutura hierárquica, isto é, a comparação entre os critérios definidos. Entretanto, as figuras 5.12 a 5.20 referem-se às matrizes das comparações binárias do segundo nível da estrutura hierárquica, ou seja, as comparações entre as alternativas segundo cada um dos critérios considerados.

Comparação critérios (Escala Saady)					
	C1	C2	C3	C4	C5
C1	1,000	7,000	3,000	5,000	1,000
C2	0,143	1,000	1,000	1,000	3,000
C3	0,333	1,000	1,000	3,000	1,000
C4	0,200	1,000	0,333	1,000	9,000
C5	1,000	0,333	1,000	0,111	1,000
Soma	2,676	10,333	6,333	10,111	15,000

Comparação critérios normalizada						
	C1	C2	C3	C4	C5	PML
C1	0,374	0,677	0,474	0,495	0,067	0,417
C2	0,053	0,097	0,158	0,099	0,200	0,121
C3	0,125	0,097	0,158	0,297	0,067	0,149
C4	0,075	0,097	0,053	0,099	0,600	0,185
C5	0,374	0,032	0,158	0,011	0,067	0,128

Figura 5. 11. Comparação Binária dos Critérios.

Comparação alternativas (C1)

C1	A1	A2	A3
A1	1,000	0,457	0,525
A2	2,188	1,000	1,148
A3	1,906	0,871	1,000
Soma	5,094	2,328	2,672

Comparação alternativas (C2)

C2	A1	A2	A3
A1	1,000	1,095	1,002
A2	0,913	1,000	0,915
A3	0,998	1,093	1,000
Soma	2,911	3,188	2,917

Comparação alternativas (C3)

C3	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	0,111
A2	1,000	1,000	0,111
A3	9,000	9,000	1,000
Soma	11,000	11,000	1,222

Comparação alternativas (C4)

C4	A1	A2	A3
A1	1,000	9,000	9,000
A2	0,111	1,000	1,000
A3	0,111	1,000	1,000
Soma	1,222	11,000	11,000

Comparação alternativas (C5)

C5	A1	A2	A3
A1	1,000	0,111	0,111
A2	9,000	1,000	0,111
A3	9,000	9,000	1,000
Soma	19,000	10,111	1,222

Comparação alternativas normalizada (C1)

C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,196	0,196	0,196	0,196
A2	0,429	0,429	0,429	0,429
A3	0,374	0,374	0,374	0,374

Comparação alternativas normalizada (C2)

C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,343	0,343	0,343	0,343
A2	0,314	0,314	0,314	0,314
A3	0,343	0,343	0,343	0,343

Comparação alternativas normalizada (C3)

C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,091	0,091	0,091	0,091
A2	0,091	0,091	0,091	0,091
A3	0,818	0,818	0,818	0,818

Comparação alternativas normalizada (C4)

C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,818	0,818	0,818	0,818
A2	0,091	0,091	0,091	0,091
A3	0,091	0,091	0,091	0,091

Comparação alternativas normalizada (C5)

C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,053	0,011	0,091	0,052
A2	0,474	0,099	0,091	0,221
A3	0,474	0,890	0,818	0,727

Matriz comparação Alternativas (normalizada)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,196	0,343	0,091	0,818	0,052
A2	0,429	0,314	0,091	0,091	0,221
A3	0,374	0,343	0,818	0,091	0,727

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	0,295
A2	0,276
A3	0,429

Figura 5. 12. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre Sede e Cliente 1.

Comparação alternativas (C1)

C1	A1	A2	A3
A1	1,000	1,048	1,017
A2	0,954	1,000	0,971
A3	0,983	1,030	1,000
Soma	2,938	3,078	2,988

Comparação alternativas (C2)

C2	A1	A2	A3
A1	1,000	0,954	1,129
A2	1,048	1,000	1,183
A3	0,886	0,845	1,000
Soma	2,934	2,800	3,312

Comparação alternativas (C3)

C3	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C4)

C4	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C5)

C5	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	9,000
A2	1,000	1,000	9,000
A3	0,111	0,111	1,000
Soma	2,111	2,111	19,000

Comparação alternativas normalizada (C1)

C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,340	0,340	0,340	0,340
A2	0,325	0,325	0,325	0,325
A3	0,335	0,335	0,335	0,335

Comparação alternativas normalizada (C2)

C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,341	0,341	0,341	0,341
A2	0,357	0,357	0,357	0,357
A3	0,302	0,302	0,302	0,302

Comparação alternativas normalizada (C3)

C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C4)

C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C5)

C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,474	0,474	0,474	0,474
A2	0,474	0,474	0,474	0,474
A3	0,053	0,053	0,053	0,053

Matriz comparação Alternativas (normalizada)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,340	0,341	0,333	0,333	0,474
A2	0,325	0,357	0,333	0,333	0,474
A3	0,335	0,302	0,333	0,333	0,053

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	0,355
A2	0,351
A3	0,294

Figura 5. 13. Comparação Binária das Alternativas de Percursos entre a Sede e o Cliente 2.

