

**Desenho e Planeamento do Sistema Logístico associado  
a um Sistema Inovador de Recuperação de Vidro de  
Embalagem**

**Frederico Castro de Sá Madaíl da Silva**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia e Gestão Industrial**

Orientadoras: Prof. Ana Isabel Cerqueira de Sousa Gouveia Carvalho  
Prof. Tânia Rodrigues Pereira Ramos

**Júri**

Presidente: Prof. Ana Paula Ferreira Dias Barbosa Póvoa  
Orientador: Prof. Tânia Rodrigues Pereira Ramos  
Vogal: Prof. Bruna Alexandra Elias Mota

**Janeiro 2021**

**Declaration**

I declare that this document is an original work of my own authorship and that it fulfils all requirements of the Code of Conduct and Good Practices of the Universidade de Lisboa.

**Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

## Resumo

Os resíduos urbanos são uma problemática bastante complexa e relevante nos últimos anos devido aos impactos nocivos que podem causar no meio ambiente e na saúde humana. A imposição de metas ambiciosas por parte da União Europeia no que toca à reciclagem fez com que vários países, incluindo Portugal, procurassem alternativas à recuperação destes resíduos. Deste modo, a Sociedade Ponto Verde lançou uma iniciativa no qual irá recorrer ao investimento de um número seletivo de projetos inovadores no âmbito do desenvolvimento de uma economia circular.

O presente trabalho está inserido nesta iniciativa, sendo que o objetivo passa pelo resgate de vidro das operações de aterro através da realização do planeamento logístico associado a um sistema com máquinas capazes de recuperar esse material do lixo indiferenciado. Aqui será explorado um sistema logístico misto, caracterizado por unidades de recuperação de vidro móveis e fixas, com vista a alavancar a sua viabilidade financeira.

Para tal, foram desenvolvidos dois modelos: o primeiro trata-se de um modelo estocástico de localização e dimensionamento que considera a alteração da composição do produto a processar em termos de presença de vidro ao longo do horizonte temporal, no qual são determinadas as decisões de investimento no sistema; o segundo é um modelo de roteamento que utiliza os *outputs* do primeiro modelo para efetuar o sequenciamento das visitas das unidades móveis e determinar os custos associados a estas deslocações. Os resultados do modelo desenvolvido em GAMS concluíram que uma abordagem fixa será a mais benéfica considerando todos os cenários envolvidos.

**Palavras-chave:** Gestão de Resíduos, Desenho da Rede de Distribuição, Roteamento, Localização de Infraestruturas, Incerteza na Procura

## Abstract

Urban waste is a very complex and relevant problem in recent years due to the harmful impacts it can cause on the environment and human health. The imposition of ambitious recycling targets by the European Union has led several countries, including Portugal, to seek alternatives to the recovery of this waste. Therefore, Sociedade Ponto Verde has launched an initiative in which it will resort to the investment of a selective number of innovative projects in the development of a circular economy.

The present work is part of this initiative, and the objective is to rescue glass from landfill operations by carrying out a logistical planning associated with a system with machines capable of recovering this material from municipal solid waste. A mixed logistic system will be explored, characterized by mobile and fixed glass recovery units, leveraging its financial viability.

Two models have been developed for this purpose: the first is a stochastic model of location and sizing that considers the change in the composition of the product to be processed in terms of the presence of glass along the time horizon, in which investment decisions in the system are determined; the second is a routing model that uses the outputs of the first model to sequence the visits of the mobile units and determine the costs associated with these travels. The results of the model developed in GAMS concluded that a fixed approach will be the most beneficial considering all the scenarios involved.

**Keywords:** Waste Management, Network Design, Routing Problems, Location Problems, Demand Uncertainty

## Agradecimentos

Após o fecho desta etapa bastante desafiante, não poderia deixar de expressar a minha gratidão a todos aqueles que me ajudaram a atingir este marco na minha vida.

Às minhas orientadoras, a Professora Tânia Ramos e a Professora Ana Carvalho, por toda a disponibilidade e ajuda que me deram ao longo deste período. Foi um prazer poder aprender com as professoras não só durante a realização deste trabalho, como também nas cadeiras que me lecionaram.

A todos os envolvidos no Projeto Mobile-Pro-U, mais particularmente à Professora Teresa Carvalho, Professora Ana Póvoa, Professor Luís Reis e ao colega Manuel Sardinha, por toda a informação e sugestões dadas que certamente ajudaram bastante ao desenvolvimento desta dissertação.

À Carolina Morais por toda a disponibilidade, ajuda, e acima de tudo paciência para me guiar nos momentos em que me sentia mais desmotivado.

Ao Fábio, ao Paulo e ao Jota, que foram aqueles com quem estabeleci uma relação de amizade desde o primeiro ano de universidade, e também ao Miguel, ao João e ao Mário, com os quais partilhei grande parte do meu tempo durante estes 5 anos. Tenho a certeza de que por muito distantes que tenhamos estado durante este ano complicado como o que se verificou devido à pandemia, haverá sempre um sentimento de amizade e companheirismo entre nós. Também gostava de agradecer ao Pedro, que embora só tenha tido a oportunidade de conhecer melhor numa fase mais adiantada do curso, foi uma pessoa que me ajudou bastante durante este ano e com o qual tive a oportunidade de partilhar a minha experiência de Erasmus e nutrir uma grande amizade que certamente durará.

