



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VALQUIRIA MELO SOUZA CORREIA

**MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO E MODELO DE
OTIMIZAÇÃO DE ROTA APLICADOS À COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM
CENTROS URBANOS**

FORTALEZA

2019

VALQUIRIA MELO SOUZA CORREIA

MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO E MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE
ROTA APLICADOS À COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM CENTROS URBANOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof.a Dra. Marisete Dantas de Aquino.

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Clécio Fontelles Thomaz

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C849m Correia, Valquiria Melo Souza.

Método multicritério de apoio à decisão e modelo de otimização de rota aplicados à coleta de resíduos sólidos em centros urbanos / Valquiria Melo Souza Correia. – 2019.

183 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Marisete Dantas de Aquino.

1. Análise multicriterial. 2. Problema do Carteiro Chinês. 3. Gestão dos resíduos sólidos urbanos. 4. Metodologia M-Macbeth. I. Título.

CDD 628

VALQUIRIA MELO SOUZA CORREIA

MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À DECISÃO E MODELO DE OTIMIZAÇÃO DE
ROTA APLICADOS À COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM CENTROS URBANOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 05/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof.a Dra. Marisete Dantas de Aquino (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Clécio Fontelles Thomaz (Co-Orientador)
Instituto de Tecnologia da Informação e Comunicação (ITIC)

Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcus Vinícius Sousa Rodrigues
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Ao Nosso Senhor e Salvador, Jesus Cristo.

Aos meus pais, Francisco Tarcísio e Joana
D'Arc, e irmãos, Valéria e Wagner.

Ao meu marido amado, Marcílio Correia.

Ao meu maravilhoso filho, Daniel Melo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em minha vida, me protegendo e dando força nas horas mais difíceis, pois essa trajetória não foi fácil.

Agradecimento especial expresso a minha orientadora, Prof.a Dra. Marisete Dantas de Aquino, pelos seus ensinamentos, mas, principalmente, pela compreensão, carinho, atenção e paciência, o que muito contribuiu para condução desta pesquisa e ao co-orientador, Prof. Dr. Antônio Clécio Fontelles Thomaz, pela orientação e sincera amizade.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, pelos ensinamentos repassados, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao professor Raimundo (*in memoriam*) pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade.

Ao meu marido Marcílio Luís Viana Correia pela ajuda incansável, apoio sempre presente, passo certo e confiante em busca do caminho confiado pelo Nosso Senhor Jesus, pelo incentivo, ajuda em cada detalhe do nosso caminhar e por comparecer em um momento tão especial da minha vida pessoal e profissional. Essa é mais uma vitória que conquistamos juntos.

Ao meu filho, Daniel Melo, que, pelo milagre da sua vida, enche de sentido a minha estada e luta no mundo... você é meu orgulho! Agradeço pelo apoio contínuo e pelo entendimento nas minhas horas de ausência. Isso tudo também é por você.

Aos meus pais, Francisco Tarcísio de Souza e Joana D'Arc de Melo Souza, pelos exemplos tangíveis de que o esforço sempre vale a pena e a certeza de que o amor de vocês me move diariamente ao meu melhor; assim como pelo apoio diário e o amor. Meu mais sincero agradecimento. Vocês são muito importantes.

Aos meus irmãos Wagner Melo e Valéria Melo, pelo incentivo sempre encorajador. A nova família Luciana Amaral (cunhada) e Marcelo Pinheiro (cunhado) e aos meus sobrinhos Yasmim e João Rafael pelas novas alegrias que enchem meu coração de esperança.

Agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, por todas as condições que propiciaram o desenvolvimento do Doutorado.

Agradeço à Universidade Federal do Ceará, pelas condições que propiciaram o desenvolvimento de minha tese de doutoramento.

Agradeço à Prefeitura Municipal do Crato, à Associação dos Agentes Recicladores do Crato, ao Ministério Público do Crato, que participaram desta pesquisa, pela receptividade e disponibilização de informações fundamentais para realização desta tese.

Aos especialistas que também contribuíram consideravelmente na fatura da pesquisa.

Um agradecimento especial ao Mestre Rodrigo Bastos, pelo apoio nas ideias do CPP.

Um agradecimento muito especial ao professor Dr. Valdemar Siqueira Filho, pelo incentivo e encorajamento para a realização do doutorado.

Ao professor catedrático Carlos António Bana e Costa pelos esclarecimentos de dúvidas e disponibilização de referencial bibliográfico.

Aos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

O apoio de todos foi imprescindível para a conclusão dessa tese. Meu muito obrigada!

Que toda honra seja dada ao meu Senhor e Salvador Jesus! Glória a Deus!!!

*O mundo se move para o futuro como resultado de decisões,
não como resultado de planos. Planos são significativos
apenas na medida em que afetam as decisões... se o
planejamento não é parte de um processo de tomada de
decisão, é uma bolsa de vento, um pedaço de papel e
diagramas sem valor.*

- Kenneth E. Boulding

RESUMO

A sociedade contemporânea é cada vez mais desafiada no tratamento, destinação e disposição final adequada dos resíduos sólidos urbanos, pois estes configuram uma das maiores e mais complexas dificuldades de tomada de decisão. Em face disso, esta pesquisa tem como objetivo diagnosticar e aplicar um modelo de multicritério de apoio a decisão e de otimização de rotas à coleta de resíduos sólidos urbanos no Município do Crato. Foram constituídos 26 critérios de avaliação, agrupados em sete áreas de interesse: ambiental; social; econômicos; político/regulatório; planejamento/institucional;ecoinovação e tecnologias ambientais e estruturas de apoio. Além disso, impôs-se minimizar as distâncias percorridas pelo caminhão de coleta e de transporte dos resíduos sólidos urbanos pelos responsáveis de realizar a coleta de lixo, que percorrem as ruas (arcos) do bairro Centro, no Município do Crato/CE, apresentando um modelo de otimização para a melhoria do gerenciamento de coleta e transporte de resíduos sólidos. Para a realização desta pesquisa, foram consideradas as rotas dos caminhões de coleta convencional, que é realizado em dias e horários alternados da semana, preestabelecidos pela equipe de trabalho. O processo heurístico do estudo de caso foi desenvolvido pelo Problema do Carteiro Chinês Não Orientado, que possui como característica fazer o emparelhamento de nós de um grafo não direcionado. No que concerne aos procedimentos metodológicos, foi realizado um estudo de caso no Município do Crato-CE, com algumas etapas, tais como: contextualização; caracterização, informações básicas do Município e das características do seu fluxo de resíduos sólidos urbanos. Com isso, o modelo de multicritério M-Macbeth denota viabilidade, reaplicação e pertinência para outras avaliações de cunho institucional, comercial e qualificação da pesquisa, mostrando as macrofases da metodologia multicritério, mas sem descartar a opinião dos atuais tomadores de decisão no assunto. Quanto ao modelo do *Chinese Postman Problem* (CPP), baseado no modelo de Edmonds (1973), constrói uma arborescência, em que o circuito euleriano consiste uma tarefa trivial, embora com abordagem diferente de Euler. O resultado obtido é oriundo da associação do trabalho de campo e do modelo do CPP, com cuja limitação da quantidade de nós e arestas o modelo se tornou não dirigido. Quanto às rotas otimizadas, ao serem comparadas com as realizadas, proporcionam uma redução na distância total percorrida pelo veículo, o que pode acarretar uma economia significativa. Assim, se considerou apropriada e eficiente a utilização das ferramentas propostas para auxiliar na tomada de decisão, pelo fato de seus resultados serem precisos e condizentes com a situação analisada no trabalho.

Palavras-chave: Análise multicriterial. Problema do Carteiro Chinês. Gestão dos resíduos sólidos urbanos. Metodologia M-Macbeth.

ABSTRACT

Contemporary society is increasingly challenged in the treatment, disposal and proper final disposal of urban solid waste, since these constitute one of the largest and most complex decision-making difficulties. The objective of this research is to diagnose and apply a multicriteria decision support model and to optimize routes to the collection of municipal solid waste in the Municipality of Crato. Twenty-six evaluation criteria were grouped into seven areas of interest: environmental; Social; economic; political / regulatory; planning / institutional; eco-innovation and environmental technologies and support structures. In addition, it was necessary to minimize the distances traveled by the collection truck and the transportation of solid urban waste by those responsible for collecting garbage, which run through the streets (arcs) of the Centro district, in the Municipality of Crato / CE, presenting a optimization model for improving the management of solid waste collection and transportation. For the accomplishment of this research, the routes of the conventional trucks were considered, that is realized in alternating days and times of the week, pre-established by the work team. The heuristic process of the case study was developed by the Unmanned Chinese Postman Problem, which has the characteristic of pairing nodes of an undirected graph. As far as methodological procedures are concerned, a case study was carried out in the Municipality of Crato-CE, with some stages, such as: contextualization; characterization, basic information of the Municipality and the characteristics of its urban solid waste stream. Thus, the M-Macbeth multicriteria model denotes feasibility, reapplication and relevance to other institutional, commercial and research qualification evaluations, showing the macrophases of the multicriteria methodology, but without ruling out the opinion of the current decision-makers on the subject. As for the Chinese Postman Problem model, based on the Edmonds (1973) model, it constructs a tree structure, in which the Eulerian circuit is a trivial task, albeit with a different approach from Euler. The result obtained comes from the association of the fieldwork and the model of the CPP, with whose limitation of the number of nodes and edges the model became non-directed. Optimized routes, when compared to those performed, provide a reduction in the total distance traveled by the vehicle, which can lead to significant savings. Thus, it was considered appropriate and efficient the use of the proposed tools to assist in decision making, because their results are accurate and consistent with the situation analyzed in the work.

Keywords: Multicriteria analysis. Chinese Postman Problem. Management of solid urban waste. Methodology M-Macbeth.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– <i>Framework</i> do enquadramento metodológico da tese.....	29
Figura 2	– Escalonamento do uso de recursos.....	33
Figura 3	– Fluxograma de gerenciamento de resíduos sólidos.....	35
Figura 4	– Caracterização das sete pontes num grafo por Euler.....	56
Figura 5	– Modelo matemático do problema das sete pontes.....	57
Figura 6	– Aresta a_1 que liga os vértices n_1 e n_2	58
Figura 7	– Arco a_1 que liga os vértices n_1 e n_2	59
Figura 8	– Links l_1 e l_2 que liga os vértices n_1 , n_2 e n_3	59
Figura 9	– Grafo euleriano ou grafo unicursal.....	60
Figura 10	– Grafo semieuleriano.....	61
Figura 11	– (a) Grafo euleriano (b) Grafo semieuleriano.....	62
Figura 12	– Iteração do grafo euleriano.....	65
Figura 13	– Formulação matemática do CPP.....	68
Figura 14	– Fundamentos da decisão.....	69
Figura 15	– Etapas da Análise de Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA).....	72
Figura 16	– Macrofases da metodologia multicritério.....	76
Figura 17	– Fases do processo M-Macbeth de apoio multicritério à decisão.....	78
Figura 18	– Dinâmica do modelo Macbeth.....	80
Figura 19	– Estruturação e avaliação dos pesos dos critérios Macbeth.....	81
Figura 20	– Etapas de desenvolvimento da metodologia da pesquisa no Município do Crato.....	82
Figura 21	– Localização da Região Metropolitana do Cariri, 2012.....	83
Figura 22	– Localização geográfica do Município do Crato, em 2017.....	84
Figura 23	– <i>Etapas ideais do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos</i>	93

Figura 24	– Etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, no Município do Crato.....	94
Figura 25	– Vista geral de alguns materiais nos logradouros (A = lixeira térrea de concreto em passeio público, B = lixeira suspensa de aço em frente a um comércio). Crato – Ceará, em 2016.....	100
Figura 26	– Resíduos da construção civil (A = resíduos da construção civil no centro comercial do Crato, b = resíduos da construção civil à margem do canal do rio Grangeiro). Crato – Ceará, em 2016.....	105
Figura 27	– Disposição final dos resíduos sólidos no Município. Crato – Ceará, em 2017.....	107
Figura 28	– Mapa do Centro do Município do Crato, em 2016.....	111
Figura 29	– Caminhão compactador e implemento. Crato – Ceará, em 2017.....	116
Figura 30	– Imagem da rota 05 que se inicia na madrugada, no bairro Centro, no dia 18 de novembro.....	117
Figura 31	– Acondicionamento de resíduos sólidos. Crato - Ceará, em 2016.....	121
Figura 32	– Locais de armazenagem dos resíduos. Crato - Ceará, em 2016.....	122
Figura 33	– Pontos de coleta dos resíduos, em terreno às margens do rio Grangeiro e próximo ao Mercado Público. Crato - Ceará, em 2016.....	122
Figura 34	– Gargalos do trânsito local (A = conflitos com automóveis e desrespeito à legislação de trânsito, B = rua estreita). Crato - Ceará, em 2016.....	123
Figura 35	– Galpão da Associação dos Agentes Recicladores do Crato (A = vista geral, B = vista lateral), em 2016.....	124
Figura 36	– Carregamento de caminhão com materiais recicláveis, pelos associados. Crato - Ceará, em 2016.....	125
Figura 37	– Ponto de coleta de bag com papelões, em frente ao Banco do Nordeste. Crato - Ceará, em 2016.....	125
Figura 38	– Vista geral de alguns materiais selecionados na associação (A = tampas, B = latinhas, C = PET, D = embalagem “Brilux”). Crato - Ceará, em 2016.....	126

Figura 39	– Imagem satélite entre o bairro Centro e o lixão no Município do Crato – Ceará, 2017.....	127
Figura 40	– Lixiviado no lixão do Crato – Ceará, em 2017.....	127
Figura 41	– “Loteamento” de armazenagem no lixão (A = casa, carro e bags, B = barraco, bags). Crato - Ceará, em 2016.....	128
Figura 42	– Árvore de valor com os critérios e descritores de impactos introduzidos e a serem avaliadas pelo software M-Macbeth.....	129
Figura 43	– Introdução dos níveis de performance do critério de interesse da população, no software M-Macbeth.....	130
Figura 44	– Tabela de performances. Gestores de RSU. Crato – Ceará.....	133
Figura 45	– Matriz de ordenação de níveis de performances num critério.....	134
Figura 46	– Julgamentos, escala de valor e a escala termométrica do critério valorização do RSU.....	135
Figura 47	– Matriz de julgamentos para a ponderação dos critérios, para gestores de RSU. Crato – Ceará.....	136
Figura 48	– Tabela de pontuações dos critérios, para gestores de RSU. Crato – Ceará...	137
Figura 49	– Termômetro global de pontuações.....	138
Figura 50	– Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G1. Crato-Ceará.....	139
Figura 51	– Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G2. Crato-Ceará.....	139
Figura 52	– Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G3. Crato-Ceará.....	140
Figura 53	– Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G4. Crato-Ceará.....	140
Figura 54	– Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G5. Crato-Ceará.....	141
Figura 55	– Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G6. Crato-	

	Ceará.....	141
Figura 56	– Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G7. Crato- Ceará.....	142
Figura 57	– Perfis das diferenças entre as opções do decisor G7 e G5. Crato- Ceará.....	143
Figura 58	– Análise de sensibilidade de peso de valorização dos RSU.....	144
Figura 59	– Ruas dispostas no mapa do bairro Centro do Município do Crato – Ceará, em 2017.....	148
Figura 60	– Grafo final ajustado do estudo de caso. Crato, Ceará. 2017.....	149

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Classificação das pesquisas.....	30
Gráfico 2 – Resumo referente aos RSU de abrangência nacional.....	40
Gráfico 3 – Comparação do antes e depois (esperado) da Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010).....	43
Gráfico 4 – Aplicações de roteirização.....	47
Gráfico 5 – Classificação dos problemas de roteirização pura.....	49
Gráfico 6 – Problemas de roteirização e programação.....	50
Gráfico 7 – Problema e descrição.....	51
Gráfico 8 – Roteirização e programação.....	52
Gráfico 9 – Classificação dos resíduos sólidos.....	53
Gráfico 10 – Problemas de otimização de rotas.....	54
Gráfico 11 – Critérios de rotas.....	62
Gráfico 12 – Problema de roteamento.....	62
Gráfico 13 – Elementos da decisão.....	70
Gráfico 14 – Pontos positivos e negativos referentes aos modelos de análise multicritério.....	75
Gráfico 15 – Etapas de programação linear.....	80
Gráfico 16 – Estrutura arborescente do modelo da gestão dos RSU no Município do Crato.....	86
Gráfico 17 – Priorização dos critérios.....	91
Gráfico 18 – Peso dos critérios e o tipo de atendimento.....	92
Gráfico 19 – Quantidade de veículos de coleta de RSU, no Município do Crato – Ceará, em 2016.....	98
Gráfico 20 – Percentual da frequência de coleta de resíduos no Crato – Ceará, em 2016	100
Gráfico 21 – Rota e frequência de coleta. Crato – Ceará, em 2016.....	101

Gráfico 22 – Ecopontos, no Município Crato, em 2017.....	104
Gráfico 23 – Rotas da reciclagem no Município Crato, em 2017.....	105
Gráfico 24 – Tipos de coleta dos resíduos no Município. Crato – Ceará, em 2017.....	106
Gráfico 25 – Descrição dos profissionais atuantes no Município do Crato, em 2017.....	108
Gráfico 26 – Dados dos colaboradores da rota 05. Crato – Ceará, em 2016.....	112
Gráfico 27 – Forma de coleta dos resíduos sólidos, no bairro Centro no momento da coleta convencional, 2016.....	113
Gráfico 28 – Atividades da rota 05 que se inicia na madrugada, no bairro Centro, no dia 18 de novembro de 2016.....	114
Gráfico 29 – Percurso produtivo do veículo de coleta de RSU, no bairro Centro do Crato, no dia 18 de novembro de 2016.....	114
Gráfico 30 – Percurso improdutivo do veículo de coleta de RSU, no bairro Centro do Crato, no dia 18 de novembro de 2016.....	115
Gráfico 31 – Percurso total do veículo de coleta de RSU, no bairro Centro do Crato, no dia 18 de novembro de 2016.....	115
Gráfico 32 – Componentes ambientais, Região do Cariri, 2017.....	119
Gráfico 33 – Descrição das áreas de interesse que formam o modelo.....	131
Gráfico 34 – Descrição dos critérios que foram definidos no modelo.....	131
Gráfico 35 – Descrição de impacto dos critérios.....	133
Gráfico 36 – Resultados do grafo final. Crato – Ceará, em 2017.....	150
Gráfico 37 – Resumo de abordagens encontradas na literatura nacional e internacional sobre método de multicritério de apoio à decisão na gestão de RSU.....	152
Gráfico 38 – Resumo de abordagens encontradas na literatura nacional e internacional sobre problema do carteiro chinês para coleta de resíduos sólidos urbanos.....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de estabelecimentos, segundo divisão CNAE – Município: Crato/CE – anos 2014/2016.....	94
Tabela 2 – Materiais coletados pela Associação dos Agentes Recicladores de Crato.....	103
Tabela 3 – Ruas do bairro Centro a serem percorridas. Crato – Ceará, em 2017.....	146
Tabela 4 – Simulação do consumo de combustível da rota do Bairro Centro.....	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AARC	Associação dos Agentes Recicladores do Crato
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AMD	Apoio Multicritério à Decisão
ANP	Agência Nacional de Petróleo
CF	Constituição Federal
CIWMB	<i>California Integrated Waste Management Board</i>
CNAE	Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CNM	Confederação Nacional dos Municípios
COGERH	Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Ceará
COMEGE	Comercial de Medicamentos Gentil
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEA	<i>Data Envelopmen Analysis</i>
DMU	<i>Decision Making Units</i>
ELECTRE	<i>Elimination and Choice Expressing Reality</i>
EPA	Elementos Primários de Avaliação
EPA	<i>Environment Protection Agency</i>
GIRS	Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
GRS	Gestão de Resíduos Sólidos
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INSS	Instituto Nacional do Seguro Social

IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
ISWA	Associação Internacional de Resíduos Sólidos
LNSB	Lei Nacional de Saneamento Básico
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Basead Evaluation Technique</i>
MCA	Métodos de Análise Multicritério
MCDA	<i>Multiple Criteria Decision Analysis</i>
MCDM	Tomada de Decisão Multicritério
MINFRA	Ministério de Infraestrutura
MLD	Matriz de Levantamento de Dados
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MPCE	Ministério Público do Estado do Ceará
MPF	Ministério Público Federal
MTPS	Ministério do Trabalho e Previdência Social
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
ONU	Organização das Nações Unidas
PCC	Problema do Carteiro Chinês
PCCD	Problema do Carteiro Chinês Direcionado
PCCM	Problema do Carteiro Chinês Misto
PCCND	Problema do Carteiro Chinês Não Direcionado
PCCV	Problema do Carteiro Chinês com Vento
PCR	Problema do Carteiro Rural
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PET	Politereftalato de Etileno
PFCM	Problema de Fluxo de Custo Mínimo
PI	Programação Inteira
PIB	Produto Interno Bruto
PL	Programação Linear
PLANSAB	Plano Nacional do Saneamento Básico
PLI	Programação Linear Inteira
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PMSB	Planos Municipais de Saneamento Básico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPL	Problemas de Programação Linear
PRA	Problema de Roteamento em Arcos
PRAD	Plano de Recuperação de Área Degradada
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation</i>
PVC	Policloreto de Polivinila
PVF	Pontos de Vista Fundamentais
RAIS	Relação Anual de Informações Sociais
RCC	Resíduos da Construção Civil
RDO	Resíduos Domiciliares
RMC	Região Metropolitana do Cariri
RPU	Resíduos Públicos
RSD	Resíduos Sólidos Domésticos
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
RSS	Resíduos Sólidos de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SAAEC	Sociedade Anônima de Água e Esgoto do Crato
SEMAC	Secretaria do Meio Ambiente e Controle
SESC	Serviço Social do Comércio
SESP	Secretaria de Serviços Públicos
SLU	Sistema de Limpeza Urbana
SMD	Sistema de Multicritério de Decisão
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TCU	Tribunal de Contas da União
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
URCA	Universidade Regional do Cariri
US EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
UTA	<i>Utilité Additive</i>
VRP's	<i>Vehicle Routing Problems</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Justificativa	25
1.2	Pressuposto	26
1.3	Objetivos	27
1.3.1	<i>Geral</i>	27
1.3.2	<i>Específicos</i>	27
1.4	Hipóteses	28
1.5	Enquadramento metodológico	28
1.6	Delineamento do processo de pesquisa	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Gerenciamento sistêmico, integrado e participativo dos resíduos sólidos	33
2.1.1	<i>Gestão de resíduos sólidos</i>	33
2.1.2	<i>Aspectos legais e institucionais dos resíduos sólidos no Brasil</i>	36
2.1.3	<i>Legislação ambiental concernente aos resíduos sólidos</i>	38
2.1.4	<i>Gerenciamento integrado dos resíduos sólidos</i>	41
2.1.5	<i>Informações básicas no manejo dos resíduos sólidos no Ceará</i>	43
2.2	Metodologia do carteiro chinês	45
2.2.1	<i>Roteirização otimizada</i>	45
2.2.2	<i>Classificação dos problemas de roteirização e programação</i>	51
2.2.3	<i>Contextualização</i>	56
2.2.4	<i>Teoria dos grafos</i>	58
2.2.5	<i>Problemas de roteamento dos arcos</i>	61
2.2.6	<i>Grafos de Euler</i>	63
2.2.7	<i>Circuitos eulerianos</i>	64
2.2.8	<i>Problema do carteiro chinês (Chinese Postman Problem – CPP)</i>	66
2.2.9	<i>Problema do carteiro chinês – passo a passo</i>	68
2.3	Metodologia multicritérios de auxílio à decisão: ferramenta da gestão sistêmica, integrada e participativa	69
2.3.1	<i>Métodos multicritério de auxílio à decisão</i>	71
2.3.2	<i>Metodologia multicritério de apoio à tomada de decisão</i>	75
2.3.3	<i>Metodologia M-Macbeth</i>	77
3	METODOLOGIA	82

3.1	Descrição das etapas do desenvolvimento da pesquisa.....	83
3.1.1	<i>Levantamento de dados e delimitação da área de estudo.....</i>	83
3.1.2	<i>Diagnóstico e prognóstico dos RSU no Município.....</i>	92
3.1.3	<i>Estudo piloto no Município do Crato.....</i>	107
3.1.4	<i>Avaliação dos resultados integrados.....</i>	118
4	RESULTADOS E DISCUSÃO.....	119
4.1	Sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos do Município do Crato.....	119
4.2	Estudo exploratório de construção e avaliação de modelo potencial da gestão dos resíduos sólidos urbanos com a abordagem do M-Macbeth.....	128
4.3	Análise da otimização da rota de coleta convencional de resíduos no bairro Centro do Município do Crato.....	144
4.3.1	<i>Exemplo de coleta de resíduos sólidos urbanos no bairro Centro do Município do Crato.....</i>	145
4.3.1.1	<i>Rota atual do caminhão de coleta de resíduos.....</i>	
4.4	Comparação de trabalhos já realizados.....	151
5	CONCLUSÃO	160
	REFERÊNCIAS	162

1 INTRODUÇÃO

O tema resíduo sólido se expressa como um crescente desafio da sociedade contemporânea, particularmente, quando se trata da destinação dos resíduos e sua disposição final adequada, haja visto a ausência de ações de gerenciamento responsável compartilhado.

Nessa perspectiva, a sociedade atual defronta o desafio do equacionamento entre geração de resíduos e disposição final ambientalmente segura os impactos sociais, ambientais e econômicos gerados com a gestão e a disposição inapropriadas dos resíduos sólidos poderiam ser revertidos com a apropriação de padrões de produção e de consumo sustentáveis e de um gerenciamento adequado de resíduos sólidos que minimizariam os impactos ao ambiente e à saúde pública.

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017) a quantidade de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) gerada e a quantidade coletada em 2016 foram de 78,3 milhões de toneladas de lixo urbano, com um índice de cobertura de coleta de 90,8% em todo País, ficando 7,3 milhões de toneladas de resíduos sem coleta, e com destino incerto e impróprio, expondo ao risco a saúde do meio ambiente e da população. Quanto à disposição final, registrou-se um aumento no volume de resíduos enviados para destinação inadequada, com quase 30 milhões de toneladas de resíduos dispostas em lixões de baixa segurança ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

O quadro que se instala com relação aos RSU no Brasil é: redução da coleta de lixo, menos recursos para essa área e aumento do número de lixões, dados preocupantes destacados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016, lançado pela ABRELPE. Destaca-se que o brasileiro produziu no ano passado 1,040 kg de lixo por dia, uma queda de 2,9% quando comparado ao ano anterior. Esse dado, no entanto, não veio acompanhado com uma eficiência na gestão da coleta, na destinação e nos recursos investidos nessa área (ABRELPE, 2017).

A coleta de lixo domiciliar na cidade do Crato/CE é um serviço realizado pela Prefeitura Municipal. A coleta de resíduos recicláveis é efetivada pela Associação dos Agentes Recicladores do Crato (AARC). Pessoas cadastradas fazem a coleta dos materiais recicláveis, separam e comercializam na sede da Associação. Muitos materiais que seriam para reciclagem, no entanto, ainda são coletados pelo caminhão compactador de lixo e lançados no lixão da cidade. Esses resíduos são separados por catadores não cadastrados e comercializados diretamente no lixão.

Quanto à otimização de rotas de coleta, não há um direcionamento efetivo, causando problemas no seu gerenciamento, isto é, necessidade de minimizar rotas por meio do planejamento e execução das operações.

Assim, a necessidade de se buscar um modelo de gerenciamento que atenda de maneira adequada à gestão em resíduos sólidos urbanos, promovendo a sustentabilidade ambiental, social e econômica, é um grande desafio para gestores que atuam na área. Até mesmo porque as soluções mais praticadas nos municípios do País tratam somente de método convencional, de coletar o lixo e lançar em lugares distantes sem tratamento adequado.

Nesse contexto, a pesquisa busca estabelecer, com suporte na realidade do Município do Crato, um modelo de apoio à tomada de decisão, por meio do modelo multicritério M-Macbeth (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), assim como a otimização do percurso de coleta de resíduos sólidos urbanos com a utilização do modelo matemático Problema do Carteiro Chinês, no bairro Centro do Município do Crato, que concentra o maior número de estabelecimentos comerciais e pessoas.

1.1 Justificativa

Ante os impactos ambientais e a degradação ambiental, assim como uma busca pelo consumo consciente e sustentável, o destino adequado dos resíduos sólidos ganha a cada dia maior relevância. O desenvolvimento econômico, a urbanização e a melhoria dos padrões de vida nas cidades levaram à um aumento da quantidade e complexidade dos resíduos gerados (RATHI, 2006). Além de comprometimento dos recursos naturais, as gerações futuras sofrerão influências negativas causadas pela degradação do meio ambiente, se não forem adotadas medidas que minimizem estes prejuízos causados, em sua maioria, pelas atividades humanas e empresariais nocivas ao ambiente (TINOCO; KRAMER, 2011). Um modo de tratar o problema é incorporar tecnologias que sejam capazes de aprimorar o gerenciamento e a tomada de decisões referentes aos resíduos sólidos em toda a cadeia produtiva.

Por ser o planejamento da atividade de resíduos sólidos, uma questão que envolve conflito de interesses nas avaliações, derivados da carência e limitação dos recursos naturais, pela quantidade de agentes envolvidos e pela existência de objetivos não quantificáveis, opta-se pela utilização de métodos multicritério.

O modelo de aplicação de metodologia de multicritério, no presente estudo, busca apoiar os tomadores de decisão na melhor escolha do tratamento e destino dos resíduos

sólidos. Esta é uma importante ferramenta de gerenciamento estratégico, para a obtenção de resultados eficientes, permitindo o gerenciamento dos resíduos sólidos, que têm uma preocupação básica em prover adequadamente um ambiente seguro para o cidadão.

Neste estudo, serão analisados os critérios e fatores necessários para avaliar e priorizar medidas de “mitigação”, visando desenvolver diretrizes técnicas para o gerenciamento de resíduos sólidos em centros urbanos, com suporte em métodos de apoio à tomada de decisão.

A motivação da ferramenta M-Macbeth decorre do fato dela estar relacionada a uma abordagem construtiva, ou seja, a interatividade é um fator de destaque (Bana e Costa; Vansnick, 1995) e humanista. A construção do modelo quantitativo está baseada em julgamentos qualitativos, diferenças de atratividade (Bana e Costa, 2007), de modo que ajuda os tomadores de decisão a ponderar, comunicar e discutir os seus sistemas de valores e preferências. Assim, na prática, proporciona uma interação que beneficiará o sistema de apoio à decisão, tornando-o mais eficiente e fácil de usar o *software* M-Macbeth (BANA e COSTA, *et al.*, 2003).

O que motivou a pesquisa foi o fato de conhecer melhor essa realidade, buscando contribuir, de modo teórico-prático, a gestão e o gerenciamento dos resíduos da Região Metropolitana Cariri (RMC), precisamente o Município do Crato-CE. No contexto regional do Cariri cearense, todavia, o manejo dos resíduos sólidos urbanos é ainda tratado de maneira inadequada, de modo que a gestão dos resíduos se fundamenta no princípio de um sistema de coletar, transportar e descartar os resíduos no solo, proporcionando lixões que chegam a degradar significativamente algumas áreas. Isso favorece um comprometimento do solo, do ar, da água, a saúde da população, que, direta ou indiretamente, apresenta um local insalubre e todos os seres vivos que integram o meio ficam suscetíveis às doenças.

Assim, a proposta de inovação da tese é de que como não há registros utilizando em conjunto as técnicas M-Macbeth e Problema do Carteiro Chinês em estudos aplicados à coleta de resíduos sólidos em centros urbanos o trabalho realiza essa abordagem e faz a comparação como ferramenta de gerenciamento dos resíduos sólidos.

1.2 Pressuposto

A busca por modelos de tomada de decisão para o gerenciamento dos resíduos sólidos se faz necessária, haja vista que o caráter de inesgotabilidade está inerente aos resíduos. Assim sendo, construir um modelo de decisão que possa levar ao gestor municipal

os elementos de como proceder diante do destino adequado dos resíduos sólidos é uma maneira de buscar opções que se comprometam em minimizar os danos socioeconômicos, sanitários e socioambientais que envolvem a problemática dos resíduos sólidos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

O objetivo desta pesquisa é diagnosticar e aplicar um modelo de multicritério de apoio à decisão e de otimização de rotas à coleta de resíduos sólidos urbanos no Município do Crato, baseada em conceitos da PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), do método de apoio à decisão M-Macbeth e da aplicação da ferramenta do *Chinese Postman Problem* (CPP) enfocando um problema real.

1.3.1.1 Específicos

Foram definidos os objetivos específicos, a seguir delineados, para atender ao objetivo geral da pesquisa.

- Correlacionar as condições socioambiental e legislação direcionadas aos resíduos sólidos urbanos, a fim de proporcionar melhor tomada de decisão.
- Identificar as características e habilidades essenciais dos gestores do Município do Crato, bem como outros fatores fundamentais para a tomada de decisão dos resíduos sólidos urbanos.
- Criar um “modelo de decisão”, mediante a aplicação da metodologia de multicritério Macbeth, com o auxílio do *software* M-Macbeth.
- Analisar a capacidade na tomada de decisão, por meio das características e habilidades dos gestores e outros fatores necessários, de acordo com os gestores selecionados e a experiência adquirida sobre o tema.
- Identificar, explorar e analisar a coleta convencional e o transporte dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Bairro Centro, do Município do Crato.
- Abordar um problema real de cobertura de arcos através do CPP.
- Determinar uma rota de custo mínimo de um caminhão de coleta de RSU no bairro Centro do Município do Crato, para que todos os arcos do grafo sejam percorridos ao menos uma vez.

O “modelo de decisão” compreende um conjunto de indicadores sinalizadores em que há maiores chances de ocorrerem numa tomada de decisão pelos gestores locais.

1.4 Hipóteses

Na elaboração deste trabalho, foram consideradas as hipóteses expressas na sequência.

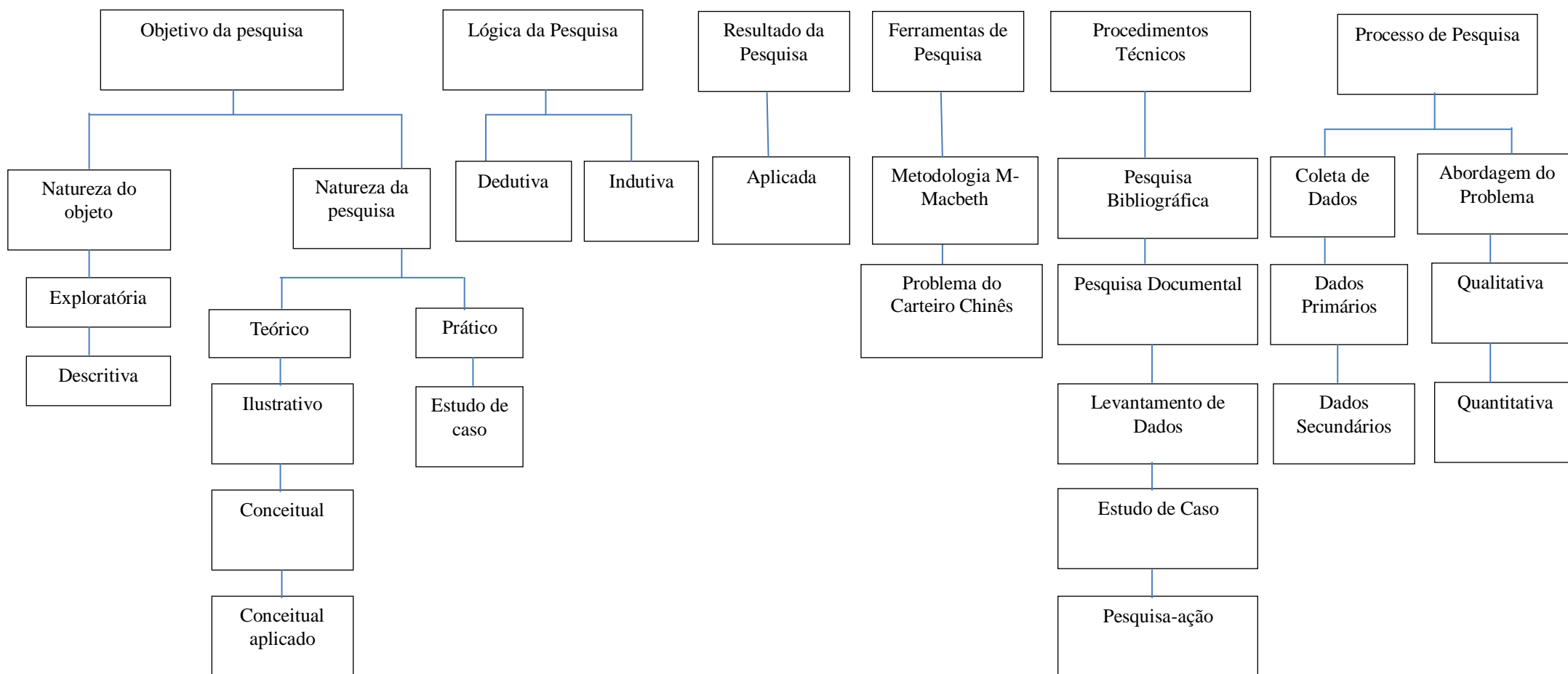
- A estruturação do planejamento pode envolver a participação de vários agentes na definição de opções de tratamento e destino dos resíduos sólidos.
- O planejamento e o gerenciamento dos resíduos sólidos admitem sua adequação no tempo e no espaço e consideram aspectos intrínsecos ao meio ambiente e à saúde da população.
- As rotas de coleta convencional de lixo no Município podem ter impacto no processo de planejamento e de tomada de decisão.
- Os métodos multicritério de auxílio à decisão podem ser utilizados na priorização das opções, para cooperar na implementação eficiente do gerenciamento dos resíduos sólidos.

1.5 Enquadramento metodológico

A descrição das abordagens e ferramentas que são utilizadas para esta pesquisa tem o intuito de especificar o conjunto de procedimentos ou mesmo os métodos filosóficos que fundamentam o tema em estudo. A proposta é proporcionar a integração dos resultados da investigação e socialização (TASCA *et al.*, 2010).

O enquadramento norteia a pesquisa, visto que delimita as ações e também estabelece os critérios abordados, visando a atender o objetivo, assim como definir as características dos processos, procedimentos e instrumentos que facilitam a identificação do estudo e a aplicação científica dos resultados, conforme construção do *Framework* do enquadramento metodológico da tese, Figura 1.

Figura 1 - *Framework* do enquadramento metodológico da tese



Fonte: Elaboração própria (2019).

1.6 Delineamento do processo de pesquisa

A população da pesquisa de campo engloba as partes interessadas do sistema de gerenciamento de RSU do Município do Crato. Trata-se de uma amostragem não probabilística, ou seja, com amostras intencionais, na qual o julgamento da pesquisadora foi utilizado para selecionar os membros da população que são fontes de informação precisa e também especialistas (SILVA; MENEZES, 2005).

Para Forte (2006), os métodos estatísticos direcionam as pesquisas quantitativas, ao passo que as categorizações e as análises dissertativas se destacam nas pesquisas qualitativas, conforme Quadro 1. “De qualquer forma, como sempre haverá explicações sobre fenômenos, cálculos e resultados quantitativos, as pesquisas têm em si os dois métodos”. (FORTE, 2006, p. 7). Na verdade, não existe um tipo de pesquisa que seja superior ao outro, o que vai caracterizar é a capacidade do pesquisador em adequá-las à sua necessidade e à realidade.

Quadro 1 - Classificação das pesquisas

Natureza das variáveis	Qualitativa	Quantitativa	
Objetivo e grau do problema	Exploratória	Descritiva	Causal
Escopo	Estudo de caso	Estudo de campo	Levantamento da amostra
Controle	Laboratório	Experimento de campo	

Fonte: Adaptado de Forte (2006).

A natureza das variáveis do estudo se classifica como uma pesquisa quali-quantitativa. Se apresenta qualitativa no que tange à identificação dos fatores, critérios e variáveis, utilizando-se de categorias inseridas no *software* M-Macbeth como forma de medir o grau de incidência das características do planejamento e pelas análises dissertativas utilizadas para interpretar os dados que serão inseridos no modelo e os resultados após processados por meio do *software* M-Macbeth. Com relação ao objetivo e grau do problema, o tipo é qualitativa de caráter exploratório, pois busca identificar em ampla pesquisa bibliográfica e mediante entrevistas com os decisores para a escolha das variáveis (critérios) e aplicação do modelo multicritério de apoio à decisão quanto à escolha da melhor estratégia.

Quanto à construção do modelo multicritério, é necessária a utilização de modelos e métodos quantitativos, que estão disponíveis no *software* M-Macbeth. Isto torna a pesquisa como quantitativa de caráter descritivo quanto ao objetivo e grau do problema, visto que a evidência da solução mais aceitável para o problema em estudo é mais indireta do que uma

pesquisa de caráter causal, o que torna mais adequado o uso dessa evidência no processo decisório que requer a experiência e o julgamento do decisor quanto à natureza das relações causais.

A metodologia Macbeth foi compreendida pelo tomador de decisão envolvido, de modo que este compreendeu o uso de julgamentos qualitativos na avaliação dos indicadores de desempenho, fazendo com que o processo estivesse mais interativo, simples e sistêmico.

Um desafio nessa fase da pesquisa, no entanto, foi com a ponderação dos distintos *swings* (pesos), visto que o problema concentrou na dificuldade no preenchimento da matriz de julgamentos na ponderação dos *swings* dos critérios, porque, com a existência de um grande número de indicadores (critérios) para avaliar qualitativamente a diferença entre pares, o trabalho não será muito simples em razão do inúmero par de julgamentos que é preciso dar.

O Macbeth, ao usar um modelo de agregação aditiva, é uma vantagem com respeito a outros modelos de Sistema de Multicritério de Decisão (SMD), pois permite que um mau desempenho de uma organização num dado indicador seja compensado por um bom desempenho em outro indicador. Assim sendo, a avaliação global do desempenho de uma organização será fornecida pela importância de cada um dos indicadores e não uma avaliação global analisada indicador por indicador.

É uma pesquisa de cunho descritivo porque, além de descrever o gerenciamento dos resíduos sólidos, procura explicar que, por meio das variáveis, fatores e critérios envolvidos, dependentes das teorias dos variados pesquisadores e da opinião dos decisores consultados em relação à gestão dos resíduos sólidos. Essas informações procuram descrever a relação entre os critérios e os fatores, com o uso de fórmulas matemáticas que estão no *software* M-Macbeth e na ferramenta do *Chinese Postman Problem* (CPP).

O modelo deve se adequar à situação-problema, de modo a determinar a maneira que melhor contribua para se apoiar a decisão, tendo que se observar as abordagens normativas, prescritivas e descritivas que sejam favoráveis ao problema e a forma como ele se apresenta.

Como fontes de informações e coleta de dados, foram realizadas entrevistas com o uso de questionários; pesquisas e consultas em textos e documentos em sites, livros, artigos, dissertações e teses, modelos e metodologias de multicritério de apoio à decisão com abordagem Macbeth e *software* M-Macbeth e na ferramenta do *Chinese Postman Problem* (CPP). Ou seja, no decorrer do desenvolvimento da pesquisa, foram utilizadas técnicas de Pesquisa Operacional para modelar e resolver o problema de geração de rotas, com o propósito de minimizar o custo do percurso da coleta e transporte dos resíduos sólidos

urbanos e/ou da limpeza das ruas no bairro do Centro da cidade do Crato/CE, utilizando dados reais.

O escopo da pesquisa está mais próximo do estudo de campo, pelas características de se realizar pesquisas junto a um município que possui perfil, objetivos e atividades. Quanto à amplitude, é relativamente pequena, devido ao número de elementos da pesquisa, no entanto, o modelo pode ser aplicado, com ajustes, a outras instituições e regiões, de acordo com a situação local e a opinião dos decisores envolvidos.

A pesquisa foi realizada junto ao município do Crato, com restrição da aplicação da ferramenta do *Chinese Postman Problem* (CPP) no bairro do Centro, devido ao fluxo de resíduos sólidos urbanos que são coletados diariamente e pela característica própria do bairro, uma área estritamente urbana e, assim, composta de residências e pontos comerciais.

Desse modo, o trabalho com os decisores é realizado em, basicamente, três etapas: a primeira é relacionada à avaliação das escolhas realizadas pela analista quanto a opções e critérios, que poderiam ser desconsiderados e acrescentados. No que tange aos critérios, deve ser solicitada análise quanto à sua forma de avaliação. Para os critérios acrescentados, solicitar-se-ia indicar sua forma de avaliação. Critérios remanescentes seriam ponderados. Na segunda etapa da pesquisa, objetivaria consolidar os dados obtidos (opções, critérios e pesos). A apresentação e a avaliação dos resultados finais da pesquisa, que foi gerada a partir do uso do Método Multicritério Macbeth e do *Chinese Postman Problem* (CPP), compõem a terceira etapa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

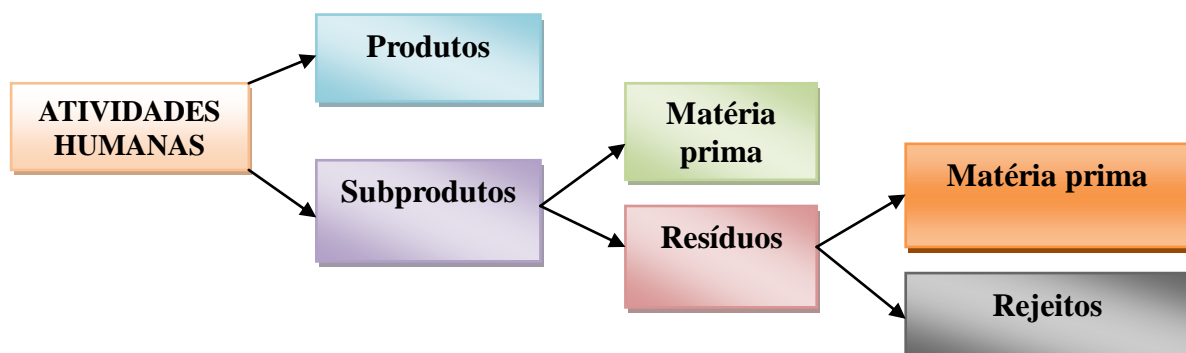
2.1 Gerenciamento sistêmico, integrado e participativo dos resíduos sólidos

2.1.1 Gestão dos resíduos sólidos

O gerenciamento inadequado dos resíduos é uma realidade e um dos principais fatores para a ocorrência de impactos ambientais em muitos municípios, sendo considerado como desprezível e sem importância. Após tramitar por cerca de 20 anos no Congresso Nacional, a legislação que trata sobre os resíduos é a Lei nº 12.305/2010, a primeira a cuidar especificamente do tema. Com a aprovação do PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos), os resíduos tornam-se mais evidentes e proporcionam uma preocupação, visto que empresas privadas, sociedade e governos passaram a compartilhar a produção e o destino final, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017).

Consoante Philippi Jr. (2005), os resíduos são considerados subprodutos das atividades humanas, de tal modo que suas características são definidas, normalmente, pelo gerador. Quanto à cadeia logística de utilização, os subprodutos tendem a se tornar novas matérias-primas, consideradas secundárias, e, quando o resíduo não puder mais ser aproveitado, tornar-se-á rejeito, conforme Figura 2.

Figura 2 – Escalonamento do uso de recursos



Fonte: Adaptado de Phillip Jr. (2005).