Comparação alternativas (C1)

C1	A1	A2	A3
A1	1,000	0,982	1,082
A2	1,018	1,000	1,102
A3	0,924	0,908	1,000
Soma	2,942	2,890	3,184

Comparação alternativas (C2)

C2	A1	A2	A3
A1	1,000	0,876	1,096
A2	1,141	1,000	1,251
A3	0,912	0,799	1,000
Soma	3,054	2,676	3,347

Comparação alternativas (C3)

C3	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C4)

C4	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C5)

C5	A1	A2	A3
A1	1,000	0,111	0,111
A2	9,000	1,000	1,000
A3	9,000	1,000	1,000
Soma	19,000	2,111	2,111

Comparação alternativas normalizada (C1)

C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,340	0,340	0,340	0,340
A2	0,346	0,346	0,346	0,346
A3	0,314	0,314	0,314	0,314

Comparação alternativas normalizada (C2)

C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,327	0,327	0,327	0,327
A2	0,374	0,374	0,374	0,374
A3	0,299	0,299	0,299	0,299

Comparação alternativas normalizada (C3)

C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C4)

C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C5)

C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,053	0,053	0,053	0,053
A2	0,474	0,474	0,474	0,474
A3	0,474	0,474	0,474	0,474

Matriz comparação Alternativas (normalizada)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,340	0,327	0,333	0,333	0,053
A2	0,346	0,374	0,333	0,333	0,474
A3	0,314	0,299	0,333	0,333	0,474

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	0,299
A2	0,362
A3	0,339

Figura 5. 14. Comparação Binária das Alternativas de Percurso entre Sede e Cliente 3.

Comparação alternativas (C1)

C1	A1	A2	A3
A1	1,000	0,670	1,595
A2	1,492	1,000	2,379
A3	0,627	0,420	1,000
Soma	3,119	2,091	4,974

Comparação alternativas (C2)

C2	A1	A2	A3
A1	1,000	1,361	0,817
A2	0,735	1,000	0,601
A3	1,224	1,665	1,000
Soma	2,959	4,026	2,418

Comparação alternativas (C3)

C3	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	0,111
A2	1,000	1,000	0,111
A3	9,000	9,000	1,000
Soma	11,000	11,000	1,222

Comparação alternativas (C4)

C4	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	0,111
A2	1,000	1,000	9,000
A3	9,000	0,111	1,000
Soma	11,000	2,111	10,111

Comparação alternativas (C5)

C5	A1	A2	A3
A1	1,000	9,000	1,000
A2	0,111	1,000	9,000
A3	1,000	0,111	1,000
Soma	2,111	10,111	11,000

Comparação alternativas normalizada (C1)

C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,321	0,321	0,321	0,321
A2	0,478	0,478	0,478	0,478
A3	0,201	0,201	0,201	0,201

Comparação alternativas normalizada (C2)

C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,338	0,338	0,338	0,338
A2	0,248	0,248	0,248	0,248
A3	0,414	0,414	0,414	0,414

Comparação alternativas normalizada (C3)

C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,091	0,091	0,091	0,091
A2	0,091	0,091	0,091	0,091
A3	0,818	0,818	0,818	0,818

Comparação alternativas normalizada (C4)

C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,091	0,474	0,011	0,192
A2	0,091	0,474	0,890	0,485
A3	0,818	0,053	0,099	0,323

Comparação alternativas normalizada (C5)

C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,474	0,890	0,091	0,485
A2	0,053	0,099	0,818	0,323
A3	0,474	0,011	0,091	0,192

Matriz comparação Alternativas (normalizada)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,321	0,338	0,091	0,192	0,485
A2	0,478	0,248	0,091	0,485	0,323
A3	0,201	0,414	0,818	0,323	0,192

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	0,286
A2	0,374
A3	0,340

Figura 5. 15. Comparação Binária das Alternativas de Percurso entre Clientes 1 e 2.