Aos meus amigos de longa data, nomeadamente o Lamas, Bartolomeu, Tomás, Regêncio, Adolfo, Lemos e Rosas, por terem estado presentes durante todos estes anos e ajudarem-me sempre que precisei.

À Angelica pelo apoio incondicional e força que me transmitiu durante este período e por ter acreditado em mim e no sucesso deste trabalho.

Ao meu irmão Tomás por ter sido um exemplo para mim, por me ensinar que o sucesso académico e profissional só depende do nosso esforço e trabalho e pelos imensos conselhos que me deu e continua a dar.

Por fim, gostava de agradecer aos meus pais por todo o amor que me proporcionaram, em especial à minha mãe por ter estado sempre ao meu lado e ter sido o meu suporte não só durante o meu tempo na universidade, mas durante toda a minha vida.

# Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Índice.....	iv
Índice de Figuras.....	vi
Índice de Tabelas.....	vii
Lista de Acrónimos.....	viii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e Motivação.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Metodologia da Dissertação.....	3
1.4. Estrutura da Dissertação.....	5
2. Definição do Problema.....	6
2.1. Gestão de Resíduos Urbanos.....	6
2.1.1. Evolução da Gestão de Resíduos Urbanos na Europa.....	6
2.1.2. Evolução da Gestão de Resíduos Urbanos em Portugal.....	9
2.2. Gestão de Resíduos de Embalagem.....	11
2.2.1. Gestão de Resíduos de Embalagem na Europa.....	11
2.2.2. Gestão de Resíduos de Embalagem em Portugal.....	12
2.3. Vidro de Embalagem.....	15
2.3.1. Vidro de Embalagem na Europa.....	15
2.3.2. Vidro de Embalagem em Portugal.....	16
2.4. Caracterização do Projeto Mobile-Pro-U.....	17
2.4.1. Tarefa 1.....	17
2.4.2. Tarefa 2.....	18
2.4.3. Tarefa 3.....	21
2.5. Caracterização do Problema.....	23
2.6. Conclusões do Capítulo.....	23
3. Revisão de Literatura.....	24
3.1. Logística.....	24
3.2. Recolha e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos.....	25
3.3. Desenho da Rede de Distribuição.....	27

3.4. Sistemas Móveis .....	29
3.4.1. Vehicle Routing Problem .....	30
3.4.2. <i>Location Routing Problems</i> .....	32
3.5. Incerteza em Modelos de Localização e Roteamento.....	33
3.6. Conclusões do capítulo.....	35
4. Desenvolvimento da Solução Proposta .....	36
4.1. Visão Geral do Método de Solução .....	36
4.2. Desenvolvimento do Modelo Estocástico de Localização e Dimensionamento.....	38
4.2.1. Formulação Matemática do Modelo .....	39
4.3. Desenvolvimento do Modelo de Roteamento das Unidades Móveis .....	50
4.3.1. Formulação Matemática do Modelo .....	51
5. Resultados da Análise do Modelo Misto.....	54
5.1. Apresentação dos cenários .....	54
5.2. Dados utilizados.....	56
5.3. Resultados dos Cenários Independentes.....	60
5.3.1. Resultados Cenário 1 .....	60
5.3.2. Resultados Cenário 2 .....	65
5.4. Resultados do Modelo Estocástico.....	67
5.5. Análise de Sensibilidade.....	70
5.6. Resultados Computacionais .....	75
5.7. Conclusões do Capítulo.....	76
6. Conclusões e Trabalho Futuro.....	78
7. Referências .....	80

# Índice de Figuras

Figura 1: Hierarquia dos Resíduos (fonte: APA, 2019 a) .....	1
Figura 2: Valores de reciclagem de vidro em Portugal entre 2004 e 2017 (fonte: (APA, 2019 b)) ..	2
Figura 3: Metodologia para o desenvolvimento da dissertação .....	3
Figura 4: Comparação da TGR aplicada com a percentagem de utilização de aterro na UE (fonte: STOA, 2017).....	8
Figura 5: Tratamento dos resíduos urbanos na Europa entre 1995-2018 (fonte: Eurostat, 2019) ..	9
Figura 6: Percentagem de reciclagem de resíduos de embalagem nos países da Europa (fonte: EEA,2019) .....	11
Figura 7: Destino dos Resíduos de Embalagem em Portugal (fonte: Dias, 2015).....	12
Figura 8: SIGRE para o Fluxo Urbano, Recolha Seletiva (fonte: SPV, 2019).....	13
Figura 9: Localização das TMBs em Portugal Continental (fonte: <i>Castel-branc, 2019</i> ).....	14
Figura 10: Ciclo de vida do Vidro de Embalagem com processo RecGlass (fonte: Castel-branc, 2019).....	16
Figura 11: Organização das tarefas no Projeto Mobile Pro U (Fase I e Fase II) .....	17
Figura 12: RecGlass, esquema A e foto do protótipo em B (fonte: (Dias, 2015) .....	18
Figura 13: Diagrama associado ao equipamento RecGlass (fonte: (Dias,2015)) .....	19
Figura 14: UMPs concebidas para recuperação de vidro .....	20
Figura 15: Representação da Análise do Sistema Misto.....	36
Figura 16: Representação do funcionamento do Modelo de Roteamento .....	51
Figura 17: Árvore de cenários do estudo do Sistema Logístico Misto .....	54
Figura 18: Desenho do sistema logístico associados aos cenários 1.2. s3 e 1.2.s4 durante o 1º ano do projeto (à esquerda) e durante o 2º e 3º ano (à direita).....	62
Figura 19: Representação de todos os fluxos dos cenários 1.1.,1.2. s1 e 1.2 s2 respetivamente	64
Figura 20: Representação do sistema logístico associado aos cenários 2.1. e 2.2. s1 e s2 .....	66
Figura 21: Representação da solução ótima do Modelo Estocástico.....	69
Figura 22: Árvore de cenários das análises de sensibilidade a efetuar .....	71
Figura 23: Análise de Sensibilidade Pu .....	72
Figura 24: Análise Sensibilidade Aex .....	73
Figura 25: Análise Sensibilidade E .....	74