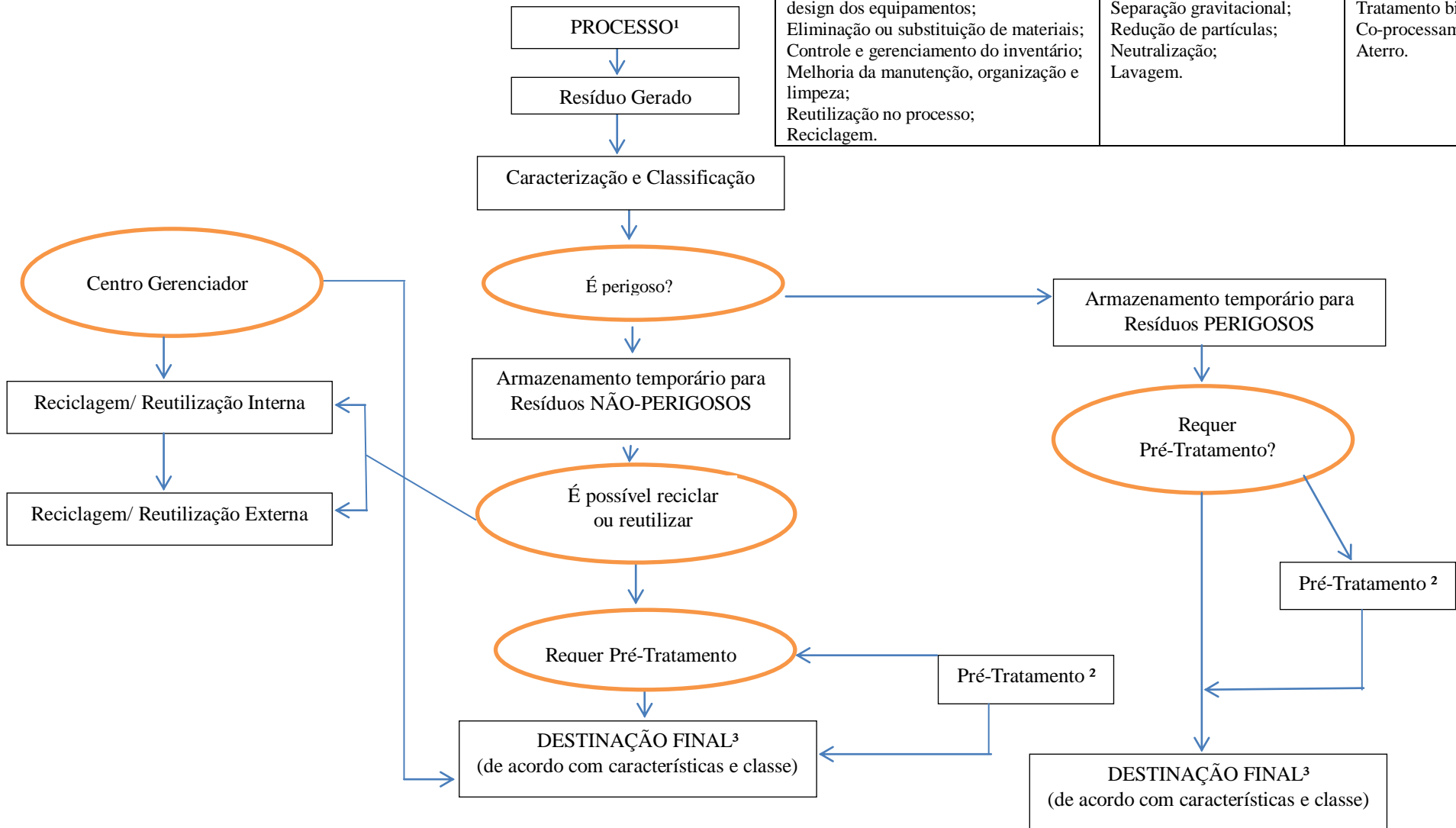
Dessa maneira, há uma série de problemas ambientais, principalmente, quando os resíduos sólidos não são coletados, tratados e dispostos adequadamente, em particular,

levando-se em consideração que há uma série de impactos que se propagam pela ausência da disposição adequada e eficaz, pois, além de causar a poluição dos solos, da água e do ar e trazer maior risco de alagamentos, a disposição imprópria do lixo proporciona problemas de saúde pública, com a propagação de doenças infecto-contagiosa.

Ferraz (2008) considera que a gestão dos resíduos sólidos deve estabelecer os princípios de Engenharia, Economia, Saúde Pública e Ciências Sociais, visto que envolve o bem-estar da população. A maneira de se gerenciar os RSU é algo que precisa ser bem estudado. O fluxograma (Figura 3) a seguir representa uma gestão dos resíduos que tem como alvo a redução e a reciclagem, no que propõem Cunha e Caixeta Filho (2002) como também Rogers e Tibben-Lembke (2001).

Figura 3 - Fluxograma de gerenciamento de resíduos sólidos

1. PROCESSO	2. PRÉ-TRATAMENTO	3. DESTINAÇÃO FINAL
Modificação no processo ou mudança no design dos equipamentos; Eliminação ou substituição de materiais; Controle e gerenciamento do inventário; Melhoria da manutenção, organização e limpeza; Reutilização no processo; Reciclagem.	Centrifugação; Separação gravitacional; Redução de partículas; Neutralização; Lavagem.	Tratamento térmico; Tratamento biológico; Co-processamento; Aterro.



Fonte: Adaptado de Sistema FIRJAN (2006).

2.1.2 Aspectos legais e institucionais dos resíduos sólidos no Brasil

A Constituição Federal consiste na norma fundamental, estruturadora e de organização do Estado, estabelecendo no artigo 170 os princípios gerais da atividade econômica, assim como em seu artigo 225 estabelece, também, a imposição ao Poder Público e a coletividade na obrigação de defender o meio ambiente e de preservá-lo para as gerações presentes e futuras.

Art. 225 da CF/88: Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo para as presentes e futuras gerações.

Assim, o problema dos resíduos sólidos tem grande complexidade e apresenta ao meio ambiente as condições diretas em que a sociedade vive.

De acordo com a Agenda 21, documento proveniente das discussões oriundas da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, promovida pela ONU no Rio de Janeiro, em 1992 (ECO 1992), como cita Calderoni (1998).

[...] aproximadamente 5,2 milhões – incluindo 4 milhões de crianças – morrem por ano de doenças relacionadas com o lixo. Metade da população urbana dos países em desenvolvimento não tem serviços de despejo de lixo sólido. Globalmente, o volume de lixo municipal produzido deve dobrar até o final do século e dobrar novamente antes do ano de 2025.

Portanto, é necessário que haja uma sinergia entre o gerador do resíduo e toda a sociedade (civil, empresas privadas, governamental, órgãos oficiais), para que possam desenvolver, eficientemente, opções para os resíduos sólidos, de modo que os produtos sejam aceitos, reconhecidos e se preocupem com as questões socioambientais.

O marco regulatório dos resíduos sólidos é definido pela Lei nº 11.445/2007, que estabelece Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico (Lei Nacional de Saneamento Básico - LNSB) (BRASIL, 2007), e pela Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010).

A Lei nº 11.445/2007 considera, como componentes do saneamento básico, a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos urbanos, dentre outros, bem como a exigência de elaboração de Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB), que devem apresentar metas de universalização para esses serviços. Trata da responsabilidade do planejamento no âmbito federal, por meio do Plano Nacional do Saneamento Básico (PLANSAB), onde estão incorporadas as metas para o manejo adequado dos resíduos sólidos urbanos de todo o País. Para Castro e Souza (2010), a PNRS é,

[...] é um marco regulatório abrangente, pois lida com questões bastante complexas e uma diversidade de interesses sociais, ambientais e econômicos em praticamente todas as atividades. O principal objetivo a ser atingido com essa Lei é a uniformização dos princípios e linhas gerais da gestão dos resíduos sólidos em todo o território nacional, face ao tratamento nos âmbitos estadual e municipal que vinha sendo dado justamente pela lacuna na legislação.

Do mesmo modo que a Lei nº 11.445/2007, a PNRS trata, no planejamento, de um de seus principais instrumentos. Exige, no entanto, a elaboração do Plano Integrado de Gestão de Resíduos Sólidos para as distintas esferas - federal, estadual e municipal - e de gerenciamento para os setores privados. Então, mediante, o planejamento é que se definem as condições pelas quais os objetivos da PNRS devem ser alcançados no âmbito de cada ente federado.

A coleta seletiva e a reciclagem são instrumentos essenciais da PNRS, principalmente quando se trata da implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, assim como na viabilização da hierarquização no gerenciamento dos resíduos e na inclusão socioeconômica dos catadores de materiais. Em razão disso, a diretriz da PNRS institui que a coleta seletiva deve ser amplamente respeitada nos planos, inclusive em âmbito regional, criando instrumentos econômicos para sua viabilização.

A Lei nº 12.305/2010, por sua vez, estabelece diretrizes gerais aplicáveis a todos os tipos de resíduos sólidos, exceto os radioativos que são regulados por legislação específica, e elabora um novo modelo para gestão dos resíduos, com oportunidades de desenvolvimento econômico e social, assim como determinar o encerramento dos lixões em até quatro anos e de estabelecer dois anos para a conclusão dos Planos de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, desde a sanção da lei.

É uma importante lei que busca contribuir com uma série de conceitos inovadores, ou seja, permite o resíduo sólido como material que pode ser reutilizado e reaproveitado, assim como trata o rejeito como insumo inservível como matéria-prima em uma cadeia produtiva.

Na verdade, trata-se de um conceito já incentivado em 1990 pelo programa de Produção mais Limpa do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), que busca a aplicação contínua de uma estratégia ambiental integrada para processos, produtos e serviços, a fim de aumentar sua eficiência, principalmente no concernente à geração de resíduos, permitindo atingir um dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, pois consiste em incentivar a gestão de resíduos sólidos (GRS).

A lei nº 12.305/2010, e seu regulamento, Decreto Nº 7.404 de 23 de dezembro de 2010, destacam-se a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa, como um,

[...] conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos desta Lei (BRASIL, 2010).

Nessa perspectiva a não geração, a redução e a reutilização somente alcançam resultados no longo prazo, visto que envolvem forte componente de educação ambiental, além de transformação comportamental da sociedade. Através da reciclagem, que já bem sendo realizada no país, porém em pequena escala e de forma não organizada, mas que tem como potencial o crescimento em função dos incentivos trazidos pela PNRS.

Assim, a elaboração do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) consiste no requisito em que os municípios tenham acesso aos recursos da União. Segundo Weber (2013), “é condição para que os Municípios tenham acesso a recursos da União, ou por ela controlado, destinados a empreendimentos e serviços relacionados à limpeza urbana e ao manejo de resíduos sólidos, ou para serem beneficiados por incentivos ou financiamentos de entidades federais de crédito ou fomento para tal finalidade”.

No Ceará, a Lei n. 13.103, de 24/01/2001, estabelece a PERS. O art. 2º, I, considera os resíduos sólidos como “qualquer forma de matéria ou substância, no estado sólido e semissólido, que resulte de atividade industrial, domiciliar, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços, de varrição e de outras atividades humanas, capazes de causar poluição ou contaminação ambiental”.

Dentre os objetivos da PERS, o art. 5º, V e VI, da Lei n. 13.103/2001, exige “a implantação de sistemas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos cujos impactos ambientais negativos sejam de baixa magnitude, assegurando a utilização adequada e racional dos recursos naturais e preservando-os para a presente e futuras gerações, e; a promoção da recuperação das áreas degradadas ou contaminadas em razão de acidentes ambientais ou da disposição inadequada dos resíduos sólidos”.

2.1.3 Legislação ambiental concernente aos resíduos sólidos

Considerando que existe um expressivo crescimento da geração de resíduos, tem-

se percebido mudanças significativas, nas últimas décadas, dos resíduos sólidos particularmente em sua composição e características, bem como o aumento de sua periculosidade (IPEA, 2010). Logo, a preocupação se concentra quando não recebem destino e descarte correto, ou seja, se acumulam pelas ruas e calçadas, expondo toda sociedade.

Todavia toda a legislação brasileira tem como referência a Constituição Federal de 1988, que busca manter um modelo de desenvolvimento ambientalmente correto. De tal modo que considera a responsabilidade compartilhada entre União, Estados e Municípios, na proteção do meio ambiente e o combate à poluição em qualquer de suas formas (BRASIL, 1988).

No que se diz respeito à periculosidade dos resíduos, a NBR – ABNT 10.004/2004 (ABNT, 2004, p. 3), classifica da seguinte maneira,

Classe I (Perigosos): apresentam risco à saúde pública ou ao meio ambiente, caracterizando-se por possuir uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;

Classe II A (Não Inertes): podem ter propriedades como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água, porém, não se enquadram como resíduo I ou II;

Classe II B (Inertes): não têm constituinte algum solubilizado em concentração superior ao padrão de potabilidade da água.

Em termos de políticas e legislações nacionais, os resíduos sólidos, são destacados como:

- Política Nacional de Meio Ambiente: Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 que tem como objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental favorecendo a vida e contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico, a segurança nacional e a proteção da dignidade da vida humana.
- Política Nacional de Saúde: Lei Orgânica nº 3.080, de 19 de setembro de 1990;
- Política Nacional de Educação Ambiental: Lei nº 9.795, de 24 de abril de 1994;
- Política Nacional de Recursos Hídricos: Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997;
- Lei de Crimes Ambientais: Lei nº 10.257 de 12 de fevereiro de 1998;
- Estatuto das Cidades: Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001;
- Política Nacional de Saneamento Básico: Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007;
- Política Nacional de Resíduos Sólidos: Lei nº 12.305, de 05 de agosto de 2010 estabelece a integração da PNRS com outras políticas nacionais como a de saneamento básico e educação (art.2º), a definição dos princípios (art. 6º), objetivos (art.7º) e seus instrumentos (art. 8º), as diretrizes que implicam os resíduos sólidos (art. 9º), definições relacionadas a origem e a periculosidade dos resíduos sólidos (art.

13, I e II) diretrizes aplicáveis aos planos de gestão e de gerenciamento de resíduos sólidos (arts. 4º a 24), responsabilidade dos geradores e do poder público (art. 25 e seguintes), responsabilidade compartilhada (art. 6º, VII e art. 30 e incisos), os instrumentos econômicos aplicáveis (art. 42 a 46) e as proibições relacionadas ao tema (arts. 47 a 49) e disposições transitórias e finais (arts. 50 a 57).

Quadro 2 - Resumo referente aos RSU de abrangência nacional

Normas e leis federais, estaduais e municipais	Descrição
Portaria do Inmetro 101/2009	Aprova a nova Lista de Grupos de Produtos Perigosos e o novo Anexo E.
Resolução do Conama 401/2008	Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências. Revoga a Resolução do Conama 257/1999.
Lei Federal no 11.445/2007	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Altera as Leis 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990; 8.666, de 21 de junho de 1993; e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Revoga a Lei 6.528, de 11 de maio de 1978.
Lei Federal 10.257/2001	Estatuto das Cidades. Estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
Lei Federal 9.605/1998	Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
Portaria do IBAMA 32/1995	Obriga ao cadastramento no Ibama as pessoas físicas e jurídicas que importem, produzam ou comercializem a substância mercúrio metálico.
Decreto Federal 97.634/1989	Dispõe sobre o controle da produção e da comercialização de substância que comporta risco para a vida, a qualidade de vida e o meio ambiente, e dá outras providências, em específico para o mercúrio metálico.
Lei Federal no 6.938/1981	Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

Fonte: Adaptado das normas e leis federais, estaduais e municipais (2018).

Vale destacar que ainda existem leis e normas estaduais, onde cada Estado tem suas instrumentações legais sobre os resíduos sólidos.

2.1.4 Gerenciamento integrado dos resíduos sólidos

O gerenciamento dos resíduos sólidos de maneira integrada e sustentável reduz a produção das fontes geradoras, proporciona reaproveitamento, favorece a coleta seletiva e a reciclagem devido a inclusão socioeconômica dos catadores de resíduos, assim como a recuperação de energia (KLUNDER *et al.*, 2001; ADEDIPE *et al.*, 2005).

Todavia, o gerenciamento tem sido um grande desafio para o problema dos resíduos sólidos no Brasil, visto que não há política pública para o setor que tenha uma visão sistêmica e envolva todos os níveis de governo, seja ele municipal, estadual ou federal (JERONIMO e SANTIAGO JR, 2012). Apesar de toda a sociedade ser co-responsável pela gestão, assim como pela geração dos resíduos sólidos, o principal responsável pelo gerenciamento são os municípios (BRASIL, 2010).

A ausência de recursos financeiros e de recursos humanos especializados e capacitados para a gestão e operação dos serviços torna o gerenciamento ainda mais deficiente no Brasil (DEMAJOROVIC *et al.* 2005). Contudo, tarifas de cobrança pelos serviços de coleta e disposição final são tarefas do município. Outro fato consiste na falta de sistemas de coleta seletiva e de unidades de triagem de resíduos recicláveis, assim como não há preparo eficiente na separação de resíduos perigosos, logo tudo é enviado ao lixão.

Segundo Nascimento *et al.* (2015), com a implementação da PNRS algumas mudanças são importantes para o gerenciamento eficiente dos RSU no Brasil dentro dos setores público e privado. Necessita-se ainda do envolvimento de todos os atores incluindo os catadores e a toda população. De acordo com o Quadro 3 é possível se ter uma comparação do antes e depois (esperado) da implementação desta política para alguns destes setores.

Quadro 3 - Comparação do Antes e Depois (esperado) da Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010)

Atores	Antes	Depois (esperado)
Poder Público	<p>Pouca prioridade para a questão dos resíduos sólidos</p> <p>A maioria dos municípios destinava os dejetos para lixões a céu aberto</p> <p>Não há aproveitamento dos resíduos sólidos orgânicos (RSO)</p> <p>Coleta seletiva ineficiente e pouco expressiva</p>	<p>Municípios devem traçar um plano para gerenciar os resíduos sólidos da melhor maneira possível, buscando a inclusão dos catadores.</p> <p>Lixões passam a ser proibidos e devem ser erradicados até 2014, com a criação de aterros que sigam as normas ambientais</p> <p>Municípios devem instalar a compostagem para tratar os RSO</p> <p>Prefeituras devem organizar a coleta seletiva de recicláveis e orgânicos para atender toda a população, fiscalizar e controlar os custos desse processo.</p>
População	<p>Separação inexpressiva de lixo reciclável nas residências</p> <p>Falta de informações</p> <p>Atendimento da coleta seletiva pouco eficiente</p>	<p>População deve separar o lixo reciclável na residência</p> <p>Realização de campanhas educativas sobre o tema dos resíduos sólidos e a sua importância</p> <p>A coleta seletiva deverá ser expandida.</p>
Catadores	<p>Manejo do lixo feito por atravessadores, com riscos à saúde</p> <p>Predominância da informalidade no setor</p> <p>Problemas tanto na qualidade quanto na quantidade dos resíduos</p> <p>Catadores sem qualificação</p>	<p>Catadores deverão se filiar a cooperativas de forma a melhorar o ambiente de trabalho, reduzir os riscos à saúde e aumentar a renda</p> <p>Cooperativas deverão estabelecer parcerias com empresas e prefeituras para realizar a coleta e reciclagem</p> <p>Aumento do volume e melhora da qualidade dos resíduos que serão reaproveitados ou reciclados</p> <p>Os trabalhadores passarão por treinamentos para melhorar a produtividade.</p>

Fonte: Adaptado de CEMPRE (2013) *apud* Nascimento *et al.* (2015).

Segundo o MMA (2012), a gestão integrada dos resíduos sólidos envolve todas as ações que estejam na busca de soluções para a coleta, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos, de modo que inclui os planos nacional, estaduais, microrregionais, intermunicipais, municipais e os de gerenciamento. Quanto a responsabilidade desses planos concerne aos entes federados e tratam da coleta seletiva, reciclagem, inclusão social e participação da sociedade civil, assim como os resíduos de serviços de saúde, da construção civil, de mineração, de portos, aeroportos e fronteiras, industriais e agrossilvopastoris.

Para D’Almeida e Vilhena (2000), o gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos é um conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento onde a administração pública municipal busca desenvolver para coletar, segregar, tratar e dispor o “lixo” de sua cidade. Takenaka (2008) destaca que uma adequada estratégia de gestão dos resíduos, deve estar direcionada a organizar e dar condições de trabalho aos trabalhadores presentes nos “lixões” dos municípios, uma vez que está presente nas tomadas de decisões dos representantes do poder público municipal.

2.1.5 Informações básicas no manejo dos resíduos sólidos no Ceará

A ausência de gestão dos resíduos sólidos está associado a ocorrência de acidentes ambientais que podem se manifestar de diferentes maneiras, envolvendo o descarte de resíduos ou de produtos químicos em vias públicas, disposição indevida sob o solo, assim como o armazenamento inadequado, descarte em terrenos baldios, praças e escolas, o que coloca em risco a saúde pública e o meio ambiente.

No Estado do Ceará cerca de 156 municípios (85%) destinam seus resíduos em lixões a céu aberto, dos 184 municípios. Já em 120 (65%) municípios, os pontos de descarte dos resíduos encontram-se a uma distância da área urbana, menor ou igual a um quilômetro, ainda mais preocupante é que 48 (26%) dos municípios depositam seus de resíduos a uma distância dos recursos hídricos, menor ou igual a um quilômetro, proporcionando um grave risco à saúde da população e ao meio ambiente (CEARÁ, 2006). A situação de coleta e destino final dos resíduos sólidos urbanos é semelhante na maioria dos estados brasileiros.

Algumas iniciativas têm sido trabalhadas no Estado do Ceará, com o intuito de melhorias da gestão e manejo dos resíduos sólidos nos municípios. Até 2010, foram elaborados planos por 177 municípios, do total de 184 do estado. No entanto, há necessidade de verificação desses planos para revisão, ajustes e complementação deste conjunto de documentos nos moldes da Política Nacional (Lei nº 12. 305/2010).

Quanto aos resíduos sólidos especiais no Ceará, algumas informações inspiram preocupação, sobretudo em relação à fase de disposição final. No Ceará, 57,5% dos resíduos industriais são dispostos em áreas fora dos empreendimentos. Destes, 12% são para lixões municipais, inclusive os resíduos perigosos. Esses dados mostram, ainda, a ausência de gestão no manejo dos resíduos sólidos nos municípios do estado e algumas deficiências nas melhorias.

Algumas conclusões do Relatório de Auditoria Operacional do Monitoramento do TCU referente ao Programa de Resíduos Sólidos Urbanos (2011):

355 Verificou-se que **a pulverização de recursos para o financiamento de aterros sanitários de pequeno porte** assim como para aquisições isoladas ou mal dimensionadas **tem acarretado desperdício de recursos públicos**.

356 Estima-se que o **desperdício gerado na aplicação de recursos**, pela Funasa, em convênios **para construção de aterros sanitários que foram abandonados ou que retornaram à condição de lixões**, no período de janeiro/2000 a abril/2011, se aproxima de R\$ 20 milhões.

...

360 Portanto, com vistas à promoção da eficiência e da efetividade na aplicação de recursos do Programa Resíduos Sólidos Urbanos, faz-se necessária substantiva mudança na forma e no objeto de alocação de recursos da Ação 10GG. Caso contrário, a Funasa continuará a destinar recursos para projetos fadados ao fracasso, haja vista os problemas apontados. **Em lugar de continuar a financiar projetos de RSU de municípios de forma individual, esses entes federativos deveriam ser apoiados na implementação de gestão consorciada para manejo de resíduos sólidos urbanos.**

O que demonstra uma necessidade de regulação na prestação dos serviços, em modelos viáveis de gestão de resíduos sólidos para uma sociedade dinâmica. Desse modo uma nova concepção é formada referente a lógica de implantação de ações para o atendimento a Lei, ou seja, ao invés de começar pela implantação do aterro sanitário, que representa os investimentos mais onerosos e de mais longa instalação e operacionalização, se inicia soluções de menor custo de investimento, mas que geram receitas.

O fato é que não há como se implantar em curto prazo aterros sanitários, assim como encerrar os lixões instantaneamente, ao passo que é possível e desejável “ir menos ao lixão”, além de melhorar suas condições. Proporcionando outro destino aos resíduos mais impactantes, os orgânicos, e ao mesmo tempo cumprindo determinação da Lei 12.305/2010 que em seu Artigo 36 define como responsabilidade do titular dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos a compostagem dos resíduos orgânicos e a coleta seletiva dos resíduos.

Nessa perspectiva, existem desafios e dificuldades ao se realizar uma eficiente gestão ambiental pública, pois estariam relacionadas à falta de planejamento ambiental dos municípios, a ausência de recursos financeiros, a baixa ou ausência de capacitação técnica e o desconhecimento da legislação e dos instrumentos de gestão ambiental. Segundo Giesta (2013), a gestão ambiental pública necessita ser implementada com o acompanhamento de uma série de mudanças no âmbito institucional.

2.2 Metodologia do carteiro chinês

2.2.1 Roteirização otimizada

Os problemas acerca da “otimização de redes” incluem aplicações tradicionais. Trata-se de encontrar a maneira mais eficiente de relacionar diversas localidades, direta ou indiretamente, encontrando o caminho mais curto entre dois nós, e propondo o fluxo máximo em uma rede (os nós conectados por via de ramificações) de modo que satisfaça os requisitos de suprimentos e a demanda em distintos locais, programando as atividades de um determinado projeto.

Alguns pesquisadores, como Colin *et al.* (1999), conforme está disponível também em Cunha (2000) e em Paes (2004), revelam que quando se dispõe de uma “otimização de rotas”, consideram-se os ganhos que se obtém com a redução do custo de transporte, além da satisfação do usuário que irá desfrutar de uma categoria de serviço bem mais eficiente.

A problemática relacionada à roteirização periódica em arcos capacitados consiste na teoria dos grafos. Segundo Ore (1990), essa teoria surgiu devido ao anseio de Euler em resolver o problema da ponte de Königsberg. Assad e Golden (1995) consideram que Euler identificou a origem da teoria dos grafos ao clássico problema das sete pontes que atravessam o Rio Pregel em Königsberg, publicado por ele em 1736.

Assim sendo, a problemática das sete pontes pode ser definida quando um determinado indivíduo é capaz de, a partir de um certo ponto, percorrer em cada uma das sete pontes, exatamente uma vez, e voltar ao ponto de origem. A questão é que o problema poderia ser resolvido por tentativa e erro, porém, Euler desenvolveu um mecanismo mais decisivo correspondente à um grafo qualquer (ASSAD; GOLDEN, 1995). Ou seja, Euler conduziu o problema da seguinte forma: considerando o questionamento de que se for possível percorrer o diagrama a partir de qualquer um dos pontos *A*, *B*, *C* ou *D*, usando os arcos apenas uma vez, e voltar ao ponto de início a solução é negativa, isto porque o grafo não contém a trilha de Euler, e desse modo não há possibilidade de percorrer as sete pontes de uma só vez, voltando ao ponto de partida.

Para cada “caminho fechado” que percorre todos os arcos de um grafo somente uma vez, foi denominado de “caminho” ou “roteiro de Euler”. Um grafo que consiste de um caminho fechado de Euler é um grafo de Euler (NETTO, 2001).

O problema do carteiro chinês é considerado um problema onde um grafo $G(N, A)$, cujos arcos (i, j) possuem um comprimento não negativo, e se objetiva identificar um

caminho de menor comprimento, onde ele possa iniciar em algum vértice e passar por todas as arestas, pelo menos uma vez, retornando ao vértice inicial. A problemática do carteiro chinês divide-se conforme o tipo de orientação a que se propõe resolver, sendo eles: os grafos (também chamados de circuitos) direcionados, os não direcionados e os mistos (GOLDBARG; LUNA, 2000).

Alguns autores consideram que a roteirização consiste em projetar um conjunto de rotas com o propósito de minimizar custos no atendimento de um grupo de clientes que estejam geograficamente dispersos, satisfazendo as restrições operacionais (BRÄYSY *et al.*, 2009; PILLAC *et al.*, 2012). Existem, no entanto, variadas maneiras de alcançar a redução de custos. Alguns autores tratam: da redução do tempo da rota (TEIXEIRA *et al.*, 2004); da redução das distâncias (DAS e BHATTACHARYYA, 2015; SANJEEVI e SHAHABUDEEN, 2016); da redução de tempo de espera e de quantidade de veículos (QURESHI *et al.*, 2009) e da redução da quantidade de rotas e de distância (RAMOS *et al.*, 2013). Para outros pesquisadores, como Brasileiro e Lacerda (2002) e Khan e Samadder (2016), a roteirização é otimizar conjuntamente a distância e tempo de rota.

De acordo com Deluqui (1998), a otimização do processo de coleta de resíduos sólidos urbanos deve buscar a máxima satisfação da população com a prestação de serviços, por via da adequada consideração dos aspectos de qualidade, custos, atendimento e proteção à saúde pública. Sendo assim, é fundamental que se estabeleça um controle operacional dos serviços prestados que permita sua avaliação.

Para Kim *et al.* (2006), a minimização do número de veículos e o tempo da rota compõem a roteirização, mas consideram ainda a capacidade da rota, isto é, trabalham no processo de redução do número de cruzamentos entre as vias.

Problemas de roteirização de veículos (*Vehicle Routing Problems - VRPs*) são de natureza combinatória e fazem parte de uma categoria ampla de problemas de pesquisa operacional conhecida como problemas de otimização de rede. Nessa categoria, encontram-se problemas clássicos, como problema de fluxo máximo, do caminho mínimo, de transporte, de designação (GOLDEN *et al.*, 1981).

Alguns estudos expressam aplicações práticas para o problema de roteirização que podem ser encontrados no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 – Aplicações de roteirização

Para problemas de atendimentos em	
Nós	Arcos
<ul style="list-style-type: none"> · coleta de peças automobilísticas (WU, 2007); · coleta de lixo industrial (TEIXEIRA; ANTUNES; SOUSA, 2004); 	<ul style="list-style-type: none"> · coleta de lixo residencial (CHU; LABADI; PRINS, 2004); · limpeza de ruas (LACOMME; PRINS; RAMDANE-CHÉRIF, 2002); · entrega postal (GHIANI <i>et al.</i>, 2005); · leitura de medidor residencial (ASSAD; GOLDEN, 1995); · controle de neve ou gelo (MONROY; AMAYA; LANGEVIN, 2013); · inspeção de trilhos de trem (BATISTA; SCARPIN, 2014).

Fonte: Adaptado de Santos (2016).

Um dos primeiros problemas de roteirização estudado foi o problema do caixeiro viajante (*traveling salesman problem* – TSP) (CUNHA, 2000). O estudo consistia em encontrar o roteiro ou a sequência de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante, de modo que minimizasse a distância total a ser percorrida por ele, e garantindo que cada cidade fosse visitada apenas uma vez. Desse modo, para esse tipo de problema, não há restrições referentes à capacidade de veículos e a sua demanda é determinística.

Algumas restrições, no entanto, começaram a ser incorporadas ao problema do caixeiro viajante, de modo que representassem os diversos problemas envolvendo pessoas e veículos. Segundo Cunha (2000), as principais restrições implementadas foram: horário de coleta e entrega, capacidade do veículo, tipo de veículo, tamanho do veículo, duração máxima do percurso dos veículos.

Christofides (1985a,b) define o problema da roteirização de veículos com a mesma essência do problema de distribuição, onde os clientes ou produtos estão dispersos geograficamente e devem ter suas demandas atendidas por veículos que partem de um depósito central.

Segundo Roviriego (2005), a roteirização costuma ser empregada com o termo programação. Essa ligação consiste nos aspectos temporais dos roteiros que direcionam os horários requeridos a cada atividade estabelecida no planejamento do roteiro, de modo que, no sistema de coleta otimizada, a roteirização estabelece sequência e critérios de ordem (paradas para refeições, duração da rota, transbordo, etc).

Para roteirização de veículos, embora não identificada nos dicionários de língua

portuguesa, é uma maneira que vem sendo empregada como equivalente ao inglês “*routing*” (ou “*routeing*”) que aponta o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem atendidos por veículos de uma frota, que são visitados em pontos geograficamente dispersos, como em locais predeterminados, mas que necessitam de atendimento (CUNHA; 1997, 2000).

O primeiro trabalho relacionado a modelagem de problemas de roteirização e programação de veículos e tribulações foi retratado por Bodin *et al.* (1983), que ainda é referência no assunto, tendo em vista que os problemas de roteirização podem ser do tipo roteirização pura ou de roteirização e programação. Para problemas de roteirização pura, as condicionantes temporais não são importantes para a definição dos roteiros e das sequências de coletas e entregas, mas os aspectos espaciais da localização dos pontos a serem atendidos, objetivando construir roteiros viáveis a um menor custo possível. Com relação aos problemas de roteirização e programação, estes acontecem em situações em que existem restrições de janelas de tempo (horário de atendimento) e de precedência entre tarefas (coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo).

O problema de roteirização pura, mais clássico, é o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), que consiste em determinar uma rota de mínimo custo que passe por todos os nós, uma só vez, sem restrições de tempo nem limitações de capacidade. Outros problemas, no entanto, se enquadram neste tipo de classificação.

- ✓ Problema do Carteiro Chinês (PCC): análogo ao PCV, mas com um novo propósito de encontrar um caminho mínimo tal, onde todas as ruas sejam visitadas, ou seja, a demanda está localizada nos arcos, e não nos nós.
- ✓ Múltiplos Caixeiros Viajantes: fundamenta-se no PCV, no entanto considera mais de um caixeiro viajante.
- ✓ Roteirização em nós com único depósito e vários veículos: consiste no problema de designar rotas de veículos com menor custo total, com pontos de origem e destino coincidentes, onde cada cliente é visitado precisamente uma vez, respeitando as capacidades dos veículos (LAPORTE *et al.*, 2000).
- ✓ Roteirização em nós com vários depósitos e vários veículos: apresenta múltiplos pontos de origem e destino.
- ✓ Roteirização em nós com único depósito e vários veículos com demandas incertas: apresenta demandas seguindo uma distribuição probabilística.

- ✓ Carteiro Chinês com limite de capacidade (carteiro chinês capacitado): similar ao PCC, mas com restrições de capacidade dos veículos.

Quadro 5 - Classificação dos problemas de roteirização pura

Denominação do Problema	Número de roteiros	Localização dos clientes	Limite de capacidade nos veículos	Número de Depósitos	Demandas
caixeiro viajante	um	nós	não há	um	Determinística
carteiro chinês	um	arcos	não há	um	Determinística
múltiplos caixeiros viajantes	múltiplos	nós	não	um	Determinística
roteirização em nós com uma única base	múltiplos	nós	sim	um	Determinística
roteirização em nós com múltiplas bases	múltiplos	nós	sim	múltiplos	Determinística
roteirização em nós com demandas incertas	múltiplos	nós	sim	um	Estocásticas
roteirização em arcos com limite de capacidade (carteiro chinês capacitado)	múltiplos	arcos	sim	um	Determinística

Fonte: Adaptado de Bodin *et al.* (1983).

Pode-se analisar que os problemas de roteirização pura listados anteriormente derivam do problema clássico do caixeiro viajante, exceto do problema do carteiro chinês, onde a localização dos clientes está nos arcos ao invés dos nós. Nesse caso, a otimização em rede envolve os percursos ociosos, já que o veículo precisa percorrer todos os arcos uma vez para o atendimento.

Cunha (1997) estudou os problemas de transporte oriundos da pesquisa operacional que possuem função objetivo para reduzir o tempo, a distância ou o custo total do trajeto, em que as condicionantes podem envolver os tempos despendidos no atendimento em cada ponto a ser percorrido. Dessa maneira, as paradas para as refeições ou máxima de jornada de trabalho são restrições que podem ser analisadas.

Para Cunha (2000), problemas de roteirização e programação são aqueles que têm definidos os aspectos espaciais, faltando apenas determinar a alocação de veículos e tripulações ao conjunto de viagens programadas, com base em algumas restrições. Os problemas de programação podem ser ainda subdivididos em: programação de veículos e programação de tripulações.

Para problemas de roteirização e programação, Salles (2013) afirma que quando existe algum tipo de restrição de precedência e ou janela de tempo. De tal modo, que janelas de tempo são restrições horárias, normalmente associadas ao intervalo desejado para que um

dado serviço seja executado em um determinado cliente. Assim, podem existir outros tipos de janela de tempo, como, por exemplo, o intervalo de tempo em que um veículo fica disponível, ou o intervalo de tempo em que o (s) depósito(s) fica (m) disponível(eis) para o(s) veículo(s). Em problemas combinados, tanto os aspectos espaciais quanto temporais são levados em consideração.

Para Bodin *et al.* (1983), os problemas combinados de roteirização e programação ocorrem em situações em que existem restrições de tempo e de precedência entre tarefas. Dessa maneira, esses problemas podem ser frequentemente encontrados no cotidiano, sendo representativos para muitas aplicações do mundo real, onde a solução está na literatura com diversas estratégias e métodos.

Os principais problemas típicos apontados pelos autores estão no Quadro 6.

Quadro 6 - Problemas de roteirização e programação

problema de roteirização e programação	ônibus escolares para atendimento de um conjunto de escolas.
	cavalos mecânicos tracionando carretas com carga completa: cada carreta é tracionada individualmente de um ponto de origem para um ponto de destino.
	serviços de coleta de resíduos domiciliares e de varrição de ruas, semelhante ao problema do carteiro chinês, porém com restrições de capacidade dos veículos, de duração máxima da jornada e de janelas de tempo associadas aos horários de proibição de estacionamento, de forma a possibilitar a execução do serviço de varrição.
	serviços de transporte de pessoas, conhecidos como “dial-a-ride”, em geral para o transporte porta-a-porta de idosos e deficientes; cada usuário possui locais de origem e de destino distintos e eventualmente janelas de tempo; a precedência entre tarefas é uma restrição fundamental a ser considerada.

Fonte: Adaptado de Bodin *et al.* (1983) *apud* CUNHA (2000).

Para Ronen (1988), a roteirização deve apresentar vários aspectos, desde a tomada de decisão tática e estratégica como determinantes básicos para o desenvolvimento das atividades. A classificação dos diversos problemas de roteirização e programação está fundamentada em ambientes operacionais e objetivos a serem alcançados, conforme está no Quadro 7.

Quadro 7 – Problema e descrição

Problema	Descrição
relativo ao transporte de passageiros	programação de linhas de ônibus; de sistemas de táxi; de sistemas de transporte de pessoas, em geral idosos e deficientes, conhecidos como “ <i>dial-a-ride</i> ”; de transporte de escolares por ônibus, entre outros.
de prestação de serviços	roteirização e programação de equipes de reparos ou de serviços públicos, tais como de coleta de lixo, entrega postal, varrição de ruas e leitura de parquímetros, entre outros.
relativos ao transporte de carga	coleta e distribuição.

Fonte: Adaptado de Ronen (1988).

Eiselt *et al.* (1995b) consideram em seus estudos que se pode determinar o menor custo para se atravessar um conjunto de arcos de um grafo, com ou sem restrições, tendo como objetivo o Problema de Roteamento em Arcos (PRA), em inglês *Arc Routing Problems*. Este problema aparece em diversas aplicações práticas, tais como: entrega domiciliar de jornais, dimensionamento de serviços de coleta domiciliar de lixo, entrega domiciliar de jornais, dimensionamento de equipes para entrega postal (correio), entre outros.

2.2.2 Classificação dos problemas de roteirização e programação

Para Bodin *et al.* (1983), os problemas combinados de roteirização e programação, ou simplesmente problemas de roteirização e programação, acontecem em situações em que há restrições de janelas de tempo (horário de atendimento) e de precedência entre tarefas (coleta deve preceder a entrega e ambas devem estar alocadas ao mesmo veículo).

Algumas características identificam as restrições inerentes aos problemas de roteirização e programação, onde cada qual apresenta diferentes suposições de modelagem. Em algumas pesquisas, Cunha (2000) é mencionado por afirmar que a classificação de Bodin *et al.* (1983) é, em tempos atuais, vista como uma das mais importantes, por considerar os principais tipos de problemas de roteirização de veículos. Essa classificação de Bodin *et al.* (1983, p. 73) é apresentada no Quadro 8.

Quadro 8 – Roteirização e programação

Características	Opções Possíveis
Tamanho da frota disponível	Um veículo Múltiplos veículos
Tipo de frota disponível	Homogênea Heterogênea Veículos especiais
Quantidade de depósitos	Depósito único Múltiplos depósitos
Natureza das demandas	Demanda determinística (conhecida) Demanda estocástica Atendimento parcial de demanda disponível
Localização das demandas	Nós, Arcos, Mista
Estrutura da rede	Não direcionada, Direcionada Mista Euclidiana
Restrições de capacidade dos veículos	Imposta (capacidade igual para todos os veículos) Imposto (veículos de diferentes capacidades) Não imposto (capacidade ilimitada)
Tempo máximo da rota	Imposto (o mesmo para todas as rotas) Imposto (específico a cada rota) Não imposto
Operação	Somente coleta, Somente entrega Mista (coleta e entrega) Entrega fracionada
Custos	Variáveis ou de roteirização Custos fixos de operação ou de aquisição de veículos Custos comuns da operadora – terceirização do serviço (por não atender a demanda)
Objetivos	Minimizar custo total da rota Minimizar o somatório dos custos fixos e variáveis Minimizar o número de veículos necessários Maximizar a função utilidade baseada no nível de serviço Maximizar a função de utilidade baseada nas propriedades dos clientes

Fonte: Adaptado de Bodin *et al.* (1983, p. 73).

Existem alguns trabalhos de pesquisa que aplicam os conceitos da roteirização na coleta de RSU, dentre os quais estão aqueles realizados por Brasileiro e Lacerda (2002) e Paes (2004), que consideram a coleta de lixo residencial com foco em roteirização otimizada.

Alguns pesquisadores classificam a coleta de resíduos sólidos consoante o Quadro 9.

Quadro 9 - Classificação dos resíduos sólidos

Esferas	Autores	Tipo
coleta de resíduos urbanos	Brasileiro e Lacerda, 2008; Das e Bhattacharyya, 2015; Ghose <i>et al.</i> , 2006; Hiramatsu <i>et al.</i> , 2009; Khan e Samadder, 2016; Kim <i>et al.</i> , 2006; Sanjeevi e Shahabudeen, 2016	caracterizada pela coleta de todo resíduo urbano
coleta de resíduos recicláveis	Teixeira <i>et al.</i> , 2004; Wilson e Williams, 2007)	normalmente vinculada a coleta de plástico, papel, vidro e metal e
coleta de resíduos orgânicos	Gredmaier <i>et al.</i> , 2013	orgânicos

Fonte: Adaptado de Oliveira e Rodrigues (2017).

Dois tipos são destacados pela roteirização da coleta de resíduos sólidos urbanos, que são eles: de porta a porta (BRASILEIRO e LACERDA, 2002; DAS e BHATTACHARYYA, 2015) e *drop-off* (TEIXEIRA *et al.*, 2004; KHAN e SAMADDER, 2016). Para a coleta porta a porta, os resíduos ficam nas ruas e calçadas, em que é necessário que o caminhão passe por todas as ruas, proporcionando um problema de rota em arco (RAMOS *et al.*, 2013). Já na coleta *drop-off*, há pontos de entrega de fácil acesso para que sejam levados os resíduos, centrais que armazenem temporariamente os resíduos e que depois um veículo coletor passa em todos os pontos e centrais de entrega, tornando-o um problema de rota de nó (RAMOS *et al.*, 2013).

Gredmaier *et al.* (2013) comparam as duas formas de coleta de resíduos residenciais com um resultado de consumo de combustível muito menor para a coleta *drop-off*. Da mesma maneira, a coleta de resíduos comerciais também é dividida em porta a porta (KIM *et al.*, 2006; RAMOS *et al.*, 2013) e *drop-off*. Sanjeevi e Shahabudeen (2016) abordam a integração dos sistemas de coleta de resíduos comerciais e residenciais por *drop-off*.

Alguns trabalhos podem ser destacados por estarem relacionados ao problema de otimização de rotas de coleta utilizando técnicas de pesquisa operacional, conforme Quadro 10.

Quadro 10 - Problemas de otimização de rotas

Autor (es)	Descrição da Pesquisa	Problema
Teitz e Bart (1968)	Propuseram um método de pesquisa de aproximação em que fosse encontrada a mediana de um grafo ponderado, que ocorre através da troca de vértices, a partir de uma solução inicial.	Problema de p-medianas
Christofides (1975)	Problemas de localização de facilidades e roteamento de veículos, com estudos de algoritmos de resolução para esses problemas contendo formulações matemáticas estruturadas	Problemas dos p-centros, p-medianas e Problemas do Caixeiro Viajante
Stern e Dror (1978)	Estudos de rotas dos leituristas de medidores elétricos, por meio de roteamento de arcos orientados.	Técnicas do Algoritmo do Carteiro Chinês
Bezerra (1995)	Racionalizar o transporte entre o local de coleta e o local de processamento, utilizando três algoritmos: Floyd para determinar as distâncias mínimas entre cada nó que faz parte da rede; das p-medianas para a localização dos postos de coleta e genético para encontrar as distâncias e o roteiro para os problemas do caixeiro viajante.	Problema de p-medianas
Weber apud Lobo (1998)	Um dos primeiros trabalhos referente à teoria da localização, onde se resgata o trabalho publicado em 1909 referente à localização de uma indústria visando a minimizar os custos de transporte de matéria-prima, do produto final. Nessa situação foi considerada apenas uma área onde existia somente um mercado consumidor e duas regiões fornecedoras da matéria-prima.	Teoria da Localização
Nunes (1998)	Demonstra um problema real de roteamento de transporte de veículos onde racionaliza o sistema de transporte dos funcionários de uma empresa reduzindo a quantidade de veículos utilizados e minimizando as distâncias percorridas pelos veículos.	Algoritmos genéticos
Rosário <i>et al</i> (2001)	É proposta uma metodologia para distribuição espacial de Unidades de Saúde 24 horas para a cidade de Curitiba, Paraná, minimizando a distância média de deslocamento dos usuários.	Algoritmos genéticos (diagrama de Voronoi)
Costa <i>et al</i> (2001)	Realizando em duas etapas um estudo sobre a otimização de correspondências dos serviços postais: a) dividiu a região de estudo em sub-regiões; b) utilizou algoritmos de cobertura de arcos e de cobertura de nós para cada sub-região.	Algoritmo do Carteiro Chinês

continuação

Autor (es)	Descrição da Pesquisa	Problema
Smiderle, Steirner e Wilhelm (2004)	Trabalho que se divide em duas etapas, propondo uma solução para a leitura dos medidores das contas de água. A metodologia foi: a) formação de grupos de atendimento para cada leiturista, usando a meta-heurística do Algoritmo Genético e depois refinado pela heurística de Teitz e Bart; b) propor a melhor rota, minimizando a distância percorrida pelos leituristas.	Algoritmo do Carteiro Chinês
Corrêa <i>et al</i> (2004)	A pesquisa buscou otimizar a designação de candidatos ao vestibular, de modo que estes realizassem as provas mais próximas de suas residências. Foi utilizada a meta-heurística Busca Tabu para memórias de curto e longo prazo a fim de controlar a busca.	Algoritmo Genético, por meio do operador heurístico “hipermutação direcionada”
Sherafat (2004)	A pesquisa foi desenvolvida para se determinar um circuito de custo mínimo de um dado subconjunto de arcos, arestas e nós de um grafo misto, que estivesse sujeito a algumas restrições.	Problemas de roteamento de arcos (Problema do Carteiro Chinês Misto, Problema do Carteiro Rural e suas variações)
Paes (2004)	Propõe o gerenciamento da coleta e transporte de resíduos domiciliares, com o objetivo de minimizar os custos financeiros. O algoritmo trabalhado foi baseado na Meta-heurística GRASP (<i>Greedy Randomized Adaptive search Procedure</i>)	Problema do Carteiro Chinês Misto
Karadimas <i>et al</i> (2005)	Identificar a melhor relação custo-benefício para um cenário alternativo na coleta de resíduos sólidos e de transporte, assim como o custo e a simulação do procedimento de coleta de resíduos sólidos.	Algoritmo de otimização Colônia de Formigas
Gonçalves, Steirner e Zamboni (2005)	A pesquisa propõe uma metodologia para alcançar rotas para serviços de entrega, no caso de distribuição de água mineral.	Algoritmo das p-medianas de Teitz e Bart; Algoritmo modificado de Gillett e Johnson e os algoritmos dos Savings de Clarke e Wright, da Inserção do Mais Próximo, da Busca Tabu e de algumas combinações.
Smiderle, Dal Piva e Tibes (2005)	Implantar ou realocar unidades farmacêuticas de forma descentralizada, com o propósito de minimizar a distância média do deslocamento da população.	Algoritmo genético e Algoritmo de Teitz

continuação

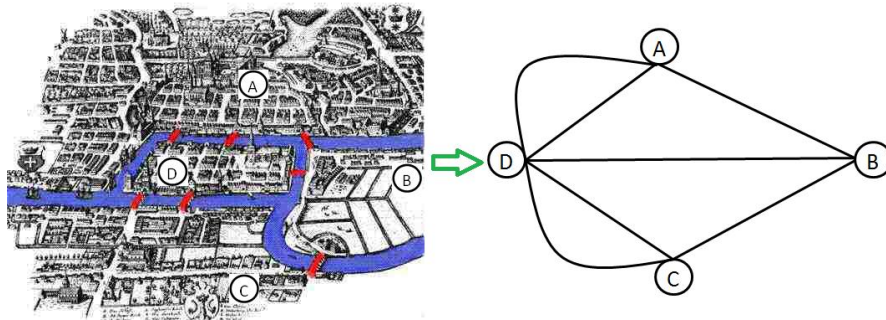
Autor (es)	Descrição da Pesquisa	Problema
Simonetto e Borenstein (2006)	Apresenta a concepção, modelagem e implementação de um sistema de tomada de apoio a decisão direcionado ao planejamento operacional de coleta seletiva.	Combinação de técnicas da Pesquisa Operacional
Capri e Steirn (2006)	Otimizar o serviço de estacionamento rotativo, buscando obter melhor distribuição dos trechos de quadra em setores a serem percorridos pelos fiscais.	Algoritmo de Teitz e Bart; Algoritmos genéticos e Busca Tabu
Apaydın e Gonullu (2007)	A pesquisa busca a otimização das rotas de coleta de resíduos sólidos, considerando as restrições: rede rodoviária, demografia e produção de lixo.	Otimização de coleta de resíduos

Fonte: Adaptado de Capri (2005).