Comparação alternativas (C1)

C1	A1	A2	A3
A1	1,000	1,416	1,337
A2	0,706	1,000	0,944
A3	0,748	1,059	1,000
Soma	2,454	3,475	3,282

Comparação alternativas (C2)

C2	A1	A2	A3
A1	1,000	1,090	1,004
A2	0,918	1,000	0,922
A3	0,996	1,085	1,000
Soma	2,913	3,175	2,926

Comparação alternativas (C3)

C3	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C4)

C4	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C5)

C5	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	9,000
A2	1,000	1,000	9,000
A3	0,111	0,111	1,000
Soma	2,111	2,111	19,000

Comparação alternativas normalizada (C1)

C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,407	0,407	0,407	0,407
A2	0,288	0,288	0,288	0,288
A3	0,305	0,305	0,305	0,305

Comparação alternativas normalizada (C2)

C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,343	0,343	0,343	0,343
A2	0,315	0,315	0,315	0,315
A3	0,342	0,342	0,342	0,342

Comparação alternativas normalizada (C3)

C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C4)

C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C5)

C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,474	0,474	0,474	0,474
A2	0,474	0,474	0,474	0,474
A3	0,053	0,053	0,053	0,053

Matriz comparação Alternativas (normalizada)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,407	0,343	0,333	0,333	0,474
A2	0,288	0,315	0,333	0,333	0,474
A3	0,305	0,342	0,333	0,333	0,053

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	0,383
A2	0,330
A3	0,286

Figura 5. 16. Comparação Binária das Alternativas de Percurso entre Clientes 1 e 3.

Comparação alternativas (C1)

C1	A1	A2	A3
A1	1,000	1,032	0,898
A2	0,969	1,000	0,870
A3	1,114	1,150	1,000
Soma	3,083	3,182	2,768

Comparação alternativas (C2)

C2	A1	A2	A3
A1	1,000	0,675	1,215
A2	1,481	1,000	1,800
A3	0,823	0,556	1,000
Soma	3,304	2,231	4,015

Comparação alternativas (C3)

C3	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C4)

C4	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C5)

C5	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas normalizada (C1)

C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,324	0,324	0,324	0,324
A2	0,314	0,314	0,314	0,314
A3	0,361	0,361	0,361	0,361

Comparação alternativas normalizada (C2)

C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,303	0,303	0,303	0,303
A2	0,448	0,448	0,448	0,448
A3	0,249	0,249	0,249	0,249

Comparação alternativas normalizada (C3)

C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C4)

C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C5)

C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Matriz comparação Alternativas (normalizada)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,324	0,303	0,333	0,333	0,333
A2	0,314	0,448	0,333	0,333	0,333
A3	0,361	0,249	0,333	0,333	0,333

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	0,326
A2	0,339
A3	0,335

Figura 5. 17. Comparação Binária das Alternativas de Percurso entre Cliente 1 e Aterro.

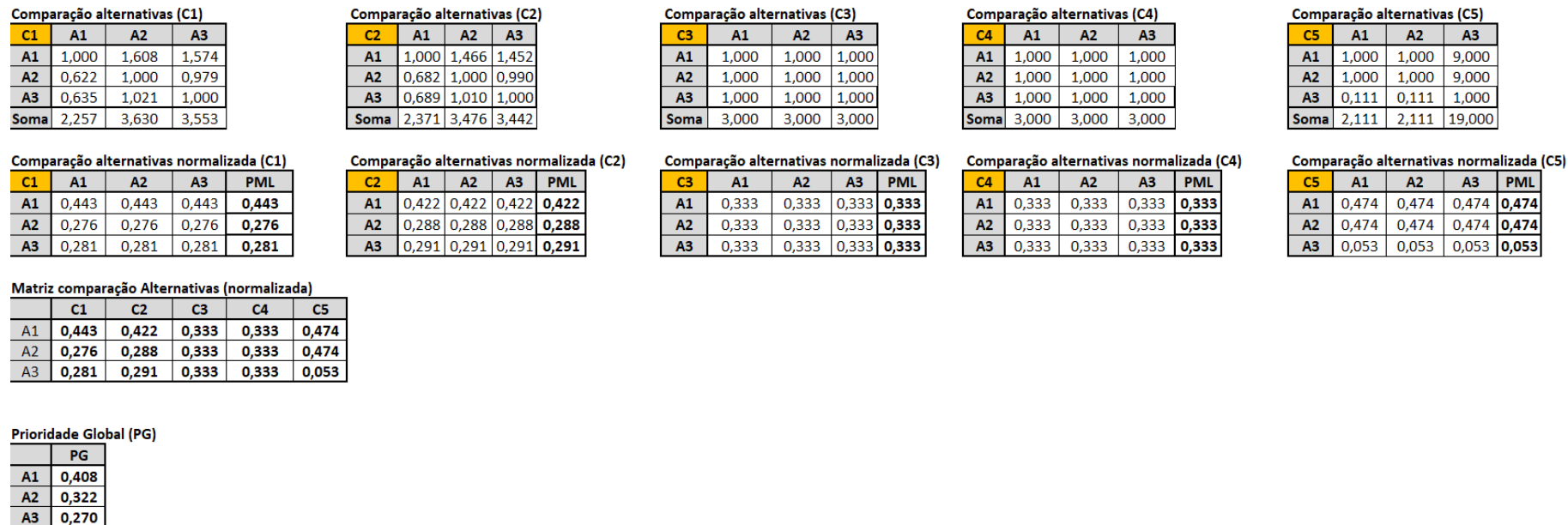


Figura 5. 18. Comparação Binária das Alternativas de Percurso entre Clientes 2 e 3.