## Índice de Tabelas

Tabela 1: Valor da Taxa de Gestão de Resíduos na UE (fonte: adaptado de (CEWEP,2017)) .....	7
Tabela 2: Custo do investimento nas unidades móveis e em material de apoio às TMBs .....	20
Tabela 3: Custo de investimento no diagrama fixo (Adaptado de Castel-branc, 2019) .....	21
Tabela 4: Resultados do cenário selecionado referente ao sistema fixo .....	22
Tabela 5: Análise preliminar ao custo de transporte das unidades móveis .....	37
Tabela 6: Estimativa de percentagem de vidro presente nos Resíduos Urbanos Indiferenciados ao longo do horizonte temporal .....	55
Tabela 7: Valores dos parâmetros dos modelos apresentados .....	57
Tabela 8: Resultados das TMBs estudadas na Tarefa 1 do projeto Mobile-Pro-U .....	58
Tabela 9: Lista das restantes TMBs a serem consideradas no projeto Mobile Pro-U .....	59
Tabela 10: Matriz distâncias entre instalações TMB (Retirado de (Castel-branc, 2019)) .....	59
Tabela 11: Obtenção Período de Análise Adequado .....	60
Tabela 12: Análise Resultados do Cenário 1 .....	61
Tabela 13: Anos de Processamento dos diagramas para cada cenário .....	61
Tabela 14: Tempo de Permanência das unidades móveis nas instalações.....	63
Tabela 15: Custo de Transportes das Unidades Móveis Comparativamente ao Custo de Investimento Total do Projeto.....	65
Tabela 16: Análise Resultados do Cenário 2 .....	65
Tabela 17: Probabilidade de Acontecimento de cada Cenário s (Fonte: SPV).....	67
Tabela 18: Resultados do Investimento e VAL do modelo estocástico.....	67
Tabela 19: Quantidade de vidro recuperado no modelo estocástico e cálculo da média ponderada .....	68
Tabela 20: Número de diagramas fixos em funcionamento em cada cenário s .....	69
Tabela 21: Cenários da Análise de Sensibilidade .....	70
Tabela 22: Preços de recuperação do vidro nas instalações TMB a considerar .....	71
Tabela 23: Custos de aterro externo a considerar .....	73
Tabela 24: Eficácias dos Diagramas a considerar .....	74
Tabela 25: Estatísticas dos Modelos Simulados .....	75
Tabela 26: Análise Pu Cenário A.....	88
Tabela 27: Análise Pu Cenário B.....	89
Tabela 28: Análise Pu Cenário C.....	89
Tabela 29: Análise Aex Cenário A.....	89
Tabela 30: Análise Aex Cenário B.....	89
Tabela 31: Análise Aex Cenário C.....	90
Tabela 32: Análise E Cenário A.....	90
Tabela 33: Análise E Cenário B.....	90
Tabela 34: Análise E Cenário C.....	90

## **Lista de Acrónimos**

SPV - Sociedade Ponto Verde

CERENA - Centro de Recursos Naturais e Ambiente, do Instituto Superior Técnico

TMB – Estação de Tratamento Mecânico-Biológico

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

PERSU – Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos

RU – Resíduos Urbanos

SGRU – Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos

SIGRE – Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagens

TMBr – Rejeitado pesado das TMB

CDR – Combustível Derivado de Resíduos

RG - RecGlass

TO - Triador Ótico

UMP - Unidade Móvel de Processamento

PO SEUR - Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos

DRV – Diagrama de Recuperação de Vidro

UE – União Europeia

EG – Entidade Gestora

EGF – Environment Global Facilities

TGR – Taxa de Gestão de Resíduos

# 1. Introdução

Este capítulo inicial tem como objetivo introduzir o problema em questão, proporcionando uma visão global da temática a abordar ao longo deste trabalho. Na secção 1.1 contextualiza-se o problema e as motivações por detrás do tema; na secção 1.2 descrevem-se os objetivos do projeto; na secção 1.3 apresenta-se a metodologia da dissertação e, por fim, a secção 1.4. define a estrutura do documento.

## 1.1. Enquadramento e Motivação

A produção de resíduos está diretamente associada à atividade humana, pelo que uma adequada gestão dos seus fluxos é necessária para a implementação de um novo paradigma de crescimento, respeitando assim os limites do planeta (REA, 2019). Os resíduos urbanos e a sua gestão apresentam diferentes características que os distinguem dos outros fluxos de resíduos, representando um número de produtores não só elevado como difuso. Embora estes resíduos representem apenas 10% do total de resíduos gerados na Europa, são uma das categorias mais poluentes de resíduos e a categoria com maior potencial de melhoria ambiental por meio de uma melhor gestão (European Commission, 2016).