2.2.3 Contextualização

De acordo com Summerfield *et al.* (2015), o *Chinese Postman Problem* (CPP) é relacionado ao problema de Euler, que foi proposto por Guan Meoi-Ko (1962), um matemático chinês, da Escola Normal *Shangtun*, que, durante a revolução cultural chinesa, serviu em uma agência dos correios e se interessou por encontrar roteiros de distâncias mínimas para os carteiros, de modo que viessem a passar por todas as ruas de uma determinada área uma só vez, distribuir as correspondências e voltar ao ponto de partida. Baseou-se no registro mais antigo referente ao roteamento de arcos, o famoso enigma das pontes de *Konigsberg* (cidade localizada na Prússia), em que esta cidade, construída em ambas as margens do rio Pregel e sobre duas ilhas nele situadas, visto que as margens do rio e as duas ilhas são conectadas por sete pontes (Figura 4). O questionamento que atormentava os moradores era se seria possível realizar um percurso pelas ilhas, passando uma só vez em todas as sete pontes, voltando ao ponto de origem.

Figura 4 - Caracterização das sete pontes num Grafo por Euler

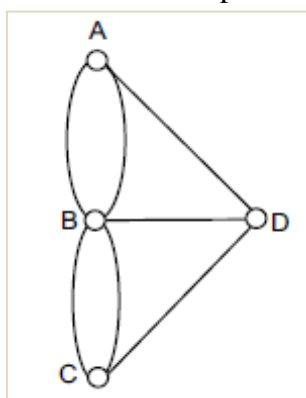


Fonte: (GOMES *et al.*, 2009) – Modificou-se (2018).

Com suporte nos estudos do matemático suíço Leonhard Euler em busca de

resolver este problema, no ano de 1736, ele publicou um artigo, no qual demonstrava que não havia solução para tal problema, de modo que eliminou os detalhes que não influenciavam o problema, como a distância entre as ilhas e tamanho das ilhas, e se concentrou apenas nos aspectos que considerou essenciais. Na verdade, Euler representou o problema de uma forma bastante simples, como mostra a Figura 5, e se acredita que esta estrutura tenha sido o primeiro exemplo de grafo.

Figura 5 - Modelo matemático do problema das sete pontes



Fonte: Sherafat, 2004.

Esse problema está direcionado a situações para as quais não exista solução ótima para (um caminho fechado que percorra uma só vez cada aresta), ou seja, um CPP percorre um circuito fechado mais curto de um gráfico em que cada aresta e arco são visitados pelo menos uma vez.

A preocupação do problema de Euler consiste na existência de um circuito euleriano, que passa exatamente uma vez em cada aresta, ao passo que o problema abordado por Guan se preocupava com os grafos não eulerianos, na tentativa de identificar o circuito de distância mínima que passa pelo menos uma vez em cada aresta, num grafo qualquer. Assim, se o grafo for unicursal, a rede contém um circuito euleriano, que atende perfeitamente à necessidade do percussor. A questão, no entanto, se torna um relevante problema combinatorial.

O desenvolvimento da teoria dos grafos só se tornou mais significativo desde os anos de 1950, em razão do aumento do número de pesquisas relacionadas à otimização e que usavam modelos de grafos para solucionar seus problemas. Esse desenvolvimento, todavia, só se tornou mais eficiente em razão do uso do computador.

O desenvolvimento da teoria dos Grafos veio se dar finalmente, sob o impluso das aplicações a problemas de otimização organizacional, dentro do conjunto de técnicas que forma hoje a pesquisa operacional, já na segunda metade do século XX. Evidentemente, tal desenvolvimento não se teria dado sem a invenção do

computador, sem o qual a imensa maioria das aplicações de Grafos seria totalmente impossível. (BOAVENTURA NETTO, 2006, p. 2).

Nessa tentativa de uma solução, Guan não consegue achar uma solução satisfatória para o problema, de modo que seu trabalho provocou interesse geral na comunidade científica do ocidente, e vários outros matemáticos e pesquisadores operacionais começaram a estudar o problema. Logo, com o seu pioneirismo, o problema passou a ser denominado como o *Chinese Postman Problem* (CPP), que consiste em encontrar o caminho mais curto, ou circuito fechado, de modo que se visite cada aresta de um grafo (conexo) não direcionado.

Dror *et al.* (1987) foram os primeiros autores a formalizar a ideia de uma hierarquia ao serviço de um aglomerado de ruas, utilizando o CPP; no entanto, é necessário que se conheça a Teoria dos Grafos.

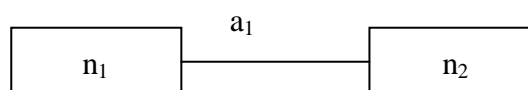
2.2.4 Teoria dos grafos

Os termos relacionados à Teoria dos Grafos são um padrão e podem ser encontrados nos trabalhos clássicos científicos, como os de Christofides (1975).

Um grafo $G = (N, A, E)$ é um conjunto finito de elementos chamados vértices ou nós $N = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, um conjunto finito de elementos chamados arestas $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ e uma função de incidência que, associada a cada aresta e um par não ordenado de vértices (não necessariamente distintos), denominados de extremos, representa a cardinalidade de cada conjunto $n = |N|$, $r = |A|$ e $m = |E|$. Outra definição se refere ao conjunto de *links* de G . Trata-se de um conjunto maior, definido por $L = A \cup E$ e $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, portanto, um *link* $l \in L$ pode ser um arco ou uma aresta do grafo G .

Desse modo, um link pode ser apresentado pelo par de nós ou vértices (x_i, x_j) que indicam seus nós finais. Ao passo que o *link* de uma aresta, a ordem de nós finais, nesta notação, é irrelevante (Figura 6).

Figura 6 - Aresta a_1 que liga os vértices n_1 e n_2

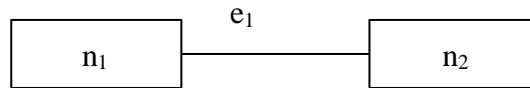


Fonte: Elaboração própria (2019).

Para o link dos arcos, todavia, a ordem que se dá é a do nó ou vértice inicial para

o nó ou vértice final (Figura 7).

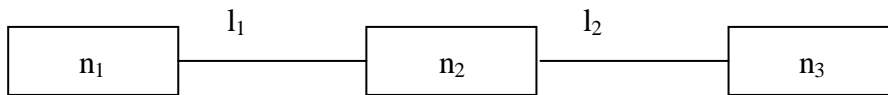
Figura 7- Arco e_1 que liga os vértices n_1 e n_2



Fonte: Elaboração própria (2019).

Agora um grafo com dois links l_1 e l_2 , sendo que l_1 é uma aresta do grafo, ou seja, $l_1 \in A$, e l_2 é um arco que pertence ao mesmo grafo, $l_2 \in E$ (Figura 8).

Figura 8 - Links l_1 e l_2 que ligam os vértices n_1 , n_2 e n_3



Fonte: Elaboração própria (2019).

Outro aspecto relevante é que, sempre quando conveniente, se pode considerar uma aresta (x_i, x_j) como um par de arcos contrariamente orientados ou direcionados (x_i, x_j) e (x_j, x_i) , de modo que dois nós ou arestas conectadas por um link são chamados de adjacentes. Assim, a cada link (x_i, x_j) de um grafo pode ser associado um custo d_{ij} . Logo uma matriz $D = [d_{ij}]$ consiste numa matriz de custos associada ao grafo, onde d_{ij} é o custo do link $(x_i, x_j) \in L$, e $d_{ij} = \infty$ se $(x_i, x_j) \notin L$.

Desse modo, as formulações podem ser:

- Se $E = \phi$, logo G é um grafo dirigido, pois só possui arcos e não possui arestas;
- Se $A = \phi$, logo G é um grafo não dirigido, pois só possui arestas e não possui arcos;
- Se $E = \phi$ e $A = \phi$, logo G corresponde ao grafo misto, de modo que possui tanto arestas como também arcos.

Com relação ao grafo completo, pode-se ressaltar que se trata de um grafo orientado (ou não orientado) em que para quaisquer nós $x_i \in N$ e $x_j \in N$ o arco $(x_i, x_j) \in A$ (ou a aresta $(x_i, x_j) \in E$).

Em um grafo não orientado, todavia, para cada nó x_i , define-se o grau $g(x_i)$ como o número de arestas que incidem no nó x_i . Assim, quando o grafo é orientado, define-se como o grau de entrada, $g_e(x_i)$, o número de arcos cujos nós finais são o nó x_i . Desse modo, o grau de saída $g_s(x_i)$ é o número de arcos, cujos nós iniciais são o nó x_i . Na verdade, é fácil verificar que a soma de graus de entrada de todos os nós de um grafo é igual à soma dos graus de saída.

O caminho consiste na sequência de links em que, respeitando sua orientação, o nó final de um é o inicial do próximo. Assim, um caminho $C(x_i, x_j)$ começa em um nó x_i e termina em x_j , em que x_i e x_j não são necessariamente adjacentes. Assim, x_i e x_j são considerados os nós inicial e final do caminho, respectivamente, e conectados nesta ordem pelo caminho.

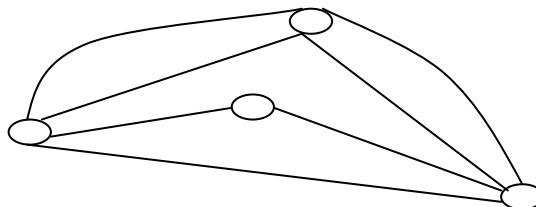
Uma cadeia é uma sequência de, também ligando dois nós não necessariamente adjacentes, sem respeito à orientação dos arcos. Nessa perspectiva, um circuito é um caminho em que o nó inicial coincide com o nó final.

Um grafo é dito fortemente conexo se para qualquer par ordenado de nós x_i, x_j existe pelo menos um caminho que conecta x_i a x_j . Portanto, a definição implica que, num grafo fortemente conexo, dois nós quaisquer são mutuamente acessíveis. Um grafo é dito conexo, ou fracamente conexo, se para qualquer par de nós x_i, x_j existe pelo menos uma cadeia que conecta x_i a x_j . Se pelo menos para um par de nós tal cadeia não existe, o grafo é, então, considerado desconexo.

Nessa perspectiva, quando um circuito passa por todos os nós de um grafo, sem que repita o mesmo nó mais de uma vez, é denominado de Circuito Hamiltoniano. Nem todo grafo, no entanto, contém um circuito hamiltoniano; mas, quando possui, é chamado de Grafo Hamiltoniano.

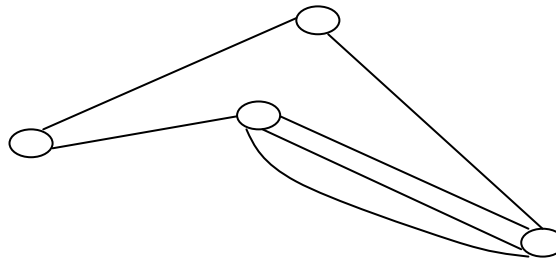
Quando um circuito que passa por todos os links de um grafo, sem que repita o mesmo link mais de uma vez, é denominado de Circuito Euleriano (Figura 9). Nessa mesma lógica, nem todo grafo contém um circuito euleriano e, quando o possui, ele é chamado de Grafo Euleriano, ou Grafo Unicursal. Um grafo que não possui um circuito euleriano, no entanto, contém um caminho euleriano, é chamado de semieuleriano (Figura 10).

Figura 9 - Grafo euleriano ou grafo unicursal



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 10 - Grafo semieuleriano



Fonte: Elaboração própria (2019).

Assim, quando um circuito passa por todos os *links* de um grafo pelo menos uma vez, é denominado de Circuito de Carteiro. Isto quer dizer que todo grafo fortemente conexo contém um circuito de carteiro.

2.2.5 Problemas de roteamento dos arcos

Problemas relacionados a roteamento podem ser dispostos em duas grandes classes: roteamento em grafos e roteamento de veículos propriamente dito (GOLDBARG, 2005).

Quando se trata de problemas de roteamento de grafos, ainda se constitui pelas subclasses: Problema de Roteamento de Nós (associados aos ciclos hamiltonianos) e Problemas de Roteamento de Arcos (associados aos ciclos eulerianos).

Ainda segundo Goldbarg (2005), o problema de coleta de resíduos sólidos se justifica como um problema de roteamento de arcos, visto que exige a formação de um ciclo euleriano em que o veículo de coleta deve passar por todos os arcos uma só vez.

A otimização na rota de serviços, realizada pelo caminhão de coleta e transporte de resíduos sólidos, tem uma significativa importância econômico-financeira para os cofres públicos. Este, no entanto, é um problema que cresce bastante em importância e em relevância, em razão do crescimento econômico da população como também os paradigmas do comércio moderno.

O fato é que a área de um município, que é representado pela rede em uma série de ruas e avenidas, as quais devem ser atendidas de acordo com as demandas solicitadas. Assim, o planejamento é realizado sob a óptica da frequência e disposição dos resíduos, que depende em muito do consumo da população, a qual, por sua vez, está ligada à capacidade do caminhão, equipe de trabalho, despesas com combustível, desgaste do caminhão e tempo de duração da coleta.

Quanto a problemas de roteamento de veículos, existe uma grande parcela de problemas de distribuição. Uma vez tomadas as decisões estratégicas e táticas, torna-se relevante a definição de uma rota em que se minimize o custo do serviço de coleta, visto que os custos operacionais associados aos veículos se configuram entre os mais significativos de todo o processo da logística de distribuição e são, em geral, sensíveis às rotas definidas para o cumprimento do serviço. Logo, pequenas percentagens de redução podem significar grandes economias no custo total da operação.

Como parte do problema de coleta e transporte de resíduos sólidos é atender a um conjunto de demandas distribuído numa rede, a rota consiste na sequência apropriada de locais a serem visitados para se realizar de forma eficiente o atendimento referente à coleta dos resíduos. Nessa perspectiva, quatro critérios influenciam uma rota, de modo que cada um estabelece opções que caracterizam o problema de roteamento, Quadro 11.

Quadro 11 - Critérios de rotas

Instalações	são os locais de coleta; pode haver uma só, ou então múltiplas instalações, e cada instalação pode ter a própria capacidade.
Veículos	a demanda pode ser suprida por um só caminhão compactador, ou por caminhões abertos, respeitando a capacidade de cada um.
Rede	representada por um grafo, pode ser orientada, não orientada ou mista, e além disso podem existir outras restrições de trânsito impostas aos veículos.
Demanda	a demanda pode estar localizada em pontos específicos da rede, ou distribuída ao longo de trechos; ela pode ser uniforme ou variável e pode conter restrições temporais; pode, ainda, ser determinística ou estocástica.

Fonte: Adaptado de Sherafat, 2004.

Com bases nesses critérios e do método de solução empregado, existe uma variedade de formulações para a resolução de problemas de roteamento. Assim, por exemplo, com dois grupos de restrições (da rede e da demanda) podem ser obtidas algumas formulações clássicas (EISELT, 1995a; 1995b), que formam os problemas básicos de roteamento, Quadro 12.

Quadro 12 – Problema de roteamento

Problema	Descrição
Caixeiro Viajante	considera a determinação de um circuito de custo mínimo que percorre todos os nós de um dado grafo.
Carteiro Chinês	consiste em determinar um circuito de custo mínimo que contém todos os <i>links</i> (arcos e/ou arestas) do grafo, pelo menos uma vez.
Carteiro Chinês com Vento	tem a mesma formulação de PCC num grafo não orientado, exceto que o custo de percurso de cada aresta varia, a depender de em que sentido ela é percorrida (como se tivesse vento a favor ou vento contra).

Fonte: Adaptado de Sherafat, 2004.

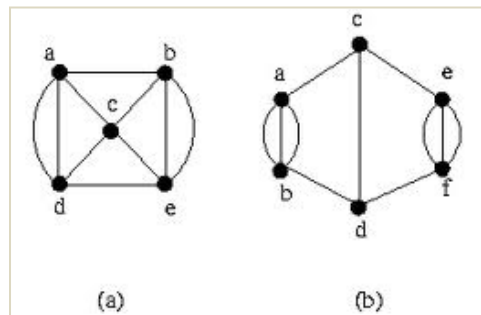
2.2.6 Grafos de Euler

Com base na solução do problema das sete pontes de *Königsberg* por Euler, em que ele prova que é impossível encontrar um caminho fechado de modo que se percorra em só vez todas as pontes, visto que se depara sempre com um problema de se entrar em alguma ilha ainda não utilizada mas não conseguir sair, isto porque todas as pontes já foram percorridas.

Diante desse problema, procurou-se pesquisar um tipo de grafo que atendesse a necessidade de se encontrar algum caminho, ou seja, um caminho fechado, mas que passasse por todas as arestas exatamente uma só vez, conhecido como “caminho de Euler”, ou caminho euleriano.

Assim, um grafo G é considerado euleriano quando existe um caminho fechado (circuito) em G , contendo cada aresta apenas uma vez e cada vértice pelo menos uma vez (circuito euleriano) (NEGREIROS *et al.*, 2009). Já um grafo que não apresente um circuito euleriano, mas contenha um caminho euleriano, pode ser denominado grafo semieuleriano. Um caminho é considerado, todavia, por definição, sempre conexo, de modo que um circuito euleriano apresenta todas as arestas de um grafo. Logo, um grafo euleriano é sempre conexo, exceto de vértices isolados (Figura 11).

Figura 11 - (a) Grafo euleriano (b) Grafo semieuleriano.



Fonte: Sherafat, 2004.

Três pontos, no entanto, são essenciais para o estudo do Grafo de Euler.

1) Se o grafo for conexo, há mais que dois vértices com grau ímpar. Logo, ele não tem um caminho euleriano.

2) Se o grafo conexo tem exatamente dois vértices com grau ímpar, ele terá um caminho euleriano e todo caminho terá que começar em um desses vértices e terminar em outro.

3) Se o grafo conexo não possui vértices com grau ímpar, ele terá um caminho euleriano. Logo, o caminho euleriano será fechado.

O último ponto, entretanto, é uma condição necessária e suficiente para que um grafo G conexo não orientado seja euleriano, de modo que um grafo é euleriano se, e somente se, todo vértice possuir grau par (Teorema de Euler).

2.2.7 Circuitos eulerianos

O circuito euleriano consiste no circuito em que todas as arestas são usadas somente uma vez, sendo, assim, considerado Grafo Euleriano, ou Grafo Unicursal. Desse modo, para que um grafo G obtenha um circuito euleriano, ele deve (EISELT *et al.*, 1995):

- Se G for não dirigido:
 - G deve ser fortemente conexo e todos os vértices devem possuir grau par.
- Se G for dirigido:
 - G deve ser fortemente conexo e todos os vértices devem ter grau de entrada igual ao grau de saída.
- Se G for misto:
 - G deve ser fortemente conexo, todos os vértices devem ter grau par e devem ser balanceados.

Com relação ao teorema básico sobre a existência de um circuito euleriano, em um grafo não dirigido, tem-se:

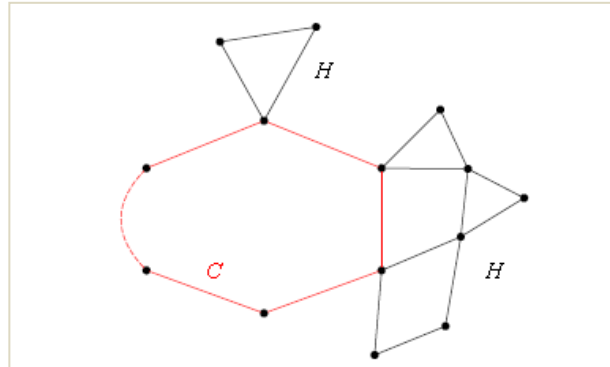
Teorema [EULER, 1971] – Um grafo fortemente conexo $G=(N, E)$ contém um circuito euleriano, se, e somente se, o grafo não tem nenhum nó de grau ímpar.

A demonstração que se faz do teorema é que, se T é um circuito euleriano fechado de G ; se T passa por um vértice v qualquer, então T contribui com pelo menos duas arestas para o grau de v (caso T contribuísse com somente uma aresta, então T seria uma trilha, mas não um circuito, ou não seria uma trilha). Como T é um circuito, cada aresta de G ocorre exatamente uma vez em T . Assim, todos os vértices de G têm as características do vértice v . Logo, cada vértice de G é par e nele se pode construir um circuito euleriano. Dessa maneira, a prova se dá por indução no número de arestas de G , supondo que cada grau de cada vértice de G é par. Como G é conexo, $d(v) \geq 2$ para todo $v \in V$, todavia se $G(V, A)$ é um grafo tal que $d(v) \geq 2$ para todo $v \in V$, então G contém um ciclo (Figura 12). Logo:

- se C contém todas as arestas de G , o teorema está provado.

- se não, tem que remover G das arestas de C , resultando num grafo H , possivelmente desconexo, com menos arestas do que G .

Figura 12 - Iteração do grafo euleriano



Fonte: Sherafat, 2004.

Teorema [EULER, 1741] – Todo grafo tem uma quantidade par de vértices com grau ímpar.

Nesse item, considera-se m como o número de arestas do grafo, de modo que cada aresta está ligada a dois vértices do grafo. Logo, a soma dos graus de todos os vértices corresponde a $2m$. Assim, se $X_p + X_i = 2m$, onde X_p é a soma dos vértices pares e X_i a soma dos vértices ímpares, e como X_p é obviamente um número par, X_i também tem que ser um número par, e se a soma de alguns números ímpares for par, isso significa que a quantidade desde números ímpares é par, logo a quantidade de vértices ímpares é par.

Segundo Edmonds e Johnson (1973), para se construir uma arborescência, um circuito euleriano é uma tarefa trivial, embora com abordagem diferente de Euler; ou seja, uma propriedade notável de um grafo, quando não é euleriano, consiste em não possuir um número par de nós de grau ímpar. Desse modo, pode-se explicar pelo número total de incidências nos nós do grafo, ou seja, se um grafo possui n arestas e cada aresta está em contato com dois nós, a soma de graus de todos os nós será $2n$, que representará um número par. Então, g_p é a soma de graus dos nós de grau par, e g_i a soma para os nós de grau ímpar. Logo,

$$g_p + g_i = 2n$$

Com efeito, g_p e g_i serão um número par, em que, a soma de alguns números ímpares é par, pois a quantidade dos números ímpares é par. Assim, é possível considerar que em qualquer grafo há um número par de nós de grau ímpar.

2.2.8 Problema do carteiro chinês (*Chinese Postman Problem – CPP*)

O CPP é definido com um problema de otimização que objetiva cobrir com um percurso todos os arcos do grafo, e seu foco é minimizar a distância total percorrida. Desse modo, o percurso do carteiro distingue-se do circuito (ou ciclo) euleriano por nele ser permitida, se necessária, a repetição de arestas; no entanto, se o grafo possuir circuitos eulerianos, esses circuitos solucionam o problema. Segundo Edmonds e Johnson (1973), o CPP é exemplo de um problema de roteamento que admite solução em tempo polinomial.

Quanto à natureza da rede, classifica-se em:

- Problema do Carteiro Chinês Não Direcionado (PCCND);
- Problema do Carteiro Chinês Direcionado (PCCD);
- Problema do Carteiro Chinês Misto (PCCM); e
- Problema do Carteiro Rural (PCR) – variante do CPP, uma vez que consiste em calcular uma rota que atende somente a um subconjunto $R \subseteq A$ de arcos (EISELT *et al.*, 1995).

Para um grafo não orientado $G = (N, E)$, conexo, em que a cada aresta $e \in E$ é associado um custo, sendo o circuito em G dito *circuito de carteiro* se ele possuir todas as arestas de E (pelo menos uma vez). Nesse caso, *Chinese Postman Problem* (CPP) consiste em encontrar um circuito de carteiro de custo mínimo. Segundo Kwan (1962), “[...] um carteiro tem que cobrir seu local de trabalho, antes de retornar ao posto. O problema é encontrar a menor distância de percurso para o carteiro”.

Quando um circuito de carteiro contém todas as arestas exatamente uma vez, ele é denominado de *Circuito Euleriano*, e o respectivo grafo de *grafo euleriano*, ou *unicursal*. Logo, se o grafo contém um circuito euleriano, ele é uma solução ótima para o CPP, uma vez que se define um grafo conexo como euleriano, isto é, existe um caminho fechado G que possui exatamente uma vez cada um dos arcos e pelo menos uma vez cada um dos vértices. Segundo Ford e Fulkerson (1962), esse tipo de propriedade consiste na importância das condições necessárias e suficientes para que um grafo conexo G seja euleriano.

A literatura do CPP para redes se divide em três classes de problemas: não direcionados, direcionados e mistos.

Para o grafo não dirigido, todos os vértices devem apresentar um número par de arestas incidentes, sendo os arcos as arestas. Então, o custo c_{ij} associado à aresta (i,j) é igual ao custo c_{ji} , associado à aresta (j,i) .

Quanto ao grafo dirigido, o número de arcos que entra num vértice deve ser igual ao número de vértices que sai. Assim, para um grafo dirigido, o custo c_{ij} é diferente do custo c_{ji} .

Já para o grafo misto, todos os vértices apresentam um número par de arcos incidentes dirigidos e não dirigidos, de sorte que a diferença entre o número de arcos dirigidos é igual ou menor ao número de arcos não dirigidos, mantendo uma condição de equilíbrio. Nesse sentido, um grafo misto é um grafo em que as arestas têm custos iguais, e os arcos custos diferentes.

Na verdade, para cada um dos arcos dos clusters de atendimento, há um caminho correspondente que deverá ser percorrido de maneira a formar um circuito euleriano. Dessa maneira, o *Chinese Postman Problem* (CPP) consiste no problema de otimização que objetiva cobrir com um passeio todos os arcos de um grafo, minimizando a distância total percorrida.

Alguns estudiosos se destacam, haja vista suas pesquisas proporem soluções que evidenciam a otimização de serviços, tais como: Costa *et al.* (2001), que propõem uma solução para o problema de entrega de correspondências realizada pelos serviços postais em que o Algoritmo do Carteiro Chinês é comparado com vários algoritmos de cobertura de nós; Stern e Dror (1978), que aplicaram o Algoritmo do Carteiro Chinês no estudo das rotas dos leituristas de medidores elétricos; pesquisadores como Eglese e Murdock (1991), que apresentaram um *software* para otimizar o serviço de limpeza de ruas com veículos vassoura; além de Ghiani e Improta (2000), que demonstram uma variante do clássico Problema do Carteiro Chinês, o Problema do Carteiro Chinês Hierárquico, em que os arcos são divididos em agrupamentos (*clusters*) e a relação precedente é definida nesses clusters; sua aplicação prática pode ser vista nos controles de neve e gelo nas ruas e estradas.

Desse modo, a formulação matemática do CPP, segundo Bodin e Golden (1983), é apresentada a seguir, Figura 13.

Figura 13 - Formulação matemática do CPP

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (a)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1}^n x_{ji} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (b)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq 1, \quad \forall (i, j) \in A \quad (c)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ inteiras e binárias} \quad (d)$$

Fonte: Sherafat *et al.*, 2004.

Assim, a função objetiva (a) minimiza o custo total, ou seja, a distância total a ser percorrida; (b) as restrições que buscam a continuidade da rota; (c) as restrições que consideram todas as arestas; e (d) as variáveis do problema são não negativas, inteiras e binárias (isto é, serão iguais a “1”, se o arco (x_i, x_j) for transpassado pelo carteiro chinês, e a “0”, caso contrário).

Nesse caso, o problema do carteiro chinês se distingue do circuito euleriano por nele ser permitida, se necessária, a repetição de arestas (GOLDBARG; LUNA, 2005).

2.2.9 Problema do carteiro chinês – passo a passo

Se o grafo não for de Euler, então algumas arestas terão que ser repetidas. Para resolver o problema, utiliza-se o algoritmo do Carteiro Chinês. Desse modo são os passos para a construção:

1. determinar os vértices de grau ímpar;
2. construir a matriz de distância D, com apenas os vértices de grau ímpar; [utilizar o algoritmo de Dijkstra¹ para determinar a matriz D];
3. determinar através da matriz D, o par de vértices v_i e v_j que contém o menor caminho;

¹ Algoritmo de Dijkstra foi criado por Edsger Dijkstra em 1956 e publicado em 1959. Soluciona o problema do caminho mais curto num grafo com arestas de peso não negativo.

4. construir um caminho artificial de v_i para v_j com o custo encontrado em 3 [este caminho artificial representa as arestas de menor custo que serão repetidas entre v_i e v_j];
5. eliminar a matriz D as linhas e colunas correspondentes a v_i e v_j ;
6. se ainda houver linha e coluna, então volta para 3;
7. orientar o grafo;
8. o custo será igual à soma dos custos de todas as arestas acrescida dos custos das arestas encontradas em 3.

Assim, os itens 1, 2, 3 e 4 são os relacionados ao algoritmo do Carteiro Chinês e os 5, 6, 7 e 8 ao algoritmo de Fleury.

2.3 Metodologia multicritérios de auxílio à decisão: ferramenta da gestão sistêmica, integrada e participativa

A teoria da análise de decisão (*Decision Analysis*) denota uma decisão como uma escolha entre as opções que proporcionarão futuros incertos, para a qual existem preferências. Então, uma maneira de explicar os fundamentos da análise de decisão pode ser demonstrada com a imagem do banco de três pernas de Howard (2007), (Figura 14).

Figura 14 – Fundamentos da decisão



Fonte: Howard, 2007.

Didaticamente, pode-se considerar que as pernas do banco são alegoricamente três

elementos de qualquer decisão. Quadro 13.

Quadro 13 - Elementos de decisão

Fato	Descrição	Base da decisão
alternativas	o que você pode fazer	Se o banco apresentar qualquer ausência de perna, não será possível decisão de ser tomada
informação	o que você sabe	
preferências	o que você quer	

Fonte: Adaptado HOWARD, 2007.

O fato é que assento do banco é a lógica que opera na base da decisão para produzir a melhor alternativa (HOWARD, 2007). “O objetivo principal de uma ferramenta de apoio à decisão é aprimorar sua racionalidade, ou seja, aumentar a perspectiva de que uma escolha conduza a um resultado satisfatório.” (MEIRELLES; GOMEZ, 2009, p. 453).

Com relação aos métodos multicritérios, a decisão não se limita ou mesmo seja tratada por meio de algoritmos, mas sempre haverá um fator humano no processo de decisão (GOMES; GOMES, 2014).

Os Métodos Multicritérios de Apoio à Decisão (MCDA) são interpretados por outros autores como Tomada de Decisão Multicritério (MCDM), Métodos de Análise Multicritério (MCA), ou mesmo Apoio Multicritério à Decisão (AMD), todavia as siglas remetem à mesma finalidade de MCDA (CAMPOS, 2011; GIACON, 2012; TORRES, 2014).

Os métodos de multicritério são abordados para equacionar problemas em diversas áreas da atividade humana, como gestão, negócios, engenharia, ciência e muitas outras (BEHZADIAN *et al.*, 2010).

Para Roy (1990), a metodologia de multicritérios de decisão utiliza-se da visão prescritiva e construtiva, para aproximar-se dos problemas, com uma visão descritiva (o mundo como ele se apresenta) e normativa (o mundo como processos e com o uso de fórmulas matemáticas).

A metodologia multicritério é estudada pelos métodos da Escola Americana e pela Escola Francesa. Para a Escola Americana, destacam-se os métodos AHP (SAATY, 1980), TODIM (GOMES *et al.*, 1992), MACBETH (BANA e COSTA; VANSNICK, 1995, 2005) e UTA (JAQUET-LEGREZE; SISKOS, 1982), que buscam analisar os diversos critérios em apenas um, mediante somas ponderadas, e a interação com os agentes é imprescindível. Já na Escola Francesa, há os estudos de *Concorcet*, com os métodos ELECTRE (ROY, 1968, 1978; ROY; SHALKA, 1984) e PROMETHEE (BRANS *et al.*, 1986), (SOARES DE MELLO, *et al.* 2003).

A técnica de construção de fronteiras de produção e de indicadores de eficiência produtiva que teve origem no trabalho de Farrel (1957) e foi generalizada por Charnes *et al.* (1978) é a *Data Envelopmen Analysis* (DEA), uma técnica não paramétrica de avaliação da eficiência relativa de um conjunto de Unidades Tomadoras de Decisão (DMU - *Decision Making Units*) homogêneas. A proposta da técnica é de utilizar as quantidades de *inputs* consumidos e de *outputs* produzidos por unidade e, mediante a da técnica de programação linear, a DEA cria, com suporte na melhor prática observada, a fronteira eficiente de produção, a qual proporcionará a base para a avaliação da eficiência das demais unidades tomadoras de decisão (LIGARDA; NACCHA, 2006).

Nessa perspectiva, a metodologia estabelece algumas vantagens que se baseiam na operacionalidade e julgamento pessoal e podem ser destacadas como:

- a) facilitar o uso de não especialistas, pois quando transformada em um programa de computador que seja o mais amigável possível com o usuário e disponha de recursos gráficos-visuais;
- b) estabelecer-se em um método lógico e transparente;
- c) exercer liberdade de incerteza para interpretações dos dados de entrada;
- d) inserir tanto critérios qualitativos como quantitativos;
- e) exercer julgamentos de valor em escalas cardinais ou verbais; e
- f) lidar com opções que sejam independentes uma das outras, assim como dependentes.

Com isso, Gomes *et al.* (2002, p.73) esclarecem que “[...] tomar uma decisão é fazer uma escolha dentro do conjunto de alternativas factíveis [...] a eficiência na tomada de decisão consiste na escolha da alternativa que [...] ofereça o(s) melhor(es) resultado(s)”.

2.3.1 Métodos multicritério de auxílio à decisão

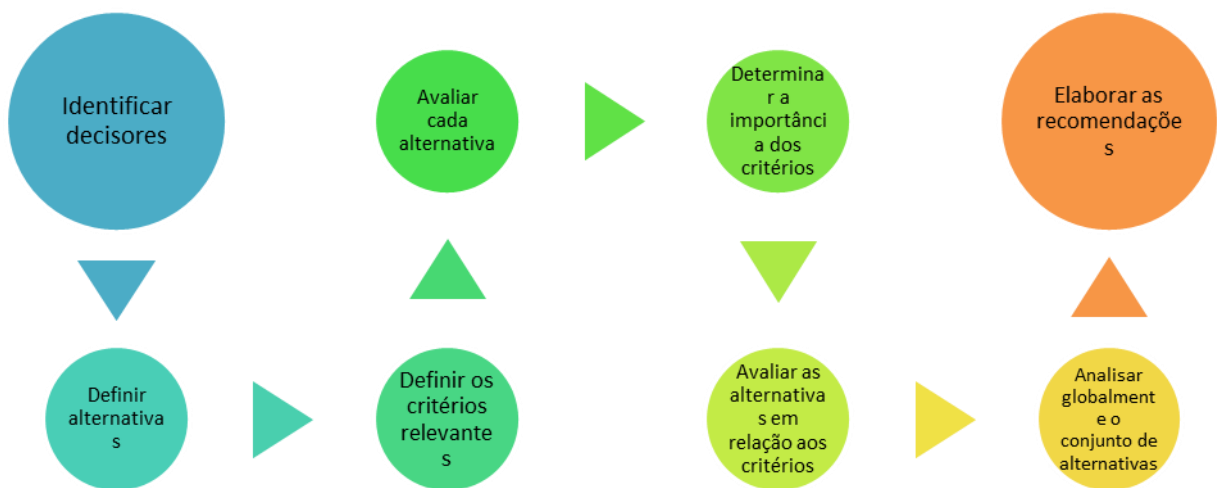
As organizações, constantemente, deparam problemas relacionados à decisão. Esse tipo de situação acontece com frequência, e nem sempre é fácil de resolver. Na maioria das vezes, essas decisões são complexas e envolvem riscos e incertezas, visto que o processo decisório deve decorrer de modo formal, consistente e transparente. Um líder de maneira informal poderia analisar a situação e escolher a melhor alternativa em sua concepção para resolução do problema, mas, como nas organizações os problemas são mais amplos e envolvem a opinião de muitas pessoas, então o processo decisório deve ser estruturado e realizado com certos cuidados.

De acordo com Roy e Vanderpooten (1996), os métodos multicritérios são

empregados em problemas reais em que existe um número predeterminado de opções e na maioria das vezes as preferências são incertas ou existem divergências de opiniões dentro de um grupo de decisores.

A Análise de Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) é definida como um conjunto de métodos que buscam analisar opções agrupadas e relacionadas sobre múltiplos critérios, com a finalidade de solucionar um problema específico (GOMES; GOMES 2014). Ainda segundo Gomes *et al.*(2004), essa análise é um processo interativo, no entanto, podem seguir algumas etapas sequenciadas, Figura 15.

Figura 15 – Etapas da Análise de Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA)



Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2004).

São comuns, nas diversas áreas, problemas complexos, envolvendo múltiplos critérios. Em geral, são identificados quando exprimem critérios conflitantes entre si que não são compreendidos, ou quando os critérios são subjetivos ou não quantificáveis, sendo necessária aplicar uma escala de valor, ou seja, atribuir valores a tais critérios como forma de abordá-los no processo decisório. Sendo assim, na utilização desses métodos, existe uma grande interação dos dados qualitativos e quantitativos para a tomada de decisão (GOMES, *et al.* 2004; NOGUEIRA, 2010).

Os métodos multicritérios de tomada de decisão envolvem muitas variáveis que precisam ser organizadas para a adequada compreensão do problema abordado (TZENG; HUANG, 2011). É necessário analisar quais são os critérios que possuem influência sob a decisão para compreender de modo preciso o problema abordado, após serem coletados os

dados, e informações adequadas para estabelecer corretamente as preferências, avaliando coerentemente as opções e, finalmente, deve ser selecionado um método adequado que auxilie na avaliação da melhor alternativa, de acordo com a estratégia abordada no processo decisório.

Sob o ponto de vista de tomada de decisão, os problemas podem ser classificados em três categorias: problemas estruturados, semi estruturados e não estruturados (TURBAN; ARONSON, 1998). Um problema é considerado estruturado quando sua definição e fases operacionais para atingir os resultados esperados são claros e sua execução repetida é sempre possível; os semi estruturados são problemas com operações conhecidas, mas que possuem fatores variáveis que podem influir nos resultados; já nos problemas não estruturados, os cenários e critérios de decisão não são fixados ou conhecidos.

No processo de decisão, o primeiro passo é formular o problema, com muita cautela, pois erros podem ser cometidos, e, ao formular de modo incorreto o problema, acarretará em um resultado que reduz a eficiência e a eficácia. Simon (1977) considera a solução de um problema de decisão em atividades empresariais que podem ser visualizadas em quatro etapas: percepção da necessidade de decisão, formulação das opções de ação, avaliação das opções em suas respectivas contribuições e tomada de uma ou mais opções para execução.

O passo a passo para o processo de tomada de decisão (SHIMIZU, 2006), elabora:

Fase um - Formulação

- I. Definir o problema e suas variáveis relevantes (parâmetros).
- II. Estabelecer os critérios ou objetivos de decisão.
- III. Relacionar os parâmetros com os objetivos; ou seja, modelar o problema.
- IV. Gerar as opções de decisão e as dos cenários possíveis, para diferentes valores dos parâmetros.

Fase dois – Tomada de Decisão

V. Avaliar as opções e escolher a que melhor satisfaz aos objetivos (método de decisão).

VI. Implementar a decisão escolhida e monitorar os resultados por meio de: (a) análise de sensibilidade dos resultados, para poder responder à pergunta do tipo “*what – if*”; e (b) aprendizagem pela retroalimentação dos resultados, para poder alterar ou melhorar o modelo.

Assim, a escolha de um modelo depende da finalidade da decisão, da limitação do tempo e custo e da complexidade do problema. Um problema, no entanto, pode ser

considerado complexo quando:

- a) o número de variáveis e/ou objetivos aumenta (são os problemas multidimensionados de grande porte, com múltiplos objetivos);
- b) a ocorrência das variáveis e/ou dos objetivos está sujeita a risco ou incerteza;
- c) as variáveis e/ou objetivos são definidos de modo impreciso, nebuloso ou difuso (*fuzzy*).

Os problemas podem ser classificados, segundo o nível de incerteza, em:

- a) problemas com certeza completa, quando os valores das variáveis e objetivos são conhecidos;
- b) problemas com risco ou incerteza, quando os valores das variáveis e os objetivos dependem de uma lei da probabilidade;
- c) problemas com incerteza extrema, quando os valores das variáveis e dos objetivos não são conhecidos e se deve usar algum tipo de sorteio para efetuar a decisão.

Nesse sentido, a tomada de decisão envolve em seu processo quase sempre a escolha da melhor decisão, levando em consideração múltiplos critérios, fatores ou objetivos. Não há solução objetiva que seja melhor do que outra para critérios considerados simultaneamente. São usados os termos critério, objetivo e restrição como se fossem sinônimos. Os critérios são fatores ou variáveis qualitativas ou quantitativas consideradas na seleção da melhor alternativa de decisão.

Assim, quando a tomada de decisão envolve múltiplos critérios surgem conflitos de preferências que interferem no processo decisório. Então, métodos eficazes de apoio à tomada de decisão são necessários para o andamento do processo. De acordo com Roy e Vanderpooten (1996), os métodos multicritérios são empregados em problemas reais onde existe um número predeterminado de opções e na maioria das vezes as preferências são incertas ou existem divergências de opiniões dentro de um grupo de decisões.

Os problemas complexos, envolvendo múltiplos critérios, em geral são identificados quando denotam critérios conflitantes entre si que não são compreendidos, ou quando os critérios são subjetivos ou não quantificáveis, sendo necessário aplicar uma escala de valor, ou seja, atribuir valores a tais critérios como forma de abordá-los no processo decisório. Sendo assim, na utilização desses métodos, existe grande interação dos dados qualitativos e quantitativos para a tomada de decisão (GOMES *et al.*, 2004; NOGUEIRA, 2010).

Nessa perspectiva, os métodos multicritérios envolvem muitas variáveis que precisam ser organizadas para a adequada compreensão do problema abordado (TZENG;

HUANG, 2011). É importante verificar quais são os critérios que possuem influência sobre a decisão para, então, compreender precisamente o problema abordado. Depois de serem coletados os dados e informações adequados, devem-se construir as preferências, avaliando coerentemente as opções, e, finalmente, deve ser selecionado um método adequado que auxilie na avaliação da melhor alternativa de acordo com a estratégia abordada no processo decisório.

2.3.2 Metodologia multicritério de apoio à tomada de decisão

A elaboração de um modelo de multicritério de apoio à decisão de cunho construtivista tem como propósito auxiliar na tomada de decisões, considerando as percepções e valores dos envolvidos no processo, de modo que se insere na perspectiva de uma visão epistemológica, acerca de apoio à tomada de decisões (ENSSLIN, *et al.*, 2001).

O modelo de multicritério a ser escolhido dará em função da simplicidade de aplicação do modelo em estudo, visto que auxilia a reduzir a subjetividade das opções por meio de sua programação. O Quadro 14 traz pontos positivos e negativos referentes aos modelos de análise multicritério que correspondem a mesma proposta do Macbeth.

Quadro 14 - Pontos positivos e negativos referentes aos modelos de análise multicritério

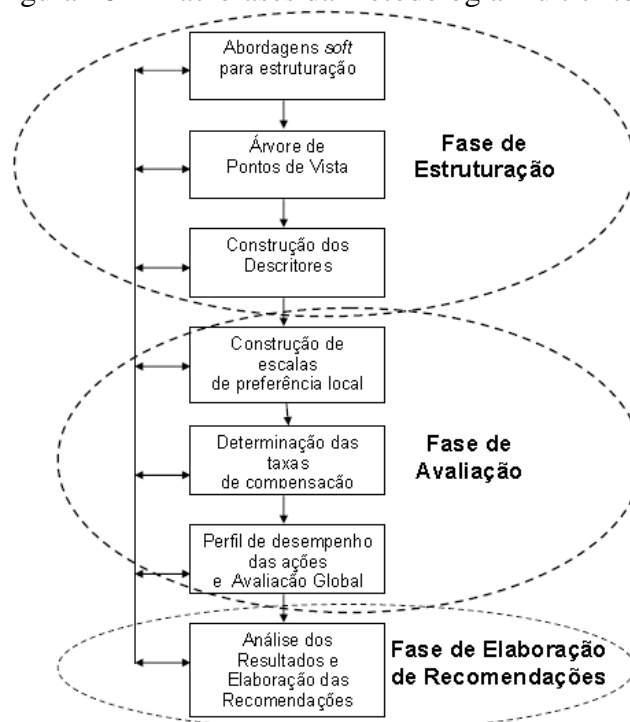
AHP – Analytic Hierachy Process (Thomas Saaty – 1980)	<p>(+) Processo baseado na hierarquização do problema de decisões em árvore e formato qualitativo facilita a relação com os participantes do processo.</p> <p>(-) A conversão da escala verbal para a numérica e a forma de definição dos pesos dos critérios.</p>
ELECTRE – Electre I (Roy - 1968)	<p>(+) Utilizam a modelação de preferência baseada nas relações de sobreclassificação entre pares de ações.</p> <p>(-) Envolve conceitos complexos e um grande número de parâmetros.</p>
PROMÉTHÉE – (Brans e Viincke – 1982)	<p>(+) Está ancorada numa modelação matemática robusta e consegue processar problemas de grande complexidade, com aqueles que envolvem elementos estocástico.</p> <p>(-) O modelo tem dificuldade de trabalhar com premissas subjetivas.</p>
MACBETH – (Carlos Banna e Costa e Jean Claude Vansnick – 1994)	<p>(+) Simplicidade do método, que requer apenas julgamentos qualitativos sobre as diferenças de atratividade entre elementos para gerar pontuações; aplicação qualitativa e grande interatividade.</p> <p>(-) Subjetividade.</p>

Fonte: Adaptado de Moraes (2017).

Assim, o grau de complexidade em situações decisórias envolve atores e agentes e interferem no processo de decisão, visto que apresentam objetivos, critérios, preferências e interesses pessoais, refletindo situações, algumas vezes, de natureza caótica, em razão dos conflitos e ambientes competitivos.

O modelo é importante, visto que exprime viabilidade, reaplicação e pertinência para outras avaliações de cunho institucional, comercial e qualificação da pesquisa, apresentando com as macrofases da metodologia multicritério, Figura 16.

Figura 16 – Macrofases da metodologia multicritério



Fonte: Adaptado de Ensslin *et al.* (2000, p. 81).