Comparação alternativas (C1)				
C1	A1	A2	A3	
A1	1,000	1,472	1,525	
A2	0,679	1,000	1,036	
A3	0,656	0,965	1,000	
Soma	2,335	3,437	3,561	

Comparação alternativas (C2)				
C2	A1	A2	A3	
A1	1,000	1,027	0,802	
A2	0,974	1,000	0,781	
A3	1,247	1,281	1,000	
Soma	3,222	3,307	2,583	

Comparação alternativas (C3)				
C3	A1	A2	A3	
A1	1,000	1,000	1,000	
A2	1,000	1,000	1,000	
A3	1,000	1,000	1,000	
Soma	3,000	3,000	3,000	

Comparação alternativas (C4)				
C4	A1	A2	A3	
A1	1,000	9,000	1,000	
A2	0,111	1,000	0,111	
A3	1,000	9,000	1,000	
Soma	2,111	19,000	2,111	

Comparação alternativas (C5)				
C5	A1	A2	A3	
A1	1,000	1,000	1,000	
A2	1,000	1,000	1,000	
A3	1,000	1,000	1,000	
Soma	3,000	3,000	3,000	

Comparação alternativas normalizada (C1)				
C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,428	0,428	0,428	0,428
A2	0,291	0,291	0,291	0,291
A3	0,281	0,281	0,281	0,281

Comparação alternativas normalizada (C2)				
C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,310	0,310	0,310	0,310
A2	0,302	0,302	0,302	0,302
A3	0,387	0,387	0,387	0,387

Comparação alternativas normalizada (C3)				
C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C4)				
C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,474	0,474	0,474	0,474
A2	0,053	0,053	0,053	0,053
A3	0,474	0,474	0,474	0,474

Comparação alternativas normalizada (C5)				
C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Matriz comparação Alternativas (normalizada)					
	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,428	0,310	0,333	0,474	0,333
A2	0,291	0,302	0,333	0,053	0,333
A3	0,281	0,387	0,333	0,474	0,333

Prioridade Global (PG)	
	PG
A1	0,396
A2	0,260
A3	0,344

Figura 5. 19. Comparação Binária das Alternativas de Percurso entre Cliente 2 e Aterro.

Comparação alternativas (C1)

C1	A1	A2	A3
A1	1,000	1,263	1,067
A2	0,792	1,000	0,845
A3	0,937	1,184	1,000
Soma	2,729	3,447	2,912

Comparação alternativas (C2)

C2	A1	A2	A3
A1	1,000	0,836	0,993
A2	1,196	1,000	1,188
A3	1,007	0,842	1,000
Soma	3,203	2,678	3,181

Comparação alternativas (C3)

C3	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C4)

C4	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas (C5)

C5	A1	A2	A3
A1	1,000	1,000	1,000
A2	1,000	1,000	1,000
A3	1,000	1,000	1,000
Soma	3,000	3,000	3,000

Comparação alternativas normalizada (C1)

C1	A1	A2	A3	PML
A1	0,366	0,366	0,366	0,366
A2	0,290	0,290	0,290	0,290
A3	0,343	0,343	0,343	0,343

Comparação alternativas normalizada (C2)

C2	A1	A2	A3	PML
A1	0,312	0,312	0,312	0,312
A2	0,373	0,373	0,373	0,373
A3	0,314	0,314	0,314	0,314

Comparação alternativas normalizada (C3)

C3	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C4)

C4	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Comparação alternativas normalizada (C5)

C5	A1	A2	A3	PML
A1	0,333	0,333	0,333	0,333
A2	0,333	0,333	0,333	0,333
A3	0,333	0,333	0,333	0,333

Matriz comparação Alternativas (normalizada)

	C1	C2	C3	C4	C5
A1	0,366	0,312	0,333	0,333	0,333
A2	0,290	0,373	0,333	0,333	0,333
A3	0,343	0,314	0,333	0,333	0,333

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	0,345
A2	0,320
A3	0,335

Figura 5. 20. Comparação Binária das Alternativas de Percurso entre Cliente 3 e Aterro.

5.3. Etapa II

A tabela 5.1 corresponde ao resumo geral dos resultados do modelo de AHP, onde se mostram as preferências globais das melhores alternativas de deslocamento entre os diferentes alvos. Os elementos desta matriz de preferência se constituem nos coeficientes da função objetivo do modelo de Programação Linear Inteira da Etapa II.