A Diretiva 2008/98/CE, também denominada de Diretiva Quadro de Resíduos (DQR) visou reforçar a política de resíduos, estabelecendo medidas de proteção do ambiente e da saúde humana, reduzindo os impactos adversos decorrentes da produção e gestão de resíduos, diminuindo assim os impactos gerais da utilização dos recursos e melhorando a eficiência dessa utilização. Um dos princípios base da DQR é o princípio da hierarquia dos resíduos (ver figura 1). Esta hierarquia estabelece uma ordem de prioridades do que constitui, geralmente, a melhor opção ambiental no âmbito da gestão de resíduos, sendo que a prevenção e redução encontram-se como prioritárias e a eliminação como último recurso a utilizar.



Figura 1: Hierarquia dos Resíduos (fonte: APA, 2019 a)

O desenvolvimento de regulamentos e investimento em infraestruturas de tratamento de resíduos, como aterros, instalações de incineração de resíduos e instalações de triagem e recuperação de resíduos, são alguns dos comportamentos dos países europeus de modo a gerir os seus resíduos de maneira confiável e ambientalmente correta. Contudo, estas iniciativas revelam-se insuficientes, dado que ainda se registam valores relativamente elevados de resíduos que são eliminados sem qualquer tratamento prévio (EEA, 2015). Uma das outras alterações necessárias é relativa ao modelo de

produção e consumo da economia europeia, que é predominantemente baseado num princípio linear: os recursos são extraídos, processados, usados e, por fim, descartados como resíduos. No final desse ciclo, os resíduos são normalmente encaminhados para incineração (produção de energia) ou para aterro, sendo que nestes dois casos, os materiais são retirados do seu ciclo ou destruídos. Estas ações resultam em impactos negativos à saúde humana e ambiental, uso ineficiente dos recursos naturais e, na maioria dos casos, a uma dependência excessiva de recursos exportados (STOA, 2017). Este tipo de modelo linear só pode ser viável se existirem recursos ilimitados que satisfaçam uma procura global que se encontra em constante crescimento, tanto pelo aumento da população humana como pelos hábitos de consumo potenciados por indústrias em expansão (Vergara e Tchobanoglous, 2012). Mudar para uma “Economia Circular” aliviaria estas pressões e preocupações e proporcionaria benefícios económicos, sociais e ambientais (EEA, 2017).

A Ponto Verde Innovation, uma iniciativa da Sociedade Ponto Verde (SPV), vem no seguimento da promoção de bases como o crescimento sustentável, produção de conhecimento e da já referida economia circular, financiando um conjunto seletivo de projetos inovadores, no qual o Mobile-Pro-U, apresentado pelo IST-ID – Associação do Instituto Superior Técnico para a Investigação e Desenvolvimento – foi escolhido. Este projeto inovador baseia-se num dos materiais mais passíveis de ser reutilizado e reciclado: o vidro. Trata-se de um material bastante atrativo para reaproveitamento, já que é 100% reciclável, como também bastante importante em termos ambientais, já que pode demorar entre 4 mil a 1 milhão de anos a decompor-se na natureza (ANAVIDRO, 2013). No contexto da reciclagem de vidro, Portugal encontra-se abaixo das metas Europeias, sendo que a taxa de reciclagem do vidro de embalagem, encontra-se na ordem dos 50% em 2017 (dados públicos mais recentes), estando aquém da meta de 60%, estabelecida para 2020 no ano de 2011 (ver figura 2). Esta percentagem resulta maioritariamente do vidro recuperado na recolha seletiva e em estações de tratamento mecânico e biológico pelo total de vidro reciclável produzido (APA, 2018 a).

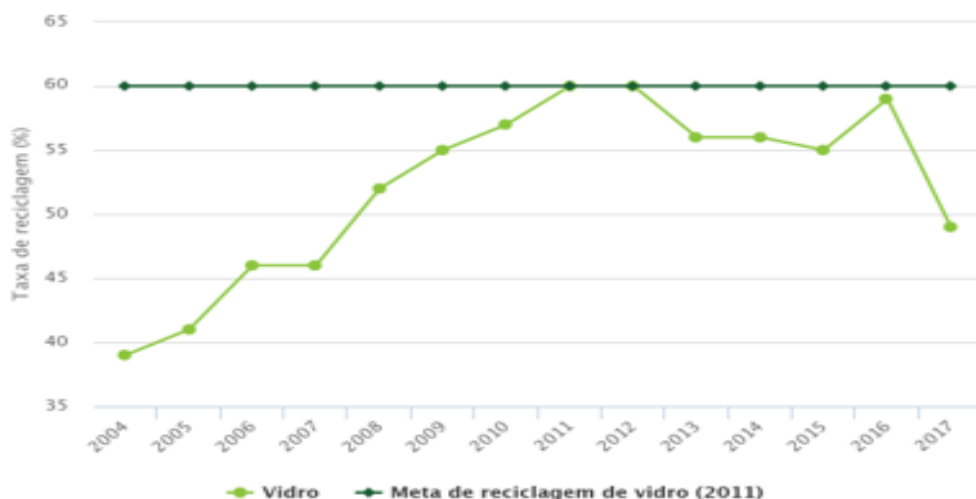


Figura 2: Valores de reciclagem de vidro em Portugal entre 2004 e 2017 (fonte: (APA, 2019 b))