O modelo está estruturado com base na metodologia multicritério, que tem abordagem de apoio à decisão descrita por Ensslin *et al.* (2000), em que as escalas estão associadas aos níveis de impacto e taxas de substituição dos critérios que, para configuração, são substituídas pelo método Macbeth desenvolvido por Bana e Costa e Vansnick (1995). O *software* utilizado para operacionalizar o método foi M-MACBETH®, versão 2.5.0, apenas para o uso acadêmico (BANA CONSULTING LTDA, 2018).

A escolha da problemática, segundo Ensslin *et al.* (2001), se deu por via do processo de estruturação do modelo multicritério e na definição dos critérios a serem trabalhados. Os tipos de problemáticas que definem o resultado esperado são: escolha, que tem como propósito esclarecer a decisão diante da seleção de um conjunto restrito, que apresenta as melhores ações e que definem a escolha de uma alternativa; classificação esse

tipo de problemática está ligado na busca pela organização que é feita pela triagem de ações possíveis de categorias distintas, mas definidas; ordenação consiste no agrupamento de ações que acontecem por ordem de preferência; descrição esclarece as ações potenciais que acontecem pelas decisões e suas consequências (GOMES *et al.*, 2009).

2.3.3 Metodologia M-Macbeth

O método multicritério de apoio à decisão busca fazer sua associação com o seu elemento original, a Pesquisa Operacional. De acordo com Roy e Vanderpooten (1996), trata-se de uma ferramenta importante de tomada de decisão, utilizada inicialmente na Segunda Guerra Mundial. Tornou-se, entretanto, um instrumento de apoio à decisão empresarial, tendo como propósito soluções precisas que direcionam os tomadores de decisão para uma determinada ação, que tem como pontos de partida pressupostos definidos: Estruturação dos critérios; Avaliação e ponderação dos critérios; Avaliação das alternativas e Análise MCDA: Estudo do método M-Macbeth.

O método Macbeth (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) se diferencia de outros métodos multicritérios por se fundamentar na ponderação dos critérios e na avaliação das opções em julgamentos qualitativos sobre diferenças de atratividade. Por meio do método, pode realizar a comparação de dados qualitativos mediante um procedimento não numérico, buscando quantificar a atratividade relativa das opções.

A praticidade é fator determinante, pois o método sugere interação que beneficia o sistema de apoio à decisão de modo eficiente, trabalha com uma matriz de julgamentos baseada nas diferenças de “atratividade”, o que permite verificação visual de consistência, assim como uma comparação par a par em uma escala intervalar que proporcionará um *ranking* completo com pontuação, por meio do *software* M-Macbeth (BANA e COSTA *et al.*, 2005).

De acordo com Marques *et al.*, (2011), com as respostas, a consistência é analisada mediante uma escala numérica que representa os julgamentos dos tomadores de decisão. O método nesse caso possibilita adicionar notas a cada opção por meio da comparação pareada. Assim, dadas as opções, o decisor julgará qual a mais atrativa e qual o grau desta atratividade em uma escala semântica.

O Macbeth (BANA *Consulting*, 2007) é um sistema multicritério de apoio à decisão, concebido para ser usado por um consultor (facilitado ou analista de decisão), seguindo o princípio construtivista segundo o qual “[...] o problema e a solução pertencem ao decisor e não ao consultor” (SCHEIN, 1999). É um processo sociotécnico com várias fases

(Figura 17), que “[...] combina elementos técnicos da análise multicritério com aspectos sociais de *decision conferencing*” (BANA E COSTA *et al.*, 2013).

Figura 17 - Fases do processo M-Macbeth de apoio multicritério à decisão



Fonte: Bana e Costa *et al.* (2012).

A metodologia Macbeth pode utilizar o *software* M-Macbeth em suas etapas de apoio à tomada de decisões: estruturação, avaliação e elaboração de recomendações.

Quanto à escala de valores, para que sejam atribuídas notas às opções de cada critério, o *software* faz uso do módulo *scores*, comparando, par a par, cada alternativa, e por programação linear. Propõe uma escala de notas, analisando também os intervalos de variação, sem tornar o problema inconsistente. Para atribuir pesos e para construção do critério-síntese, é utilizado o módulo *weights* do M-Macbeth. O M-Macbeth faz a comparação dos critérios de forma indireta e considerando fictícias as opções dos critérios (SOARES DE MELLO *et al.*, 2003).

O índice pode ser construído quando se reúnem todos os critérios do problema por meio da análise e atribuição de pesos, preferências e escalas. A escolha da metodologia Macbeth, que pode ser considerada da Escola Americana de multicritério, tendo sido desenvolvida por Bana e Costa; Vansnick (1995; 1997) e apresentada em Bana e Costa; Chagas (2004).

Essa metodologia de apoio à tomada de decisão avalia opções, considerando múltiplos critérios, sendo: a) capaz de transformar julgamentos qualitativos em quantitativos; b) verificar automaticamente a consistência dos julgamentos, proporcionando sugestões para solucionar eventuais inconsistências; c) o *software* é de fácil uso e de fácil explicação para o decisor, incluindo, nesse caso, a explicação da base axiomática; d) permite explicitar as preferências do decisor.

Para obtenção de funções de valor para os descritores (hierarquia de níveis de

impacto) foi utilizada a ferramenta Macbeth, por meio do *software* M-Macbeth versão 2.5.0, que gera as funções de valor para os critérios selecionados, assim como calcula as taxas de substituição de cada um deles. A proposta da ferramenta é de operacionalizar um método de julgamento semântico que ocorre por meio de comparações entre todos os possíveis pares de níveis de impacto de um critério (BANA e COSTA; VANISNICK, 1995).

O procedimento inicial para a utilização do método para os critérios ocorre de uma função de valor cardinal ou mensurável, de modo que ordena as diferenças de intensidade de preferência entre os pares de/ou entre as opções (DYER; SARIN, 1979).

A construção da estrutura hierárquica é a etapa em que se apresenta a árvore de decisão do *software* M-Macbeth, onde os pontos de vista fundamentais (PVF's) são os aspectos essenciais apontados pelos entrevistados no processo de construção do modelo de decisão. Os níveis de impacto da hierarquia são opções avaliadas e podem ser de ordem qualitativa ou quantitativa.

Segundo Bana e Costa *et al.* (1995), a relação entre as escalas associadas aos níveis de impacto dos PVF's e as taxas de substituição consiste no uso de categorias de atratividade que buscam expressar as diferenças de valor entre pares de ações potenciais que se caracterizam pelos níveis de impacto dos critérios. Essas categorias de diferença de atratividade no *software* M-Macbeth versão 2.5.0 apenas para o uso acadêmico e utilizadas na pesquisa são: Nula; Muito Fraca; Fraca; Moderada; Forte; Muito Forte; Extrema.

A representatividade das categorias de atratividade, no entanto, ocorre quando há uma intensidade de preferência do decisor entre duas ações ou níveis de impacto do PVF (ENSSLIN *et al.*, 2001).

As categorias de atratividade são importantes, visto que são utilizadas em matrizes de julgamentos semânticos e estudadas par a par, onde as declarações de diferença de atratividade entre os níveis são ordenadas pelos descritores de cada PVF.

A função de valor cardinal é calculada pelo *software* M-Macbeth por meio de quatro programas de programação linear (Mc1, Mc2, Mc3, Mc4), Quadro 15, que são resolvidos sequencialmente (BANA e COSTA, 1995). Para Bana e Costa *et al.* (1995, p. 24), “[...] Macbeth foi concebido para ser utilizado como um método interativo de apoio à construção de uma escala cardinal sobre um conjunto A de ações”.

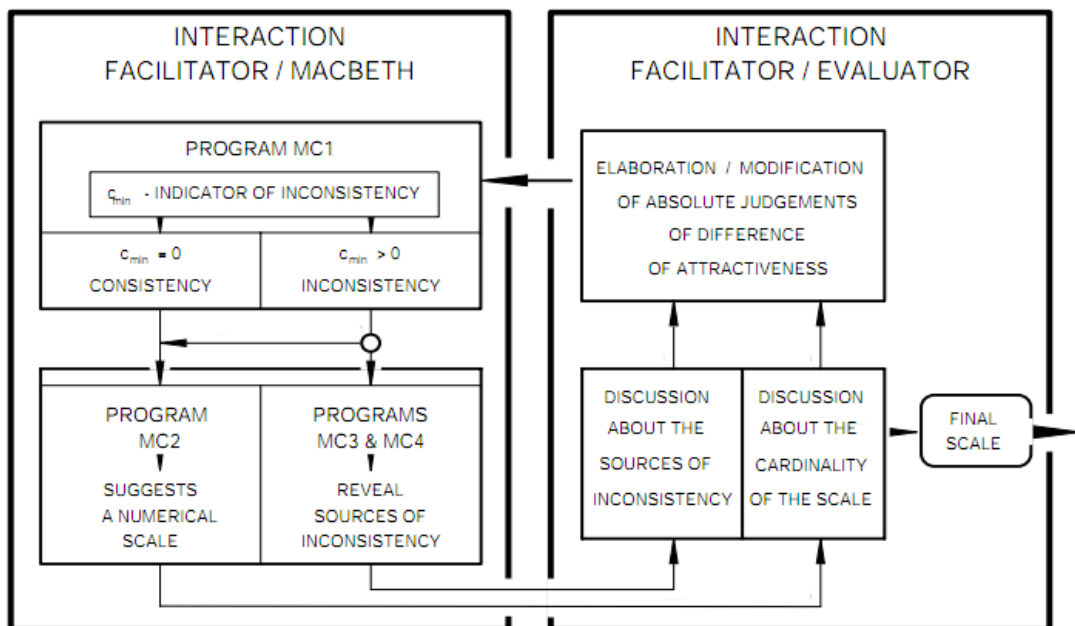
Quadro 15 – Etapas de programação linear

Programa Mc1	Revela o indicador de inconsistência (C_{min}), sendo $C_{min}=0$ (consistência) e $C_{min}>0$ (inconsistência)
Programa Mc2	Sugere uma escala numérica
Programa Mc3	Identificam e revelam causas da inconsistência
Programa Mc4	

Fonte: Adaptado Bana e Costa *et al.* (1995).

Desse modo, é possível afirmar que as agregações matemáticas são alcançadas por meio do *software* M-Macbeth que operacionaliza a técnica de forma sistêmica. O fato é que, pela aplicação do *software*, são realizadas as apreciações de julgamento pelo tomador de decisão. Com isso, mediante a programação linear, o M-Macbeth apresenta a escala de avaliação e os intervalos em que as avaliações podem modificar, sem que o problema se apresente inconsistente nos julgamentos, Figura 18 (LONGARAY *et al.* 2010).

Figura 18 – Dinâmica do modelo Macbeth



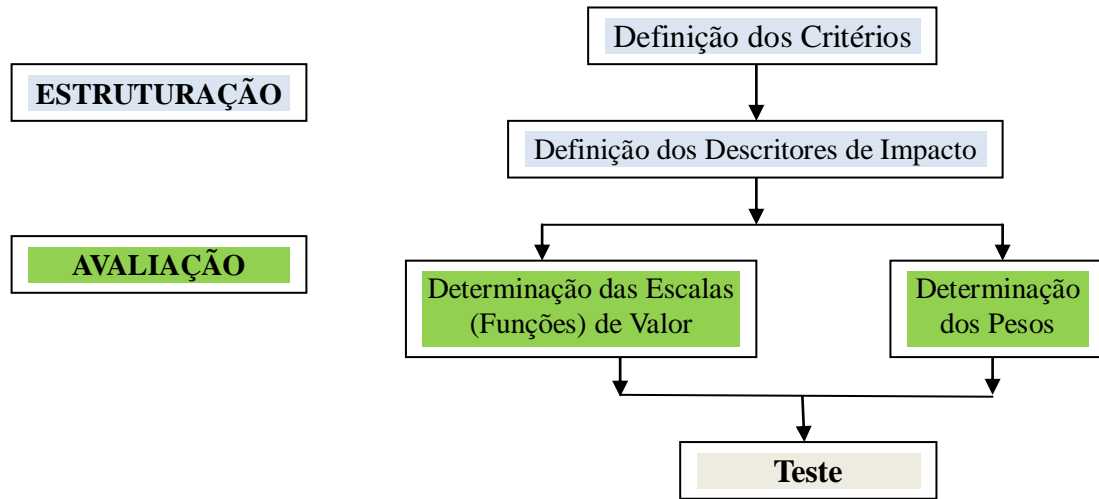
Fonte: Adaptado de Bana e Costa *et al.* (2003).

De acordo com Bana e Costa; Vansnick (1995) afirmar que o método Macbeth, matematicamente, apresenta quatro problemas de programação linear (PPL's) sequenciais que fazem a análise de consistência cardinal, a construção da escala valor cardinal e assim revelam as eventuais inconsistências.

O processo de estruturação e avaliação dos pesos dos critérios, Figura 19,

baseados pelo método Macbeth consiste em:

Figura 19 - Estruturação e avaliação dos pesos dos critérios Macbeth



Fonte: Adaptado de Almeida *et al.*, 2011, p. 56

Com a posse dos julgamentos absolutos de valor conforme cada um dos critérios, é essencial se obter informações de natureza intercritérios (representadas por constantes de escala, taxas de substituição ou pesos), para uma avaliação global das opções. Para a construção do método Macbeth, cada critério é interpretado por uma alternativa fictícia que tenha a melhor avaliação possível nesse critério e a pior nos demais critérios (BANA e COSTA; VANSNICK, 1995).

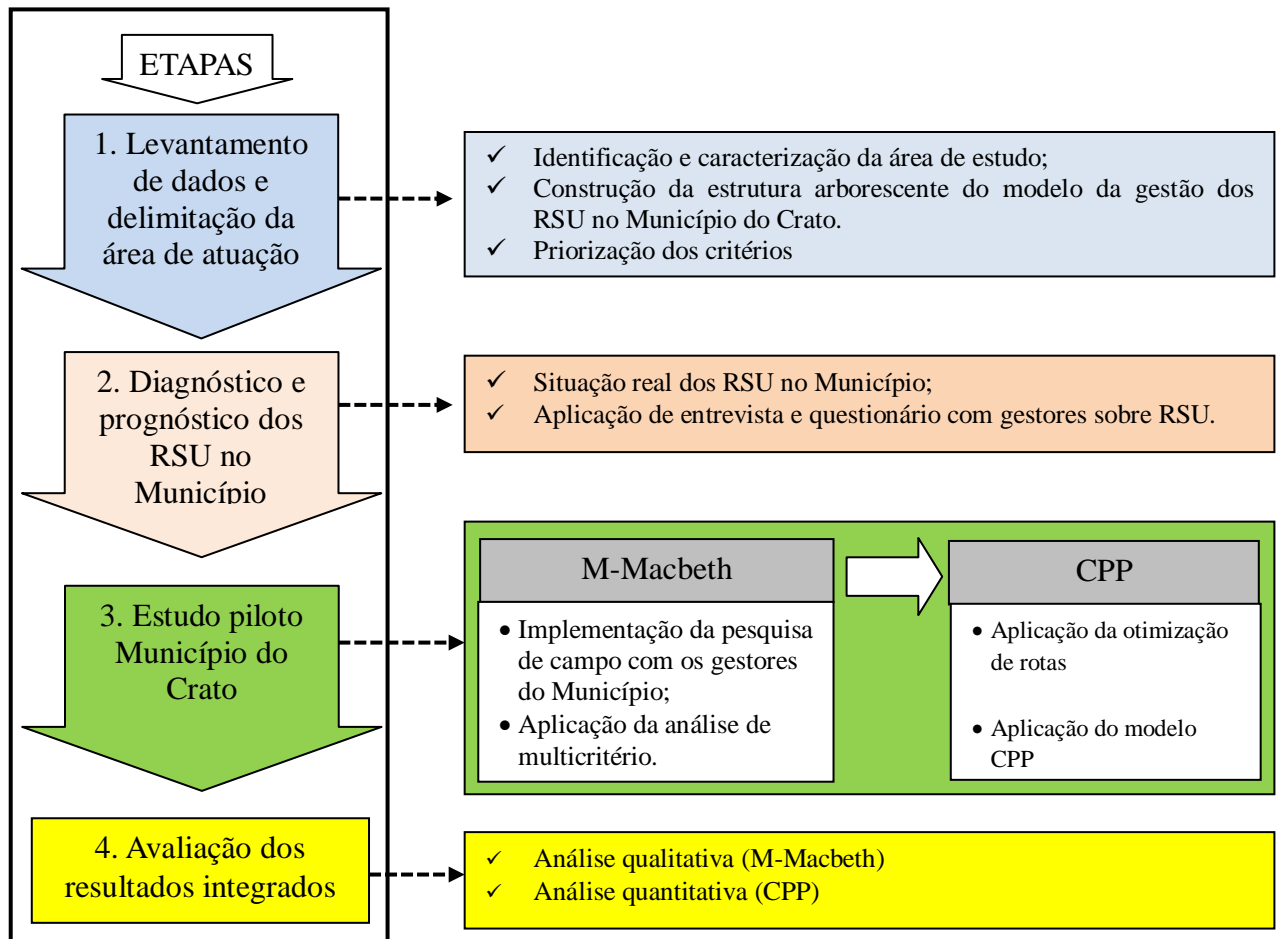
Vale destacar que o modelo multicritério da decisão mediante o uso do *software* Macbeth pode ser aplicado para comparar ações entre áreas distintas e também pode ser utilizado para avaliar qual seria a escolha para distintos tipos de tomadas de decisões dos gestores, possibilitando a inclusão de variáveis qualitativas na análise, o que não é muito considerado nos modelos quantitativos tradicionais.

3 METODOLOGIA

O trabalho teve como referencial teórico os conceitos, práticas e aplicações da área de concentração em saneamento ambiental, tendo como embasamento pesquisa bibliográfica, livros técnico-científicos, dissertações, teses e artigos nacionais e internacionais que abordam, de modo sistemático, profundo e coeso, os aspectos bibliográficos a serem expostos continuamente no trabalho, favorecendo, assim, a interface do conhecimento estabelecido com o saber proposto.

A Figura 20 apresenta as etapas desenvolvidas no decorrer da fase metodológica, que se torna fundamental no desenvolvimento da pesquisa.

Figura 20 – Etapas de desenvolvimento da metodologia da pesquisa no Município do Crato



Fonte: Elaboração da autora (2019).

O estudo de caso consiste de algumas etapas, tais como: contextualização, caracterização, informações básicas do Município e das características do fluxo de resíduos sólidos urbanos do Crato, cidade estudada.

3.1 Descrição das etapas do desenvolvimento da pesquisa

3.1.1 Levantamento de dados e delimitação da área de estudo

A primeira etapa do desenvolvimento da metodologia consistiu no levantamento de dados e da delimitação da área de atuação. Por critério de maior consistência de dados e acesso às informações nos órgãos públicos e privados foi escolhido o Município do Crato e para aplicação da otimização de rotas dos RSU é o bairro Centro, devido a maior concentração de comércios e serviços, além do fluxo de pessoas.

Com efeito, um gerenciamento mais eficiente com algumas etapas constitui fator essencial para auxiliar na melhoria e estabelecimento da gestão dos RSU.

Segundo Nascimento (2015), a Região Metropolitana do Cariri é importante para o desenvolvimento e crescimento da região, mas não há um planejamento que seja efetivo para as áreas metropolitanas, de tal modo que contemplem os seus aspectos principais e unam políticas públicas associadas à participação da sociedade; e que tenham como resultado a transformação do meio social, econômico e ambiental. Figura 21.

Figura 21 - Localização da Região Metropolitana do Cariri, 2012



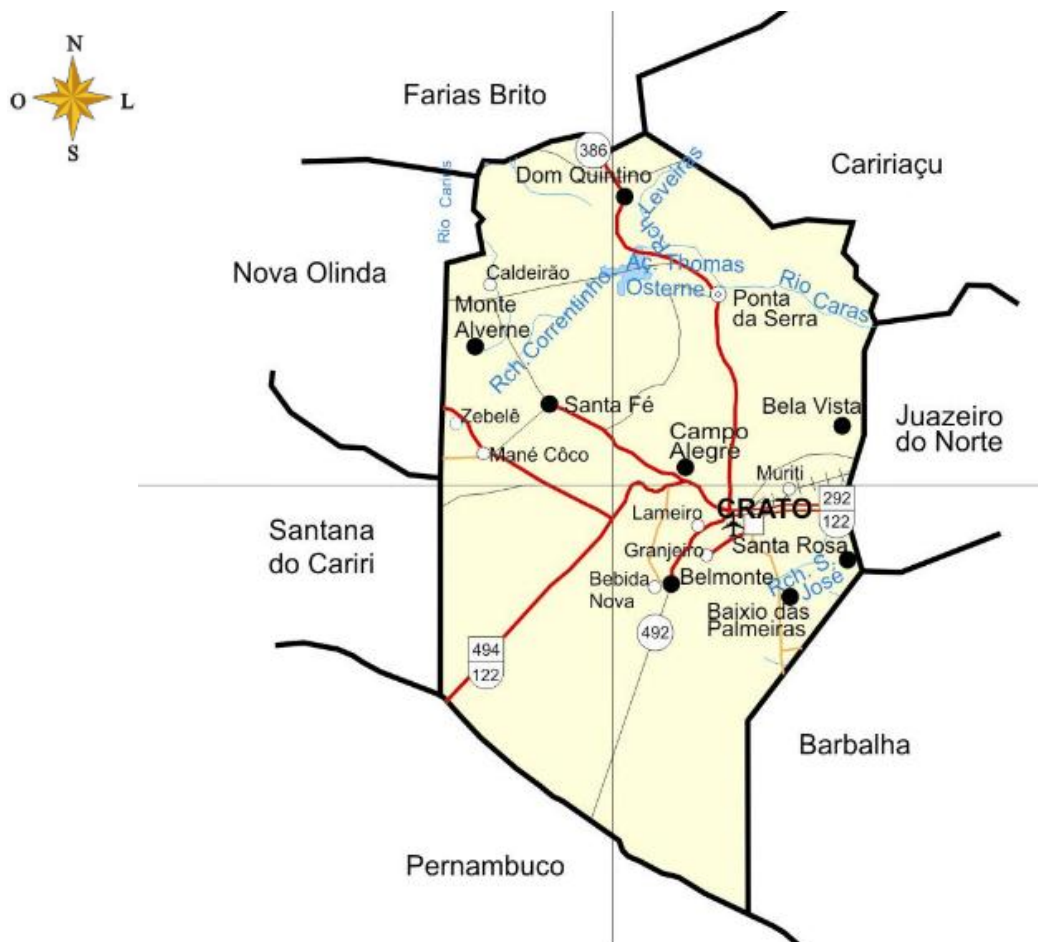
Fonte: IPECE (2012).

Crato é um dos municípios da Região Metropolitana do Cariri – RMC (Lei Complementar Estadual 78/2009). O Município tem uma distância rodoviária de

aproximadamente 402,4 quilômetros da Capital cearense (IBGE, 2016). Com uma população de 121.428 habitantes, dividida em, 100.916 na zona urbana e 20.512 na zona rural, distribuídos em uma área total de 1.176,5 km² e densidade demográfica de 103,21 hab./km². É a sexta cidade mais populosa do Estado em número de residentes e o 9º maior PIB do Estado (IBGE, 2010).

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDHM) - Crato é 0,713, em 2010, o que situa esse Município na faixa de Desenvolvimento Humano Alto (IDHM de 0,700 a 0,799). A dimensão que mais contribui para o IDHM do Município é Longevidade, com índice de 0,822, seguida de Educação, com índice de 0,673, e de Renda, com índice de 0,655 (PNUD, 2013). Seus distritos são: Crato (sede), Baixio das Palmeiras, Belmonte, Campo Alegre, Dom Quintino, Monte Alverne, Bela Vista, Ponta da Serra, Santa Fé e Santa Rosa (IPECE, 2017), Figura 22.

Figura 22 - Localização geográfica do Município do Crato, em 2017



Fonte: IPECE (2017).

Ainda nessa etapa, se deu a construção formal do modelo de decisão a partir da elaboração do modelo da gestão dos RSU no Município do Crato, composta de 38 critérios em dez áreas de agrupamento.

A estrutura arborescente organiza os critérios de forma hierárquica, de tal modo que separa áreas ou grupos comuns de interesse ou mesmo de pertinência. Desse modo, o objetivo geral é construir um modelo de tomada de decisão que possa levar ao gestor municipal os elementos de como proceder sobre a problemática dos RSU definido a partir dos principais objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos e, logo após, os critérios de avaliação utilizados são apresentados.

Com procedência nesse objetivo, são definidas e descritas características dos critérios relacionadas aos RSU do Município do Crato.

Os critérios oferecidos são baseados em práticas ocorrentes no Brasil e no mundo e de modelos de gerenciamento dos RSU. Por fim, a árvore do modelo de decisão é criada, de modo que os critérios foram selecionados, também com amparo na pesquisa de outros trabalhos realizados no âmbito da gestão de resíduos sólidos urbanos, e correspondem aos principais aspectos a serem avaliados e melhorados nos municípios. Assim, as questões (critérios de avaliação) foram fundamentadas e se considerou necessária a elaboração de uma estrutura que contemplasse os fatores propostos. As áreas são ambiental, social, econômica, política e regulatória, que foram escolhidas com base em Chang; Pires (2015); Lima *et al.* (2014); NBR 13.896/97; Manual do IBAM; Abelpre (2017); IBGE (2017); PNUD (2016); Brasil (2010a), Planejamento com base em US EPA (2002) e Brasil (2010 a, b, c e d), Institucional foi escolhido com suporte em ISWA e ABRELPE (2017). Já para o critérioecoinovação e tecnologias ocorreu, com base na Agenda 21 (1997); Brasil (2010a).

Dentre os vários critérios apontados por esses autores, foram escolhidos 38 que se julgou serem eficientes para a construção do modelo da gestão dos RSU. Os critérios e a descrição dos níveis de impacto para cada critério foram constituídos de modo a contribuir para a tomada de decisão do gestor municipal, tendo como subsídio as opções oferecidas. Esta avaliação foi estruturada segundo 38 critérios gerais, agrupados em dez áreas, de modo que, para cada critério, há opções que permitem estabelecer distintos graus de importância e de valor que ajudam o tomador de decisão a ter uma visão panorâmica do problema. As opções indicam o estado de cada área e seu critério. (Quadro 16).

Quadro 16 - Estrutura arborecente do modelo da gestão dos RSU no Município do Crato

Áreas	Critérios	Alternativas	Prioridade	Descrição dos níveis de impacto para área critério	Fonte de Pesquisa	Referências
Ambientais	Destinação final	Adequado		Montante em massa de RSU destinados aos lixões e aterro controlado onde ocorre a etapa de valorização dos RSU com o emprego de tecnologias de aproveitamento, como a reciclagem.	<i>In loco</i>	Chang e Pires (2015); Lima et. al (2014); NBR 13.896/97; Manual do IBAM; Abelpre (2017); IBGE (2017); PNUD (2016); Brasil (2010a); CETESB (2015); Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9605/1998), CETESB, (2012), <i>in loco</i> ; análise documental; Dantas (2013); Farias (2002); Resolução CONAMA Nº 460/2013; <i>1st Joint World Congress on Groundwater</i> Mendonça; Frischkorn; Santiago & Mendes Filho (2000)
		Inadequado	X			
	Adequação do local de disposição final dos RSU	Adequado		A área de disposição final foi liberada por lei, ou seja, é adequado o que minimiza ou elimina os impactos causados pela disposição a céu aberto.	Análise documental: Licença de operação	
		Inadequado	X			
	Controle da contaminação dos cursos d'água	Adequado		De acordo com a NBR 13.896/97 as áreas não podem situar-se a menos de 200m de corpos d'água.	<i>In loco</i>	
		Inadequado	X			
	Profundidade do lençol freático	Maior do que 3m		De acordo com a NBR 13.896/97 a área onde será implantado o aterro sanitário deve apresentar solo homogêneo de 3,0m de espessura entre a base do aterro e o nível do lençol freático mais alto, com coeficiente de permeabilidade de $K = 1,0 \times 10^{-6}$ cm/s, sendo aceitável uma distância mínima, entre a base do aterro e a cota máxima do aquífero freático igual a 1,5m, para um coeficiente de permeabilidade $K = 5 \times 10^{-5}$ cm/s.	Análise documental <i>In loco</i>	
		De 1 a 3m	X			
		De 0 a 1m				
	Controle da contaminação dos solos	Adequado		É desejável que o solo tenha uma baixa condutividade hidráulica para evitar a percolação do chorume. Resolução CONAMA Nº 460/2013 - "Altera a Resolução CONAMA n. 420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e dá outras providências." - Data da legislação: 30/12/2013 - Publicação DOU, de 30/12/2013, pág. 153.	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequado	X			

Continuação

Áreas	Critérios	Alternativas	Prioridade /Peso	Descrição dos níveis de impacto para área critério	Fonte de Pesquisa	Referências
	Percentual de redução de resíduos com a coleta seletiva	Suficiente		Visa a ações que realizam reutilização e reciclagem dos materiais, os quais passarão a ser consideradas matérias-primas secundárias e retornarão ao ciclo produtivo e ao mercado consumidor. Os materiais são separados pela Associação de Recicladores, catadores de rua, catadores que permanecem no lixão e depósitos que comercializam o material coletado/comprado.	Estatística da Associação <i>In loco</i>	
		Insuficiente				
	Qualidade do ar	Com restrições	X	É um crime ambiental que provoca danos à saúde humana, a mortandade de animais e a destruição da flora.	Análise documental <i>In loco</i>	
		Adequada				
	Qualidade do ar	Inadequada	X			
		Adequada				
Sociais	IDHM	0,713		O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é uma medida resumida do progresso a longo prazo em três dimensões básicas do desenvolvimento humano: renda, educação e saúde	Análise documental <i>In loco</i>	
	PIB <i>per capita</i> (2014)	R\$ 11.578,96		Representa a soma (em valores monetários) de todos os bens e serviços finais produzidos numa determinada região		
	Saúde pública	Suficiente	X	Indisposição com o poder público, gerando reações negativas através da mídia e problemas com a comunidade local.		
		Insuficiente				
	Geração de emprego e renda	Suficiente		São os serviços relacionados a gestão dos resíduos sólidos.		
		Insuficiente	X			
	Utilização de EPI's	Adequada		Utilização dos equipamentos de proteção, por se tratar de atividades insalubres e evitar a contaminação.		
		Inadequada	X			
	Inserção de catadores informais	Adequada		Retirada de catadores informais das áreas insalubres e sua inserção em programas e iniciativas sociais.		
		Inadequada	X			
Proximidade de núcleos habitacionais	Longe > 500m		Os núcleos habitacionais devem estar a mais de 500 metros do local de destinação final dos RSU para reduzir os incômodos			
	Próximo	X				

Continuação

Áreas	Critérios	Alternativas	Prioridade /Peso	Descrição dos níveis de impacto para área critério	Fonte de Pesquisa	Referências
				provocados aos moradores, tais como: odores, fumaça, barulho dos veículos, presença de vetores)		
Econômicas	Investimentos na coleta convencional dos RSU's	Adequada		Custos relacionados aos recursos financeiros referentes aos RSU's, em que a administração pública tem a responsabilidade em arcar com tais investimentos.	Análise documental	
		Inadequada	X			
	Investimentos nas associações de catadores de materiais recicláveis	Suficiente		Consiste na implantação da cooperativa de recicláveis e da manutenção dos serviços.	Análise documental <i>In loco</i>	
		Insuficiente	X			
	Custo de coleta	Suficiente	X	Custos fixos e custos variáveis de coleta e transporte	Análise documental	
		Insuficiente				
Políticas	Recompensa política	Suficiente		Participação social em programas de coleta seletiva	Análise documental	
		Insuficiente	X			
	Adoção de solução consorciada	Suficiente		Gestão integrada dos RSU com outros municípios, que esteja de acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS)		
		Em discussão	X			
		Insuficiente				
	Regulatórias	Regulatórias	Adequada		Aplicação das prioridades da PNRS	Legislação
Inadequada			X			
Planejamento	Legalização da localização	Liberada		A área de implantação deve ser liberada por lei, se o local for permitido	Análise documental <i>In loco</i>	
		Não liberada	X			
	Instalações	Suficiente		Centros de triagem, centros de tratamento e unidades de disposição final dos RSU	Análise documental <i>In loco</i>	
		Insuficiente				
		Inexistente	X			
	Ecopontos	Suficiente		De acordo, com PNRS (2010) trata dos locais onde se utiliza, normalmente, contêineres ou pequenos depósitos	Análise documental <i>In loco</i>	

Continuação

Áreas	Crítérios	Alternativas	Prioridade /Peso	Descrição dos níveis de impacto para área critério	Fonte de Pesquisa	Referências
		Insuficiente	X	colocados em pontos fixos no município, escolas, bancos, repartições públicas onde os moradores depositam os recicláveis que depois serão enviados para a reciclagem		
		Inexistente				
	Implantação de tecnologias de tratamento	Adequada		Alternativas tecnológicas de tratamentos dos RSU, segundo a Lei nº 12.305/2010	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequada				
Inexistente		X				
Institucional	Institucional	Sim		Modelos institucionais e de financiamento para o encerramento do lixão	Análise documental <i>In loco</i>	IPT-Cempre, ISWA e Abrelpe (2017)
		Não	X			
Eco-inovação e tecnologias ambientais.	Programas de Educação Ambiental	Suficiente		Conscientização ecológica e o desenvolvimento sustentável	Análise documental <i>In loco</i>	Agenda 21; Brasil (2010a)
		Insuficiente	X			
	Novos mercados	Sim		Beneficiar a abertura de mercados por produtos “verdes”, práticas sustentáveis e mudanças no comportamento das empresas	Análise documental <i>In loco</i>	
		Não	X			
Estruturas de apoio	Rede viária	Adequada		Trecho por onde os veículos coletores passam (perfil do pavimento, largura das ruas)	Análise documental <i>In loco</i>	IPT-Cempre, Brasil, (2010a, b,c); Summerfield et. al (2015); Dror, Stern e Trudeau (1987), GPS
		Inadequada	X			
	Veículos coletores	Adequado	x	Número de caminhões, tipo de caminhão (sem ou com compactação) e sua capacidade	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequado				
	Recipientes do lixo	Adequado		Recipientes primários e coletores urbanos, comunitários e institucionais	<i>In loco</i>	
		Inadequado	X			
	Desempenho da coleta	Suficiente		Medidas de produtividade, eficiência operacional e qualidade do serviço	Análise documental <i>In loco</i>	
		Insuficiente	X			
	Rotas	Adequada		Elaboração de rotas de coleta convencional que tenham o custo mínimo	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequada	X			
Disposição final dos resíduos	Portaria, balança e vigilância	Suficiente		Estrutura de apoio para a entrega e saída dos veículos coletores e o ingresso de pessoas no local de despejo dos resíduos	Análise documental <i>In loco</i>	IPT-Cempre; CETESB (2015)
		Insuficiente				
		Inexistente	X			
	Localização do destino final dos RSU	Adequada		Local (espaço físico) do destino final dos RSU	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequada	X			
	Isolamento físico e visual	Suficiente		Cinturão “verde” para dificultar o acesso de pessoas e animais no terreno.	Análise documental <i>In loco</i>	

Continuação

Áreas	Critérios	Alternativas	Prioridade /Peso	Descrição dos níveis de impacto para área critério	Fonte de Pesquisa	Referências
		Insuficiente				
		Inexistente	X			
	Frentes de trabalho	Adequada		Compactação e recobrimento dos resíduos	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequada				
	Taludes e bermas	Adequada		Dimensões e inclinações; proteção vegetal e afloramento do chorume	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequada				
		Inexistente	X			
	Estrutura de proteção ambiental	Adequada		Impermeabilização do solo, drenagem do chorume, drenagem das águas pluviais, drenagem dos gases, monitoramento das águas subterrâneas, monitoramento geotécnico	Análise documental <i>In loco</i>	
		Inadequada				
		Inexistente	X			

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para a construção da hierarquia de níveis de impacto para os pontos de vistas fundamentais (PVF's) a serem avaliados na pesquisa, foram extraídos a partir do modelo da gestão dos RSU no Município do Crato (Quadro 38), tendo níveis quantitativos e qualitativos que foram elaborados por meio da combinação entre os estados possíveis dos PVF's.

Com o intuito de se efetuar a melhor tomada de decisão referente ao Modelo de GRSU, foram estabelecidas prioridades e fixados pesos tanto as primeiras quanto ao atendimento dos critérios utilizados, conforme Quadros 17 e 18.

Quadro 17 - Priorização dos critérios

Prioridade	Critérios de Atendimento
1	às normas técnicas da ABNT, a legislação ambiental vigente
2	aos condicionantes políticos/regulatório
3	aos condicionantes sociais
4	aos condicionantes técnicos (planejamento/institucional)
5	aos condicionantes econômicos
6	aos condicionantes as estruturas de apoio
7	aos condicionantes de tecnologias ambientais

Fonte: Adaptado de IBAM (2011).

Quadro 18 - Peso dos critérios e o tipo atendimento

Peso	Critérios
100	1
70	2
60	3
40	4
30	5
20	6
10	7

Fonte: Adaptado de IBAM (2011).

Desse modo, a análise proposta busca construir e avaliar um modelo potencial da gestão dos resíduos sólidos urbanos no Município.

No modelo da gestão dos RSU, onde foram colhidas no Município informações demográficas, quantidade de resíduos gerados, composição física, características, receptáculos comunais, cobertura do serviço, frequência de coleta, queixas com relação ao transporte e coleta, indicadores de inputs dos recursos, indicadores de eficiência, desempenho do serviço, input de recursos, eficiência do serviço.

O modelo da gestão dos RSU no Município do Crato pode ser considerada como estruturação e forneceu os elementos primários de avaliação (EPA's) para a definição dos pontos de vistas fundamentais (PVF's) e de seus níveis de impacto, segundo Ensslin (2001),

onde os critérios de avaliação foram considerados e obedeceram as propriedades de funcionalidade.

Nesta etapa, o passo a passo da construção do modelo consistiu em informações do sistema de gerenciamento do Município para o efetivo monitoramento e avaliação da logística dos RSU, assim como pretende reconhecer os principais fatores e estabelecer critérios que identifiquem e priorizem o processo de tomada de decisão e que sejam relevantes.

3.1.2 Diagnóstico e prognóstico dos RSU no Município

Na segunda etapa da metodologia da pesquisa é realizado o diagnóstico e prognóstico dos RSU no Município. A etapa permitiu que fossem coletados dados e informações em documentos oficiais e a situação real dos RSU no Município. Além da aplicação da entrevista em que a escolha dos entrevistados foi por amostra definida pela qualidade do informante, por facilidade de acesso, pela experiência na área, pela identificação e conhecimento na região do Cariri. De modo que subsidiaram a etapas seguintes, referente ao estudo-piloto. Foram entrevistados 24 gestores que abordaram sobre as limitações e melhorias relacionadas aos resíduos sólidos. Além do questionário que consiste num roteiro em que cada informante foi convidado a mencionar fatores essenciais e críticos dos RSU do Município do Crato-CE.

O diagnóstico se deu com o estado real dos RSU, a tecnologia existente e as operações cotidianas de coleta e tratamento dos RSU, visto que em situações que envolvem distintos fatores conflitantes para a tomada de decisão, a aplicação da metodologia de multicritério no processo de tomada de decisão é a alternativa mais adequada para o gestor.

A população da pesquisa de campo engloba as partes interessadas no sistema de gerenciamento de RSU do Município do Crato-CE. Trata-se de uma amostragem não probabilística, ou seja, com amostras intencionais, em que o julgamento do pesquisador foi utilizado para selecionar os membros da população que são especialistas em gestão de resíduos sólidos (SILVA; MENEZES, 2005).

No segundo questionário se desenvolveu uma metodologia de apoio multicritério à construção de um modelo de gestão municipal que avaliou em múltiplas dimensões, o gerenciamento dos RSU, de sete gestores do Município do Crato, por meio de questionário que foram aplicados no *software* Macbeth.

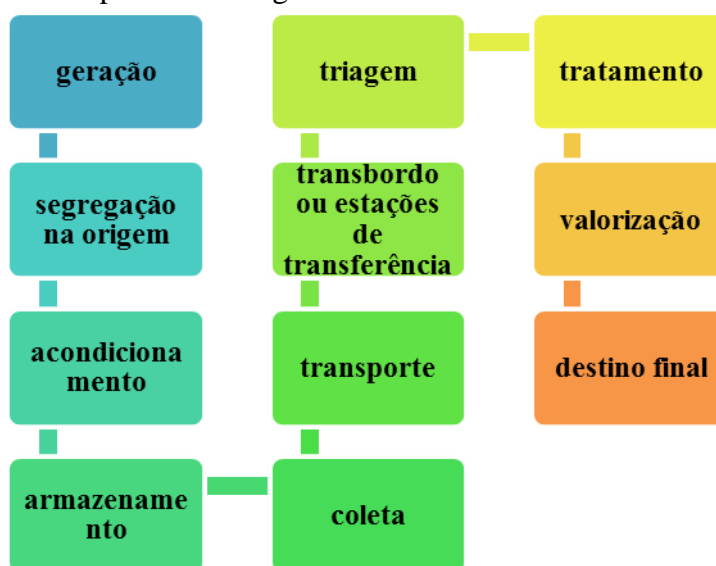
Os entrevistados do primeiro e segundo questionários foram escolhidos mediante julgamento subjetivo da pesquisadora com sugestões de especialistas de centros de pesquisa da área de RSU. Para a formatação do modelo da gestão dos RSU no Município do Crato, a obtenção dos dados foi oriunda de *sites* oficiais, documentos do Ministério Público Federal (MPF), documentos da Secretaria de Infraestrutura, Gestão e Meio-Ambiente dos municípios, associações de catadores e/ou recicladores, depósitos de reciclagem, indústria de processamento de reciclagem de plásticos, e empresas particulares de coleta de resíduos e pelo modelo da gestão dos RSU no Município do Crato criado.

A presença dos “lixões” e das zonas geradoras de lixo no Município ocasiona diversos problemas, tanto no aspecto ambiental como para a população, isso porque existe a inserção de uma parcela dessa população que, sem muitas perspectivas, busca nos resíduos uma fonte de renda, proveniente da catação e venda dos materiais encontrados entre os rejeitos.

Nessa perspectiva, um modelo de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos é imprescindível, visto que a inesgotabilidade não é possível quando se trata de resíduos sólidos urbanos, sendo uma forma de minimizar os danos que envolvem a gestão desses resíduos.

Um sistema da gestão de resíduos sólidos urbanos é dividido em etapas do gerenciamento (Figura 23), que parte da fonte geradora até seu destino final (VILHENA, 2013).

Figura 23 – Etapas ideais do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos

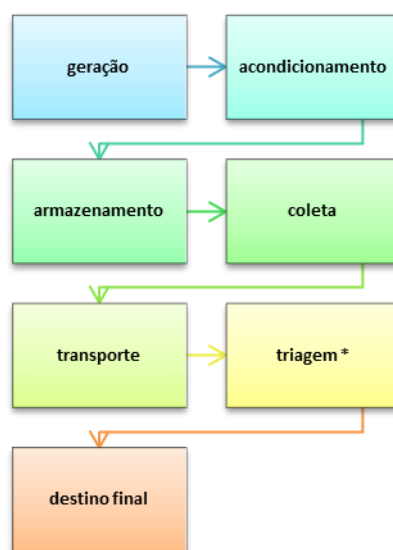


Fonte: Adaptado de Vilhena, 2013.

Na verdade, os dados relacionados ao manejo de cada etapa do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos são extensos e estão interligados nas fontes geradoras, dando subsídios para decisões político-administrativas.

No Município do Crato, algumas dessas etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos são subtraídas, de tal maneira que as etapas mais próximas da realidade são as indicadas na Figura 24.

Figura 24 – Etapas do gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, no Município do Crato



Fonte: Elaboração própria (2019).

* Triagem: existem dois ou mais pontos de coleta seletiva com fins comerciais, além da Associação que trabalha no âmbito social. Já as instituições públicas (escolas estaduais e municipais, Ministério Público e INSS) trabalham no plano educacional.

As atividades que geram resíduos de variadas naturezas, porém, no Município, são listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade de estabelecimentos segundo divisão CNAE - município: Crato/CE - anos 2014/2016

CNAE 2.0 Div	2014	2015	2016
Agricultura, pecuária e serviços relacionados	12	12	11
Pesca e aquicultura	0	1	1
Extração de minerais metálicos	1	1	1
Extração de minerais não-metálicos	4	4	5
Fabricação de produtos alimentícios	16	16	18
Fabricação de bebidas	4	5	4
Fabricação de produtos têxteis	1	1	1

Continuação

CNAE 2.0 Div	2014	2015	2016
Confecção de artigos do vestuário e acessórios	15	11	13
Preparação de couros e fabricação de artefatos de couro, artigos para viagem e calçados	15	10	10
Fabricação de produtos de madeira	9	9	8
Fabricação de celulose, papel e produtos de papel	2	2	2
Impressão e reprodução de gravações	8	6	8
Fabricação de coque, de produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis	2	1	0
Fabricação de produtos químicos	2	3	3
Fabricação de produtos de borracha e de material plástico	5	5	5
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	23	25	27
Metalurgia	2	2	2
Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	15	13	15
Fabricação de máquinas e equipamentos	1	1	1
Fabricação de móveis	6	7	6
Fabricação de produtos diversos	7	3	2
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	6	5	8
Eletricidade, gás e outras utilidades	1	1	1
Captação, tratamento e distribuição de água	1	1	1
Coleta, tratamento e disposição de resíduos	5	5	5
Construção de edifícios	62	61	65
Obras de infra-estrutura	9	16	14
Serviços especializados para construção	23	17	14
Comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas	78	82	75
Comércio por atacado, exceto veículos automotores e motocicletas	41	46	46
Comércio varejista	772	758	741
Transporte terrestre	34	32	31
Armazenamento e atividades auxiliares dos transportes	3	4	3
Correio e outras atividades de entrega	2	2	2
Alojamento	18	15	17
Alimentação	110	123	114
Edição e edição integrada à impressão	5	5	3
Atividades de rádio e de televisão	3	3	3
Telecomunicações	5	4	6
Atividades dos serviços de tecnologia da informação	2	2	1
Atividades de prestação de serviços de informação	1	2	2
Atividades de serviços financeiros	7	8	7
Seguros, resseguros, previdência complementar e planos de saúde	2	1	1
Atividades auxiliares dos serviços financeiros, seguros, previdência complementar e planos de saúde	0	1	1
Atividades imobiliárias	8	9	8
Atividades jurídicas, de contabilidade e de auditoria	26	27	28
Atividades de sedes de empresas e de consultoria em gestão empresarial	3	4	3
Serviços de arquitetura e engenharia	6	8	6
Pesquisa e desenvolvimento científico	2	1	1
Publicidade e pesquisa de mercado	1	3	4
Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	3	2	4

Continuação

CNAE 2.0 Div	2014	2015	2016
Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos intangíveis não-financeiros	11	13	10
Agências de viagens, operadores turísticos e serviços de reservas	8	6	7
Atividades de vigilância, segurança e investigação	1	0	0
Serviços para edifícios e atividades paisagísticas	17	18	18
Serviços de escritório, de apoio administrativo e outros serviços prestados às empresas	45	41	35
Administração pública, defesa e seguridade social	4	4	3
Educação	64	68	69
Atividades de atenção à saúde humana	100	107	111
Atividades de atenção à saúde humana integradas com assistência social, prestadas em residências coletivas e particulares	2	2	1
Serviços de assistência social sem alojamento	2	3	2
Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	2	2	1
Atividades esportivas e de recreação e lazer	14	14	16
Atividades de organizações associativas	34	33	31
Reparação e manutenção de equipamentos de informática e comunicação e de objetos pessoais e domésticos	5	7	6
Outras atividades de serviços pessoais	30	29	26
Total	1.728	1.733	1.694

Fonte: MTPS, RAIS 2014, 2015 e 2016.

A Tabela 1 lista e fornece elementos de acompanhamento na execução dos serviços, assim como demonstra um quadro panorâmico da situação do lixo no Município e informações gerais de geração do lixo, dando uma visão da realidade e de intervenções necessárias para a melhoria do gerenciamento dos resíduos, se destacando o comércio varejista e alimentação.