Tabela 5. 1. Preferências Globais das Diversas Alternativas de Deslocamento.

Matriz Geral de PG				
	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Aterro
Sede	0,379	0,337	0,344	0,000
Cliente 1	0,000	0,375	0,365	0,339
Cliente 2	0,375	0,000	0,452	0,396
Cliente 3	0,365	0,452	0,000	0,345

Além dos cinco alvos já citados, nesta aplicação foi considerada uma frota de dois veículos. Na tabela 5.12 constam as quantidades de resíduo geradas por cada cliente assim como a capacidade máxima de transporte de cada um dos dois veículos considerados.

Tabela 5. 2. Quantidades de resíduo produzida e capacidade de transporte dos veículos.

Cliente	Resíduo produzido (kg/mês)	Veículo	Capacidade máxima de transporte (kg)
1	8.000	1	10.700
2	6.900	2	9.500
3	2.000		

Com base nos dados específicos desta simulação, a formulação genérica do modelo de Programação Linear Inteira apresentada no capítulo anterior será explicitada a

continuação. Reiterando que a estudo de caso restringe-se a apenas coleta de resíduo não reciclável.

5.3.1. Variáveis de decisão:

x_{ijk} : decisão de ir ($x_{ijk}=1$), ou não ($x_{ijk}=0$) do alvo (sede da empresa ou cliente) i para o alvo (cliente ou aterro) j , com o veículo k .

$i=0,1,2,3$

$j=1,2,3,4$

$k=1,2$

5.3.2. Função objetivo:

Maximizar a preferência (Z) do percurso total feito pelos veículos da empresa para recolher o resíduo não reciclável, isto é, desde a saída da sede da empresa, passando pelos diversos clientes, até chegar ao aterro sanitário que é o destino final de todas as rotas.

Observação: o subíndice “0” será sempre a sede da empresa, enquanto o subíndice “4” indicará sempre o aterro sanitário. Os demais valores de os subíndices corresponderão aos diversos clientes. Deste modo tem-se:

$i=0$: veículo saindo da sede da empresa

$i=1$: veículo saindo do cliente 1

$i=2$: veículo saindo do cliente 2

$i=3$: veículo saindo do cliente 1

$j=1$: veículo chegando ao cliente 1

$j=2$: veículo chegando ao cliente 2

$j=3$: veículo chegando ao cliente 3

$j=4$: veículo chegando ao aterro sanitário

$$\begin{aligned} \max Z = & 0,379. (x_{010} + x_{012}) + 0,337. (x_{021} + x_{022}) + 0,344. (x_{031} + x_{032}) \\ & + 0,375. (x_{121} + x_{122}) + 0,365. (x_{131} + x_{132}) + 0,339. (x_{141} + x_{142}) \\ & + 0,375. (x_{211} + x_{212}) + 0,452. (x_{231} + x_{232}) + 0,396. (x_{241} + x_{242}) \\ & + 0,365. (x_{311} + x_{312}) + 0,452. (x_{321} + x_{322}) + 0,345. (x_{341} + x_{342}) \end{aligned}$$

5.3.3. Restrições

A formulação compacta das restrições foi apresentada no capítulo 4, de modo que a continuação, na mesma sequência serão detalhadas essas mesmas restrições para as condições específicas do caso de estudo.

Restrição 1: Garantia de que apenas um veículo “k” visite cada cliente “i” e, obviamente, uma única vez.

$$x_{121} + x_{122} + x_{131} + x_{132} + x_{141} + x_{142} = 1$$

$$x_{211} + x_{212} + x_{231} + x_{232} + x_{241} + x_{242} = 1$$

$$x_{311} + x_{312} + x_{321} + x_{322} + x_{341} + x_{342} = 1$$

Restrição 2: Garantia que para chegar no alvo destino deve-se partir de apenas um outro alvo

$$x_{011} + x_{211} + x_{311} = 1$$

$$x_{021} + x_{121} + x_{321} = 1$$

$$x_{031} + x_{131} + x_{231} = 1$$

$$x_{141} + x_{241} + x_{341} = 1$$

$$x_{012} + x_{212} + x_{312} = 1$$

$$x_{022} + x_{122} + x_{322} = 1$$

$$x_{032} + x_{132} + x_{232} = 1$$

$$x_{142} + x_{242} + x_{342} = 1$$

Restrição 3: Garantia de que cada alvo será atendido uma única vez (evitar viagens de ida e volta para o mesmo alvo)