Dado que cerca de 50% do vidro está efetivamente a ser depositado em aterro (APA, 2019 b), é necessário encontrar formas de o recuperar para atingir as metas propostas. O propósito do presente projeto é aumentar o valor da reciclagem do vidro através do desenho e planeamento de um sistema

logístico que inclui diagramas de recuperação de vidro com o equipamento necessário para realizar o seu resgate. Estes têm hipótese de estar embutidos em unidades móveis (designadas de Mobile-Pro-U) que são transportadas para estações de Tratamento Biológico-Mecânico, onde processam o rejeitado pesado de resíduos indiferenciados. Os diagramas incluem uma tecnologia desenvolvida pelo CERENA (Centro de Recursos Naturais e Ambiente, do Instituto Superior Técnico), denominada de RecGlass, que permite que a obtenção deste recurso seja realizada de maneira eficaz. Este projeto conta com o apoio do Instituto Superior Técnico (IST), Instituto de Engenharia Mecânica (IDMEC) e Maltha Glass Recycling Portugal enquanto parceiros.

## 1.2. Objetivos

A criação do sistema logístico terá por base a utilização de métodos de otimização, sendo que as decisões serão sustentadas por um conjunto de critérios, de modo a atingir um ou mais objetivos previamente delineados. Embora não se trate da primeira análise do desenho do plano logístico no contexto deste projeto, este trabalho detém características únicas quando comparado com a literatura existente sobre a problemática e sobre os modelos a desenvolver. Isto leva à necessidade de desenvolver uma revisão literária capaz de auxiliar a realização do modelo de localização e dimensionamento proposto. Após o desenvolvimento do modelo matemático, este será sujeito a várias análises, onde se pretende estudar um leque de cenários passíveis de se registarem, tendo por base dados fornecidos pela Sociedade Ponto Verde e pelos restantes parceiros do Projeto Mobile-Pro-U. Assim, o trabalho em questão terá como objetivos:

- 1) Caracterizar o problema a investigar e a motivação do seu estudo;
- 2) Realizar uma revisão da literatura de conceitos relevantes, definições e metodologias de investigação relativamente a tópicos ligados à logística, recolha e tratamento de resíduos urbanos, desenho da rede de distribuição, problemas de localização e problemas de roteamento;
- 3) Desenvolvimento de uma análise, centrada num modelo estocástico de localização e dimensionamento, capaz de responder às necessidades do problema em questão;
- 4) Registrar os resultados dos cenários analisados e estabelecer um ponto de situação referente aos próximos passos do projeto.

## 1.3. Metodologia da Dissertação

A metodologia de seguida descrita e apresentada na Figura 3 permite definir o rumo necessário para atingir o principal objetivo da dissertação: desenvolver técnicas de otimização para suportar decisões relativas ao planeamento de um sistema logístico misto, associado a um diagrama de recuperação de vidro (DRV).

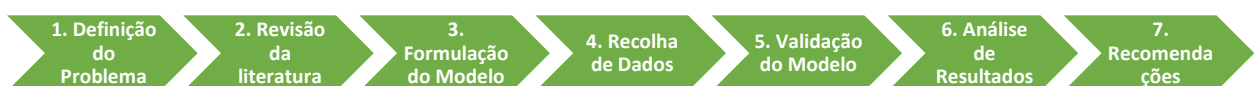


Figura 3: Metodologia para o desenvolvimento da dissertação

## **1. Definição do Problema**

Nesta etapa pretende-se efetuar uma introdução do mercado de resíduos urbanos a nível europeu e nacional e descrever a situação referente ao vidro de embalagem. Será feita também a caracterização do projeto Mobile-Pro-U, onde estão referidas as suas tarefas e demonstrado o progresso atingido até à data, identificando ainda os principais objetivos, bem como descrevendo potenciais oportunidades e limitações relacionadas com o problema.

## **2. Revisão da literatura**

O objetivo desta etapa é proporcionar o estado da arte das problemáticas associadas ao projeto. Para tal, serão descritas várias metodologias de solução com possíveis aplicações no trabalho a desenvolver, tais como problemas de localização, unidades móveis e roteamento. Adicionalmente, serão apresentados exemplos concretos relacionados com a recolha e tratamento de resíduos. Esta secção também inclui a descrição de alguns dos termos chave deste problema como a logística e logística inversa.

## **3. Formulação do Modelo de Otimização**

Tendo em conta a definição do problema e os modelos relevantes da revisão literária efetuada, serão desenvolvidos os modelos matemáticos no software GAMS que funcionarão como ferramenta de decisão e de planeamento do sistema logístico misto desejado. Os modelos serão desenvolvidos de modo a ter em conta equipamentos de recuperação de vidro fixos e móveis;

## **4. Recolha de Dados**

Uma recolha de dados será efetuada, na qual informação referente a características granulométricas e de presença de vidro no produto a processar, valores de investimento das unidades móveis concebidas, localização das TMBs, custos operacionais e de manutenção dos equipamentos e custo de deposição em aterro foi compilada. Estes dados são recolhidos através do contacto com entidades parceiras do projeto Mobile-Pro-U (Maltha, na qualidade de retomadora de vidro de embalagem e Sociedade Ponto Verde, na qualidade de entidade gestora de resíduos de embalagem), com as estações de tratamento mecânico-biológico visitadas e com os responsáveis dos variados trabalhos relacionados com as tarefas pertencentes ao projeto.