O prazo para o fim dos lixões, disposto na Lei Federal nº 12.305/2010, expirou em agosto de 2014 e havia sido prorrogado por um ano. Em 1º de julho de 2017, o Senado Federal aprovou nova prorrogação do prazo para o fim dos “lixões”, atendendo a um pedido da Confederação Nacional dos Municípios (CNM), devido a pelo menos três mil municípios brasileiros e inclusive o Distrito Federal não terem conseguido cumprir o prazo estabelecido. Os novos prazos variam de 2018 a 2021, de acordo com alguns critérios preestabelecidos. A prorrogação foi inserida na Medida Provisória 678/2015, mas, como a emenda não era relacionada ao objeto inicial da Medida, foi vetada pela Presidência.

No Ceará, o encerramento dos lixões tem encontrado muitas dificuldades para atender à Política Nacional de Resíduos Sólidos. Segundo Alexandre Caetano, analista de regulação da Arce, “Estima-se que há cerca de 300 lixões espalhados pelo estado e que, dos

184 municípios cearenses, 178 ainda destinam os rejeitos das cidades de forma inadequada”. Ele destaca ainda, que, para agravar essa realidade,

[...] algumas experiências no passado, em busca da construção de aterros sanitários no interior, não foram bem-sucedidas por falta de mecanismos que pudessem prover sustentabilidade econômica ao tratamento dos resíduos sólidos e destinação final adequada dos rejeitos. (MPCE, 2017).

De acordo com o MPCE (2017), os municípios cearenses encontram grandes dificuldades para atender à Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê, por exemplo, o fim dos lixões. A gestão municipal do Crato busca a remediação do atual local de descarte dos resíduos sólidos gerados no Município, evitando, assim o comprometimento ambiental de novas áreas, até que haja uma definição da implantação do aterro consórciado ou política de implantação individualizada do aterro sanitário com disponibilidade de financiamento, uma vez que a implantação de um aterro sanitário demanda despesa acima dos recursos próprios do Município. Tão logo haja alternativa para o descarte adequado para os resíduos, a atual área de descarte deverá ser submetida a um Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), mas tem sido um desafio o cumprimento do objetivo.

A empresa responsável pela prestação de serviço é a Sociedade Anônima de Água e Esgoto do Crato – SAAEC, e com o concurso da Secretaria de Serviços Públicos – SESP. Segundo dados do SNIS 2014 e do IBGE (2015), a população total do Município corresponde a 121.428 habitantes.

Quanto aos resíduos domiciliares, estes não são enviados para outro município, visto que são destinados ao “lixão” que fica a aproximadamente 6 km da Sede. Embora haja uma quantidade significativa de resíduos coletados, o lixão não possui uma balança para pesagem rotineira dos resíduos sólidos coletados. Assim, todo material recolhido é estimado pela capacidade que possui o caminhão, o que, necessariamente, não corresponde à realidade da coleta.

A população atendida no Município abrange a população que reside no Distrito-Sede e nas localidades, totalizando 106.093 habitantes. Segundo dados da SNIS (2016), os resíduos sólidos são coletados em veículos, conforme Quadro 19.

Quadro 19 – Quantidade de veículos de coleta de RSU, no Município do Crato – Ceará, em 2016

Veículos	Quantidade disponível (unidade)
caminhões compactadores com idade maior que 10 anos, pertencentes ao agente público executor da coleta de RDO e RPU	2
caminhões compactadores com idade até 5 anos, pertencentes aos agentes privados executor da coleta de RDO e RPU	4
caminhões basculantes ou carroceira ou baús com idade até 5 anos, pertencentes ao agente público executor da coleta de RDO e RPU	3
caminhões basculantes ou carroceira ou baús com idade maior que 10 anos, pertencentes ao agente público executor da coleta de RDO e RPU	2
caminhões basculantes ou carroceira ou baús com idade até 5 anos, pertencentes aos agentes privados executor da coleta de RDO e RPU	4
caminhões basculantes ou carroceira ou baús com idade maior que 10 anos, pertencentes aos agentes privados executor da coleta de RDO e RPU	7
tratores agrícolas com reboque com idade maior que 10 anos pertencente ao agente público executor da coleta de RDO e RPU	1

Fonte: Adaptado da Prefeitura Municipal Crato (2016).

Pode-se considerar que os veículos de transporte de RSU no Município se diferenciam conforme a função a que se destinam. Assim veículos com capacidade, com compactadores ou não, são característicos da coleta domiciliar, como também passam a ser utilizados para o transporte dos resíduos coletados ao lixão. A coleta dos resíduos hospitalares é realizada por outros veículos coletores de características específicas de resíduos sólidos de saúde (RSS). As embalagens de papelão e de soro fisiológico, no entanto, recolhidas nos hospitais do Município são de responsabilidade da Associação de Agentes Recicladores do Crato.

Os resíduos públicos urbanos (RPU) provenientes da varrição ou limpeza de logradouros públicos são recolhidos junto com os resíduos domiciliares (RDO) e seu destino final é o lixão, assim como toda a operação da unidade é a Prefeitura ou SLU (sistema de limpeza urbana).

Vale destacar que a maior fonte geradora de resíduos sólidos é RSO e RPU. Esse fato ocorre por estar associado aos hábitos sociais e de consumo e à inevitável produção de resíduos sólidos, mas é uma estimativa, pois não há balança para pesagem rotineira dos resíduos sólidos coletados.

Segundo dados do SNIS (2016), a despesa *per capita* com manejo de resíduos sólidos em relação à população urbana (R\$/hab) é de R\$ 193,09. A taxa de cobertura dos resíduos domiciliares em relação à população total é de 100%. O custo unitário médio do

serviço de coleta (RDO + RPU) é de R\$ 96,37 /ton. Com relação a incidência do custo do serviço de coleta (RDO + RPU) no custo total do manejo de RSU é de 60,86 %.

Outro fator importante da geração dos resíduos está na composição física (percentual de peso, base seca ou úmida) que traduz cada componente da amostra de lixo analisada e nas características do lixo que podem passar por mudanças em função de aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos, ou, ainda, se diferenciar nas comunidades entre si e nas próprias cidades. No Município do Crato, da quantidade de resíduos gerados de acordo com seus componentes, percentual de peso, base seca e úmida não há descrição, visto que o estudo gravimétrico dos resíduos sólidos ainda não foi realizado, malgrado sua importância, pois estudos de caracterização de resíduos permitem auxiliar no planejamento e no desenvolvimento de políticas públicas, no dimensionamento de decisões para uma gestão integrada de resíduos sólidos.

Visualmente, pode-se inferir que a maior proporção dos resíduos sólidos dispostos no lixão é composta de material putrescível (matéria orgânica), seguida de rejeitos e materiais potenciais recicláveis. A caracterização da composição física dos resíduos sólidos produzidos no Município é uma tarefa árdua, mas primordial para o seu gerenciamento. Assim, como uma forma de cumprir as ações e se adequar às normas da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que consiste na compreensão do tipo de resíduos gerados diariamente e a sua sazonalidade, além da quantificação dos produtos recicláveis e comercializados e que são produzidos no município.

As formas de acondicionamento dos resíduos sólidos urbanos no Crato são sacos plásticos, principalmente de supermercados, em tambores, caixas de papelão que ficam dispostos em frente às residências ou estabelecimentos comerciais para posterior coleta. (Figura 25).

Figura 25 – Vista geral de alguns materiais nos logradouros (A = lixeira térrea de concreto em passeio público, B = lixeira suspensa de aço em frente a um comércio). Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).

Em razão do seu elevado peso específico, o entulho de obras é acondicionado, na maioria das vezes, em contêineres metálicos estacionários de 4 ou 5m³, como ocorre com o acondicionamento do lixo público. Os resíduos da construção civil, também, consomem muito espaço nos lixões, o qual poderia estar sendo utilizado para a destinação de outros tipos de resíduos não passíveis de reciclagem, no entanto, esses resíduos são depositados em terrenos baldios.

As condições de armazenamento ocorrem, geralmente, de modo acondicionado ou solto, dependendo do tipo de resíduos. Com relação ao tempo, este depende da facilidade de acesso em relação ao fluxo dos resíduos.

De acordo com dados da Secretaria do Meio Ambiente e Controle (SEMACE, 2016) a quantidade de resíduos coletados por todos os agentes é de aproximadamente 28.000 toneladas/ano. O Quadro 20 mostra o percentual da frequência de coleta de resíduos da população atendida, no bairro Distrito-Sede do Município do Crato.

Quadro 20 - Percentual da frequência de coleta de resíduos. Crato – Ceará, em 2016

Frequência	% da população atendida
Diária	45
de 2 ou 3 vezes por semana	40
Uma vez por semana	15

Fonte: Adaptado pela autora da SEMACE, 2016.

A coleta dos resíduos sólidos, consoante informações da Secretaria de Serviços Públicos, está estimada em 2.300 ton/mês, sendo uma coleta sistemática. Esse serviço é de responsabilidade da Prefeitura Municipal, as vias inacessíveis aos veículos, os garis fazem o recolhimento para a esquina. As rotas de coleta sistemática seguem roteiro predefinido pela Secretaria de Serviços Públicos, obedecendo frequência, horário de início e término, rota, motorista responsável e garis (Quadro 21). Em cada caminhão, trabalham um motorista e dois ou quatro garis. Aos domingos a coleta é extra no Centro da cidade e nas avenidas principais.

Quadro 21 – Rota e frequência de coleta. Crato – Ceará, em 2016

Setor	Carro	Rota	Frequência de coleta
1	5	Pantanal, CaixaD'água, Sossego I-II, Parque Grangeiro, CTC, HSF, Praça da Sé, Pimenta, Bacural	Segunda/quarta/sexta (manhã)
2	1	Jocum, Sertãozinho, Grandene, IPEC, N.S.Fátima, TG, Seminário Sagrada Família, TG, Objetivo, Genario, Seminário, Cacimbas, Baixada Fluminense	Segunda/quarta/sexta (manhã)
3	6	Vila Silvestre, Vila Alta, Independência, Dr. Antenor, Recreio (Beco da Cebola), Asa, Recreio	Segunda/quarta/sexta (manhã)
4	4	Recreio e Seminário	Segunda/quarta/sexta (manhã)
5	3	Ladeira, Santa Luzia, Pinto Madeira, São Miguel, Vila Sardinha, Palmeiral, André Cartaxo (Jocildo)	Segunda/quarta/sexta (manhã)
6	5 ou 6	Lameiro, Novo Lameiro, Zacarias Gonçalves	Segunda/quarta/sexta (tarde)
7	3 ou 6	Centro 2 Mercado, 18 de Maio, Restaurante Popular, Beco da Mijada, Praça Cristo Reis, Canal do Mercado à Genário	Segunda/quarta/sexta (tarde)
8	2 – Distrito	Ponta da Serra, Dom Quintino, Brea, Rodeiador, Vila São Francisco	Segunda/quarta/sexta (tarde)
9	5	Novo Horizonte, Belo Horizonte, Vila Gregório, Avenidas, São Luiz, Hospital, Mercado	Terça/quinta/sábado (manhã)
10	1	Mirandão, Conviver, Vila Lôbo, Vale do Amanhecer, Alto da Penha, Multirão	Terça/quinta/sábado (manhã)
11	6	Cambará, Presídio, Anjo da Guarda, Barro Branco, Muriti (Gilberto da Serraria), Martins, MTD Conjunto Belas Artes, Conjunto Agronomia, Conjunto Padre Cícero, Fábrica, Muriti, Petrobrás, São José	Terça/quinta/sábado (manhã)
12	4	-	-
13	5	Acinbel, São Bento, Estátua Padre Cícero, Palmeiral, Batateira, Pirita	Terça/quinta/sábado (manhã)
14	5 ou 6	Novo Crato, Vitória Nossa, Av. Pé Seco, Lameiro, Clubes Nascente, Duque de Caxias, até Mercadinho Batista	Terça/quinta/sábado (tarde)

Continuação

Setor	Carro	Rota	Frequência de coleta
15	3 ou 6	Centro, Dois Mercado, 18 de Maio, Restaurante Popular, Beco da Mijada, Praça Cristo Reis, Canal do Mercado até Jenário	Terça/quinta/sábado (tarde)
16	2 – Distrito	Monte Alverne, Riacho Vermelho, Riacho Fundo, Santa Fé, Serra, Mané Couco, Palmeirinha, Agrícola, guaribas, Alegre	Terça (manhã)
17	2 – Distrito	Baixio, Muquem, Palmeirinha, Monteiro, Currais, Romualdo, São Vicente, Coqueiro, ABEC	Quinta (manhã)
18	2 – Distrito	Mata, Genipapo, Serraria, Campo Alegre, Vila Padre Cícero, Vila Guilherme	Sábado (manhã)

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Assim, os serviços de coleta de RSU acontecem em toda a cidade, abrangendo aproximadamente 100% da área urbana, assim como os distritos do Município e loteamentos irregulares.

Os materiais recicláveis são conduzidos até a Associação, onde a logística, o armazenamento temporário, a triagem e a comercialização (Figura 49). Segundo dados do SNIS (2014), a quantidade de catadores associados é de 60 pessoas.

Os principais materiais encaminhados para a Associação encontram-se listados na Tabela 2, assim como suas variações no decorrer de alguns meses. Os rejeitos da coleta seletiva, por sua vez, são enviados ao lixão.

Tabela 2 – Materiais coletados pela Associação dos Agentes Recicladores de Crato

Material	Maio/16		Junho/16		Julho/16		Agos/16		Set/16		Out/16		Média	
	Kg	Unid	Kg	Unid	Kg	Unid	Kg	Unid	Kg	Unid	Kg	Unid	Kg	Unid
PET	720		1473		317		1429		1425		1384		1.125	
Plástico mole	540		1902				368							
Bacia	169				873		312		206		280			
Filme limpo	332				192		643							
Filme semi-limpo	452		255		475									
Brilux	230		278					600		300		500		
Polidor			300					230		250		350		
Cadeira de Plástico	257		183		235		182		75					
Tubo de 5L			500			150				387		450		
Tubo de 2L			183			450				460		600		
Tampa PVC	132				130									
Papel branco	1808		1800				360							
Jornal	376						1078							
Papelão	1663		7370		1181		5390		4570					
Ferro			1190						25250					
Latinha	18		48		569									
Cobre	69													
Panela	35		20											
Coquinho			30											
Ypioca	311					561						220		
Óleo	71													
Longnec			2040			2500						1500		
Melissa						352								
Detergente							980							
Total	7346		17572		3497	4488	10742	830	31526	1397	1664	3620		

Fonte: Adaptado da Associação dos Agentes Recicladores do Crato (2016).

Embora a coleta seletiva possua uma abrangência restrita no Município do Crato, existem pontos de apoio por todo o município, conforme Quadro 22, que recebem alguns volumes de material descartados pela população, denominados de ecopontos.

Quadro 22 – Ecopontos, no Município Crato, em 2017

LOCAL	BAG's	DIAS	Horário	Observação
URCA (Universidade Regional do Cariri)	1	Todas as sextas	14:30	Mistura tudo
Bairro Alto da Penha	1	1 vez na semana – ocorre após contato telefônico		Troca as reciclagens por alimento (pede ajuda a vizinhança)
Bairro Granjeiro (Caixa D'água)	1	15 em 15 dias		Doações salas de dança (livros, PET, Ferro, etc)
Colégio Agrícola	1	-		Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha
SESC (Bairro Jocildo)	3 a 4	-	Liga quando tem bastante. Coloca em um quarto.	Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha
COMEGE (Distribuidora de Remédios) – Bairro Barro Branco	1	Todas as quintas	11 h	Só papelão
Bairro Batateira	1	-		Tudo
Ministério Público – Praça da Sé	1			Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha, livros
Escola Municipal Zé do Vale – Bairro Barro Branco	2	Ocorre após contato telefônico		Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha, livros. OBS: Tetrapark
Escola Municipal Zé do Vale – Bairro Barro Branco	2	Ocorre após contato telefônico		Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha, livros. OBS: Tetrapark
Escola Municipal Sertãozinho – depois da Grendene	2	Ocorre após contato telefônico		Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha, livros. OBS: Tetrapark
Escola Municipal 18 de maio – perto do mercado Central	3	Ocorre após contato telefônico		Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha, livros. OBS: Tetrapark
Escola Municipal Bairro Vila Lobo	2, 3 ou 4	Ocorre após contato telefônico		Papelão, vidro, garrafa PET, papel, latinha, livros. OBS: Tetrapark
Hospital São Raimundo	3, 4	Diariamente	14 h	Soro e papelão

Fonte: Elaboração da autora (2019).

As rotas da reciclagem realizadas no Município do Crato ocorrem conforme o Quadro 23.

Quadro 23 – Rotas da reciclagem no Município Crato, em 2017

Dias da semana	Local
Segunda-feira	Bairro: Vila Alta, Seminário
Terça-feira	Bairro: Muriti, Mirandão Secretaria de Saúde (pegar cheiro verde, banana, laranja, milho, ovo, galinha nas terças e quartas-feiras) - doações
Quarta-feira	Bairro: Vila Alta, Seminário
Quinta-feira	Bairro: Mirandão, Muriti, COMEGE
Sexta-feira	Bairro: Vila Alta, Seminário
Segunda a Sexta-feira (15 h às 17 h) de 17 às 19 h trajeto para deixar os recicladores em casa.	Centro da Cidade do Crato
Sábado	Limpeza na Associação

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Outras rotas relacionadas à coleta seletiva são programadas de acordo com o contato com a Associação.

Os resíduos da construção civil (RCC), a seu tempo, são descartados em terrenos baldios e locais que recebem entulhos, todavia trazem menos incômodo para a população por não gerarem odor, de sorte que se tornam mais tolerados (Figura 26). Em contrapartida, nesses pontos de descarte, o lixo pode provocar sérios impactos no meio urbano, como impedimento do tráfego nas ruas e calçadas, também transformando em pontos de acúmulo de lixo, poluindo os mananciais, contaminando o solo, obstruindo sistemas de drenagem e proporcionando a proliferação de vetores e doenças.

Figura 26 – Resíduos da construção civil (A = resíduos da construção civil no centro comercial do Crato, B = resíduos da construção civil à margem do canal do rio Grangeiro).
Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).


A logística de coleta e transporte dos resíduos sólidos no Município busca atender a NBR 13221/2010, que especifica os requisitos para o transporte terrestre de resíduos, evitando danos ao meio ambiente e protegendo a saúde da população.

No Município do Crato há quatro tipos principais de coletas utilizadas para a captação de resíduos, ou seja, a dos resíduos sólidos urbanos, a dos resíduos hospitalares, coleta de podas de árvores e a coleta dos resíduos recicláveis. A modalidade de recolhimento dos materiais está explanada no Quadro 24.

Quadro 24 – Tipos de coleta dos resíduos no Município. Crato – Ceará, em 2017

Tipo de Coleta	Recolhimento	Veículo
Resíduos Sólidos Urbanos	Coleta é realizada em setores predeterminados, de acordo com a quantidade de resíduo gerado e a necessidade de recolhimento de cada área. A coleta e o transporte do lixo doméstico e urbano produzido em residências, condomínios, instituições públicas, estabelecimentos comerciais e de serviços. O serviço não inclui a coleta de terra, areia, entulho de obras públicas ou privadas e resíduos industriais perigosos.	
Seletiva	Coletados por catadores da associação em carrinhos de mão e por caminhão da prefeitura nos <i>bag's</i> localizados nos ecopontos pré-determinados, os resíduos são encaminhados para associação de reciclagem do município.	
Podas de Árvores	Poda é realizada para correção, manutenção, limpeza, tratamento de parasitas e desobstrução de sinalização de trânsito. Já o Corte, ocorre somente quando há risco de acidentes ou alguma edificação a ser construída no local.	

Continuação

Tipo de Coleta	Recolhimento	Veículo
Resíduos da Construção Civil	Coleta de entulhos	

Fonte: Elaboração da autora (2019).

O sistema de gerenciamento, coleta, disposição final e operação dos resíduos sólidos urbanos no Município do Crato é realizado por meio da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Territorial. Todo o resíduo sólido gerado ali é destinado ao lixão (Figura 27). Esse, por sua vez, não recebe resíduos de outros municípios, no entanto, nenhum tratamento é realizado antes da disposição final, o que acarreta no despejo no lixão.

Figura 27 - Disposição final dos resíduos sólidos no Município. Crato – Ceará, em 2017



Fonte: Autora (2019).

3.1.3 Estudo-piloto no Município do Crato

A terceira etapa do desenvolvimento metodológico diz respeito ao estudo-piloto no Município do Crato. Essa etapa possui dois momentos. No primeiro momento é construído o questionário de pesquisa semiestruturado (Apêndice B) que foi aplicado, na pesquisa de campo, para sete membros do sistema de profissionais atuantes em RSU no Município do Crato. Nele se levantou informações a respeito dos critérios ambiental, social, econômico,

político/regulatório, planejamento/institucional,ecoinovação e tecnologias ambientais e estruturas de apoio.

As perguntas versaram marcar em cada linha qual o grau de importância de um critério comparado com outro, segundo a pontuação de 1 a 4 para cada item, sendo: 1 - "nunca", 2 - "raramente", 3 - "frequentemente", 4 - "sempre".

O conteúdo das respostas foi transcrito e serviu de base para a construção do questionário 02 que contém 11 questões abertas e foi aplicado, na pesquisa de campo, para sete membros do sistema de profissionais atuantes em RSU no Município do Crato (Quadro 25).

Quadro 25 - Descrição dos profissionais atuantes no Município do Crato, em 2017

Profissional	Cargo/Função	Formação
G1	Técnico da Cáritas	Não informado
G2	Presidente da Associação do Crato	Não informado
G3	Secretário de serviços públicos do município do Crato/Coordenador de limpeza pública	Administrador
G4	Consultor da Secretaria de Meio Ambiente e Controle	Ciências Contábeis
G5	Promotor de Justiça do Município do Crato	Direito
G6	Secretário do Meio Ambiente e Desenvolvimento	Direito
G7	Coordenador de Serviços Públicos	Não informado

Fonte: Elaboração da autora (2019).

As informações com os especialistas foram coletadas em entrevistas iniciais, individualmente, ocorridas aproximadamente, em uma hora de duração. Em outro momento, foi aplicado um questionário aos tomadores de decisão, onde se apresentaram algumas perguntas, com o propósito de avaliar a importância, ou não, dos critérios predefinidos no do modelo da gestão dos RSU no Município do Crato e sobre os níveis utilizados para estabelecer os pesos/prioridades.

Ainda nesse primeiro momento se deu com o estudo exploratório de construção e avaliação de modelo potencial da gestão dos resíduos sólidos urbanos. O método adotado na pesquisa, em razão do seu caráter qualitativo, foi o Macbeth desenvolvido por Bana e Costa, visto que proporciona adicionar distintos critérios de avaliação em um só critério de composição por meio da atribuição de pesos em múltiplos critérios apresentados, priorizando a opinião do tomador de decisão.

Então, a pesquisa buscou, por meio da metodologia de apoio à decisão por multicritérios, a ferramenta M-Macbeth, em que foram construídos 26 critérios de avaliação, agrupados em sete áreas de interesse: ambiental; social; econômico; político/regulatório; planejamento/institucional;ecoinovação e tecnologias ambientais e estruturas de apoio, embora no modelo de gestão dos RSU no Município do Crato se apresentem 38 critérios em dez áreas de agrupamento. Essa redução se deu pela integração de dados no diagnóstico e prognóstico do Município.

O modelo desenvolvido na pesquisa aplicou-se às problemáticas expressas por Ensslin (2001). As etapas utilizadas nessa metodologia para a construção do modelo foram: a) identificação dos elementos primários de avaliação (EPA); b) construção das árvores de pontos de vista fundamentais (PVF), ou seja, os critérios; c) construção dos descritores para os níveis de impacto dos PVF; d) obtenção de funções de valor para os descritores; e) obtenção das taxas de substituição, pesos das escalas, dos PVF.

Nessa etapa, os especialistas compararam todos os critérios par a par, com o apoio do nível de performance do software M-Macbeth.

Como resultado da aplicação da análise de multicritério identificou-se o critério de avaliação estruturas de apoio e como descritor de impacto desse critério a rede viária, veículos coletores, recipientes e coleta para aplicação do segundo momento do estudo piloto.

No segundo momento para a aplicação do estudo referente à coleta e transporte dos RSU convencionais, são utilizados os veículos (caminhões compactadores) disponíveis. Assim, a frota é constituída de dois veículos compactadores que atendem toda a área do bairro Centro do Município de Crato/CE, em dias e horários alternados, preestabelecidos pela equipe de trabalho. O estudo foi realizado quanto à coleta de RSU no bairro Centro do Município do Crato, em que o caminhão de coleta passa por todos os pontos de coleta de resíduos que estão situados nas ruas, de modo que há mais de um ponto de coleta em uma determinada rua.

A otimização da rota em estudo teve como aplicação a meta-heurística conhecida como Algoritmo Genético (GOLDBERG; HOLLAND, 1988), que busca a solução do problema do carteiro chinês misto, em que as soluções encontradas com o algoritmo são comparadas com as soluções exatas para as mesmas instâncias (VASCONCELOS, 2017).

O processo heurístico do estudo de caso será desenvolvido para o Problema do Carteiro Chinês não Orientado, que possui como característica fazer o emparelhamento de nós de um grafo não direcionado.

Quanto à metodologia do estudo de caso, foi utilizada a meta-heurística *GRASP*

(*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) que se destina a solucionar o CPP em grafos mistos $G = (V, A \cup E)$, que são grafos formados por um conjunto de arestas E (uma abstração de ruas de sentido duplo) e um conjunto de arcos A (uma abstração de ruas de mão-única) e que apresentam modelos onde a solução para resolver o CPP é de grafos NP-Completo, em que os algoritmos de eficiência polinomial não existem para uma solução.

A fase de construção representa uma orientação para as arestas do grafo com o propósito de obter um grafo direcionado, usando um algoritmo para resolver o Problema de Fluxo de Custo Mínimo (PFCM) e, desse modo, torna o grafo simétrico.

O passo a passo dessa construção ocorre quando se inicia com uma relação de arestas não orientadas (U), que apresenta todas as arestas do grafo ($U = E$). A partir da identificação, uma aresta é tomada aleatoriamente e orientada. A formação do conjunto de arestas orientadas será apresentada por E_d . Após essa etapa, a execução $d(v)$ será a diferença que ocorre entre o número de arcos e arestas orientadas que entram em (v) e o número de arcos e arestas orientadas que saem de v , isto é, $d(v) = d(v)^- - d(v)^+$. A proposta é que $d(v)$ é considerado o grau do vértice v , onde $d(v) > 0$ mostrará que existe uma oferta no vértice v , $d(v) < 0$ mostrará a existência de demanda, e quando $d(v) = 0$ mostrará que v representa um vértice de passagem.

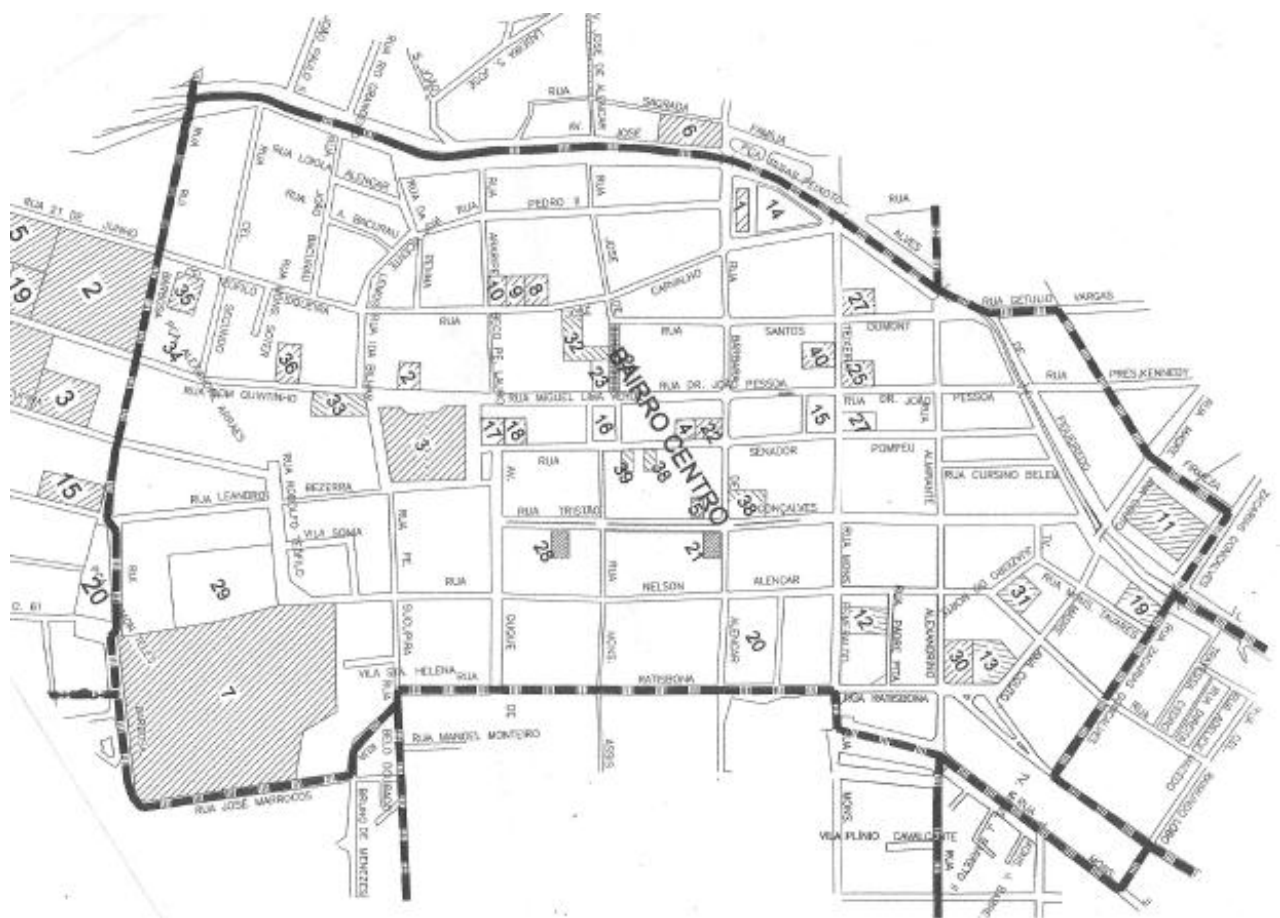
Relativamente à função avaliativa gulosa $w(i,j)$ de um aresta qualquer (i,j) , esta descreve a conveniência de orientá-la para que se aproxime o grafo de um grafo simétrico, caso contrário, o grafo pode se tornar mais distante de um grafo simétrico.

Outro aspecto consiste em que, após os pesos $w(i, j)$ serem calculados, o conjunto U é organizado em ordem decrescente de pesos w e para cada passo da fase de construção uma aresta é escolhida entre os elementos da relação restrita do *GRASP*, em que se repete este processo até que todas as arestas sejam orientadas e o grafo G_s seja simétrico.

A fase de busca local do estudo consiste na identificação em G_s se houver mais de dois pares de arcos orientados em sentidos opostos, adjacentes aos mesmos vértices. Quando houver, no entanto, excesso de pares, eles devem ser removidos, de tal modo que ocorrerá redução do custo do percurso do carteiro que não provocará modificações nas características do grafo.

A área selecionada (Figura 28) para a pesquisa de otimização de rotas de coleta de resíduos sólidos urbanos utilizando técnicas de pesquisa operacional foi o Bairro Centro, em razão do quantitativo de materiais e lixo descartados e também por ser uma área de grande fluxo de pessoas.

Figura 28 – Mapa do Centro do Município do Crato, em 2016



Fonte: Prefeitura Municipal do Crato, 2016.

O problema da coleta de resíduos sólidos urbanos é formulado com base no processo diário de coleta desenvolvido na área do Bairro Centro, onde foi necessário realizar um acompanhamento de todo o percurso realizado pelo veículo, que, por sua vez, faz por etapas, visto que a capacidade de lixo coletado se limita à capacidade do veículo.

Dentre as rotas pesquisadas, destacou-se a do Bairro Centro, com o carro 05, horário 3h30min da manhã, sexta feira, 18 de novembro de 2016. Na sequência, estão os dados dos colaboradores da rota 05 (Quadro 26).

Quadro 26 - Dados dos colaboradores da rota 05. Crato – Ceará, em 2016

Motorista		Garis	
Salário	R\$ 1.600,00	Salário	R\$ 1.100,00
Concursado	Não, terceirizado	Concursado	Não, terceirizado
Turno de Trabalho	Turno normal: 7 as 13h30min Turno da madrugada: 3h30min as 5h30min acrescenta R\$ 520,00 por duas horas durante 30 dias. (mês)	Turno de Trabalho	Turno normal: 7 as 13h30min Turno da madrugada: 3h30min as 5h30min acrescenta R\$ 520,00 por duas horas durante 30 dias. (mês)
Chegada do motorista	3h10min para preparar o caminhão. (10 minutos para conferir pneus, óleo, bateria, documentos e ligar o caminhão)	Chegada dos garis na garagem	quando a rota não fica perto da casa deles eles vem no ônibus da empresa e tomam café com pão na empresa
Observações	São oito motoristas que fazem rodízio de rotas a cada dois meses.	Observações	O turno da madrugada só trabalham dois garis. O motorista costuma ajudar quando necessário. Eles utilizam pá e/ou vassoura e caixa de papelão

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Ocorre, na realidade, a coleta do lixo solto, quando os mesmos estão dispostos ao chão sem recipientes de armazenamento (Quadro 27):

Quadro 27 – Forma de coleta dos resíduos sólidos, no bairro Centro do Crato - Ceará no momento da coleta convencional, em 2016

<p>Coletando com pano</p>	<p>Um pano tipo manta para servir de coletor para jogarem o lixo no caminhão. Dois garis colocam o pano no chão, pisam com um pé o canto mais próximo do lixo e puxam o lixo para o centro do pano. Quando o pano tem uma quantidade de lixo que os garis podem levantar eles pegam as pontas do pano, seguram com uma das mãos uma ponta e balançam o pano cheio de lixo na direção da caçamba do caminhão até soltarem um dos lados do pano e o lixo é lançado para dentro da caçamba.</p>	
<p>Coletando com caixa de papelão</p>	<p>Quando o lixo não está acondicionado, ou seja, solto no chão, o gari pega uma caixa de papelão e utiliza a caixa como recipiente para colocar o lixo no caminhão. O gari deita a caixa ao chão com a “boca” virada para o lixo e empurra o lixo pra dentro da caixa com a mão ou o pé, depois ele joga o lixo dentro da caçamba e reutiliza a caixa novamente até colher todo o resíduo.</p>	

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Embora com a situação inapropriada, alguns tipos de resíduos não são coletados, tais como: material metálico e galhos e podas de árvores. O Quadro 28 descreve o percurso realizado em tempo real do caminhão de coleta dos resíduos, onde foram anotados os pontos, o tipo de atividade realizada pela equipe de trabalho, o horário, o tempo de atividade, o quilômetro percorrido e as observações necessárias. O Quadro 29 expressa o percurso produtivo em relação à rota 05.

Quadro 28 – Atividades da rota 05 que se inicia na madrugada, no bairro Centro do Crato, no dia 18 de novembro de 2016

Ponto	Atividade	Hora (h)	Tempo	Km	Obs.
135	Saída da garagem	3:21:01		0	24214
	Posto de Abastecimento	Não			
136	Início da coleta – Praça da Sé	3:30:59	3:36	5,5	Pega dois garis na praça
137	Local com lixo solto	4:06:02		9,1	Motorista desce para ajudar
138	Mercado Central – lixo solto	4:09:46	4:16	9,3	
139	Lanche na Padaria	4:50:19	4:59	14,7	1:35
142	Término da Coleta	5:19:00		17,7	Média de 2 horas de rota produtiva – os garis são liberados
140	Chegada no Lixão	5:31:01		6,4 (rodovia)	(7,1 a 8,5 dentro do lixão)
	Portão do lixão – entrando			7,1	
	Dentro do lixão			7,1 a 8,5	
	Portão do lixão - saindo			8,8 (rodovia)	
141	Rodovia voltando para a garagem	5:40:43			
143	Chegada na garagem NRG	6:02:13			
	Refeição – água, café, cachaça, cigarro	6 min			
	Outros tempos - banheiro	Não			
	Percurso Produtivo				
	Percurso improdutivo (não realiza coleta – deslocamento)				

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Quadro 29 - Percurso produtivo do veículo de coleta de RSU, no bairro Centro do Crato, no dia 18 de novembro de 2016

PERCURSO PRODUTIVO	
Produtivo em km: 12,2 km	
Km	Observações
17,7	Último ponto de coleta de lixo (142)
- 5,5	Início da primeira coleta de lixo (136) – Praça da Sé – Crato / CE
12,2	Percurso Total Produtivo
Produtivo em horas: 1:48:01 horas	
Horas	Observações
5:19:00	Último ponto de coleta de lixo (142)
-3:30:59	Início da primeira coleta de lixo (136) - Praça da Sé - Crato / CE
1:48:01	Tempo Total Produtivo em horas

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Não foi contabilizado o tempo de deslocamento de um ponto de coleta ao outro como improdutivo, conforme Quadro 30.

Quadro 30 - Percurso improdutivo do veículo de coleta de RSU, no bairro Centro do Crato, no dia 18 de novembro de 2016

PERCURSO IMPRODUTIVO	
Percurso Improdutivo em km: 26,7 km	
Km	Observações
5,5	Trajeto da garagem (134) a primeira coleta (136)
7,1	Do último ponto de coleta (142) ao portão do lixão(141)
1,9	Deslocamento dentro do lixão
12,2	Trajeto do portão do aterro (141) a garagem(143)
26,7	Percurso Total Improdutivo em Km
Tempo utilizado no Percurso Improdutivo em horas: 1:01:33 h	
Minutos	Observações
9:58	Trajeto da garagem (135) a primeira coleta (136)
10:21	Do último ponto de coleta (142) ao portão do lixão(141)
13:44	Deslocamento dentro do lixão
21:30	Trajeto do portão do aterro (141) a garagem(143)
6:00	Café da Manhã (139)
1:01:33	Tempo Total Improdutivo

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Nesses tipos de percursos foram inclusos paradas para: lanches, água, pinga, cigarro, deslocamento: da garagem ao ponto de coleta, do último ponto de coleta ao lixão e do lixão à garagem), conforme Quadro 31.

Quadro 31 - Percurso total do veículo de coleta de RSU, no bairro Centro do Crato, no dia 18 de novembro de 2016

Percurso Total em km: 38,9 km	
Descrição	Observações
Tempo Total do Percurso em horas	2:49:34 h
Data da Coleta de dados	Sexta-feira, 18 de novembro de 2016
Horário	A coleta de lixo no bairro do Centro é realizado diariamente e ocorre de madrugada de 3:30 às 6:30 h e no turno da tarde de 15 às 22 h
Dias das Rotas	Segunda, quarta e sexta (incluem Bairro Jocildo) Terça, quinta e sábado só o bairro do Centro – 9 a 10 ton/rota Madrugada – Segunda a Sábado só o Centro – 3 a 4 ton/rota

Fonte: Elaboração da autora (2019).

O caminhão utilizado na rota é da marca Volkswagen, modelo: 17 – 190, com ano de fabricação 2014, com tara de 10.000 kg e peso líquido de 7.000 kg. A capacidade do tanque de óleo diesel é de 260 litros, e ele percorre 450 km com 200 litros de óleo diesel. O local de abastecimento é o posto Batateira, no próprio Município. O fabricante do implemento é Portal Coletores (Figura 29). Já a empresa que faz a operação para a Secretaria no momento da pesquisa é a NRG Construções Ltda.

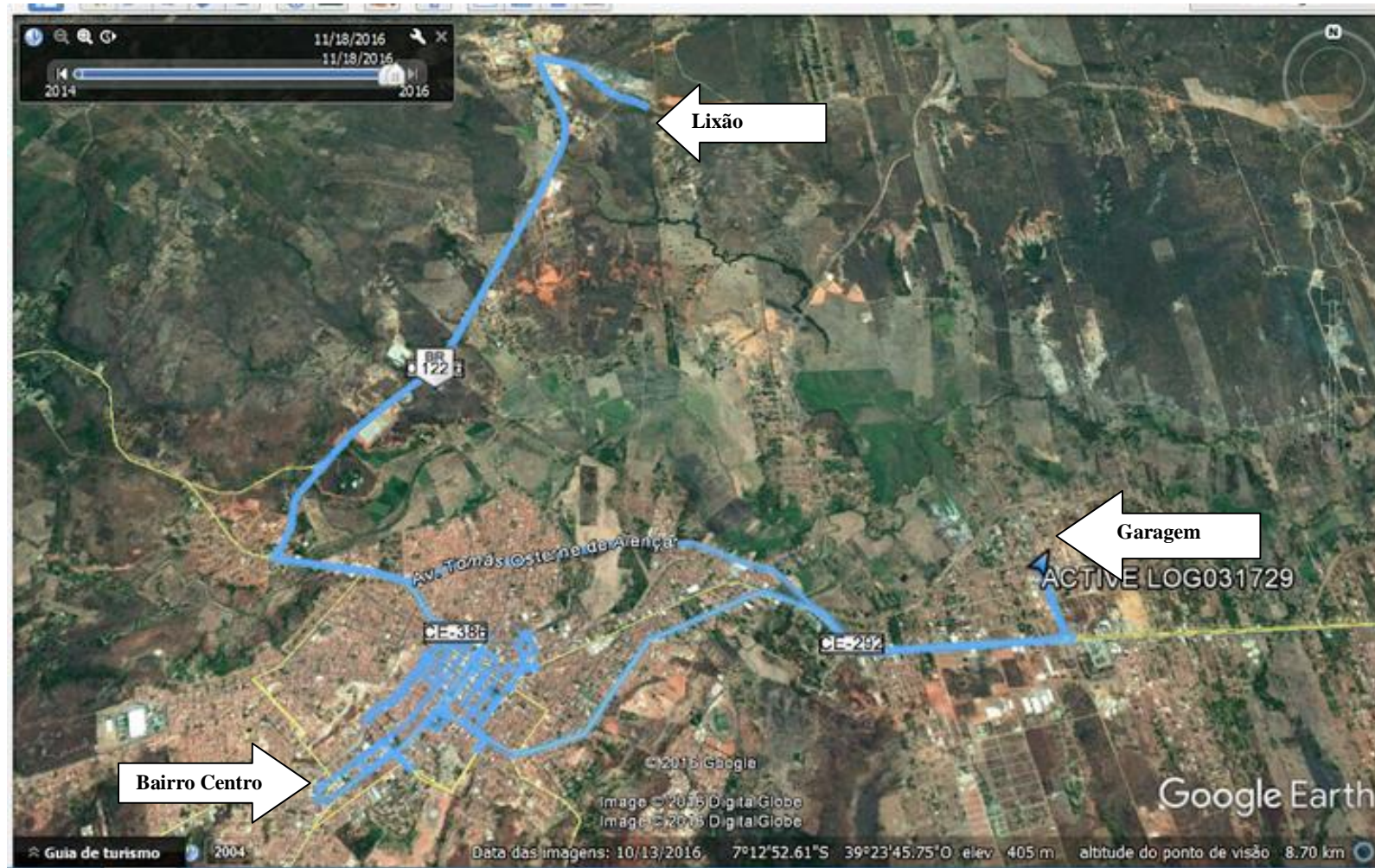
Figura 29 - Caminhão compactador e implemento. Crato – Ceará, em 2017



Fonte: Autora (2019).

Observa-se que o tempo total da rota (garagem a garagem) corresponde, aproximadamente, a três horas, sendo que o tempo total do percurso produtivo é de duas horas e o improdutivo de uma hora (Figura 30). O percurso total aproximado fica em torno de 40 km, sendo percurso total produtivo de 15 km e percurso total improdutivo de 25 km. Em relação à velocidade média no Centro, está em torno de 3 a 4 km/h, já a velocidade nos percursos fica em torno de 60 a 80 km/h. Quanto ao lixo diário conforme a rota: madrugada (3h as 6h); de 3 a 4 toneladas e a tarde (15 h as 22h): de 9 a 10 toneladas.

Figura 30 – Imagem da rota 05 que se inicia na madrugada, no bairro Centro, no dia 18 de novembro



Fonte: GPS e Google (2016).

3.1.4 Avaliação dos resultados integrados

A quarta etapa consiste na avaliação dos resultados a partir da integração da análise qualitativa (M-Macbeth) e quantitativa (CPP). Qualitativa em que se deu a importância da adoção do método M-Macbeth onde está relacionada a uma abordagem construtivista, ou seja, a interatividade que é a principal característica dessa metodologia, assim como humanista, pois a construção do modelo quantitativo está baseada em julgamentos qualitativos e diferenças de atratividade, o que representa uma contribuição para os tomadores de decisão em ponderar, comunicar e debater os seus valores e preferências, ante um determinado problema, levando em consideração múltipla. Quanto a praticidade é fator determinante, pois o método sugere interação que beneficia o sistema de apoio à decisão de modo eficiente, trabalha com uma matriz de julgamentos assinada nas diferenças de “atratividade” o que permite verificação visual de consistência, assim como uma comparação par a par em uma escala intervalar que proporcionará um *ranking* completo com pontuação, por meio do *software* M-Macbeth. Nessa análise qualitativa da pesquisa se verifica que, entre os tomadores de decisão, há o que possui melhor pontuação em relação aos demais em cada critério e a nível global.

Após a implementação e a aplicação da pesquisa com os gestores e a situação real dos RSU no Município do Crato verificou-se a necessidade de se analisar dentre os critérios em que os tomadores de decisão apontam como relevante em sua tomada de decisão e que pouco se tem estudado. Assim a escolha da ferramenta se deu de acordo com a análise de sensibilidade e com o julgamento da pesquisadora com base na realidade do Município e das entrevistas com os gestores da região, que nesse caso foi o CPP.

Na avaliação quantitativa o modelo do CPP, baseado no modelo de Edmonds (1973), se constrói uma arborescência, em que o circuito euleriano consiste numa tarefa trivial, embora com abordagem diferente de Euler. O resultado obtido é oriundo da associação do trabalho de campo e do modelo do CPP, em cuja limitação da quantidade de nós e arestas o modelo se tornou não dirigido. Quanto às rotas otimizadas, ao serem comparadas com as realizadas, proporcionam uma redução na distância total percorrida pelo veículo, o que pode acarretar uma economia significativa. Os números representam os vértices e arestas que formam os arcos a serem atravessados pelo veículo de coleta de resíduos sólidos no bairro Centro, Município do Crato.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos do Município do Crato

O Município do Crato é considerado um dos pólos de cultura popular e artesanal que apresenta uma diversidade de recursos naturais e paisagísticos que, também, são explorados como uma forma de garantir o desenvolvimento de várias atividades econômicas, dentre elas a do setor cerâmico, que busca contribuir para o desenvolvimento socioeconômico da região. Além disso, dispõe de um importante patrimônio ambiental, cultural, científico e histórico, visto que está inserido no território do *Geopark Araripe*, que envolve os Municípios de Barbalha, Crato, Juazeiro do Norte, Missão Velha, Nova Olinda e Santana do Cariri, apresentando uma área aproximada de 3.441 km² (GEOPARK ARARIPE, 2011).

Com relação às características ambientais, o clima é tropical quente, semiárido brando, com pluviosidade de 1090,9 mm, temperatura média em torno de 24°C a 26°C e período chuvoso nos meses de janeiro a maio (IPECE, 2017).

Em razão das características geoambientais serem mais favoráveis em relação ao sertão do Ceará, o Município desencadeou um crescimento populacional da cidade. O fato é que a cidade se desenvolveu sobre as margens do rio Grangeiro, de tal modo que sua mata ciliar foi destruída no médio e baixo curso do rio, tendo com isso a construção do canal.

O Município do Crato está inserido na bacia hidrográfica do Salgado, uma das 12 bacias do Estado do Ceará, conforme divisão estabelecida pela Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), seus componentes ambientais estão apresentados no Quadro 32.