$$x_{011} + x_{101} \leq 1$$

$$x_{121} + x_{211} \leq 1$$

$$x_{131} + x_{311} \leq 1$$

$$x_{141} + x_{411} \leq 1$$

$$x_{231} + x_{321} \leq 1$$

$$x_{241} + x_{421} \leq 1$$

$$x_{341} + x_{431} \leq 1$$

$$x_{012} + x_{102} \leq 1$$

$$x_{122} + x_{212} \leq 1$$

$$x_{132} + x_{312} \leq 1$$

$$x_{142} + x_{412} \leq 1$$

$$x_{232} + x_{322} \leq 1$$

$$x_{242} + x_{422} \leq 1$$

$$x_{342} + x_{432} \leq 1$$

Restrição 4: Tipo de variável

$$x_{ijk} \in \{0; 1\} \text{ (binária) } i = 0,1,2,3; j = 1,2,3,4; k = 1,2$$

Restrição 5: Os veículos devem necessariamente circular, isto é, não pode ter como origem e destino o mesmo alvo.

$$x_{111} = 0$$

$$x_{221} = 0$$

$$x_{331} = 0$$

$$x_{112} = 0$$

$$x_{222} = 0$$

$$x_{332} = 0$$

Restrição 6: Os veículos devem necessariamente ter como origem a sede da empresa.

$$x_{011} + x_{021} + x_{031} = 1$$

$$x_{012} + x_{022} + x_{032} = 1$$

Restrição 7: Os veículos devem necessariamente ter ponto final da rota o aterro sanitário.

$$x_{141} + x_{241} + x_{341} = 1$$

$$x_{142} + x_{242} + x_{342} = 1$$

Restrição 8: Os veículos não podem sair da sede da empresa e ir diretamente ao aterro sanitário, sem passar pelos clientes e recolher o resíduo correspondente.

$$x_{041} = 0$$

$$x_{042} = 0$$

Restrição 9: Os veículos não podem transportar uma carga maior a sua capacidade.

$$8.000. (x_{121} + x_{131} + x_{141}) + 6.900. (x_{211} + x_{231} + x_{241}) + 2.000. (x_{311} + x_{321} + x_{341}) \leq 10.700$$

$$8.000. (x_{122} + x_{132} + x_{142}) + 6.900. (x_{212} + x_{232} + x_{242}) + 2.000. (x_{312} + x_{322} + x_{342}) \leq 9.500$$

Restrição 10: Os veículos devem necessariamente recolher todo o resíduo produzido pelos clientes.

$$8.000. (x_{121} + x_{131} + x_{141} + x_{122} + x_{132} + x_{142}) + 6.900. (x_{211} + x_{231} + x_{241} + x_{212} + x_{232} + x_{242}) + 2.000. (x_{311} + x_{321} + x_{341} + x_{312} + x_{322} + x_{342}) = 16.900$$

Restrição 11: Restrição de continuidade da rota para assegurar que se um veículo chega num determinado alvo (cliente), esse veículo deveria sair do mesmo alvo para o alvo (cliente ou aterro).

$$x_{011} + x_{211} + x_{311} - x_{121} - x_{131} - x_{141} = 0$$

$$x_{021} + x_{121} + x_{321} - x_{211} - x_{231} - x_{241} = 0$$

$$x_{031} + x_{131} + x_{231} - x_{311} - x_{321} - x_{341} = 0$$

$$x_{012} + x_{212} + x_{312} - x_{122} - x_{132} - x_{142} = 0$$

$$x_{022} + x_{122} + x_{322} - x_{212} - x_{232} - x_{242} = 0$$

$$x_{032} + x_{132} + x_{232} - x_{312} - x_{322} - x_{342} = 0$$

5.3.4. Resultados

Na tabela 5.13 são apresentados os resultados obtidos. Como foi imposta a restrição de que cada cliente podia ter seu resíduo recolhido por apenas um veículo e levando em consideração que a capacidade máxima de transporte dos veículos considerados é inferior ao total de resíduo produzido, a solução mostrou a necessidade de utilizar os dois veículos.

Tabela 5. 3. Rotas otimizadas para a frota de recolhimento de resíduos sólidos

Veículo	Variáveis de decisão											Carga Total (kg)	
	x ₀₁	x ₀₂	x ₀₃	x ₁₂	x ₁₃	x ₁₄	x ₂₁	x ₂₃	x ₂₄	x ₃₁	x ₃₂		x ₃₄
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	8.000
2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	8.900

A interpretação dos dados da tabela 5.13 possibilita identificar as rotas dos dois veículos.

A saber:

Veículo 1: sai da sede da empresa e se dirige ao cliente 1 ($x_{011} = 1$), faz o carregamento de 8.000 kg de resíduo e logo parte diretamente ao aterro sanitário ($x_{141} = 1$).

Veículo 2: sai da sede da empresa e se dirige ao cliente 3 ($x_{032} = 1$), faz o carregamento de 2.000 kg de resíduo e logo se dirige ao cliente 2 ($x_{322} = 1$) onde recolhe 6.900 kg de resíduo. Finalmente, encaminha-se ao aterro sanitário ($x_{242} = 1$).