## **5. Validação do Modelo e Análise de Resultados**

O modelo matemático formulado anteriormente será testado, tendo como *inputs* as informações recolhidas no contexto do projeto. Será também realizada a análise e discussão dos resultados, na qual todos os cenários delineados serão testados, com o intuito de obter a solução ótima que melhor se adapta ao contexto real do projeto. Os parâmetros do modelo serão adicionalmente sujeitos a análises de sensibilidade na tentativa de testar a robustez e a viabilidade dos resultados obtidos.

## 6. Conclusões e Recomendações

A dissertação termina com o levantamento de recomendações e linhas orientadoras que serão estabelecidas para estudos futuros relacionados com os resíduos de embalagem em Portugal, e que possam contribuir para a minimização da deposição em aterro do vidro.

## 1.4. Estrutura da Dissertação

De seguida apresenta-se a linha condutora deste projeto tese, onde estão descritos os capítulos constituintes do trabalho:

Capítulo 1: Introdução – Neste capítulo pretende-se contextualizar o problema global de gestão de resíduos e identificar a solução relativa ao vidro de embalagem, através do planeamento logístico de um sistema de recuperação de vidro, explicitando também quais os principais objetivos a atingir;

Capítulo 2: Definição do Problema – Aqui é apresentado o panorama referente à gestão de resíduos urbanos na Europa, sendo que depois é realizada uma análise mais detalhada ao caso de Portugal. O mesmo é feito em relação aos resíduos de embalagem, com especial atenção para o vidro. Uma breve explicação do projeto e das fases constituintes será efetuada, sendo depois caracterizado o problema em questão.

Capítulo 3: Revisão da Literatura – Nesta secção são explorados conceitos relacionados com logística e são estudadas as diferentes abordagens relativas à otimização aplicada na modelação de sistemas logísticos com variáveis idênticas ao problema descrito. No final do capítulo são identificados os métodos mais adequados ao modelo desejado e são apresentadas possíveis limitações à sua implementação;

Capítulo 4: Desenvolvimento dos Modelos de Análise do Sistema Misto – Apresentam-se os pressupostos assumidos e a formulação matemática para o modelo de localização e dimensionamento estocástico e para o modelo de roteamento efetuados. São descritas todas as variáveis, parâmetros, equações e restrições;

Capítulo 5: Resultados da Análise do Sistema Logístico Misto – Esta secção tem o intuito de demonstrar os dados e cenários envolvidos no estudo a realizar. Os resultados obtidos serão devidamente apresentados e estudados, sendo que após este passo serão realizadas análises de sensibilidade aos parâmetros de maior incerteza, testando assim a sua robustez e estudando as variáveis-chave que definem o sucesso do projeto. De seguida, as conclusões inerentes à análise realizada serão assinaladas.

Capítulo 6: Conclusões e Trabalho Futuro – O último capítulo deste trabalho pretende registar todos os pontos críticos observados durante a análise efetuada e assinalar as limitações encontradas que poderão ter relevância nos resultados obtidos. Serão descritos os próximos passos a desenvolver no contexto do projeto e discutido o melhor curso de ação face ao estudo realizado.

## 2. Definição do Problema

Este capítulo contém informações relativas à caracterização da problemática em estudo, referente à recuperação de vidro de embalagem através do tratamento de resíduos urbanos de origem indiferenciada. É apresentada uma contextualização sobre a gestão de resíduos urbanos na secção 2.1, seguindo-se a secção 2.2, com foco nos resíduos de embalagem e a secção 2.3. que avalia a situação específica do vidro de embalagem. É de notar que estas três secções pretendem demonstrar o panorama geral dos países europeus, sendo depois apresentado em mais detalhe o caso de Portugal. Na secção 2.4. é realizada uma breve descrição do projeto Mobile-Pro-U, sendo depois caracterizado o problema específico na unidade 2.5; as conclusões retiradas no capítulo são referidas na secção 2.6.

### 2.1. Gestão de Resíduos Urbanos

#### 2.1.1. Evolução da Gestão de Resíduos Urbanos na Europa

Entende-se por resíduo urbano (RU) um “*resíduo proveniente de habitações, bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações*”. A sua gestão inclui “*a recolha, o transporte, a valorização e a eliminação de resíduos, incluindo a supervisão destas operações, a manutenção dos locais de eliminação no pós-encerramento, bem como as medidas adotadas na qualidade de comerciante ou corretor*” (Diário da República 2011, cf. Artigo 3º e 4º). Os resíduos são gerados por:

- a) agregados familiares (resíduos domésticos);
- b) pequenos produtores de resíduos semelhantes (produção diária inferior a 1.100 l);
- c) grandes produtores de resíduos semelhantes (produção diária igual ou superior a 1.100 l)”.