Quadro 32 - Componentes ambientais, Região do Cariri, 2017

Relevo	Solos	Vegetação	Bacia hidrográfica
Chapada do Araripe e Depressões Sertanejas	Solos Aluviais, Solos Litólicos, Latossolo Vermelho-Amarelo, Podzólico Vermelho-Amarelo, Terra Roxa Estruturada Similar	Carrasco, Floresta Caducifólia Espinhosa, Floresta Subcaducifólia, Tropical Pluvial, Floresta Subperenifólia Tropical Pluvio-Nebular, Floresta Subcaducifólia, Tropical Xeromorfa	Alto Jaguaribe, Salgado

Fonte: Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2017).

O Município tem um número total de códigos postais identificados em cada bairro, distrito ou povoado, totalizando 26 bairros na Sede do Município e dez distritos.

A renda *per capita* média de Crato cresceu 112,72% nas últimas décadas, passando de R\$ 221,16, em 1991, para R\$ 333,37, em 2000, e para R\$ 470,46, em 2010. Isso equivale a uma taxa média anual de crescimento nesse período de 4,05%. A taxa média anual de crescimento foi de 4,67%, de 1991 a 2000, e 3,50%, de 2000 a 2010. A proporção de pessoas pobres, ou seja, com renda domiciliar *per capita* inferior a R\$ 140,00 (a preços de agosto de 2010) passou de 65,85%, em 1991, para 48,05%, em 2000, e para 24,54%, em 2010. A evolução da desigualdade de renda nesses dois períodos pode ser descrita pelo Índice de Gini, que passou de 0,64, em 1991, para 0,64, em 2000, e para 0,57, em 2010 (PNUD, 2013).

A estrutura administrativa da Prefeitura Municipal do Crato é responsável por gerenciar o processo de limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos urbanos gerados no Município. A Prefeitura e uma empresa terceirizada são responsáveis pela limpeza das vias públicas, manutenção e administração das praças e logradouros.

Segundo dados do IPECE (2017), com relação ao serviço de coleta de lixo, se observou um avanço, pois se tinha no ano de 2000 um valor de 67,11%, passando para 84,12% no ano 2010, ou seja, um crescimento relativo de 17,01%.

Dentro da estrutura administrativa, existe a atribuição em coletar o lixo urbano e nos distritos do Município. Com relação aos funcionários, estes não possuem formação técnica na área de resíduos sólidos.

O Município do Crato não possui dados autênticos sobre as taxas geração de resíduos ao longo dos anos. Quanto à coleta e transporte, não há um padrão comparativo dos resíduos sólidos urbanos gerados por dia.

A quantidade de resíduos sólidos coletados, segundo o portal da transparência do Município em 2016, considerando a coleta regular e seletiva é de aproximadamente 2,4 t/mês, baseada na capacidade do caminhão compactador. Observa-se que a maior quantidade gerada de lixo é de matéria orgânica, papel/papelão, metal, vidro e outros.

Nessa etapa para a identificação das formas de acondicionamento dos RSU gerados pelo Município, foram realizadas visitas *in loco* onde foram considerados locais utilizados para esta finalidade pela população, nos bairros da cidade, nos meses de setembro e outubro de 2016. As formas de acondicionamento dos RSU são coletoras de aço e concreto; tambores de aço, Figura 31.

Figura 31 – Acondicionamento de resíduos sólidos. Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).

A população não faz a segregação dos resíduos na fonte. Assim, os resíduos residenciais são acondicionados pela população em sacos de lixo, sacolas plásticas de supermercado, recipientes de concreto, em tambores de borracha, em tambores de aço e coletores de aço e posteriormente dispostos de maneiras diversas, para serem coletados pelo caminhão de coleta.

O Município não fornece instalações de armazenamento e não há separação de resíduos de origem nos diversos pontos de geração, como: residências, instituições públicas, estabelecimentos comerciais, mercado público, escolas, dentre outros.

Os locais onde ficam os resíduos, enquanto a coleta não passa, são as calçadas, a via pública, canteiros centrais, muitas vezes em uma condição decrépita, de modo que algumas pessoas apenas jogam seus resíduos nos arredores dessas instalações. Figura 32.

Figura 32 – Locais de armazenagem dos resíduos. Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).

Os pontos de coleta, na maioria, não são adequados e não estão corretamente localizados e instalados (Figura 33), visto que os arredores dos recipientes são muito sujos, particularmente os que ficam no mercado público e ao longo dos canteiros centrais, e nas vias públicas onde os resíduos estão ao redor das caixas, sacos e outros recipientes.

Figura 33 – Pontos de coleta dos resíduos, em terreno às margens do rio Grangeiro e próximo ao Mercado Público. Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).

Quanto às condições dos coletores de lixo, estes também não denotam boas condições de uso, embora sejam em algumas áreas novas como nas praças públicas, mas que sofrem depredação e avarias. Outro aspecto é que existe grande variação no tamanho e forma

de recipientes nos trechos, o que dificulta um planejamento no momento da coleta, pois, na ausência de padronização, não há como se dimensionar os equipamentos adequados, mão de obra suficiente, volume do caminhão que realiza o armazenamento temporário dos resíduos coletados.

A coleta dos RSU é realizada pela Prefeitura Municipal e empresa terceirizada que utiliza caminhões compactadores, percorrendo no bairro em estudo todos os dias da semana e com frequência de duas ou três vezes ao dia. Não há estações de transferência, de modo que, todos os resíduos sólidos urbanos coletados são transportados para o local da disposição final.

Os veículos são operados durante os três turnos do dia, com intervalo das 22 horas às quatro horas da manhã. Assim, é bloqueado o movimento de trânsito nas ruas que são estreitas e em áreas congestionadas, principalmente no centro da Cidade. Outro aspecto é que os trabalhadores que realizam a coleta dos resíduos sólidos disputando espaço entre os carros, caminhões, ônibus, ciclistas, em movimento e estacionados, se tornando um desafio e risco ao trabalhador, pois, além de estar vulnerável, ainda carrega o resíduo, às vezes, sem o devido condicionamento (Figura 34).

Figura 34 – Gargalos do trânsito local (A = conflitos com automóveis e desrespeito à legislação de trânsito, B = rua estreita). Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).

Quanto ao roteamento e seu planejamento, continua o que é acordado com os gestores, mas existe a flexibilidade, de que quando necessário, pode-se alterar a rota com relação ao dia e horário para realização da coleta quando isso ocorre é observada a falta de educação ambiental da população, que, logo após o veículo ter passado no tempo previsto, ela

coloca o seu lixo nas calçadas e vias, ficando exposto mais do que o necessário, provocando, assim, um acúmulo de lixo até a próxima coleta, além de outros contratempos.

O Município não possui uma usina de triagem e compostagem. Assim, todos os resíduos sólidos coletados têm como destino final o lixão.

Existem, no entanto, catadores de materiais recicláveis que trabalham dispersos na cidade, vinculados à Associação dos Agentes Recicladores do Crato (AARC). Criada em dezembro de 2005, ela recebe embalagem longa-vida, metais, papel branco, plástico e vidro, com objetivo de retirar o catador do ambiente insalubre (lixão), proporcionando a reintegração social por meio da geração de renda, contribuindo, ainda, para a destinação adequada dos materiais (Figura 35).

Figura 35 – Galpão da Associação dos Agentes Recicladores do Crato (A = vista geral, B = vista lateral), em 2016



Fonte: Autora (2019).

Dessa maneira, os materiais recolhidos são conduzidos até a Associação, que tem como atividade logística principal o armazenamento temporário, a triagem e a comercialização (Figura 36).

Figura 36 – Carregamento de caminhão com materiais recicláveis, pelos associados. Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).

Dentre os principais materiais denominados e encaminhados para a entidade por meio de um trabalho de coleta diária em sistema porta a porta nas residências, bem como em 14 ecopontos espalhados em alguns bairros do Município, desenvolve-se a comercialização de produtos recicláveis, em processo de compra e venda, contando inclusive com a contribuição de catadores não cadastrados (Figura 37).

Figura 37 – Coleta de *bag* com papelões, em frente ao Banco do Nordeste. Crato – Ceará, em 2016



Fonte: Autora (2019).

De acordo com a AARC a denominação “própria” entre os associados dos materiais recicláveis são: PET, plástico mole, bacia, filme limpo, plástico filme semi limpo,

embalagem “Brilux”, recipiente “polidor”, cadeira de plástico, tubo de 5L, tubo de 2L, tampa, PVC, papel branco, jornal, papelão, ferro, latinha, cobre, panela de alumínio, garrafinha “coquinho”, “Ypióca”, óleo, “long neck”, “Melissa”, recipiente de detergente. Já os rejeitos da coleta seletiva são enviados ao lixão do Município (Figura 38).

Figura 38 – Vista geral de alguns materiais selecionados na associação (A = tampas, B = latinhas, C = PET, D = embalagem “Brilux”). Crato – Ceará, em 2016



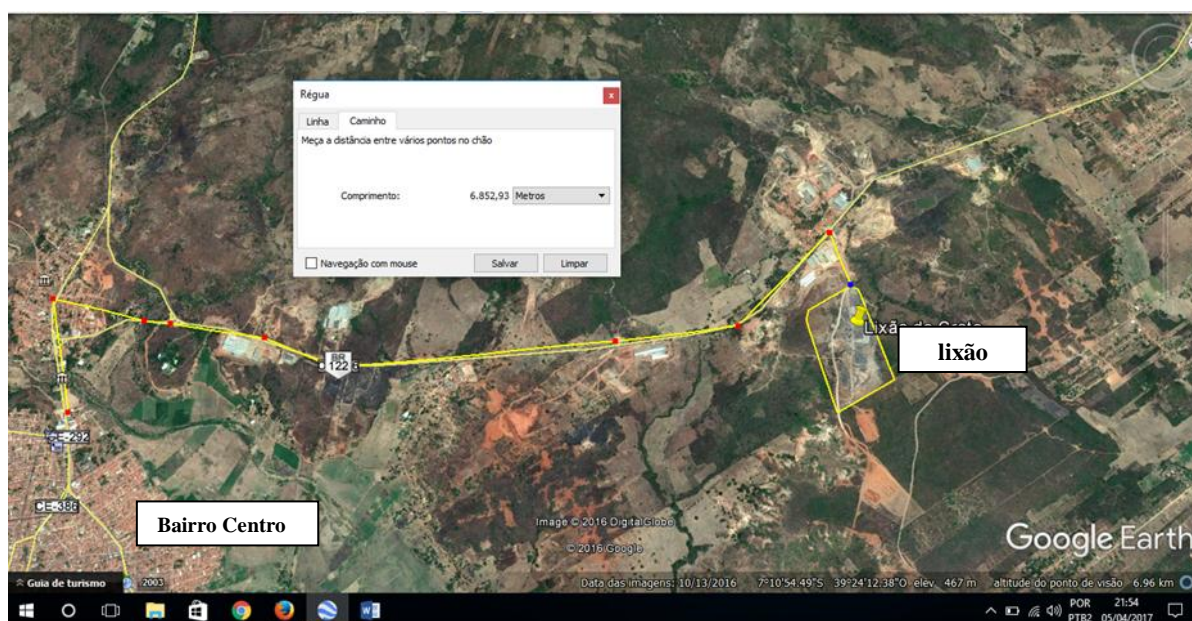
Fonte: Autora (2019).

Os catadores de materiais recicláveis precisam de algum tipo de apoio do governo sob a forma de benefícios fiscais ou instalações de infraestrutura para tornar a indústria mais efetiva, o que pode beneficiar o Município ao reduzir o peso dos resíduos volumosos que estão sendo tratados atualmente.

Não há métodos científicos e de engenharia para o tratamento de resíduos sólidos urbanos no Município do Crato. Isso pode ser atribuído à falta de recursos financeiros, motivação e *know how*. Assim os resíduos coletados e transportados pelos veículos

compactadores de todo o município são trazidos para o local de despejo final, estão localizados a aproximadamente 6,8 km do bairro Centro do Distrito-Sede, Figura 39. Existem alguns locais de despejo designados, mas que, para esta pesquisa não foram catalogados.

Figura 39 - Imagem satélite entre o bairro Centro e o lixão no Município do Crato – Ceará, em 2017



Fonte: Autora, adaptado do Google *Earth* (2019).

Os resíduos sólidos urbanos coletados pelos caminhões são despejados em vazadouros a céu aberto, sem qualquer revestimento de proteção e cobertura do solo. O lixiviado gerado aflora do solo (Figura 40).

Figura 40 – Lixiviado no lixão do Crato – Ceará, em 2017



Fonte: Autora (2019).

Assim, as condições em que se apresenta a área exigem necessidade imediata de fornecer disposição adequada (Figura 41), tais como tecnologias como a compostagem, centros de triagem que necessitam de investimentos, mas que são recomendados pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e que podem dar algum tratamento ao lixo de modo mais rápido, enquanto o local para aterro sanitário não é definido.

Figura 41 – “Loteamento” de armazenagem no lixão (A = casa, carro e *bags*, B = barraco, *bags*). Crato – Ceará, em 2016



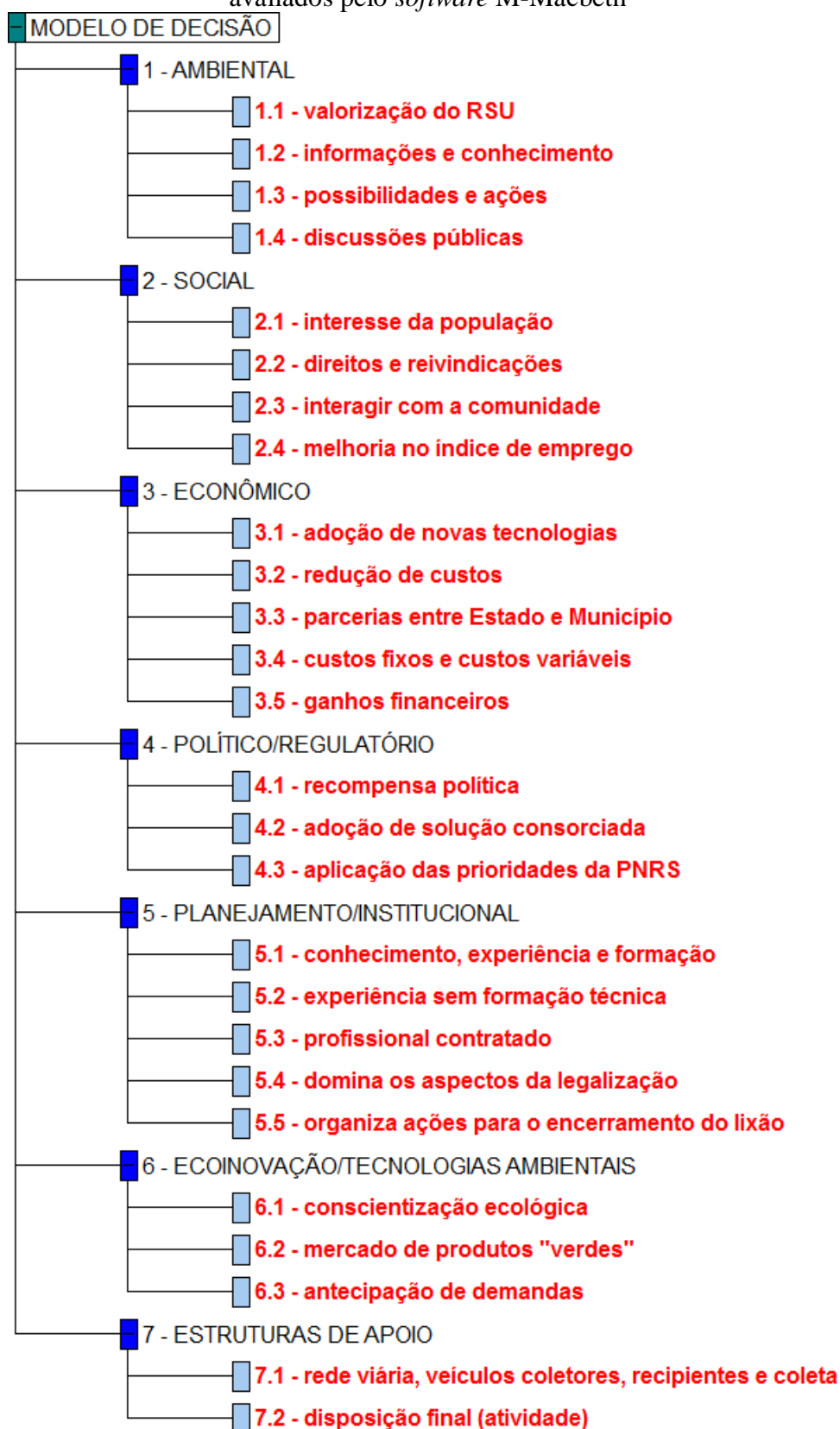
Fonte: Autora (2019).

4.2 Estudo exploratório de construção e avaliação de modelo potencial da gestão dos resíduos sólidos urbanos com a abordagem do M-Macbeth

A construção formal do modelo de decisão se deu a partir de um conjunto de informações oriundas das visitas de campo, entrevistas e questionários, bem como da elaboração do modelo de gestão dos RSU no Município do Crato.

A árvore de valor da Figura 42 mostra os critérios e descritores de impactos introduzidos e a serem avaliados, e sua construção é importante para se iniciar o processo de determinação das funções de valor e dos pesos dos critérios, que, no primeiro momento, é validada, pelos dados apresentados na entrevista e no questionário e, depois, a decisão a que se apontou.

Figura 42 - Árvore de valor com os critérios e descritores de impactos introduzidos e a serem avaliados pelo *software* M-Macbeth



Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Quanto aos descritores de impacto, foram trabalhados os descritores qualitativo ou

quantitativo, visto que a proposta da pesquisa é construir um modelo da gestão dos RSU no Município do Crato, que possa contribuir para o planejamento e a tomada de decisões.

Para cada nível de um descritor de impacto, foram quatro níveis de referência de performance intrínseco, ou seja, um nível nunca, raramente, frequentemente e sempre atratividade. A importância desses níveis é proporcionar facilidade na avaliação e comparação intercritérios (Figura 43).

Figura 43 – Introdução dos níveis de performance do critério de interesse da população, no *software* M-Macbeth

Propriedades de 1.1 - valorização do RSU

Nome: 1.1 - valorização do RSU

Nome abreviado: 1.1

Comentários:

Base de comparação:

as opções

as opções + 2 referências

níveis qualitativos de performance:

níveis quantitativos de performance:

critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		sempre	D4
2		frequentemente	D3
3		raramente	D2
4		nunca	D1

Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Para inserir a performance das opções (Figura 43), seleciona-se na guia opções do *software* Tabela de Performance e na tabela mesmo pressiona a célula que corresponde a performance de uma alternativa num determinado critério que será introduzido no modelo.

A descrição das áreas de interesse que foram tratadas no modelo é essencial para a tomada de decisão do modelo (Quadro 33).

Quadro 33 – Descrição das áreas de interesse que formam do modelo

Ambiental	É uma visão do aspecto ambiental, considerando a valorização dos RSU, conhecimento, ações, possibilidades e discussões públicas.
Social	Olhar da sociedade frente ao problema dos RSU.
Econômico	Corresponde aos custos e ganhos relacionados ao RSU.
Político/Regulatório	Tem como visão as prioridades da PNRS, adoção de soluções e recompensas políticas.
Planejamento/Institucional	É visão que o tomador de decisão tem a respeito do conhecimento, habilidades e atitudes relacionadas ao RSU.
EcoInovação/Tecnologias Ambientais	Olhar para uma consciência verde e uma antecipação das demandas de um “novo” mercado.
Estruturas de Apoio	O funcionamento e a viabilidade das ações dos RSU no município.

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Os critérios definidos para o estudo são descritos pelos indicadores na Tabela de Julgamentos dos valores das variáveis da Matriz, que foi construída com suporte em informações de pesquisas realizadas de cada opção possível. Desse modo, a descrição dos critérios incluídos ao modelo de gerenciamento de RSU no Município do Crato está indicada no Quadro 34.

Quadro 34 – Descrição dos critérios que foram definidos no modelo

Ambiental	Valorização dos RSU	Se o tomador de decisão observa a valorização dos RSU com o emprego de tecnologias de aproveitamento, como por exemplo, a reciclagem.
	Informações e conhecimento	Se o tomador busca informações e conhecimentos, ampliando suas opiniões e conceitos sobre a melhor forma de destinar os RSU.
	Possibilidades e ações	Como o decisor reflete sobre as legislações para construir novas possibilidades e ações.
	Discussões públicas	Como se promove discussões públicas e engajamento das pessoas em ações ambientais.
Social	Interesse da população	Que reconhecimento o decisor percebe por meio do diálogo, interesse da comunidade para investimentos relacionados aos RSU.
	Direitos e reivindicações	O decisor procura reconhecer os direitos e reivindicações da comunidade local.
	Interagir com a comunidade	Há interação com a comunidade sobre os impactos ambientais.
	Melhoria no índice de emprego	O tomador de decisão reflete sobre a melhoria no índice de emprego e renda de serviços relacionados ao gerenciamento dos resíduos sólidos.

Econômico	Adoção de novas tecnologias	O decisor estabelece adoção de novas tecnologias para a melhor gerenciamento dos recursos.
	Redução de custos	Se observa redução de custos por meio da gestão dos resíduos sólidos urbanos.
	Parcerias entre Estado e Município	Percebe parcerias entre Estado e município em prol da proteção dos interesses da comunidade.
	Custos fixos e custos variáveis	Sabe se os custos fixos e custos variáveis de coleta e transporte são suficientes para atender as necessidades da população.
	Ganhos financeiros	O decisor reconhece a obtenção de ganhos financeiros por meio da reciclagem.
Político/ Regulatório	Recompensa política	O decisor reconhece que existe recompensa política, de modo que a participação social em programas de coleta seletiva seja evidente.
	Adoção de solução consorciada	O decisor busca adoção de solução consorciada em que a gestão integrada dos RSU com outros municípios esteja de acordo com o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS).
	Aplicação das prioridades da PNRS	O tomador de decisão define a aplicação das prioridades da PNRS.
Institucional Planejamento/	Conhecimento, experiência e formação	O decisor tem conhecimento, experiência e formação na área de gestão dos RSU.
	Experiência sem formação técnica	O decisor tem experiência, mas nenhuma formação técnica na área de gestão dos RSU.
	Profissional contratado	O decisor terceiriza todas as funções para um profissional contratado.
	Domina os aspectos da legalização	Há domínio dos aspectos referente a legalização dos locais de destino final dos resíduos, as instalações (centros de triagem, centros de tratamento, e unidades de disposição final dos RSU), ecopontos e implantação de tecnologias de tratamento.
	Organiza ações para o encerramento do lixo	O decisor coordena, estrutura e organiza ações voltadas para modelos institucionais e de financiamento para o encerramento do lixo.
Eco-inovação/ Tecnologias Ambientais	Conscientização ecológica	O decisor busca a conscientização ecológica e o desenvolvimento sustentável.
	Mercado de produtos “verdes”	O decisor está sempre atento em beneficiar a abertura de novos mercados por produtos “verdes”, práticas sustentáveis e mudanças no comportamento das empresas.
	Antecipação de demandas	O decisor atua antes de ser solicitado, antecipando as demandas.
Estruturas de Apoio	Rede viária, veículos coletores, recipientes e coleta	O decisor considera a rede viária, veículos coletores, recipientes do lixo, desempenho da coleta e rotas fatores que contribuem para um melhor aproveitamento das oportunidades e condições, para êxito das ações dos RSU municipal.
	Disposição final (atividade)	O decisor domina perfeitamente o setor de atividade e a tecnologia relacionada na disposição final dos resíduos (portaria, balança, vigilância, isolamento físico e visual, frentes de trabalho, taludes e bermas e estruturas de proteção ambiental.

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Os descritores de impacto de todos os critérios constam do Quadro 35:

Quadro 35 – Descrição de impacto dos critérios

D1	Nunca	Quando a decisão não acontece
D2	Raramente	Quando a decisão possui acontecimentos mínimos
D3	Frequentemente	Quando ocorre de forma normativa a decisão
D4	Sempre	Quando a decisão é acontecimento presente

Fonte: Elaboração da autora (2019).

Os nomes descritos na tabela de performance G1 a G7 correspondem aos nomes fictícios dos entrevistados (tomadores de decisão) e dos critérios que foram escolhidos no momento em que se construía a árvore de decisão, ou seja, os nós na árvore de valor e as opções, no software M-Macbeth. A coluna opções da vertical correspondem aos gestores entrevistados e na horizontal as respostas de cada decisor, de modo que, por meio da função de valor, se converteram as performances das opções de pontuações obtidas pelas respostas do questionário, descritas qualitativamente. A Figura 44 mostra as performances dos sete gestores entrevistados, definidas pela associação à cada um deles de um nível de performance de cada descritor de cada critério.

Figura 44 – Tabela de performances. Gestores de RSU. Crato Ceará

Opções	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2
G1	D3	D4	D4	D4	D4	D4	D3	D3	D3	D4	D3	D2	D3	D3	D3	D4	D3	D3	D1	D4	D3	D4	D4	D4	D4	D3
G2	D1	D3	D4	D4	D4	D4	D4	D3	D4	D2	D3	D4	D2	D4	D4	D4	D4	D4	D1	D4	D4	D4	D4	D3	D4	D1
G3	D2	D2	D2	D3	D3	D4	D3	D2	D4	D3	D3	D4	D4	D2	D3	D4	D4	D1	D3	D4	D4	D4	D4	D4	D3	D2
G4	D4	D4	D4	D3	D2	D4	D4	D4	D4	D2	D2	D1	D4	D3	D1	D2	D4	D1	D1	D4	D4	D4	D1	D4	D4	D4
G5	D2	D3	D4	D3	D2	D3	D3	D3	D3	D2	D1	D1	D4	D2	D3	D4	D2	D3	D1	D3	D4	D4	D3	D3	D4	D3
G6	D3	D3	D4	D3	D2	D2	D3	D3	D3	D4	D2	D4	D4	D4	D2	D3	D1	D3	D2	D4	D3	D4	D3	D3	D3	D2
G7	D4	D4	D3	D3	D4	D4	D4	D4	D3	D4	D4	D4	D1	D3	D2	D3	D1	D4	D4	D4	D4	D4	D4	D4	D4	D4

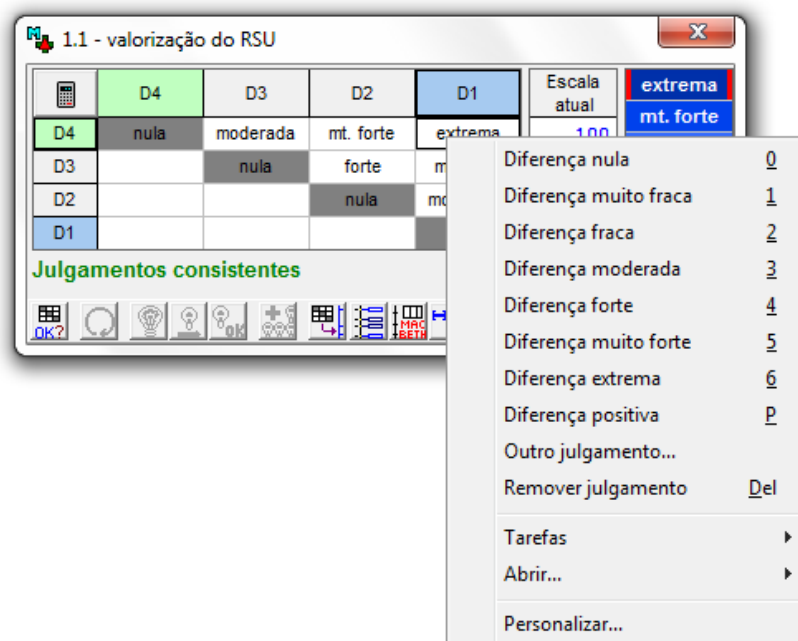
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Legenda:

Gestores de RSU	G1, G2, G3, G4, G5, G6 e G7
Decisão	D1 – nunca; D2 – raramente; D3 – frequentemente; D4 - sempre

Para cada critério, foi determinada a influência na matriz, a partir da classificação para nível, conforme as informações obtidas e coletadas do questionário, de modo que a ordenação das opções ou níveis de performance num critério (Figura 45) é possível com base nas comparações definidas.

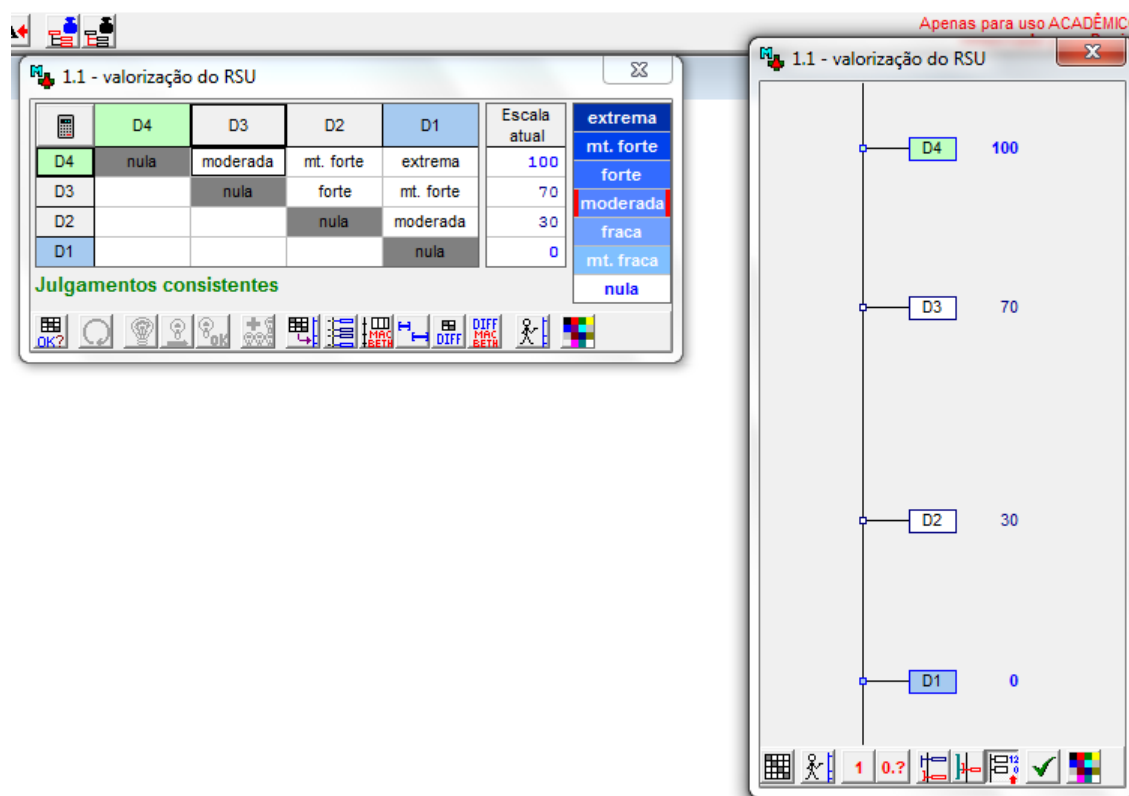
Figura 45 – Matriz de ordenação de níveis de performances num critério



Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Com suporte na ordenação dos critérios, é aberta uma matriz de julgamentos Macbeth para cada critério selecionado. À medida que se completa a matriz, o software faz o teste de compatibilidade da informação introduzida, emitindo uma mensagem de consistência ou inconsistência. Logo que a matriz estiver completamente preenchida e validada (matriz triangular superior), o próximo passo é a escala termométrica (descritores qualitativos), visto que permite ao gestor visualizar melhor as pontuações atribuídas aos distintos níveis, permitindo ainda verificar a diferença entre as pontuações. Assim, os resultados obtidos para as funções de valor (descritores quantitativos) e a visualização das respectivas escalas termométricas encontram-se na Figura 46.

Figura 46 – Julgamentos, escala de valor e a escala termométrica do critério valorização do RSU



Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Legenda:

Decisão	D1 – nunca; D2 – raramente; D3 – frequentemente; D4 - sempre
---------	---

Quanto aos resultados obtidos, verificou-se a variação entre positivos e neutros. Para a determinação dos pesos dos critérios, foi realizada a avaliação entre a diferença de atratividade dos pares de níveis, um à um, começando por comparar o swing mais atrativo com o segundo mais atrativo e assim por diante, com base nas categorias semânticas já apresentadas e utilizadas na determinação das funções de valor. Depois dos julgamentos obtidos em cada pares de níveis, preencheu-se a Matriz de Julgamentos para a ponderação dos critério (Figura 47).

Como resultado das decisões dos gestores e dos dados inseridos relativos às opções, obteve-se o ranking dos gestores para cada critério, demonstrado na Tabela de Pontuações dos Critérios (Figura 48).

Figura 47 - Matriz de julgamentos para a ponderação dos critérios, para gestores de RSU. Crato - Ceará

	[3.2]	[2.2]	[1.4]	[1.3]	[3.1]	[3.3]	[3.4]	[3.5]	[4.2]	[6.1]	[6.2]	[6.3]	[5.1]	[5.2]	[5.3]	[tudo inf.]	Escala atual	
[2.1]	moderada	moderada	forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	mt. forte	extrema	extrema	extrema	extrema	100.00	extrema
[2.3]	mod-extr	mod-extr	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	90.43	mt. forte
[7.1]	mfrac-frac	mod-extr	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	mfrac-mod	69.75	forte
[7.2]	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-mod	61.11	moderada
[1.1]	frac	frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac frac	mfrac mod	60.49	frac
[5.5]	frac-extr	frac-extr	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	frac-extr	mod-extr	59.88	mt. frac
[4.1]	mt. frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mod-extr	55.40	frac
[4.3]	mt. frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-mod	53.47	mt. frac
[5.4]	mt. frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mfrac-mod	52.20	nula
[1.2]	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mod-extr	40.74	
[2.4]	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mod-extr	40.12	
[3.2]	nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mod-extr	39.51	
[2.2]		nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	frac-extr	30.25	
[1.4]			nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	mfrac-frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	29.63	
[1.3]				nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	29.01	
[3.1]					nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	28.40	
[3.3]						nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	27.78	
[3.4]							nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	27.16	
[3.5]								nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	26.54	
[4.2]									nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mfrac-frac	25.93	
[6.1]										nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	frac-extr	25.31	
[6.2]											nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	mt. frac	frac-extr	24.69	
[6.3]												nula	mt. frac	mt. frac	mt. frac	frac-extr	24.07	
[5.1]													nula	mt. frac	mt. frac	frac-extr	23.46	
[5.2]														nula	mt. frac	frac-extr	22.84	
[5.3]															nula	frac-extr	22.22	
[tudo inf.]																nula	0.00	

Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Figura 48 – Tabela de pontuações dos critérios, para gestores de RSU. Crato - Ceará

Opções	Global	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
G1	81.76	70.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	75.00	71.43	66.67	100.00	63.64	36.36	72.73	69.23	75.00	100.00	66.67	60.00	0.00
G2	79.09	0.00	81.82	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	71.43	100.00	30.00	63.64	100.00	36.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
G3	71.23	30.00	54.55	33.33	72.73	76.92	100.00	75.00	42.86	100.00	70.00	63.64	100.00	100.00	30.77	75.00	100.00	100.00	0.00	63.64
G4	74.79	100.00	100.00	100.00	72.73	53.85	100.00	100.00	100.00	100.00	30.00	27.27	0.00	100.00	69.23	0.00	38.46	100.00	0.00	0.00
G5	64.14	30.00	81.82	100.00	72.73	53.85	57.14	75.00	71.43	66.67	30.00	0.00	0.00	100.00	30.77	75.00	100.00	33.33	60.00	0.00
G6	68.00	70.00	81.82	100.00	72.73	53.85	28.57	75.00	71.43	66.67	100.00	27.27	100.00	100.00	100.00	33.33	69.23	0.00	60.00	27.27
G7	88.48	100.00	100.00	75.00	72.73	100.00	100.00	100.00	100.00	66.67	100.00	100.00	100.00	0.00	69.23	33.33	69.23	0.00	100.00	100.00
[tudo sup.]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
[tudo inf.]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesos :		0.0555	0.0374	0.0266	0.0272	0.0917	0.0277	0.0829	0.0368	0.0260	0.0362	0.0255	0.0249	0.0243	0.0508	0.0238	0.0490	0.0215	0.0209	0.0204

Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Legenda:

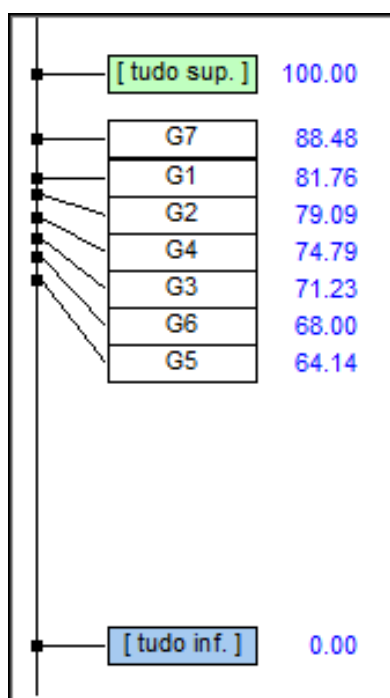
Gestores de RSU	G1, G2, G3, G4, G5, G6 e G7
-----------------	-----------------------------

Critério	Descrição	Critério	Descrição
1.1	valorização do RSU	3.3	parcerias entre Estado e Município
1.2	informações e conhecimento	3.4	Custos fixos e custos variáveis
1.3	possibilidades e ações	3.5	Ganhos financeiros
1.4	discussões públicas	4.1	Recompensa política
2.1	interesse da população	4.2	Adoção de solução consorciada
2.2	direitos e reivindicações	4.3	Aplicação das prioridades da PNRS
2.3	interagir com a comunidade	5.1	Conhecimento, experiência e formação
2.4	melhoria no índice de emprego	5.2	Experiência sem formação técnica
3.1	adoção de novas tecnologias	5.3	Profissional contratado
3.2	redução de custos		

Nessa etapa da construção do modelo, vários problemas de inconsistência ocorrem nos julgamentos quando se determinou as funções de valor, de modo que as alterações dos julgamentos que foram introduzidos, visto que há mais pares de linhas e colunas, conseqüentemente, mais complexidade na identificação do julgamento que deve ser introduzido em determinada célula-matriz.

As análises dos resultados ocorrem após a construção formal do modelo, visto que é possível analisar quais os fatores que mais interferem na construção do modelo e proporcionam uma sequência de opções. O resultado pode ser observado por meio da tabela de pontuação dos critérios (Figura 48) onde se analisa o termômetro global de desempenho dos gestores diante dos critérios, conforme demonstra a Figura 49.

Figura 49 – Termômetro global de pontuações



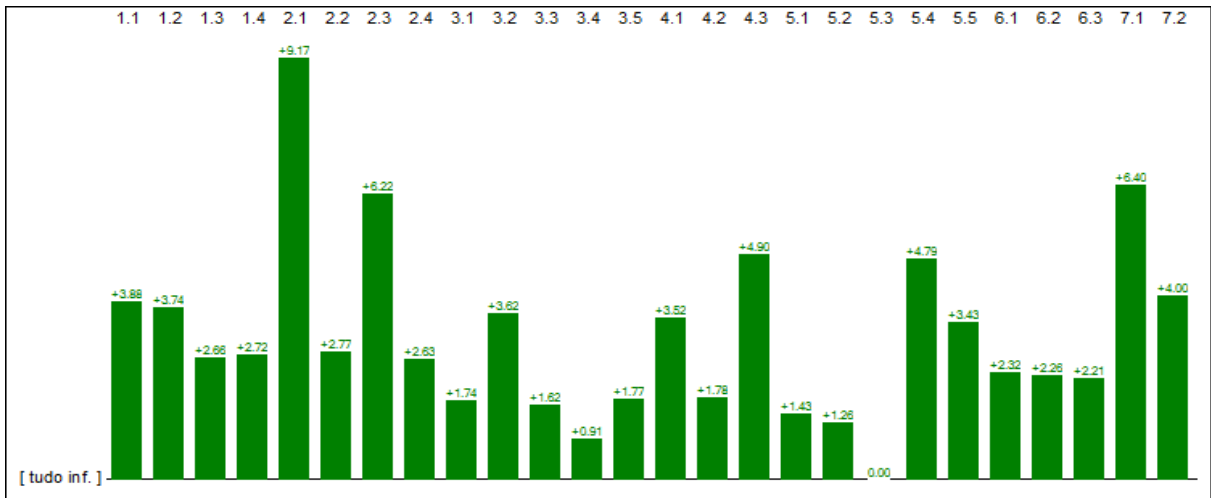
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Legenda:

Gestores de RSU	G1, G2, G3, G4, G5, G6 e G7
-----------------	-----------------------------

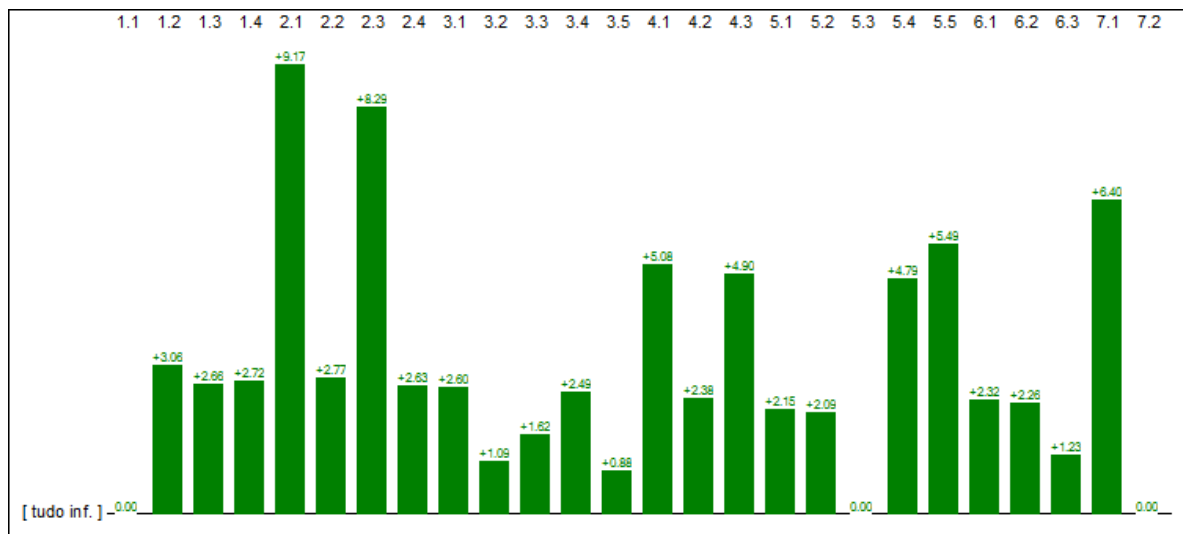
Outro aspecto consiste na análise do desempenho gráfico de cada gestor. Nota-se que nas Figuras 50 a Figura 56 está apresenta o perfil ponderado de cada gestor. Desse modo, a soma das ponderações dá a qualificação de cada tomador de decisão, ou seja, o gestor que tiver a maior soma das áreas das barras é o gestor que tem melhor desempenho de acordo com as preferências da pesquisa.