Obviamente, o modelo implementado na Etapa II permite a mudança das quantidades de resíduo produzida por cada cliente como também a possibilidade de considerar veículos com outras capacidades máxima de carga. Para exemplificar o cálculo das rotas na eventual mudança dos veículos disponíveis foi conduzida uma nova simulação com os dados da tabela 5.14, cujos resultados estão na figura 5.21.

Tabela 5. 4. Quantidade de resíduos produzida e capacidade de transporte dos veículos

Cliente	Resíduo produzido (kg/mês)	Veículo	Capacidade máxima de transporte (kg)
1	8.000	1	7.000
2	6.900	2	11.000
3	2.000		



Veículo	Variáveis de decisão												Carga Total (kg)
	x ₀₁	x ₀₂	x ₀₃	x ₁₂	x ₁₃	x ₁₄	x ₂₁	x ₂₃	x ₂₄	x ₃₁	x ₃₂	x ₃₄	
1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	6.900
2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	10.000

Figura 5. 21. Rotas otimizadas para a frota de recolhimento de resíduos sólidos

Para esta nova condição, as rotas são:

Veículo 1: sai da sede da empresa e se dirige ao cliente 2 ($x_{021} = 1$), faz o carregamento de 6.900 kg de resíduo e logo parte diretamente ao aterro sanitário ($x_{241} = 1$).

Veículo 2: sai da sede da empresa e se dirige ao cliente 1 ($x_{012} = 1$), faz o carregamento de 8.000 kg de resíduo e logo se dirige ao cliente 3 ($x_{132} = 1$) onde recolhe 2.000 kg de resíduo. Finalmente, encaminha-se ao aterro sanitário ($x_{342} = 1$).

Como era de esperar, em todas as simulações se observa que todos os clientes foram atendidos, recolhendo a totalidade do resíduo produzido e respeitando a capacidade máxima de transporte de cada veículo. Também não foram observados cruzamento de rotas ou a geração de subrotas, não havendo conseqüentemente a necessidade de implementar restrições adicionais ao problema.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com este trabalho foi possível obter uma estrutura básica para a logística de operações de uma empresa de gestão de resíduos, além disso é possível fazer o desenvolvimento e a expansão para que este seja implementado no futuro e seja aplicado para qualquer um dos três módulos apresentados inicialmente (módulo econômico/financeiro, módulo gestão de pessoal e módulo rota).

Por ter sido criado um modelo genérico é possível adicionar na formulação outras variáveis que não foram levadas em consideração como por exemplo: um maior número de clientes, outros veículos, alterar a capacidade dos veículos utilizados, adicionar outras restrições como a janela temporal que foi utilizada em alguns outros trabalhos referenciados. Esses outros critérios não foram levados em consideração no desenvolvimento do trabalho por conta das limitações apresentadas pelos softwares gratuitos disponíveis para uso.

Outra coisa que se pode observar durante o desenvolvimento do trabalho foi que a utilização do mesmo programa (Excel) para fazer tanto a etapa 1 de Análise de Prioridade Hierárquica, quanto a etapa 2 de Programação Linear Inteira, possibilitou uma maior facilidade para a conferência dos dados, pois como tudo estava interligado quando era feito uma alteração na primeira parte do modelo automaticamente a segunda parte era alterada.

Conclui-se também que a combinação dos dois métodos foi a melhor escolha para traçar o percurso mais eficiente, pois apesar do modelo de Análise de Prioridades Hierárquicas ter a vantagem de levar em conta variáveis qualitativas, este possui a limitação de apenas conseguir comparar pares de alternativas e não o percurso completo, enquanto que apesar da programação linear tem a limitação de não levar em conta critérios qualitativos, mas ao utilizar os valores obtidos na matriz geral de prioridades, da análise hierárquica como coeficientes da função objetivo essa limitação foi desconsiderada e foi possível levar em conta também variáveis quantitativas.

Ademais, pode-se concluir que apesar da maioria dos trabalhos utilizarem a função objetivo para maximizar algum benefício ou minimizar a distância percorrida, este trabalho trouxe uma nova proposta dando a oportunidade de sem conhecer os custos, mas utilizando variáveis que impactam diretamente nos custos, maximizar assim a preferência

pelo percurso que possui mais vantagens economicamente, apesar dessas vantagens não serem mensuradas de maneira direta.