Os grandes produtores de resíduos têm a responsabilidade de tratar do encaminhamento dos seus resíduos para os órgãos devidos. No caso de agregados familiares e pequenos produtores, esta gestão de resíduos está sob a alçada dos municípios. A quantidade e diversidade de resíduos urbanos existentes dificulta que todos estes sejam encaminhados da melhor forma, o que obriga aos gestores destes resíduos a estabelecer prioridades e a criar medidas faseadas com o objetivo de reduzir ao máximo o impacto destes materiais no meio ambiente e na saúde humana.

Na Europa, a gestão de resíduos municipais foi submetida a mudanças radicais a partir dos anos 90, com a introdução de várias diretivas que permitissem alterar o destino final e o tratamento destes resíduos. O objetivo era que a deposição em lixeiras abertas e da incineração simples fosse substituída por processos de valorização dos resíduos, como por exemplo incineração com recuperação de energia, triagem e reciclagem. Pode-se destacar a Diretiva 99/31/EC - com o intuito de reduzir os efeitos negativos para o ambiente e saúde humana dos resíduos provenientes do aterro, através de requisitos rigorosos para resíduos depositados nestes locais – e a Diretiva 2008/98/EC – com o objetivo de promover a reutilização, reciclagem e outras formas de recuperação de resíduos de embalagens – como duas diretrizes importantes na tentativa de alterar o comportamento dos Estados-Membros da União Europeia (UE) face a esta problemática. Embora estas diretivas conjuntamente com as metas preconizadas pela Comissão Europeia em relação à valorização das variadas categorias de resíduos tenham tido um efeito positivo na mudança de comportamento, o seu impacto não foi refletido



igualmente por todos os países europeus. Uma das razões estende-se pela flexibilidade que os Estados-Membros têm na forma de atingir estes objetivos, procurando individualmente a melhor maneira de tratamento dos seus próprios resíduos tendo em conta as suas características e necessidades.

A diferença nos valores da Taxa de Gestão de Resíduos (TGR) presente nos diferentes países da comunidade europeia é um exemplo dessa dispersão, como observado na tabela 1.

Tabela 1: Valor da Taxa de Gestão de Resíduos na UE (fonte: adaptado de (CEWEP,2017))

País	TGR em aterro €/ton (2017)
Áustria	87
Bélgica	85
Bulgária	20
Dinamarca	63.3
Estónia	29.84
Eslováquia	5.98
Eslovénia	11
Espanha	24.1
Finlândia	70
França	32
Grécia	50
Holanda	13.11
Hungria	38.7
Irlanda	75
Itália	15.51
Letónia	25
Lituânia	3
Luxemburgo	8
Polónia	33
<b>Portugal</b>	<b>7.7</b>
Roménia	17
Suécia	50

Esta taxa é aplicada aos municípios tendo em conta a quantidade de resíduos depositado em aterro, representando um incentivo extra para não encaminhar os resíduos para esse fim. Isto porque se a diferença de preços entre recorrer a um método de tratamento mais adequado for pequena ou até mesmo nula quando comparada com o depósito em aterro (que deve ser utilizado em último recurso), há uma motivação para optar pelo melhor tratamento, já que não terá um impacto tão grande em termos económicos e irá ser mais benéfico em termos ambientais. Relativamente à TGR dos restantes países da União Europeia, Portugal tem valores relativamente baixos (7,7€/ton em 2017), o que pode ser parcialmente explicado pela densidade populacional não muito elevada. Países como a Dinamarca e a

Bélgica com densidades populacionais mais elevadas, têm valores de TGR bastante altos (63€/ton e 85€/ton respetivamente), investindo mais na incineração (Janus et al., 2014). Embora se destaque esta diferença nos valores aplicados, é de referir que a maioria dos países com TGRs de valor reduzido encontram-se a aumentar estes valores significativamente nos últimos anos (incluindo Portugal, que em 2020 regista uma TGR de 11€/ton), na tentativa de aumentar a quantidade de resíduos valorizados adequadamente.

Ao analisar a correlação entre a TGR (em €/ton) e a percentagem de resíduos tratados em aterro como último destino na Figura 4, observa-se um padrão claro de elevados níveis de aterro a corresponder a uma taxa baixa, o que revela que uma TGR elevada é eficaz na redução das quantidades depositadas em aterro.

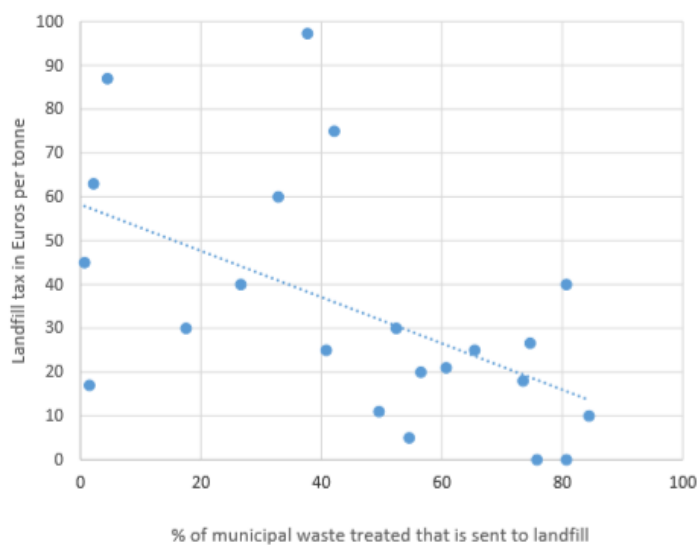


Figura 4: Comparação da TGR aplicada com a percentagem de utilização de aterro na UE (fonte: STOA, 2017)