Figura 50 - Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G1. Crato - Ceará



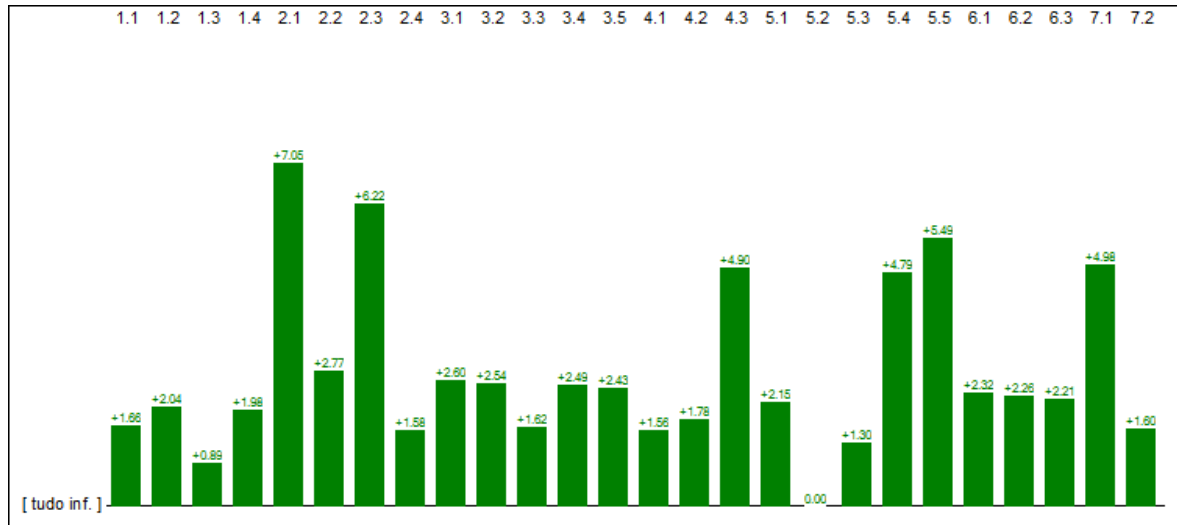
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Figura 51 - Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G2. Crato - Ceará



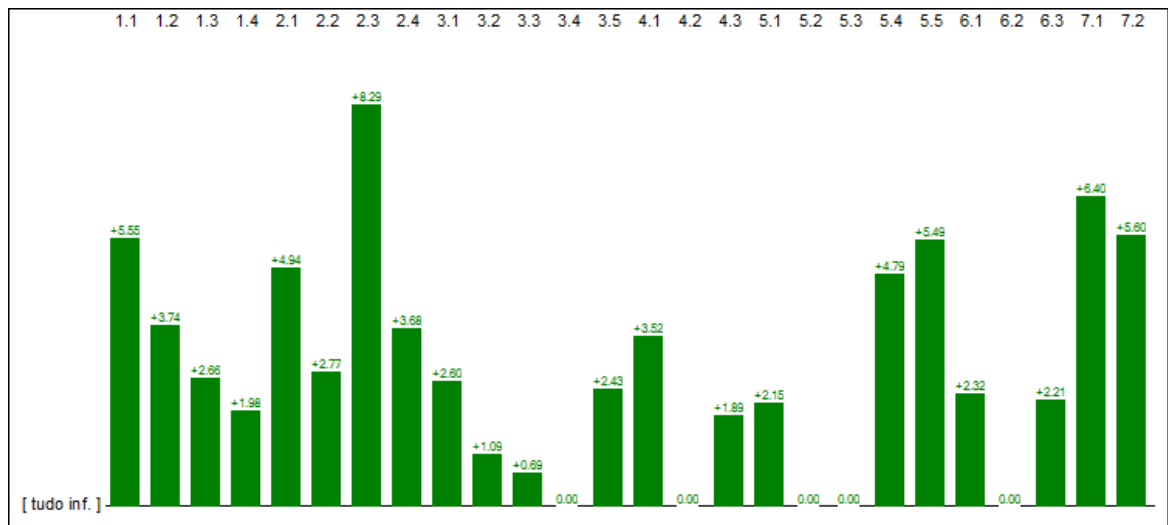
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Figura 52 - Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G3. Crato - Ceará



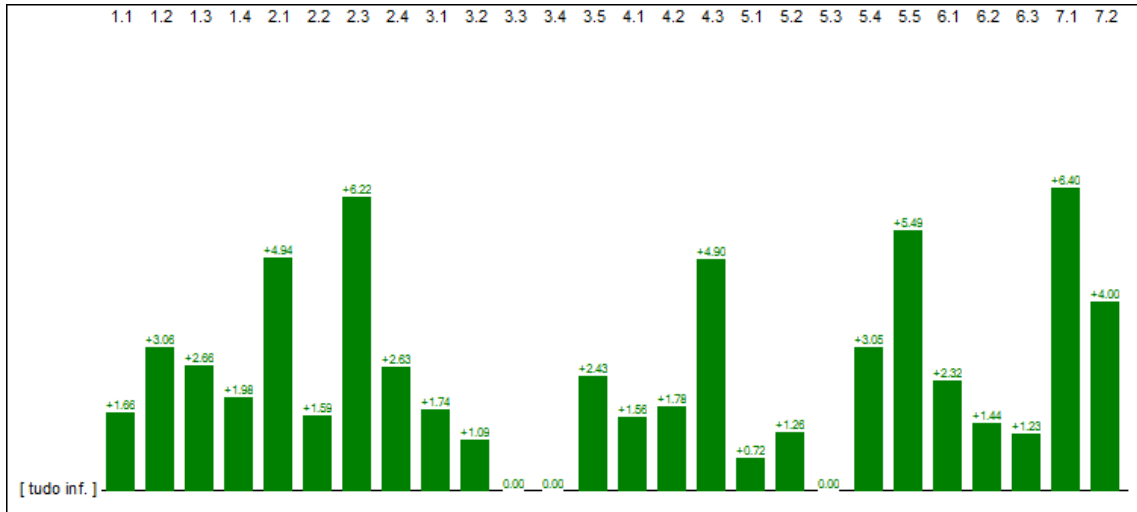
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Figura 53 - Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G4. Crato - Ceará



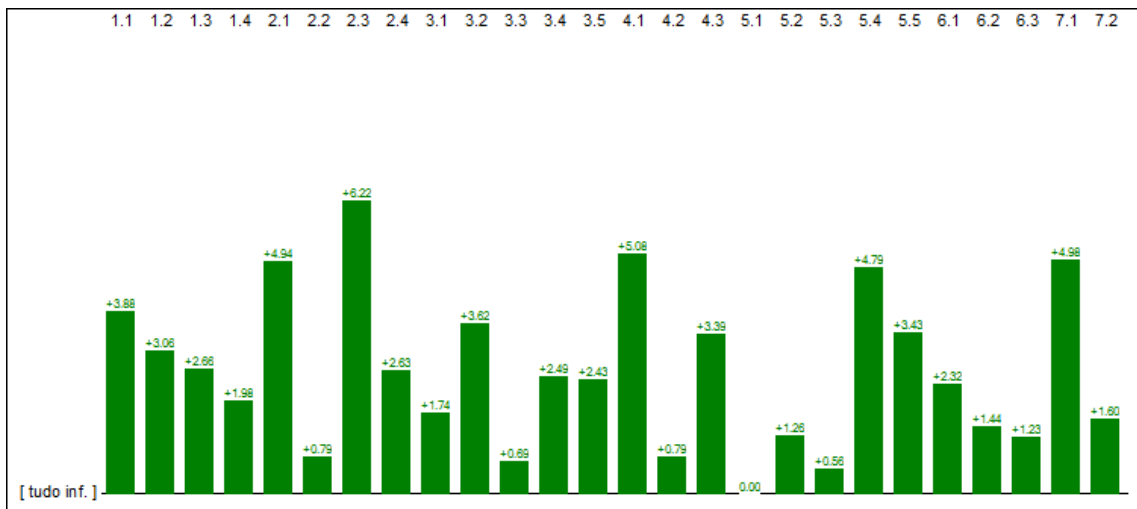
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Figura 54 - Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G5. Crato - Ceará



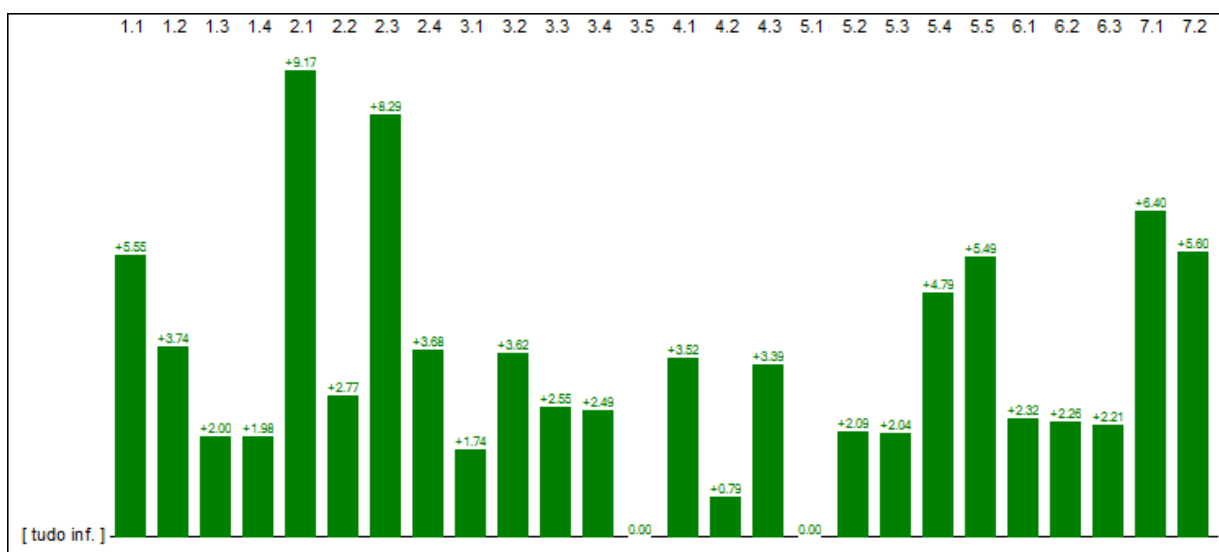
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Figura 55 - Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G6. Crato - Ceará



Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

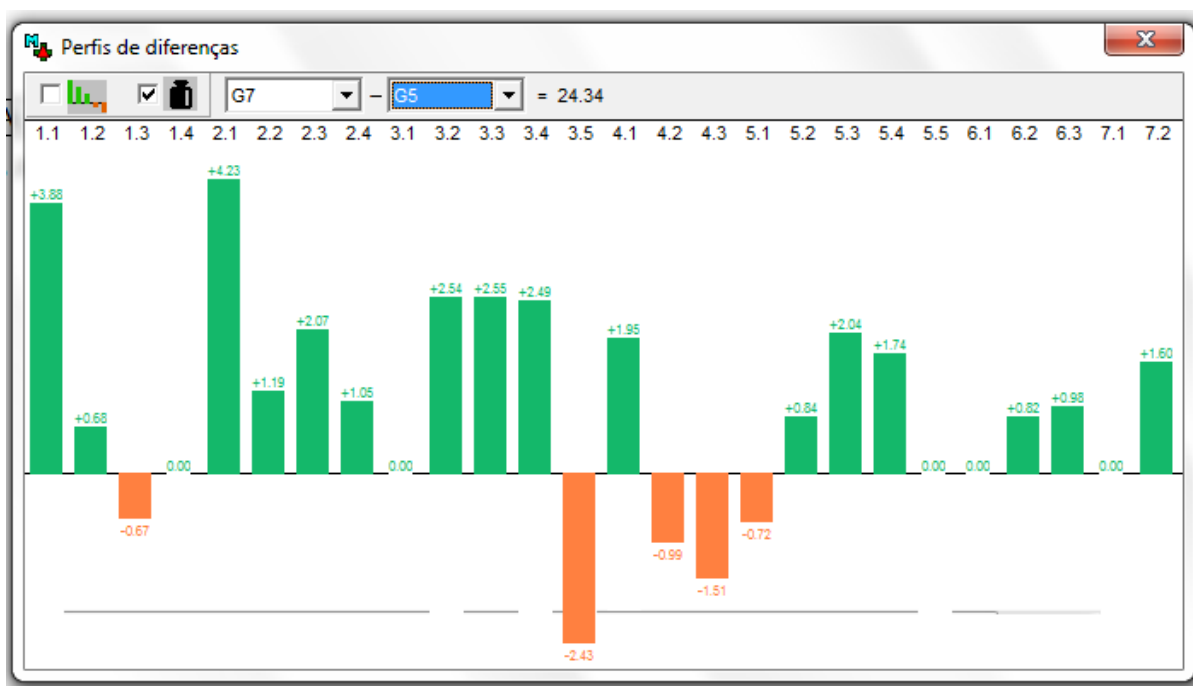
Figura 56 - Perfil (ponderado) dos tomadores de decisão comparados ao G7. Crato - Ceará



Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

Assim, considera-se que o decisor G7 é o que apresenta o melhor desempenho no gerenciamento dos RSU no Município, considerando que seu perfil (ponderado) apresentou decisões mais próximas da PNRS e legislação, em que foi considerado entre as prioridades e pesos, dentre os critérios, enquanto o decisor G5 tem desempenho sistêmico em desenvolvimento. A análise é possível, ao se verificar a diferença entre as opções para visualizar em quais critérios uma alternativa foi melhor do que a outra, embora sejam dispensáveis, no entanto, facilitam a compreensão, gerando ganhos de tempo na análise do resultado da decisão (Figura 57).

Figura 57 – Perfis de diferenças entre as alternativas do decisor G7 e G5. Crato - Ceará



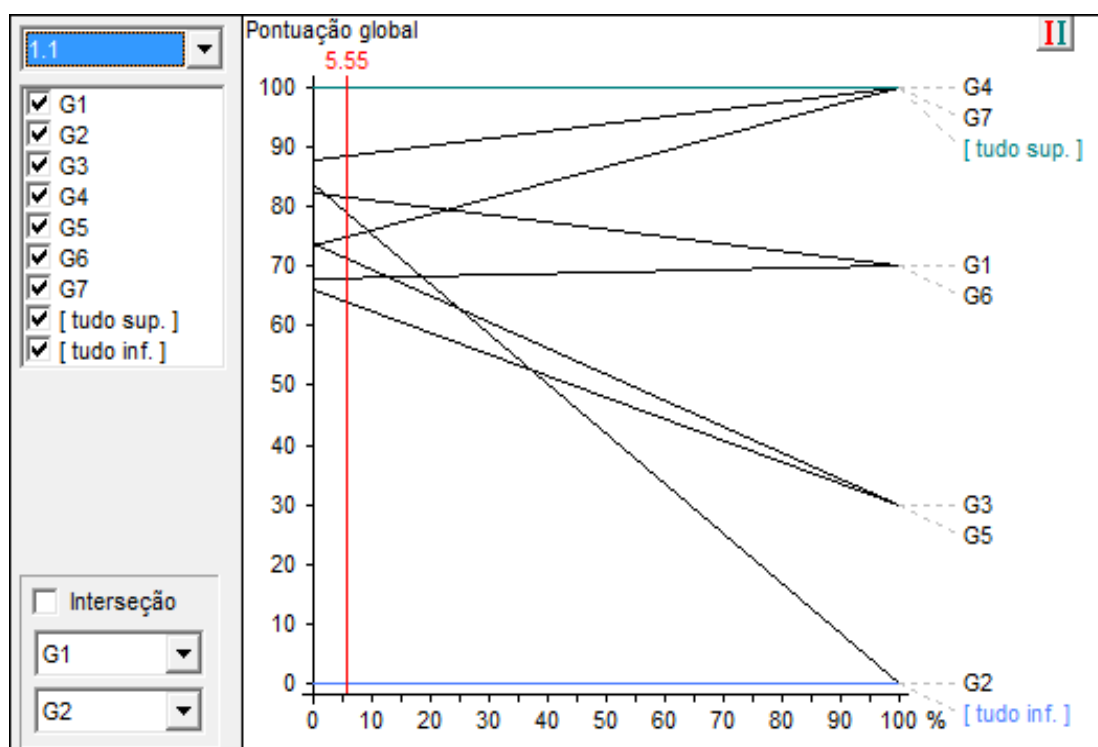
Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

A utilização do método Macbeth ao modelo de análise de sensibilidade em estudo aborda particularmente a estruturação dos critérios e da avaliação dos pesos, proporcionando, por meio da interatividade, manuseio dos pesos dos critérios, transformando julgamentos qualitativos em informações quantitativas que estejam em conformidade com o conceito de atratividade entre duas opções (ALMEIDA, 2011, p.55).

O modelo em estudo foi considerado válido e robusto por terem sido realizadas várias análises de sensibilidade e de robustez dos seus resultados, utilizando as funcionalidades do M-Macbeth; avaliando a sensibilidade dos resultados do modelo, procurando variar o coeficiente de ponderação de cada critério, sendo esta ferramenta de extrema importância no momento de tomar uma decisão para assim conseguir as variações necessárias de cenários que possivelmente acontecerão. Assim, os tomadores de decisão, muitas vezes, não conseguem fazer as análises de cenários com lógica e com racionalidade.

Mediante a análise de sensibilidade de peso, é possível verificar como a pontuação global se modifica, proporcionando mudanças na importância dos critérios, como mostra a Figura 58, em que foi realizada uma análise para todos os critérios do estudo do modelo.

Figura 58 - Análise de sensibilidade de peso de valorização dos RSU



Fonte: Elaboração própria, com utilização do *software* M-Macbeth (2019).

A análise de sensibilidade demonstra que, por meio do ponto de intersecção das retas, há uma eventual mudança de decisão, no entanto, se não há ponto de intersecção, isso significa que o critério não pode mudar de decisão.

Nessa perspectiva, o M-Macbeth apresenta ferramentas de interatividade dinâmica, em que é permitido se realizar uma análise de sensibilidade, diferenciando alguns fatores e observando o impacto no termômetro global.

4.3 Análise da otimização da rota de coleta convencional de resíduos no bairro Centro do Município do Crato

Os problemas da gestão dos resíduos sólidos urbanos são universais, independentemente dos seus próprios territórios. Assim, as preocupações são tanto locais, regionais como nacionais, tornando-se indissociáveis dos contextos cultural, social e técnico do Município. A análise do sistema da gestão dos resíduos urbanos no Brasil mostra várias semelhanças, diferenças e especificidades relativas aos contextos municipais. As diferenças que se encontram não decorrem apenas das técnicas de mobilização e manejo dos resíduos nos municípios, mas também da capacidade de o sistema lidar com o volume de resíduos

produzidos, organizar-se e direcionar os usuários nos dispositivos, bem como propor o desenvolvimento de recuperação e valorização de materiais recicláveis.

4.3.1 Exemplo de coleta de resíduos sólidos urbanos no bairro Centro do Município do Crato

Como cita Cunha (1997), a definição dos roteiros envolve não apenas aspectos espaciais ou geográficos, mas também temporais, tais como restrições de horários de atendimento nos pontos a serem visitados. Logo, os problemas são caracterizados como roteirização e programação de veículos.

Dessa maneira, identificar qual rota um caminhão de coleta de RSU deve percorrer para diminuir sua distância percorrida é um desafio de roteirização de veículos e um processo de aplicação recorrente (DETOFENO; STEINER, 2009) do problema do carteiro chinês.

4.3.1.1 Rota atual do caminhão de coleta de resíduos

O grafo que constitui a rota pesquisada é composto por 140 nós e 270 arestas, que são percorridas pelo caminhão de coleta de resíduos sólidos urbanos, perfazendo uma distância de 19.241 m.

A proposta deste trabalho é minimizar as distâncias percorridas pelo caminhão de coleta e de transporte dos resíduos sólidos urbanos quanto às distâncias percorridas pelos responsáveis pela limpeza de rua, que devem percorrer todas as ruas (arcos) do bairro Centro, no Município do Crato/CE.

O estudo foi realizado quanto à coleta de RSU no bairro Centro do Município do Crato, em que o caminhão de coleta passa por todos os pontos de coleta de resíduos que estão situados nas ruas, de modo que há mais de um ponto de coleta em uma determinada rua, conforme Tabela 3. A Figura 59 mostra a disposição das ruas no mapa.

Tabela 3 - Ruas do bairro Centro a serem percorridas. Crato – Ceará, em 2017

Ordem	Rua
1	R. ZACARIAS GONCALVES
2	R. MADRE ANA COUTO
3	TRAV. JUAZEIRO DO NORTE
4	R. ALMIRANTE ALEXANDRINO
5	R. MONS. ESMERALDO TEIXEIRA
6	R. PADRE FROTA
7	R. BARBARA DE ALENCAR
8	R. MONS. FRANCISCO ASSIS FEITOSA
9	R. JOSE DE ALENCAR
10	AV. DUQUE DE CAXIAS
11	R. PADRE SUCUPIRA
12	BECO PADRE LAURO
13	R. VICENTE LEMOS
14	TRAV. IDA BILHAR
15	R. RODOLFO TEOFILLO
16	R. JOAO BACURAU
17	R. MONS. SOTTER
18	R. CORONEL SEGUNDO
19	R. RUI BARBOSA
20	R. DA PENHA
21	R. ARARIPE
22	AV. JOSE ALVES DE FIGUEIREDO
23	R. RATISBONA
24	R. NELSON ALENCAR
25	R. MONS. TAVARES
26	R. CURSINO BELEM
27	R. DR. JOAO PESSOA
28	R. MIGUEL LIMA VERDE
29	R. SENADOR POMPEU
30	R. TRISTAO GONCALVES
31	R. SANTOS DUMONT
32	R. JOSE CARVALHO
33	R. DOM PEDRO II
34	R. LOIOLA ALENCAR
35	R. AUGUSTO BACURAU
36	R. DOM QUINTINHO
37	R. JOSE MARROCOS
38	R. LEANDRO BEZERRA
39	R. SONIA
40	R. CORONEL TEOFILLO SIQUEIRA
41	VILA SANTA HELENA
42	R. CORONEL LUIS TEIXEIRA
43	PRAÇA JUAREZ TÁVORA.
44	PRAÇA DA SÉ
45	PRAÇA SIQUEIRA CAMPOS
46	R. BRUNO DE MENESES
47	R. CAROLINA SUCUPIRA
48	R. HERMENEGILDO FIRMEZA
49	R. GETÚLIO VARGAS
50	R. TEODORICO TELES
51	R. MONS. JOVINIANO BARRETO
52	R. CORONEL RAIMUNDO LOBO

continuação	
Ordem	Rua
54	PRAÇA FRANCISCO SÁ
55	R. HORÁCIO JACOME
56	R. SAGRADA FAMILIA
57	R. DESEMB. EDMILSON CRUZ NEVES
58	R. CORONEL ANTONIO LUIZ
59	R. CORONEL SIQUEIRA



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 59 - Ruas dispostas no mapa do bairro Centro do Município do Crato – Ceará, em 2017



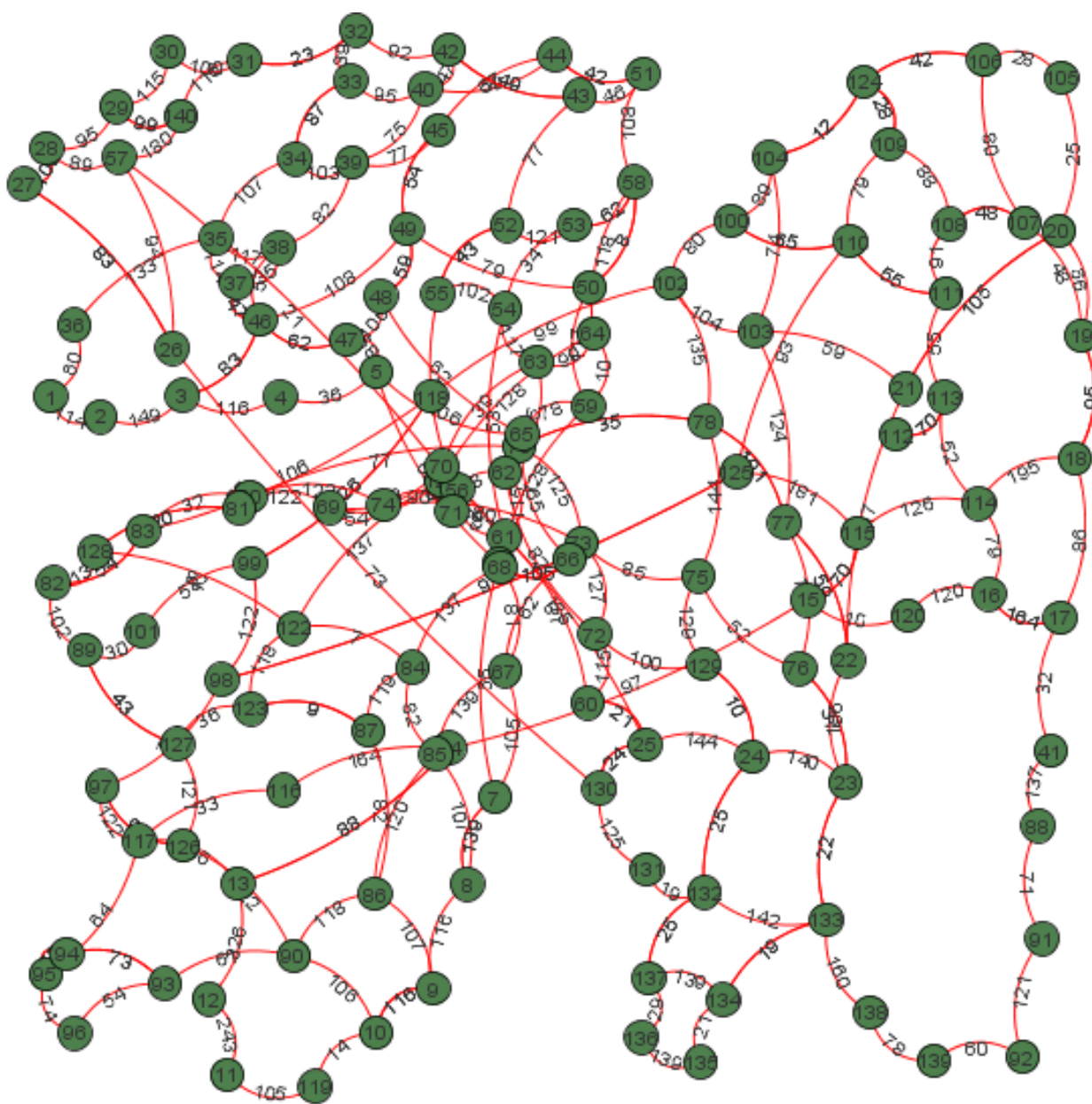
Fonte: Elaboração da autora a partir do Google Earth (2019).

Legenda:

	Nós – interseção entre um ponto e outro
	Arestas – o caminho percorrido entre os nós

A Figura 60 demonstra o grafo após a animação do percurso que foi tomado para resolver o problema. Trata-se de um grafo não euleriano, de modo que será necessário realizar as devidas operações para determinar um percurso ótimo para o grafo.

Figura 60 - Grafo final ajustado do estudo de caso. Crato, Ceará. 2017



Fonte: Elaboração própria (2019)

O grafo possui todos os vértices e arestas coloridos, pois todos foram visitados durante o percurso do caminhão de coleta dos RSU. Ao executar o algoritmo, todavia, foram

obtidos os resultados mostrados no Quadro 36.

Quadro 36 – Resultados do grafo final. Crato – Ceará, em 2017

Tipo de PCC	Não Dirigido
Método de Resolução	Modelo de Programação Linear
Número de Arestas Duplicadas	51
Arestas Duplicadas	{(3,46), (6,66), (7,8), (9,10), (13,14), (15,115), (16,17), (18,19), (20,21), (22,77), (23,76), (23,133), (24,132), (24,129), (25,60), (25,130), (26,27), (27,28), (29,140), (31,32), (33,34), (37,46), (42,43), (44,51), (45,49), (46,47), (48,49), (50,58), (52,55), (53,58), (70,71), (77,78), (78,79), (81,128), (82,83), (87,123), (89,127), (93,94), (94,95), (97,126), (98,125), (99,118), (100,110), (104,124), (106,124), (107,108), (109,124), (110,111), (112,113), (132,137), (133,134)}
Soma das Arestas Duplicadas	2.829
Número de Arestas do Grafo	270
Soma das Arestas do Grafo	21.168
Tempo de Execução (s)	0,018

Fonte: Elaboração própria (2019).

O modelo do PCC, baseado no modelo de Edmonds (1973), construiu uma arborescência, em que o circuito euleriano consiste uma tarefa trivial, embora com abordagem diferente de Euler. O resultado obtido é oriundo da associação do trabalho de campo e do modelo do PCC, em cuja limitação da quantidade de nós e arestas o modelo se tornou não-dirigido.

Então, os resultados demonstram economia aos cofres públicos, assim como ao meio ambiente e ao Município como um todo.

Os números representam os vértices e arestas que formam os arcos a serem atravessados pelo veículo de coleta de resíduos sólidos no bairro Centro, Município do Crato.

Quanto aos dados da distância atual da rota se tem 36.680 metros, aproximadamente 40 km, em percurso realizado pelo caminhão de coleta convencional de resíduos sólidos urbanos. Enquanto isso, a distância otimizada é de 19.241 metros, aproximadamente 20km. Assim, a economia entre a distância otimizada e a distância atual é de aproximadamente 48%.

Fazendo uma simulação de valores, vai o seguinte raciocínio: considerando o preço médio de venda do diesel por litro de R\$ 4,02 segundo a ANP (Agência Nacional de

Petróleo de 20/05 a 26/05/2018, no Município do Crato, tem-se:

Tabela 4 - Simulação do consumo de combustível da rota do bairro Centro no Município do Crato, em 2018

Item	Atual	Otimizado
Rota (Km)	36,68	19,24
Consumo (Km/L)	4	4
Preço do Diesel dia (R\$) *	4,02	4,02
Valor da rota dia (R\$)	589,81	309,38
Valor da rota mês (R\$) **	17.694,30	9.281,40
Valor da rota ano (R\$) ***	215.280,65	112.923,70

* ANP; ** 30 dias; *** 365 dias

Fonte: Elaboração própria (2019).

O resultado foi bastante expressivo porque, geralmente, os municípios não possuem qualquer instrumento de controle de rotas para as coletas de lixo convencional, como é o caso do Município em estudo, em que há uma sobreposição de percursos.

Desse modo, por meio da metodologia do CPP, se otimiza a rota para passar o mínimo de vezes em cada rua.

O modelo do CPP, baseado no modelo de Edmonds (1973), constrói uma arborescência, em que o circuito euleriano consiste uma tarefa trivial, embora com abordagem diferente de Euler. O resultado obtido é oriundo da associação do trabalho de campo e do modelo do CPP, em cuja limitação da quantidade de nós e arestas o modelo se tornou não-dirigido. Quanto às rotas otimizadas, ao serem comparadas com as realizadas, proporcionam uma redução na distância total percorrida pelo veículo, o que pode acarretar uma economia significativa. Assim, os resultados mostram a possibilidade de uma economia aos cofres públicos, bem como ao meio ambiente e ao Município como um todo.

4.4 Comparação com trabalhos já realizados

Trabalhos realizados a nível nacional e internacional relacionados a método de multicritério de apoio à decisão na gestão de RSU foram catalogados no Portal da Capes com os seguintes critérios: “método de multicritério de apoio à decisão na gestão de resíduos sólidos urbanos”, data de publicação entre os anos de 2015 até 2018 em que foram apresentados 243 trabalhos e desses foram analisados os 30 mais relevantes, a nível internacional. Já os nacionais foram apenas quatro. Quadro 37.

Quadro 37 – Resumo de abordagens encontradas na literatura nacional e internacional sobre método de multicritério de apoio à decisão na gestão de RSU

Nacional				
	Trabalho	Autor(es)	Assunto	Publicação
1	Fuzzy Visa: um modelo de lógica fuzzy para a avaliação de risco da Vigilância Sanitária para inspeção de resíduos de serviços de saúde	Natércia Fonseca de Carvalho Da Silva	Resíduos de Serviços de Saúde ; Lógica Fuzzy ; Vigilância Sanitária ; Inspeção Sanitária ; Técnicas de Apoio À ; Decisão .	Physis, 2017, Vol.27(1), pp.127-146
2	Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa	Waleska Silveira Lira ; Gesinaldo Ataíde Cândido	Livro sobre gestão sustentável dos recursos naturais	SciELO – EDUEPB, 01 January 2013
3	Análise da produção científica brasileira sobre sustentabilidade entre 2008 e 2011	Iizuka, Edson Sadao ; Pecanha, Reynaldo Schirmer	Sustainable Development – Analysis ; Digital Libraries – Analysis ; Environmental Management – Analysis	Revista de Gestao Ambiental e da Sustentabilidade, 2014, Vol.3(1), p.1(17)
4	Avaliação do grau de evidenciação dos impactos ambientais em relatórios de sustentabilidade e relatórios anuais de empresas brasileiras	Degenhart, Larissa ; Da Rosa, Fabricia ; Hein, Nelson ; Vogt, Mara	Evidenciação ambiental; Teoria da divulgação; Empresas brasileiras.	Revista Metropolitana de Sustentabilidade, Jan-Apr 2016, Vol.6(1), pp.81-103
Internacional				
	Trabalho	Autor(es)	Assunto	Publicação
1	Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model	Aghajani Mir, M ; Taherei Ghazvinei, P ; Sulaiman, N M N ; Basri, N E A ; Saheri, S ; Mahmood, N Z ; Jahan, A ; Begum, R A ; Aghamohammadi, N	Global Warming; Multi Criteria Decision Making; Solid Waste Management; Topsis; Vikor; Decision Support Techniques; Models, Theoretical	Journal of environmental management, 15 January 2016, Vol.166, pp.109-15

continuação

internacional				
	Trabalho	Autor(es)	Assunto	Publicação
2	<i>System tradeoffs in siting a solar photovoltaic material recovery infrastructure</i>	Goe, M ; Gaustad, G ; Tomaszewski, B	<i>Solid Wastes – Case Studies ; Solid Wastes – Analysis ; Fees – Case Studies ; Fees – Analysis ; Waste</i>	<i>Journal Of Environmental Management</i> , 2015 Sep 1, Vol.160
3	<i>A Novel Integrated Decision Support Tool for Sustainable Water Resources Management in Singapore: Synergies Between System Dynamics and Analytic Hierarchy Process.(Report)</i>	Xi, Xi ; Poh, Kim Leng	<i>Water Resource Management ; Seawater ; Reservoirs (Water) ; Desalination ; Water Resources ; Decision Making</i>	<i>Water Resources Management</i> , 2015, Vol.29(4), p.1329(22)
4	<i>Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach.(Report)</i>	Arroyo, Paz ; Molinos-Senante, Maria	<i>Green Technology ; Sewage Treatment ; Decision Making ; Waste Treatment Equipment ; Sustainable Urban Development</i>	<i>The Science of the Total Environment</i> , June 1, 2018, Vol.625, p.819
5	<i>Siting MSW landfills using MCE methodology in GIS environment (Case study: Birjand plain, Iran)</i>	Motlagh, Zeynab Karimzadeh ; Sayadi, Mohammad Hossein	<i>Analytical Network Process; Municipal Solid Waste Landfill; Ordered Weighted Averaging; Site Selection; Weighted Linear Combination; Decision Making</i>	<i>Waste management (New York, N.Y.)</i> , December 2015, Vol.46, pp.322-37
6	<i>Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina</i>	Vučijak, Branko ; Kurtagić, Sanda Midžić ; Silajdžić, Irem	<i>Multicriteria Decision Making Tool ; Solid Waste Management ; Scenario ; Selection ; Ahp ; Anp ; Electre ; Eu ; Maut ; Mcda ; Molp ; Mswm ; Promethee ; Smart ; Topsis ; Vikor ; Wms</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i> , 1 September 2016, Vol.130, pp.166-174

continuação

internacional				
7	<i>Identification and assigning weight of indicator influencing performance of municipal solid waste management using AHP</i>	Parekh, Harshul ; Yadav, Kunwar ; Yadav, Sanjay ; Shah, Navinchandra	<i>Solid waste management ; performance evaluation ; analytical hierarchy process ; performance indicator</i>	<i>KSCE Journal of Civil Engineering</i> , 2015, Vol.19(1), pp.36-45
8	<i>Investigating utility level of waste disposal methods using multicriteria decision-making techniques (case study: Mazandaran-Iran)</i>	Mirzazadeh, Fereshteh ; Hadinejad, Farhad	<i>Water Levels ; Medical Wastes ; Decision Analysis ; Case Studies ; Analytic Hierarchy Process</i>	<i>The Journal of Material Cycles and Waste Management</i> , Jan 2018, Vol.20(1), pp.505-515
9	<i>Conceptual frameworks for the drivers and barriers of integrated sustainable solid waste management</i>	C, Gahana Gopal ; Patil, Yogesh B ; Kt, Shibin ; Prakash, Anand	<i>India ; Commercialization ; Hygiene ; Emissions ; Solid Wastes ; Developing Countries ; Solid Waste Management</i>	<i>Management of Environmental Quality</i> , 2018, Vol.29(3), pp.516-546
10	<i>Current municipal solid waste management in the cities of Astana and Almaty of Kazakhstan and evaluation of alternative management scenarios</i>	Inglezakis, V. ; Moustakas, K. ; Khamitova, G. ; Tokmurzin, D. ; Sarbassov, Y. ; Rakhmatulina, R. ; Serik, B. ; Abikak, Y. ; Poulopoulos, S.	<i>Municipal solid waste ; Decision support software tool ; Almaty ; Astana ; Kazakhstan</i>	<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i> , 2018, Vol.20(3), pp.503-516
11	<i>An Improved Multi-Objective Programming with Augmented ϵ-Constraint Method for Hazardous Waste Location-Routing Problems</i>	Yu, Hao	<i>Norway ; Waste Treatment ; Hazardous Wastes ; Integer Programming ; Hazardous Substances ; Integer Programming</i>	<i>International Journal of Environmental Research and Public Health</i> , 2016, Vol.13(6), p.548

continuação

internacional				
12	<i>Industrial solid waste management through the application of multi-criteria decision-making analysis: a case study of Shamsabad industrial complexes</i>	Nouri, Dariush ; Sabour, M ; Ghanbarzadehlak, M	<i>Solid Wastes ; Environmental Risk ; Industrial Wastes ; Decision Making ; Solid Waste Management ; Pollution Control ; Waste Disposal ; Preservation ; Towns ; Landfills</i>	<i>The Journal of Material Cycles and Waste Management</i> , Jan 2018, Vol.20(1), pp.43-58
13	<i>Landfill site selection using GIS, remote sensing and multicriteria decision analysis: case of the city of Mohammedia, Morocco</i>	El Maguiri, Abdelhakim ; Kissi, Benaissa ; Idrissi, Laila ; Souabi, Salah	<i>Gis ; Landfill Siting ; Multi-Criteria ; Solid Waste ; Site Selection ; Mohammedia</i>	<i>Bulletin of Engineering Geology and the Environment</i> , Aug 2016, Vol.75(3), pp.1301-1309
14	<i>Multi-criteria analysis for municipal solid waste management in a Brazilian metropolitan area</i>	Gavazza, Savia ; Kato, Mario	<i>Analysis ; Developing Countries Organizations ; Sensitivity Analysis ; Solid Wastes ; Municipal Solid Waste</i>	<i>Environmental Monitoring and Assessment</i> , Nov 2017, Vol.189(11), pp.1-14
15	<i>Sustainable municipal solid waste management decision making</i>	Ak, Hacer ; Braida, Washington	<i>Environmental Protection ; Waste Management Industry ; Decision Making ; Sustainability ; Recycling</i>	<i>Management of Environmental Quality</i> , 2015, Vol.26(6), pp.909-928
16	<i>Solid Waste Management in Greater Shillong Planning Area (GSPA) Using Spatial Multi-Criteria Decision Analysis for Site Suitability Assessment</i>	Mipun, B ; Hazarika, R ; Mondal, M ; Mukhopadhyay, S	<i>Technology ; Engineering (General). Civil Engineering (General) ; Ta1-2040 ; Applied Optics. Photonics ; Ta1501-1820 ; Visual Arts</i>	<i>The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences</i> , pp.657-662. 2015
17	<i>New spatial decision support systems for sustainable urban and regional development</i>	Lombardi, Patrizia ; Ferretti, Valentina	<i>Decision Support Systems ; Decision Making ; Cultural Heritage ; Studies ; Urban Planning</i>	<i>Smart and Sustainable Built Environment</i> , 2015, Vol.4(1), pp.45-66

continuação

internacional				
18	<i>Insular Biobjective Routing with Environmental Considerations for a Solid Waste Collection System in Southern Chile</i>	Arango González, Daniela S. ; Olivares-Benitez, Elias ; Miranda, Pablo A.	<i>Mexico ; Chile ; Islands ; Pareto Optimization ; States ; Hazardous Substances ; Mixed Integer ; Waste Management Industry</i>	<i>Advances in Operations Research, 2017, Vol.2017</i>
19	<i>Reverse and inverse logistic models for solid waste management</i>	Banguera, L ; Sepúlveda, J M ; Fuertes, G ; Carrasco, R ; Vargas, M	<i>Industrial Engineering ; Medical Wastes ; Integer Programming ; Decision Making Models ; Fuzzy Sets ; Solid Waste Management</i>	<i>South African Journal of Industrial Engineering, Dec 2017, pp.120-132</i>
20	<i>Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis</i>	Ghinea, Cristina ; Drăgoi, Elena Niculina ; Comăniță, Elena-Diana ; Gavrilesco, Marius ; Câmpean, Teofil ; Curteanu, Silvia ; Gavrilesco, Maria	<i>Modeling ; Prognosis ; Regression ; Software ; Solid Waste ; Trend Analysis</i>	<i>Journal of Environmental Management, 1 November 2016, Vol.182, pp.80-93</i>
21	<i>Analysis and forecasting of municipal solid waste in Nankana City using geo-spatial techniques</i>	Mahmood, Shakeel ; Sharif, Faiza ; Rahman, Atta-ur ; Khan, Amin U	<i>Municipal solid waste ; Generation ; Population ; Forecasting ; Geo-visualization ; GIS</i>	<i>Environmental Monitoring and Assessment, 2018, pp.1-14</i>
22	<i>Multicriteria Evaluation of Urban Regeneration Processes: An Application of PROMETHEE Method in Northern Italy</i>	Bottero, Marta ; Oppio, Alessandra ; Hifi, Mhand	<i>Italy ; Alternatives ; Construction ; Decision Analysis ; Collaboration ; Swot Analysis ; Urban Planning ; Multiple Criterion ; Decision Making</i>	<i>Advances in Operations Research, 2018, Vol.2018</i>
23	<i>Assessing the role of preparation for reuse in waste-prevention strategies by analytical hierarchical process: suggestions for an optimal implementation in waste management supply chain</i>	Gusmerotti, Natalia ; Corsini, Filippo ; Borghini, Alessandra ; Frey, Marco	<i>Analytic Hierarchy Process ; Solid Waste Management ; Sensitivity Analysis ; Waste Management ; Environmental Impact ; Waste Management ; Solid Wastes ; Municipal Solid Waste</i>	<i>Environment, Development and Sustainability, Apr 2018, pp.1-20</i>

continuação

internacional				
24	<i>A Critical Evaluation of Waste Incineration Plants in Wuhan (China) Based on Site Selection, Environmental Influence, Public Health and Public Participation</i>	Hu, Hui ; Li, Xiang ; Nguyen, Anh ; Kavan, Philip	<i>China ; Studies ; Public Health ; Game Theory ; Site Selection</i>	<i>International Journal of Environmental Research and Public Health, Jul 2015, Vol.12(7), pp.7593-7614</i>
25	<i>Identification of suitable landfill site based on GIS in Leh, Ladakh Region</i>	Skinder, Safiya	<i>Agricultural Management ; Management ; Geology ; Solid Wastes ; Landfills ; Rodents ; Environmental Management ; Geology ; Decision Making ; Landfill ;</i>	<i>GeoJournal, 2018, pp.1-15</i>
26	<i>Using a fuzzy TOPSIS-based scenario analysis to improve municipal solid waste planning and forecasting: A case study of Canary archipelago (1999–2030)</i>	Estay-Ossandon, Charles ; Mena-Nieto, Angel ; Harsch, Nina	<i>Municipal Waste Management ; Scenario Analysis ; Fuzzy Topsis ; System Dynamics ; Decision-Making ; Canary Islands</i>	<i>Journal of Cleaner Production, 1 March 2018, Vol.176, pp.1198-1212</i>
27	<i>Applying an integrated route optimization method as a solution to the problem of waste collection</i>	Salleh, A ; Ahamad, M ; Yusoff, M	<i>Optimization ; Route Optimization ; Multiple Criterion ; Solid Waste Management ; Waste Management ; Garbage Collection ;</i>	<i>The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XLII-4/W1, pp.103-110, 2018.</i>
28	<i>Raster-based outranking method: a new approach for municipal solid waste landfill (MSW) siting</i>	Hamzeh, Mohamad ; Ali Abbaspour, Rahim ; Davalou, Romina	<i>Site selection ; MCDA ; PROMETHEE II ; ANP ; GIS</i>	<i>Environmental Science and Pollution Research, 2015, pp.12511-12524</i>

continuação

internacional				
29	<i>Development of a municipal solid waste management decision support tool for Naples, Italy</i>	Chifari, Rosaria ; Renner, Ansel ; Lo Piano, Samuele ; Ripa, Maddalena ; Bukkens, Sandra G.F. ; Giampietro, Mario	<i>Waste Management ; Decision Support Tool ; Naples ; Performance Indicators ; Participatory Assessment ; Metabolic Network</i>	<i>Journal of Cleaner Production, 10 September 2017, Vol.161, pp.1032-1043</i>
30	<i>Planning for the suitable? Land use suitability and social and ecological factors for locating a new hazardous facility</i>	Kim, Hwan ; Choi, Yeol ; Kim, Hyun ; Oh, Seung	<i>Land Suitability Analysis ; Geographic Information System (GIS) ; Spatial Decision Support Systems (SDSS) ; Landfill Site ; Analytic Hierarchical Process (AHP)</i>	<i>KSCE Journal of Civil Engineering, Jan 2016, Vol.20(1), pp.359-366</i>

Fonte: Elaboração própria (2019).

Todavia, os dados mostram que existem muitos trabalhos internacionais que aplicam a metodologia de multicritério em suas tomadas de decisões, mas a seleção da ferramenta depende das características do problema a ser tratado e das preferências do decisor.

Com relação ferramenta CPP há alguns trabalhos comparativos que foram catalogados no Portal da Capes com os seguintes critérios: “problema do carteiro chinês para coleta de resíduos sólidos urbanos”, onde foram apresentadas sete publicações, a nível internacional e apenas uma nacional. Quadro 38.

Quadro 38 – Resumo de abordagens encontradas na literatura nacional e internacional sobre problema do carteiro chinês para coleta de resíduos sólidos urbanos

Nacional				
	Trabalho	Autor(es)	Assunto	Publicação
1	Aplicação de um algoritmo genético para o problema do carteiro chinês em uma situação real de cobertura de arcos	Konowalenko, Flavia ; Francis Benevides, Paula ; Bertholdi Costa, Deise Maria ; Olandoski Barboza, Angela ; Nunes, Luiz Fernando	Problema Do Carteiro Chinês ; Pesquisa Operacional ; Algoritmos Genéticos ; Chinese Postman Problem ; Operations Research ; Genetic Algorithms	Revista Ingeniería Industrial, 2012, Issue 1, pp.27-36

Internacional				
	Trabalho	Autor(es)	Assunto	Publicação
1	<i>Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil</i>	Li, Jing-Quan ; Borenstein, Denis ; Mirchandani, Pitu B.	<i>Vehicle Scheduling ; Solid Waste Collection ; Generalized Assignment Problem ; Operations Management</i>	<i>Omega</i> , 2008, Vol.36(6), pp.1133-1149
2	<i>Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review</i>	Beliën, Jeroen ; Boeck, Liesje ; Ackere, Jonas	<i>solid waste ; vehicle routing problems ; literature review</i>	<i>Transportation Science</i> , 2012, Vol.48(1), p.78-102
3	<i>Combinatorial optimization and Green Logistics</i>	Sbihi, Abdelkader ; Eglese, Richard	<i>Green Logistics ; Reverse Logistics ; Combinatorial optimization ; Waste management ; Hazardous materials</i>	<i>4OR</i> , 2007, Vol.5(2), pp.99-116
4	<i>Combinatorial optimization and Green Logistics</i>	Sbihi, Abdelkader ; Eglese, Richard	<i>Green Logistics ; Reverse logistics ; Combinatorial optimization ; Waste management ; Hazardous materials</i>	<i>Annals of Operations Research</i> , 2010, Vol.175(1), pp.159-175
5	<i>A taxonomic structure for vehicle routing and scheduling problems</i>	Bodin, Lawrence D.	<i>vehicle routing; scheduling problems</i>	<i>Computers & Urban Society</i> , 1975, Vol.1(1), pp.11-29
6	<i>Ant colony optimization for the arc routing problem with intermediate facilities under capacity and length restrictions</i>	Ghiani, Gianpaolo ; Laganà, Demetrio ; Laporte, Gilbert ; Mari, Francesco	<i>Studies ; Optimization ; Routing ; Algorithms ; Experimental/Theoretical ; Management Science/Operations Research</i>	<i>Journal of Heuristics</i> , Apr 2010, Vol.16(2), pp.211-233
7	<i>Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art</i>	Raff, Samuel	<i>Transportation ; Routing ; Planning ; Operations Research ; Networks ; Logistics ; Distribution Engineering ; Decision Making ; Transportation Management ; Management Science/Operations Research</i>	<i>Computers and Operations Research</i> , 1983, Vol.10(2), pp.63,69,117,1 49,195- 67,115,147,19 3,211

Fonte: Elaboração própria (2019).

5 CONCLUSÃO

A pesquisa de campo com os gestores da região do Cariri e os gestores do Município do Crato foram satisfatórias, uma vez que foram coletados uma quantidade de dados e informações essenciais e suficientes para a construção do modelo de decisão a serem avaliados pelo software M-Macbeth que fez análise dos atributos inseridos na árvore de valor com os critérios e descritores de impactos introduzidos e posteriormente calculados os valores das variáveis nos atributos, chegando assim a uma classificação final demonstrando os resultados obtidos sem o intermédio de qualquer órgão externo.

Todavia se verificou que, entre os tomadores de decisão, o que possui melhor pontuação global é gestor D7 em relação aos demais, visto que sua análise em relação aos demais gestores apresenta decisões de critérios que estão mais próximas das considerações apontadas pela PNRS, ou seja, “a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública” (CAPÍTULO II, ART. 6º da LEI Nº 12.305/2010). Assim como foi estabelecido prioridade dos critérios que seria a legislação vigente.

Diante dos critérios elencados na árvore de valor o que se apresenta na análise de sensibilidade com grau de importância ao ser comparado com outro com maior frequência e mesmo sempre objeto de atenção dos decisores são aecoinovação e as estruturas de apoio. No entanto, a ecoinovação foi considerada como uma visão de marketing verde que tem sido difundida pela mídia e com características qualitativas. Quanto às estruturas de apoio foram de relevância destacadas pelos decisores e que foram aplicadas e analisadas no CPP e que particularmente, é um dos gargalos das despesas nos centros urbanos.

O modelo do CPP teve como resultado a associação do trabalho de pesquisa de campo, cuja limitação da quantidade de nós e arestas o modelo se tornou não-dirigido. No entanto, às rotas otimizadas ao serem comparadas com as realizadas proporcionam uma redução na distância total percorrida pelo veículo, o que pode acarretar uma economia significativa. Logo, os resultados mostram a possibilidade de uma economia aos cofres públicos, bem como ao meio ambiente e ao Município como um todo. Visto que os dados da distância atual da rota se têm 36.680 metros, aproximadamente 40 km, em um percurso realizado pelo caminhão de coleta convencional de resíduos sólidos urbanos. A distância otimizada é de 19.241 metros, aproximadamente 20 km. Desse modo, a economia entre a distância otimizada e a distância atual é de aproximadamente 48%.

O resultado foi bastante expressivo porque, geralmente, os municípios não

possuem qualquer instrumento de controle de rotas para as coletas de lixo convencional, como é o caso do Município sobre exames, em que há uma sobreposição de percursos. Desse modo, por meio da metodologia do CPP, se otimiza a rota para passar o mínimo de vezes em cada rua.

Outra conclusão importante é que se pode aplicar ao estudo piloto duas ferramentas distintas uma qualitativa e outra quantitativa, mas que o cruzamento dos dados foram essenciais para verificar as decisões que estão sendo tomadas e como minimizar as rotas dos veículos aumentando a eficiência e, conseqüente sustentabilidade da gestão dos RSU.

Como sugestão para possíveis ações que complementem e deem continuidade a este trabalho de tese consiste em aplicar o modelo em outros centros urbanos da região, com o intuito de diagnosticar a gestão dos RSU, aplicando a análise de multicritério M-Macbeth e a otimização de rotas com o CPP. Outra ação seria ampliar a participação dos decisores, incluindo representantes envolvidos direta e indiretamente com a problemática estudada.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: 71 p. 2004.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896 - Aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: Tanques sépticos: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos: projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. Rio de Janeiro, 1993.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**, 2017. Disponível em http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2017/key_stats_2017.pdf. Acesso em: 27 dez 2017.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. 2016. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/lancamento-do-panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2016/>. Acesso em: 23 jan. 2017.