Recomenda-se para os trabalhos futuros a utilização de softwares que não possuam como limitante a quantidade de restrições que podem ser acrescentadas, pois isso restringe a capacidade de fazer uma simulação mais próxima da realidade.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baba, C. M.; Corrêa, F. H. M.; de Souza, S. A. C; Whaba, T. M.; Medina, A. C. (2004). Otimização da colônia de formigas aplicada ao problema da programação e roteirização de veículos para o transporte de pessoas portadoras de deficiência. XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Florianópolis, SC, Brasil. 35.
- Barão, R. F. Kripka, M. (2008). Determinação da rota ótima para coleta de resíduos sólidos urbanos no município de Passo Fundo – RS. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 31. Belém. Anais.
- Bilber, J. (2012). “Gestão de Rotas na Recolha de Resíduos”, Tese de mestrado, Porto, FEUP.
- Caccalano, L.; Da Cunha, C. (2015). Roteirização de veículos para o abastecimento de linhas de produção. São Carlos: Gestão e Produção.
- Colvero, D.A. (2014). Análise das rotas tecnológicas existentes para os resíduos sólidos urbanos no município da Cidade Ocidental – GO,130 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade 113 Federal de Goiás, Programa de Pesquisa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente.
- Costa, H. G. (2002). Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão. XXXVI SBPO. Niterói/RJ.
- Cunha, C. B. da. (2000). Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. *TRANSPORTES*, 8(2). <https://doi.org/10.14295/transportes.v8i2.188>.
- Da Conceição, R. S. (2018). Uso do método AHP na tomada de decisão para seleção de uma rota tecnológica aplicada ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Universidade de Caxias do Sul.
- Da Silva, A. A., Lins, S. L. S., & da Silva Xavier, A. (2020). Uma aplicação do problema do carteiro chinês direcionado na coleta de resíduo urbano/An application of the chinese wallet problem targeted in urban waste collection. *Brazilian Journal of Development*, 6(5), 24640-24659.
- De Bittencourt, G. C., Rodrigues, S., Boaventura-Netto, P., Jurkiewicz, S. (2013). Comparação solução manual-busca dispersa em um caso do problema de roteamento

- de veículos capacitados. *Revista del Instituto Chileno de Investigación de Operaciones*, v. 3, n. 1, p. 11-20.
- Fortunato, R.J.A. (2014). "Problema de determinação de circuitos de recolha de resíduos sólidos urbanos da Câmara Municipal de Oeiras", Maestria, Universidade de Lisboa. Instituto Superior de Economia e Gestão., Lisboa, Portugal.
- Guimarães, T. A. (2012). Uma nova abordagem heurística para a resolução do problema do roteamento de veículos capacitados com restrições tridimensionais de carregamento. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.
- Martins, E. M. O.; Silva, F. F.; Vieira, A. S.; Ventura, A. A. e Júnior, R. V. (2014). Determinação do percurso mínimo para coleta seletiva de resíduos sólidos na cidade de Sousa no sertão do estado da Paraíba. *Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, 6(2), 268-278.
- Missio, F. M., & Jacobi, L. F. (2007). Variáveis Dummy: Especificações de Modelos com Parâmetros Variáveis. *Ciência E Natura*, 29(1), 111–135. <https://doi.org/10.5902/2179460X9764>.
- Oliveira Filho, P.C. Lopes, E. S.; Magraf, W. Disperati, A. A. (2005). Determinação da rota ótima de transporte com auxílio de um sistema de informação geográfica. *Ciência Florestal*, v. 15, n. 4. p. 403-409, 2005. ISSN: 0103-9954.
- Ozeki, F. L.; Ando, F. K.; Lima, A. H. P.; Yoshizaki, H. T. Y. O Problema do Milk Run: Aplicação de um Modelo de Estoque-Roteirização em uma Indústria de Alimentos. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 20/International Conference on Industrial Engineering and Operations Management 6, São Paulo. Anais, São Paulo: EPUSP/FCAV, 2000.
- Saaty, T. L. (1991). *Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process Behaviormetrika*, v. 29, p. 1-9.
- Silva, A.L.B. (2014). Análise Multicritério para avaliação de rotas cicláveis integradas ao transporte público. Dissertação (mestrado). Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. 207f.

- Silva, J.N.Y., Silva, M.C., Gomes, H.C. (2019). Aplicação do Método Simulated Annealing para Determinar as Rotas de uma Empresa Distribuidora de Bebidas, XIX Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha.
- Sosa, N. G. M., Galvão, R. D. e Gandelman, D. A. (2007). Algoritmo de busca dispersa aplicado ao problema clássico de roteamento de veículos. *Pesqui. Oper.* [online]. 27, n.2, p. 293-310, (<http://dx.doi.org/10.1590/S0101-74382007000200006> 10-2011)
- Souza, F. S.; Guardia, L. E. T. (2007). Aplicação do modelo de roteamento e programação de veículos à distribuição de fardamento destinada aos postos de vendas e de encomendas na Marinha do Brasil. Centro de Análise de Sistemas Navais. SPOLM 2007, Rio de Janeiro.