ADEDIPE, N. O.; SRIDHAR, M. K. C.; BAKER, J.; M. V. **Waste management, processing, and detoxification**. In: CHOPRA, K. et al. (Ed.) Millennium Ecosystems Assessment. Ecosystems and Human Well-Being: Policy Responses: findings of the Responses Working Group. Washington, DC: Island Press, 2005. v.3, p.313-34.

AGENDA 21. **Conferência da Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUD)**. São Paulo, SP, 1997.

AGHAJANI MIR, M. ; TAHEREI GHAZVINEI, P. ; SULAIMAN, N. M. N.; BASRI, N. E. A. ; SAHERI, S. ; MAHMOOD, N. Z. ; JAHAN, A. ; BEGUM, R. A.; AGHAMOHAMMADI, N.. Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model. **Journal of environmental management**. v.166, p.109-15. 2016.

AK, H.; BRAIDA, W.. Sustainable municipal solid waste management decision making. **Management of Environmental Quality**. v. 26, n. 6, p. 909-928. 2015

ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério**. São Paulo: Atlas S.A, 2013.

ALMEIDA A. T.; MORAIS, D. C.; COSTA, A. P. C. S.; ALENCAR, L. H.; DAHER, S. F. D., **Decisão em grupo e negociação: métodos e aplicações**, São Paulo: Atlas, 2012.

ALMEIDA, L. H., PINHEIRO, P. R.; ALBUQUERQUE, A. B. **Applying Multi-Criteria Decision Analysis to Global Software Development with Scrum Project Planning**. Lecture Notes in Computer Science. v. 6954, p. 311-320. 2011.

ANP – Agência Nacional do Petróleo. **Sistema de Levantamento de Preços**. 2018. Disponível em http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Municipio_Posto.asp. Acesso em: 30 de maio 2018.

ARANGO GONZÁLEZ, D. S.; OLIVARES-BENITEZ, E.; MIRANDA, P. A.. Insular Biobjective Routing with Environmental Considerations for a Solid Waste Collection System in Southern Chile. **Advances in Operations Research**. v. 2017. 2017.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

ARROYO, PAZ; MOLINOS-SENANTE, M.. Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach. (Report). **The Science of the Total Environment**. v. 625, n. 1, p. 819. 2018.

ASSAD, A. A. Modelling and Implementation Issues in Vehicle Routing. In: **Vehicle Routing: Methods and Studies**, editado por: Golden, B.L; Assad, A. A. v. 16, p. 127-148, second impression. 1991.

ASSAD, A. A.; GOLDEN, B. L. **Arc routing methods and applications**. Handbooks in Operations Research and Management Science. v. 8, p. 375 – 483. 1995.

BALLOU R. H. **Logística Empresarial**: transportes, administração de materiais e distribuição física. Tradução de Hugo T. Y. Yoshizaki. São Paulo: Atlas, 388 p., 2009.

BANA CONSULTING LTDA. **M-MACBETH Versão 2.5.0 (beta): Manual do usuário**. Disponível em: http://www.m-macbeth.com/help/pdf/MMACBETH%203.0.0%20Manual%20do%20usu%C3%A1rio_BETA.pdf. Acesso em: 20 de fevereiro de 2018.

BANA CONSULTING LTDA. **M-MACBETH: a multiple criteria decision support system**. [Online] 2007. [Citado em: 04 de janeiro de 2010.] Disponível em: <http://www.m-macbeth.com>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2018.

BANA E COSTA C. A.; CHAGAS, M. P. A career choice problem: an example of how to use macbeth to build a quantitative value model based on qualitative value judgments. In: **European Journal of Operational Research**. v. 153, n. 2, p. 323-331. 2004.

BANA E COSTA, C. A. **Processo de Apoio à Decisão**: Problemática, Actores e Acções. Santa Catarina, (a). p. 24. 1993.

BANA E COSTA, C. A. **Três Convicções Fundamentais no Processo de Apoio à Decisão**. Santa Catarina, (b). p. 4. 1993.

BANA E COSTA, C. A.; CHAGAS, M. P. A career choice problem: na example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgments. **Eur J Oper Res** 153:323-331. 10.1016/S0377-2217(03)00155-3. 2004.

BANA E COSTA, C. A.; CORTE, J. M. de; VANSNICK, J. C. MACBETH. **Int J Inf Tech Decis** 11:359-387. 10.1142/S0219622012400068. 2012.

BANA E COSTA, C. A.; CORTE, J. M. de; VANSNICK, J. C. MACBETH. **Working Paper LSEOR** 03.56, London School of Economics, London. 2003.

BANA E COSTA, C. A.; CORTE J. M. de; VANSNICK, J. C. **M-MACBETH Versão 1.1, Guia do Utilizador/Manual do Usuário**. (julho/2005) Disponível em <<http://www.M-MACBETH.com>>. Acesso em 19.10.2014.

BANA E COSTA, C. A., STEWART, T. J., VASNICK, J-C. **Multicriteria Decision Analysis: Some Thoughts based on the Tutorial and Discussion Sessions of the ESIGMA Meetings**. In: 14 th European Conference on Operational Research, Jesualem, July, 1995.

BANA E COSTA, C. A.; ÂNGULO MEZA, L.; OLIVEIRA, M. D. O Método MACBETH e Aplicação no Brasil. **ENGEVISTA**, v.15, n. 1, p. 3-27. 2013.

BANA E COSTA, C. A.; CORTE, J. M. de; VANSNICK, J. C. Multicriteria decision analysis: some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the ESIGMA meetings. In: **EUROPEAN CONFERENCE ON OPERATIONAL RESEARCH, 14.**, 1995, Jerusalém. Proceedings. Jerusalém: Hebrew University of Jerusalem, p. 261-272. 1995.

BANA E COSTA, C. A.; CORTE, J. M. de; VANSNICK, J. C. On the mathematical foundations of MACBETH. In: FIGUEIRA J, GRECO S, and EHRGOTT M, eds. **Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys**. New York: Springer, p. 409-437. 2005.

BANA E COSTA, C. A.; FERNANDES, T. G.; CORREIA, P. V. D. Prioritisation of public investments in social infrastructures using multicriteria value analysis and decision conferencing: a case study. **International Transactions in Operational Research**, v. 13, n. 4, p. 279–297. 2006.

BANA E COSTA, C. A.; LOURENÇO, J. C.; SOARES, J. O. An interval weighting assignment model for credit analysis. **Journal of Financial Decision Making**, v. 3, n. 2, p. 1–9. 2007.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. **Elementos de resíduos sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura, p. 424. 2012.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. On the mathematical foundation of MACBETH. [A. do livro] J. FIGUEIRA, S. GRECO e M. EHRGOTT. **Multiple criteria decision analysis**. N. York: Springer, 2005.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C.. Thoughts on a theoretical framework for measuring attractiveness by categorical based evaluation technique (MACBETH). In: CLÍMACO, J. (Ed.) **Multicriteria Analysis**, Berlin: Springer-Verlag, 1997.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C.. Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: MACBETH. In: **Investigação Operacional**. v. 15, p. 15-35. 1995.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. Thoughts on a theoretical framework for measuring attractiveness by categorical based evaluation technique (MACBETH). In: **Multicriteria Analysis** [edited by Clímaco, J.], Springer-Verlag. 1997.

BANA E COSTA, C. A.; BEHIND J. MACBETH. **Nato Advanced Research on Risk, Uncertainty and Decision Analysis for Environmental Security and Nonchemical Stressors**. Lisboa, Portugal, 2007.

BANGUERA, L ; SEPÚLVEDA, J. M. ; FUERTES, G ; CARRASCO, R. ; VARGAS, M. Reverse and inverse logistic models for solid waste management. **South African Journal of Industrial Engineering**, v. 28, n. 4, p.120-132. 2017.

BEHZADIAN, M.; KAZEMZADEH, R. B.; ALBADVI, A.; AGHDASI, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**. Iran, v. 200, p. 198-215, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect-com.ez16.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0377221709000071>>. Acesso em: 22 dez. 2017.

BELIËN, J.; BOECK, L.; ACKERE, J. Municipal Solid Waste Collection and Management Problems: A Literature Review. **Transportation Science**. v. 48, n. 1, p.78-102. 2012.

BOAVENTURA NETTO, P. O. **Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos**. 4^a ed. São Paulo: Ed. Blucher, 2006.

BODIN, L. B. **Twenty years of routing and scheduling**. Operations Research, v. 38, n. 4, p.571-579. 1990.

BODIN, L. D. A taxonomic structure for vehicle routing and scheduling problems. **Computers & Urban Society**. v.1, n. 1, p.11-29. 1975.

BODIN, L. D.; GOLDEN. B.; ASSAD, A.; BALL, M. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. **Computers and Operations Research**. v. 10, n. 2, p. 63-211. 1983.

BOTTERO, M.; OPPIO, A.; HIFI, M. Multicriteria Evaluation of Urban Regeneration Processes: An Application of PROMETHEE Method in Northern Italy. **Advances in Operations Research**. v. 2018. 2018.

BRANS, J. P.; VINCKE, P. H.; MARESCHAL, B. How to Select and How to Rank Projects: The Promethée Methods. **European Journal of Operational Research**. v. 24, p. 228-238. 1986.

BRASIL. **Lei Nº. 12.305:** Estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 10 de março de 2016. (a).

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007:** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Disponível em: <Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm >. Acesso em: 10 de março de 2016.

BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010:** Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em: <Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm >. Acesso em: 10 mar. 2016. (b)

BRASIL. Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010: Regulamenta a Lei no 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. Brasília: **Diário Oficial da União**. (c)

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010: Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília: **Diário Oficial da União**. (d)

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução Nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, nov. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, mar. 2005. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005 do Conselho nacional de Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, mai. 2011. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. 40 ed. São Paulo: Saraiva, 2007.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2015**. – Brasília: MCIDADES. SNSA, 2017.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2012**. Brasília: Ministério das Cidades / SNSA, 2014.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2014**. Brasília: Ministério das Cidades / SNSA, 2016.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos 2016**. Brasília: Ministério das Cidades / SNSA, 2018.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Ação Atenção aos Pacientes Portadores de Coagulopatias / Tribunal de Contas da União; Ministro Relator: José Jorge de Vasconcelos Lima**. – Brasília: TCU, Secretaria de Fiscalização e Avaliação de Programas de Governo, 2011. 83 p. – (Relatório de auditoria operacional).

BRASILEIRO, A. L.; LACERDA, G. M. Análise do uso de SIG no sistema de coleta de resíduos sólidos domiciliares em cidades de pequeno porte. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 6, 2002, Vitória. **Anais**. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/cndsiet.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2009.

BRÄYSY, O.; DULLAERT, W.; NAKARI, P. The potential of optimization in communal routing problems: case studies from Finland. **Journal of transport geography**. v. 17, n. 6, p.484-490. 2009.

CAIXETA-FILHO, J. V. **Pesquisa operacional: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2004.

CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 2. ed., São Paulo, Humanitas Editora/FFLCH/USP, 1998.

CAMPOS, M. B. A. **Métodos multicritérios que envolvem a tomada de decisão**. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Matemática)-Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2011. Disponível em: <http://www.mat.ufmg.br/~espec/Monografias_Noturna/Monografia_MariaBetania.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2016.

CAPRI, M. A. **Otimização no Serviço do Estacionamento Regulamentado utilizando Técnicas da Pesquisa Operacional**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR, Curitiba, PR, 2005.

CASTILHOS Jr., A. D.; FERNANDES, F.; FERREIRA, J.; JUCÁ, J.; LANGE, L. C., GOMES, L. P.; ZANTA, V. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Coord.: Armando Castilhos Júnior. Projeto Prosab, 4. Rio de Janeiro: Abes. 2006.

CASTRO, F. B. P. de; SOUZA, A. V. de. **Política Nacional de Resíduos Sólidos é um marco abrangente.** Disponível em <http://www.conjur.com.br/2010-ago-19/politica-nacional-residuos-solidos-marco-regulatorio-abrangente>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

CEARÁ (Estado). Secretaria das Cidades. **Diagnóstico da situação de coleta e destino final nos municípios do Estado do Ceará.** 2006.

CEMPRE. Review 2013. **Panorama de Reciclagem.** Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/artigos>>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares – 2009 - 2010.** São Paulo: Cetesb, 2015. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes.asp>>. Acesso em: 12 de maio de 2018.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares 2011.** São Paulo: CETESB, 2012.

CHANG, N. B.; PIRES, A. **Sustainable solid waste management: a systems engineering approach.** New Jersey: IEEE Wiley, 2015.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research.** v. 2, n. 6, p. 429-444. 1978.

CHIFARI, R.; RENNER, A.; LO PIANO, S.; RIPA, M. ; BUKKENS, S. G. F. ; GIAMPIETRO, M. Development of a municipal solid waste management decision support tool for Naples, Italy. **Journal of Cleaner Production.** v. 161, p. 1032-1043. 2017

CHRISTOFIDES, N.; BENAVENT, E.; CAMPOS, V.; CORBERÁN, A; MOTA, E. **An Optimal method for the Mixed Postman Problem.** In: Thoft-Christensen P, editor. System Modeling and Optimization, Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol. 59. Berlin: Springer. 1984.

CHRISTOFIDES N. **Graph Theory – An Algorithmic Approach.** Academic Press, London, 1975.

CHRISTOFIDES, N. **Vehicle routing,** in: LAWLER E.L., LENSTRA J.K., A.H.G. Rinnooy Kan and D.B. Shmoys, (eds.), The Traveling Salesman Problem. A Guided Tour of Combinatorial Optimization, Wiley, Chichester. p. 431-448. 1985a.

CHRISTOFIDES, N. **Vehicle scheduling and routing,** Presented at the 12th International Symposium on Mathematical Programming, Cambridge, MA. 1985b.

CLIVILLÉ, V.; BERRAH, L.; MAURIS, G. Quantitative expression and aggregation of performance measurements based on the MACBETH multi-criteria method. **International Journal of Production Economics.** v. 105, n.1, p. 171–189. 2007.

COLIN, E. C.; CIPPARRONE, F. G.; SHIMIZU, T. Otimização do Custo de Transporte na Distribuição-Armazenagem de Açúcar. **Rev. Produção**. v. 9, n.1, p. 23-30, Rio de Janeiro, 1999.

COSTA, D. M. B.; STEINER, M. T. A.; CARNIERI, C.; ZAMBONI, L. V. S; SILVA, A. C. L. da. Técnicas da Pesquisa Operacional na Otimização dos Serviços Postais, **Gestão & Produção**. v. 8, n. 1, p. 37-55. 2001.

COSTA, R. C. Áreas de risco: processos da natureza e produção da sociedade. **Revista Geonorte**, Edição Especial. v. 4, n. 4, p. 89 – 104. 2012.

CULLEN, M. Potential organic waste collection from commercial sources in Lismore: A case study. **Australian Journal of Environmental Management**. v. 4, n. 4, p. 239-250. 1997.

CUNHA, C. B. Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos de Roteirização de Veículos a Problemas Reais. **Transportes**. v.8, n.2, p.51-74. 2000.

CUNHA, C. B. **Uma Contribuição para o Problema de Roteirização de Veículos Com Restrições Operacionais**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo. 222 p. 1997.

CUNHA, V.; CAIXETA FILHO, J. V. Gerenciamento da coleta de resíduos sólidos urbanos: estruturação e aplicação de modelo não-linear de programação por metas. **Gest. Prod.** [online]. vol. 9, n. 2, p.143-161. 2002. ISSN 0104-530X. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2002000200004>.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (coord.) **Lixo municipal**: manual de gerenciamento integrado. 2 ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

DAS, S.; BHATTACHARYYA, B. K. Optimization of municipal solid waste collection and transportation routes. **Waste Management**. n. 43, p. 9-18, 2015.

DASKIN, M. S. **Network and Discrete Location**: Models, Algorithms, and Applications. Wiley Interscience, New York. 1995.

DEGENHART, L.; DA ROSA, F.; HEIN, N.; VOGT, M. Avaliação do grau de evidenciação dos impactos ambientais em relatórios de sustentabilidade e relatórios anuais de empresas brasileiras. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 6, n. 1, p.81-103. 2016

DEJAX, P., HAOUARI, M. **La résolution des problèmes complexes de tournées de véhicules**. In: Congrès International de Génie Industriel, 3., 1991, Tours Actes, 1991, p. 897-906. 1991.

DELUQUI, K. K. **Roteirização para veículos de coleta de resíduos sólidos domiciliares utilizando um sistema de informação geográfica – SIG**. Dissertação de Mestrado Engenharia Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 218 p. São Carlos. 1998.

DEMAJOROVIC, J. A evolução dos modelos de gestão dos resíduos sólidos e seus instrumentos. In: **Política ambiental e gestão dos recursos naturais**. São Paulo: Cadernos Fundap. 1996.

DEMAJOROVIC, J.; BESEN, G. R.; RATHSAM, A. A. **Os desafios da gestão compartilhada de resíduos sólidos face à lógica do mercado**. 2005. Disponível em: <<http://www.anpspas.or.br>>. Acesso em: 13 de março de 2018.

DEMIRBAS, A. **Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes**. Energy Conversion and Management, 2010.

DETOFENO, T. C.; STEINER, M. T. A. **Otimização das Rotas de Coleta de Resíduos Urbanos, utilizando Técnicas de Pesquisa Operacional**. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 20, 2009, Porto Seguro.

DROR, M.; STERN, H.; TRUDEAU, P. Postman tour on a graph with precedence relation on arcs. **Networks**. v.17, n. 3, p. 283–294. 1987.

DYER, J. S.; SARIN, R. K. Measurable multiattribute value functions. **Operations Research**, Baltimore. v. 27, n. 4, p. 810-822. 1979.

EDMONDS, J.; JOHNSON, E. L. Matching, Euler tours and the Chinese postman. **Mathematical Programming**. v. 5, p. 88 – 124. 1973.

EGLESE R. W.; MURDOCK H. Routing Road Sweepers in a Rural Area. **JORS**. v. 4, p. 281-288. 1991.

EISELT, H. A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. Arc Routing Problems, Part I: The Chinese Postman Problem. **Operations Research**. v. 43, n. 2, p. 231-242. <https://doi.org/10.1287/opre.43.2.231>. 1995b.

EISELT, H. A.; GENDREAU, M.; LAPORTE, G. Arc routing problems, part II: the rural postman problem. **Operations Research**. v. 43, n. 3, p. 399 – 414. 1995a.

EL MAGUIRI, A.; KISSI, B.; IDRISSE, L.; SOUABI, S. Landfill site selection using GIS, remote sensing and multicriteria decision analysis: case of the city of Mohammedia, Morocco. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v. 75, n. 3, p.1301-1309. 2016

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; LIMA, M. V. A. de. Constructing and Implementing a DSS to Help Evaluate Perceived Risk of Accounts Receivable. **Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems**. v. 487, p. 248-259. 2000a.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S. M. D. **Apoio a Decisão: Metodologias para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas**. Florianópolis (SC), Editora Insular. 2001.

ENSSLIN, L.; MONTIVELLER, G. N.; NORONHA, S. M. **Apoio à Decisão: Metodologias para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de Alternativas**. Florianópolis: Insular, 2001.

EPA - Environmental Protection Agency. **Climate Change and Waste. Reducing Waste Can Make a Difference.** 2002 Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/pubs/ghg/climfold.pdf>>. Acesso em: 3 de setembro de 2018.

ESTADO DO CEARÁ. **Lei Nº 13.103, de 24 de janeiro de 2001.** Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá providências correlatas, 2010.

ESTAY-OSSANDON, C.; MENA-NIETO, A.; HARSCH, N. Using a fuzzy TOPSIS-based scenario analysis to improve municipal solid waste planning and forecasting: A case study of Canary archipelago (1999–2030). **Journal of Cleaner Production.** v. 176, p.1198-1212. 2018.

EULER, L. **Solutio Problematis ad Geometrian Situs Pertinentis.** Commentarii academiae scientiarum petropolitanae. v. 8, p. 128-140. 1736.

FARREL, M. J. The measurement of productive efficiency. **J. Royal Statistical Society.** v. 120, Part III, p. 253-290. 1957.

FERRAZ, J. L. **Modelo para avaliação da gestão municipal integrada de resíduos sólidos urbanos.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

FIGUEIRA, J., GRECO, S.; EHRGOTT, M. **Multiple criteria decision analysis.** N. York : Springer, 2005.

FORD L. R., FULKERSON D. R., **Flows in Networks.** Princeton University Press, Princeton, NJ, 1962.

FORTE, S. H. A. C. **Manual de elaboração de tese, dissertação e monografia.** Fortaleza: Universidade de Fortaleza, 2006.

GAVAZZA, S.; KATO, M. Multi-criteria analysis for municipal solid waste management in a Brazilian metropolitan area. **Environmental Monitoring and Assessment.** v. 189, n. 11, p.1-14. 2017

GEPARK ARARIPE. **Geopark Araripe.** Disponível em: <http://geoparkararipe.org.br/?page_id=266>. Acessado em: 30 de setembro de 2016.

GEPARK ARARIPE. **Relatório de Recomendações.** Crato. Consórcio Ambiental/ IBI TUPI, p. 198. 2011.

GHIANI, G.; LAGANÀ, D.; LAPORTE, G.; MARI, F. Ant colony optimization for the arc routing problem with intermediate facilities under capacity and length restrictions. **Journal of Heuristics.** v.16, n. 2, p.211-233. 2010.

GHIANI G.; IMPROTA G. An Algorithm for the Hierarchical Chinese Postman Problem. **JORS.** v. 26, p. 27-32. 2000.

GHINEA, C.; DRĂGOI, E. N.; COMĂNIȚĂ, E.D.; GAVRILESCU, M.; CÂMPEAN, T.; CURTEANU, S.; GAVRILESCU, M. Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. **Journal of Environmental Management**. v. 182, p.80-93. 2016.

GHOSE, M. K.; DIKSHIT, A. K.; SHARMA, S. K. A GIS based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality. **Waste Management**. v. 26, n. 11, p. 1287-1293, 2006.

GIACON, J. C. R. **Seleção de fornecedores por análise de decisão multicritério e otimização combinatória considerando aspectos de logística e sustentabilidade**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas)-Escola Politécnica, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2012.

GIESTA, L. C. Educação ambiental e gestão ambiental no ativo Mossoró da unidade RN/CE da Petrobras. **Revista Eletrônica de Administração**. v. 19, n. 2, p. 453-484. 2013.

GOE, M. ; GAUSTAD, G. ; TOMASZEWSKI, B. System tradeoffs in siting a solar photovoltaic material recovery infrastructure. **Journal of Environmental Management**. v. 160, p.154-166. 2015

GOLDBARG M. C.; LUNA H. P. **Otimização combinatória e programação linear**. Rio de Janeiro, Elsevier: 2005.

GOLDBARG, M. C. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2ª Ed. – Rio de Janeiro, 2005.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2000.

GOLDBERG, D. E.; HOLLAND, J. H. Genetic algorithms and machine learning. **Machine learning**, Springer. v. 3, n.2, p. 95-99. 1988.

GOLDEN B. L.; MAGNANTI T. L.; NGUYEN H. Q. Implementing vehicle routing algorithms. **Networks**. v. 7, p. 113-148. 1977.

GOLDEN, B. L.; BALL, M.; BONDIN, L. Current and Future Research Directions in Network Optimization. **Computers & Operations research**. v. 8, n. 2, p. 71-81. 1981.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009. 344 p.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos: introdução aos métodos discretos do apoio multicritério à decisão**. São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2004.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 5. ed. São Paulo: Atlas S.A, 2014.

GOMES, L. F. A. M.; LIMA, M. M. P. P. TODIM: Basics and Application to Multicriteria Ranking of Projects with Environmental Impacts. **Foundations of Computing and Decision Sciences**. v. 16, n. 4. 1992.

GOPAL C, G. ; PATIL, Y. B. ; KT, S.; PRAKASH, A. Conceptual frameworks for the drivers and barriers of integrated sustainable solid waste management. **Management of Environmental Quality**. v. 29, n. 3, p.516-546. 2018

GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. Prefeitura Municipal do Crato. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano do Município do Crato**. Fortaleza/Crato: Consorcio VBA/espaco plano, 2000.

GREDMAIER, L.; RILEY, K.; VAZ, F.; HEAVEN, S. Seasonal yield and fuel consumed for domestic, organic collections in currently operational door-to-door and bring-type collection systems. **Waste and Biomass Valorization**. v. 4, n.3, p. 683-693. 2013.

GUGLIELMETTI, F.; MARINS, F.; SALOMON, V. Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Anais**. 23, 2005.

GUSMEROTTI, N.; CORSINI, F.; BORGHINI, A.; FREY, M. Assessing the role of preparation for reuse in waste-prevention strategies by analytical hierarchical process: suggestions for an optimal implementation in waste management supply chain. **Environment, Development and Sustainability**. p.1-20. 2018.

HALL, R. W.; PARTYKA, J. G. On the Road to Service. **ORMS Today**. v. 27, p. 26-30, 2000.

HAMZEH, M.; ALI ABBASPOUR, R.; DAVALOU, R. Raster-based outranking method: a new approach for municipal solid waste landfill (MSW) siting. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 22, n. 16, p.12511-12524. 2015

HIRAMATSU, A.; HARA, Y.; SEKIYAMA, M.; HONDA, R.; CHIEMCHASRI, C. Municipal solid waste flow and waste generation characteristics in an urban-rural fringe area in Thailand. **Waste Management & Research**. v. 27, n. 10, p. 951–960, 2009.

HOWARD, R. A. The foundations of decision analysis revisited. In: EDWARDS, W.; MILES, J.R.F., WINTERFELDT, D.V. (eds.). **Advances in Decision Analysis**. New York, NY: Cambridge University Press. p. 32–56. 2007.

HU, H.; LI, X.; NGUYEN, A.; KAVAN, P. A Critical Evaluation of Waste Incineration Plants in Wuhan (China) Based on Site Selection, Environmental Influence, Public Health and Public Participation. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 12, n. 7, p.7593-7614. 2015

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Código de Obras**. 2011. Disponível em: <<http://www.ibam.org.br/projeto/3>> Acesso em: 10 de maio de 2018.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **O cenário dos resíduos sólidos no Brasil**. 2004. Disponível em: <www.ibam.org.br/publico/media/Boletim1a.pdf>. Acesso em: 1 de março de 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2014/ 2016**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico, 2010**. Rio de Janeiro: IBGE. 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades@**. Disponível em: <[http://inovadoras: estudos e casos brasileiros](http://inovadoras.estudos.ecasosbrasil.com.br/)>. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2004.

IIZUKA, E. S.; PECANHA, R. S.. Análise da produção científica brasileira sobre sustentabilidade entre 2008 e 2011. **Revista de Gestão Ambiental e da Sustentabilidade**. v. 3, n. 1, p. 1-17. 2014

INGLEZAKIS, V.; MOUSTAKAS, K.; KHAMITOVA, G.; TOKMURZIN, D.; SARBASSOV, Y.; RAKHMATULINA, R.; SERIK, B.; ABIKAK, Y.; POULOPOULOS, S. Current municipal solid waste management in the cities of Astana and Almaty of Kazakhstan and evaluation of alternative management scenarios. **Clean Technologies and Environmental Policy**. v. 20, n. 3, p.503-516. 2018

IPT/SP – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT/CEMPRE. 1995. 278 p.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Pesquisa sobre pagamento por serviços ambientais urbanos para gestão de resíduos sólidos**. Relatório de pesquisa. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_arquivos/estudo_do_ipea_253.pdf> Acesso em: 23 dez. 2015.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Relatório de Pesquisa. Brasília: IPEA. p. 77, 2012.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Pesquisa sobre pagamento por serviços ambientais urbanos para gestão de resíduos sólidos**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2010.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em números 2011-2012**. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2011/completa/Ceara_em_Numeros_2011.pdf>. Acesso em: 17 out.2016.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Municipal**. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Crato_2017.pdf>. Acesso em: 22 jun.2018.

ISWA - Internacional Solid Waste Association. **WASTED HEALTH - the tragic case of dumpsites**. This report has been prepared as a part of ISWA's Scientific and Technical Committee Work-Program 2014-2015. 2017.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estud. av.** [online]. v. 25, n. 71, p. 135-158. 2011

JACQUET-LAGRÈZE, E.; SISKOS, J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. **European Journal of Operational Research**. v. 10, 1982.

JAILLET, P. The probabilistic vehicle routing problem. In: GOLDEN, B. L. e ASSAD, A. A. (edit.), **Vehicle routing: methods and studies**, Elsevier, Reino Unido, 1998.

JANNUZZI, P. M.; MIRANDA, W. L. de; SILVA, D. S. G. da. **Análise multicritério e tomada de decisão em políticas públicas**: aspectos metodológicos, aplicativo operacional e aplicações. *Informática Pública*, Belo Horizonte, ano 11, n. 1, p. 69-87, 2009.

JERONIMO, C. E. de M.; SANTIAGO Jr, A. F. Desafios da administração ambiental publica: estudo de caso do município de Espirito Santo/RN. **Revista de Administração de Roraima – RARR**. v. 2, n. 1, p.136-146. 2012.

JUCÁ, J. F. T. **Gestão de resíduos sólidos no Brasil e suas consequências na contaminação ambiental**. Disponível em: <http://www.fapesp.br/9722>. Acesso em 20 dez. 2015.

KEENEY, R. L. Decision analysis: An overview. **Operational Research**, v. 30, n. 5, p. 803-838, 1982.

KEENEY, R. L.; RAÏFFA, H. **Decision with multiple objectives**: preferences and value tradeoffs. New York: John Wiley, 1976.

KHAN, D.; SAMADDER, S. R. Allocation of solid waste collection bins and route optimisation using geographical information system: A case study of Dhanbad City, India. **Waste Management & Research**. v. 34, n. 7, p. 666-676. 2016.

KIM, B.; KIM, S.; SAHOO, S. Waste collection vehicle routing problem with time windows. **Computers & Operations Research**. v. 33, n. 12, p. 3624-3642. 2006.

KIM H. Y.;CHOI Y.; KIM H.; OH S. H. Planning for the suitable? Land use suitability and social and ecological factors for locating a new hazardous facility. **KSCE Journal of Civil Engineering**. v. 20, n. 1, p. 359-366. 2016.

KLUNDER, A.; ANSCHÜTZ, J.; SCHEINBERG, A. **Concept of ISWM**. Gouda: Waste, 2001.

KONOWALENKO, F.; BENEVIDES, P. F.; COSTA, D. M. B.; BARBOZA, A. O.; NUNES, L. F. Aplicação de um algoritmo genético para o problema do carteiro chinês em uma situação real de cobertura de arcos. *Revista Ingeniería Industrial*, 2012, Issue 1, p. 27-36.

KWAN, M. **Graphic Programming using odd or even points**. *Chinese Math*. v. 1, p. 273-277. 1962.

LAPORTE, G. **Recent Algorithmic Developments for the Travelling Salesman Problem and the Vehicle Routing Problem**. Montréal: Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, 1993. (Publication 932)

LAPORTE, G. The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**. v. 59, n. 3, p. 345-358. 1992.

LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. Y.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**. v. 7, n. 4/5, p. 285-300. 2000.

LI, J. Q.; BORENSTEIN, D.; MIRCHANDANI, P. B. Truck scheduling for solid waste collection in the City of Porto Alegre, Brazil. **Omega**. v. 36, n. 6, p.1133-1149. 2008

LIGARDA, L.; NACCHA, M. **La eficiencia de las organizaciones de salud a través del análisis envolvente de datos**. Microrredes de La Dirección de Salud IV Lima Este 2003. AnFacMed Lima. v. 67, n. 2. 2006.

LIMA, J. D., JUCÁ, J. F. T., REICHERT, G. A.; FIRMO, A. L. B. Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região sul do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 19, n. 1, p. 33-42. 2014.

LIRA, W. S.; CÂNDIDO G. A.. Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa. **SciELO – EDUEPB**, 01 January 2013.

LOMBARDI, P; FERRETTI, V. New spatial decision support systems for sustainable urban and regional development. **Smart and Sustainable Built Environment**. v.4, n. 1, p.45-66. 2015.

LONGARAY, A. A.; CAPRARIO, G. N.; ENSSLIN, L. **Análise de decisão multicritério: um caso empregando o MACBETH**. Sinergia, Rio Grande. v. 14, n. 2, p. 51-62. 2010. Disponível em: <<http://www.seer.furg.br/sinergia/article/view/2510>>. Acesso em: 26 set. 2016.

MAGALHÃES A. O. **Análise ambiental do alto curso da microbacia do Rio da Batateira no município do Crato/CE**: subsídios ao zoneamento ecológico-econômico. Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza. 2006.

MAHMOOD, S.; SHARIF, F.; RAHMAN, A. ; KHAN, A. U. Analysis and forecasting of municipal solid waste in Nankana City using geo-spatial techniques. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 190, n. 5, p.1-14. 2018.

MARQUES, G.; GOURC, D.; LAURAS, M. Multi-criteria performance analysis for decision making in project management. **International Journal of Project Management**. v. 29, n. 8, p. 1057-1069. 2011.

MEIRELLES, C. L. A.; GOMES, L. F. A. M. O apoio multicritério à decisão como instrumento de gestão do conhecimento: uma aplicação à indústria de refino de petróleo. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro. v. 29, n. 2, p. 451-470. 2009. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010174382009000200011&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 29 set. 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Versão pós audiências e consulta pública para conselhos nacionais**. Brasília. 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Guia para Elaboração dos Planos de Gestão de Resíduos Sólidos**. MMA, Brasília, 2011.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Resíduos Sólidos**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos> Acesso. 23 jan de 2017.

MIPUN, B. ; HAZARIKA, R. ; MONDAL, M. ; MUKHOPADHYAY, S.. Solid Waste Management in Greater Shillong Planning Area (GSPA) Using Spatial Multi-Criteria Decision Analysis for Site Suitability Assessment. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL, n. 7, p.657-662. 2015

MIRZAZADEH, F.; HADINEJAD, F. Investigating utility level of waste disposal methods using multicriteria decision-making techniques (case study: Mazandaran-Iran). **The Journal of Material Cycles and Waste Management**. v. 20, n. 1, p.505-515. 2018.

MONTEIRO, J. H. P. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MONTIGNAC, F.; NOIROT, I.; CHAUDOURNE, S. Multi-criteria evaluation of on-board hydrogen storage technologies using the MACBETH approach. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 34, n. 10, p. 4561–4568. 2009.

MORAES, L. N. **Proposta de Ferramenta de Análise Multicritério de Apoio à Gestão Municipal da Mobilidade Urbana** [Distrito Federal]. xiv, 143 p., 2010 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2017) Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 2017.

MOTLAGH, Z. K.; SAYADI, M. H. Siting MSW landfills using MCE methodology in GIS environment (Case study: Birjand plain, Iran). **Waste management** (New York, N.Y.). v. 46, p.322-37. 2015.

NASCIMENTO, D. C. do. **Região Metropolitana do Cariri-CE: um cenário de incertezas quanto à gestão, planejamento e finalidades**. XI Encontro Nacional da ANPEG- A diversidade da geografia brasileira: escalas e dimensões da análise e da ação. XI ANPEG, 2015.

NASCIMENTO, V.; SOBRAL, A.; ANDRADE, P. de. Evolução e desafios no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil/Development and challenges in Brazilian municipal solid waste management. **Revista Ambiente & Agua**. v. 10, n. 4, p.889. 2015.

NEGREIROS GOMES, M. J.; COELHO Jr. W.; CASTRO PALHANO, A. W. de; FERREIRA COUTINHO, E.; ALVES DE CASTRO, G.; NEGREIROS GOMES, F.J.; CUTINI BARCELLOS, G.; FERNANDES REZENDE, B.; LESSA PEREIRA, L. W. O problema do

carteiro chinês, algoritmos exatos e um ambiente MVI para análise de suas instâncias: sistema XNÊS. **Pesquisa Operacional**. v. 29, n. 2, p. 323-363. 2009.

NETTO, P. O. B. **Grafos: teoria, modelos, algoritmos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2001.

NOGUEIRA, C. W. **O enfoque da logística humanitária na localização de uma central de inteligência e suporte para situações emergenciais e no desenvolvimento de uma rede dinâmica**. 2010. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=185869>. Acesso em: 11 nov. 2011.

NOURI, D.; SABOUR, M.; GHANBARZADEHLAK, M. Industrial solid waste management through the application of multi-criteria decision-making analysis: a case study of Shamsabad industrial complexes. **The Journal of Material Cycles and Waste Management**. v. 20, n. 1, p.43-58. 2018.

NOVAES, A. G. N.; GRACIOLLI, O. D. Designing multi-vehicle delivery tours in a grid-cell format. **European Journal of Operational Research**. v. 119, p. 613-634. 1999.

NOVAES, A. G. **Sistemas logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos**. São Paulo: Edgard Blücher. 372 p. 1989.

OLIVEIRA, C. T.; RODRIGUES, C. M. T. Sistema de coleta de resíduos orgânicos em nível comunitário em um país em desenvolvimento: estudo de caso em Florianópolis, Brasil. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade - RMS**, São Paulo. v. 7, n. 2, p. 152-169, Maio/Ago., 2017.

ORE, O. **Graphs and their Uses**. 2 ed.. Washington: The Mathematical Association of America, 1990.

PAES, G. F. **Otimização de rotas para coleta do resíduo doméstico: um tratamento GRASP do problema do carteiro chinês misto (PCCM)**. 2004. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Engenharia) – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), Campos dos Goytacazes, 2004.

PAREKH, H.; YADAV, K.; YADAV, S.; SHAH, N. Identification and assigning weight of indicator influencing performance of municipal solid waste management using AHP. **KSCE Journal of Civil Engineering**. v. 19, n. 1, p.36-45. 2015.

PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri: Manole, 2005. 842p. (Coleção Ambiental, 2).

PHILLIPS, L. D. ; BANA E COSTA, C. A. Transparent prioritisation, budgeting and resource allocation with multi-criteria decision analysis and decision conferencing. **Annals of Operations Research**. v. 154, p. 51-68. 2007.

PILLAC, V.; GUÉRET, C.; MEDAGLIA, A. L. An event-driven optimization framework for dynamic vehicle routing. **Decision Support Systems**. n. 54, p. 414-423, 2012.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **PIB per capita para o Brasil e regiões geográficas**. 2016.

PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013**. Acesso ao endereço eletrônico <http://www.atlasbrasil.org.br/2013/>. 2013.

QURESHI, A. G.; TANIGUCHI, E.; YAMADA, T. An exact solution approach for vehicle routing and scheduling problems with soft time windows. **Transportation Research Part E**. v. 45, n. 6, p. 960-977. 2009.

RAFF, S. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. **Computers and Operations Research**. v. 10, n. 2, p.63,69,117,149,195-67,115,147,193,211. 1983.

RAHMAN, M. M.; SULTANA, K. R.; HOQUE, M. A. Suitable sites for urban solid waste disposal using GIS approach in Khulna city, Bangladesh. **Proceedings of Pakistan Academy of Sciences**, v. 45, n. 1, p.11 e 22. 2018.

RAMOS, T. R. P.; GOMES, M. I.; BARBOSA-PÓVOA, A. P. Planning waste cooking oil collection systems. **Waste Management**, v. 33, n. 8, p. 1691-1703, 2013.

RATHI, S. Alternative approaches for better municipal solid waste management in Mumbai, India. **Waste Management**. v. 26, n. 10, p. 1192–1200. 2006.

RENNINGS, K. Redefining innovation—eco-innovation research and the contribution from ecological economics. **Ecological economics**. v. 32, n. 2, p. 319-332. 2000.

RIBEIRO, G. M.; CAMPOS, V. B. G. Um Procedimento para Roteirização e Programação de Veículos Usando a Heurística de Ganhos para o Planejamento. In: SBPO, XXXIII, 2001, Campos do Jordão. **Routing Systems Informática Ltda – Manual do RoadShow Módulos I e II**, 2001 .

RIBEIRO, S. C. **Susceptibilidade aos Processos Erosivos Superficiais com Base na Dinâmica Geomorfológica na Microbacia do Rio Grangeiro, Crato/CE**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: UFRJ/PPGG. 2004.

RODRIGUES, F.; CANIVATO, V. **Lixo: de onde vem para onde vai?**. 2.ed. São Paulo: Moderna, 2003.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. **An examination of reverse logistics practices**. **Journal of Business Logistics**. University of South Florida, Tampa: College of Business Administration. v. 22, n. 2, p. 129-148. 2001.

RONEN, D. Perspectives on practical aspects of truck routing and scheduling. **European Journal of Operational Research**. v. 35, p. 137-145. 1988.

ROVIRIEGO, L. F. V. **Proposta de uma metodologia para a avaliação de sistemas de coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares**. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 191 p. São Carlos. 2005.

ROY, B. **Classement et choix en presence de points de vue multiples (la methode ELECTRE)**. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 1968.

ROY, B. Decision-aid and decision-making. **European Journal of Operational Research**, v. 45, n. 2-3, p. 324-331, 1990. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90196-I](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90196-I).

ROY, B. ELECTRE III: Un algorithme de methode de classements fonde sur une representatio floue des preferences em presence de criteres multiples. **Cahieres de CERO**, 1978.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding**. Kluwer Academic Publischer, 1996.

ROY, B.; SKALKA, J. M. **ELECTRE IS: Aspects methologiques et guide d'utilisation**. Document du LAMSADE, n. 30, 1984.

ROY, B.; VANDERPOOTEN, D. The European School of MCDA: Emergence, Basic Features and Current Works. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 5, p. 22-38, 1996.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarquic Process**. Pittsburg: RWS Publications, 1980.

SAINT-MLEUX, Y., MONTPETIT, G.; LANGEVIN, A. **Optimisation de la livraison à l'aide d'un système d'informations géographiques**. Paper presented at the Congrès international de génie industriel de Montréal, Montréal, Canada. p. 1405-1414. 1995.

SALLEH, A.; AHAMAD, M.; YUSOFF, M. Applying an integrated route optimization method as a solution to the problem of waste collection. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v. XLII-4/W1, p.103-110. 2018.

SALLES, R. S. **Estudo de roteirização de veículos com apoio de um sistema de informações geográficas: uma contribuição para o transporte urbano de empregados por uma frota de ônibus fretada**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo. 159 f.: il. 2013.

SANJEEVI, V.; SHAHABUDEEN, P. Optimal routing for efficient municipal solid waste transportation by using ArcGIS application in Chennai, India. **Waste Management & Research**. v. 34, n.1, p. 11-21, 2016.

SANTOS, C. G. **Uma proposta de modelagem matemática para um problema de roteirização periódica em arcos capacitados com múltiplas tarefas**. 99 f. Tese (Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, 2016.

SBIHI, A.; EGGLESE, R. Combinatorial optimization and Green Logistics. **4OR**, v. 5, n. 2, p. 99-116. 2007.

SBIHI, A.; EGGLESE, R. Combinatorial optimization and Green Logistics. **Annals of Operations Research**. v. 175, n. 1, p. 159-175. 2010.

SCHEIN, E. H. **Process consultation revisited: building the helping relationship**. Reading, MA: Addison-Wesley. 1999.

SHERAFAT, H. **Algoritmos Heurísticos de Cobertura de Arcos**. Tese de doutorado, UFSC, PPGEP, Florianópolis, SC, 2004.

SHIMIZU, T. **Decisões nas organizações**. 2. ed.. São Paulo: Atlas, 2006.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4.ed. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: <https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2015.

SILVA, N. F. C. Fuzzy Visa: um modelo de lógica fuzzy para a avaliação de risco da Vigilância Sanitária para inspeção de resíduos de serviços de saúde. *Physis*. v. 27, n. 1, p.127-146. 2017.

SIMON, H. A. **The New Science of Management Decision**. Prentice Hall College Div; Soares de Mello, J.C.C.B.; Lins, M.P.E.; Soares de Mello, M.H.C.S.; Gomes, E.G. Evaluating the performance of calculus using operational research tools. *European Journal of Engineering Education*. v. 27, n. 2, 209-218. 2003.

SIMON, H. A. **The new science of management decision**. Englewoods Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1977.

SISTEMA FIRJAN. **Manual de gerenciamento de resíduos: guia de procedimento passo a passo**. Rio de Janeiro: GMA, 2006.

SKINDER, S. Identification of suitable landfill site based on GIS in Leh, Ladakh Region. *Geojournal*, p.1-15, 2018.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; GOMES, E. G., LETA, F. R.; PESSOLANI, R. B. V. Conceitos básicos do apoio multicritério à decisão e sua aplicação no projeto Aerodesign. Artigo publicado na **ENGEVISTA**. v. 5, n. 8, p. 22-35. 2003. Disponível em <<http://www.uff.br/decisao/ENGEVISTA.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2007.

SOUZA, A. T. P.; NASSI, C. D. Uma contribuição à solução do problema de roteamento com múltiplos objetivos. **Revista Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Pesquisa**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1. 1995.

STERN H. I.; DROR M., **Routing Electric Meter Readers**, *Computers & Operations Research*, v. 6, p. 209-223, 1978.

SUMMERFIELD, N. S. ; DROR, M.; COHEN, M. A. City streets parking enforcement inspection decisions: The Chinese postman's perspective. **European Journal of Operational Research**, v. 242, n. 1, p.149-160. 2015.

TAKENAKA, E. M. M. **Políticas públicas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos no município de Presidente Prudente-SP**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008, 232p. Disponível em:< http://www4.fct.unesp.br/pos/geo/dis_teses/08/edilenetakenaka.pdf. Acesso em: 20 jun. 2017.

TASCA; ENSSLIN, L. ENSSLIN, S. An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs. **Journal of European Industrial Training**, v. 34, p. 631-655, 2010. <http://dx.doi.org/10.1108/03090591011070761>

TEIXEIRA, J.; ANTUNES, A. P.; SOUSA, J. P. Recyclable waste collection planning - a case study. **European Journal of Operational Research**. v. 158, n. 3, p. 543-554. 2004.

TINOCO, J. E. P.; KRAEMER, M. E. P. **Contabilidade e gestão ambiental**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2011.

TORRES, C. J. F. **Desenvolvimento metodológico para apoio à tomada de decisão sobre o programa de efetivação do enquadramento dos corpos d'água**.176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2014.

TURBAN, E; ARONSON, J. E. **Decision Support Systems and Intelligent Systems**. 5th Ed., Prentice Hall, 1998.

TZENG, G. H.; HUANG, J. J. **Multiple attribute decision making: methods and applications**. New York: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2011.

US EPA - United States Environmental Protection Agency. **Solid waste management: a local challenge with global impacts**. p. 1-22. Washington. 2002.

VASCONCELOS, R. B. **O Problema do Carteiro Chinês dirigido, não dirigido e misto para otimização de rotas com visualização gráfica da solução** [recurso eletrônico]. Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação, Fortaleza, 2017, p. 102.

VILHENA, A. **Guia da coleta seletiva de lixo**. São Paulo: CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2013.

VUČIJAK, B.; KURTAGIĆ, S. M.; SILAJDŽIĆ, I. Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina. **Journal of Cleaner Production**. v. 130, p.166-174. 2016.

XI, X.; POH, K. L. A Novel Integrated Decision Support Tool for Sustainable Water Resources Management in Singapore: Synergies Between System Dynamics and Analytic Hierarchy Process. (Report). **Water Resources Management**. v. 29, n. 4, p.1329. 2015.

WEBER, C. **Questões relevantes da política nacional de resíduos sólidos para os municípios**. 2013. Disponível em: <<http://www.slideshare.net/CarolineWeber1/municipios-plano-de-gerenciamento-de-residuossolidos>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

WILSON, C. D. H.; WILLIAMS, I. D. Kerbside collection: A case study from the north-west of England. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 2, n. 2, p. 381-394, 2007.

WITUCKI, M.; DEJAX, P.; TOUATI, N. **Le problème des tournées de véhicules dans une entreprise de transport et distribution: un exemple de modélisation**. In: CONGRÈS INTERNATIONAL DE GÉNIE INDUSTRIEL. Actes, v. 1994, p.1885-1894. Montréal, 1994

YU, H. An Improved Multi-Objective Programming with Augmented ε -Constraint Method for Hazardous Waste Location-Routing Problems. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 13, n. 6, p.548. 2016.