A Figura 5 ilustra a evolução, dentro dos 28 Países que constituíam a União Europeia em 2018, da quantidade de resíduos urbanos per capita tratados, tendo em conta diferentes mecanismos: desta imagem, infere-se que durante o horizonte temporal entre 1995 e 2018, houve uma redução de 61% no uso de aterros e um aumento das toneladas processadas em incineração (117%), composição (202%) e reciclagem (201%), que demonstram o aumento da consciencialização ambiental, que possivelmente foi auxiliado pela introdução das diretivas mencionadas anteriormente.

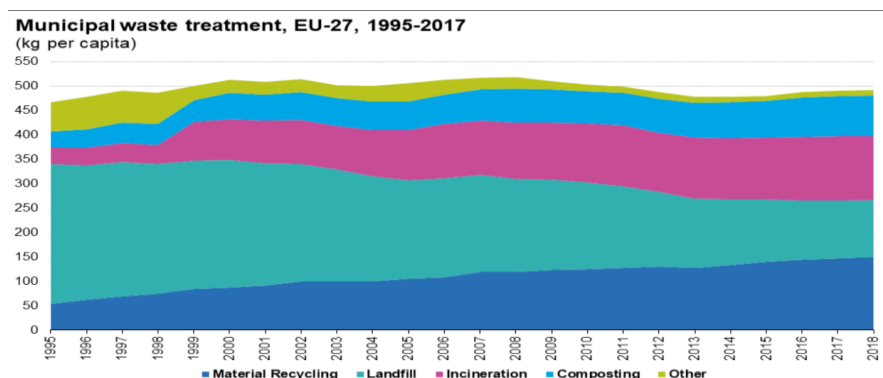


Figura 5: Tratamento dos resíduos urbanos na Europa entre 1995-2018 (fonte: Eurostat, 2019)

Tendo em conta a produção de RU, esta reduziu de 515 kg per capita para 489 kg per capita entre 2005 e 2018, o que representa um decréscimo de cerca de 5%. Contudo, a prevenção e redução promovida na hierarquia de resíduos não se tem registado uniformemente em cada país, sendo que houve um decréscimo de resíduos per capita em 15 países e um aumento em 13 deles. A produção de resíduos per capita está geralmente relacionada com o poder de compra dos consumidores, sendo que é possível denotar um padrão de países com uma economia superior a gerarem mais resíduos por pessoa - como é o caso da Dinamarca e da Noruega que detêm valores a rondar os 750 kg per capita em 2018.

### 2.1.2. Evolução da Gestão de Resíduos Urbanos em Portugal

Em Portugal, o tratamento de resíduos sólidos urbanos registou uma grande evolução, desde a aprovação do Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), em 1997. O atraso em relação à maioria dos Estados Membros da UE em meados da década de 90 fez com que o poder político considerasse a resolução destes problemas uma prioridade. Este plano teve o papel fulcral da transição da deposição de resíduos em lixeiras para a deposição em aterros - em 1996, existiam 341 lixeiras ativas a céu aberto, sendo que atualmente, todas estas estão extintas. A recolha seletiva de resíduos de embalagem era também uma temática pouco considerada na altura, registando uma taxa abaixo de 1%, centrada nas embalagens de vidro. Para combater este problema, foram criados sistemas multimunicipais e intermunicipais de gestão de RU e infraestruturas para o tratamento, valorização e eliminação dos mesmos (através da construção de redes de ecopontos e ecocentros e tratamento por incineração).

Em 2006, o PERSU foi revisto, devido ao surgimento de novas políticas setoriais europeias, onde passam a ser exigidas metas de reciclagem, valorização e limitações à deposição em aterro, tendo sido aprovado para o período entre 2007-2016 o PERSU II. A sua implementação contribuiu para que no período entre 2007-2012 se tenham verificado alterações importantes no setor tal como a modificação na configuração dos sistemas de gestão de RU e das suas opções de gestão, aumento do número de unidades de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB), reforço da aplicação da hierarquia de gestão de resíduos (no sentido de sensibilizar a sociedade para a importância da reciclagem) e uma forte aposta na valorização orgânica de resíduos biodegradáveis, que são aqueles que apresentam maior potencial de emissão, sendo uma fração com um impacto ambiental acrescido.

Ao realizar a avaliação intercalar do PERSU II, constatou-se um desvio acentuado nas metas definidas para a deposição de resíduos biodegradáveis (RUB) e para as capitações de recolha seletiva. Estes valores explicam-se sobretudo devido ao insuficiente aumento da recolha seletiva e à demora na entrada em funcionamento das infraestruturas de TMB programadas, que, aliados às alterações do número de sistemas de gestão de resíduos urbanos (SGRU) e da sua organização, e às novas metas comunitárias de preparação para reutilização e reciclagem para o ano de 2020, justificaram a realização de uma revisão do PERSU II. Consequentemente, resulta dessa revisão o PERSU 2020, aprovado em setembro de 2014. Neste instrumento estratégico são definidas quatro metas nacionais a cumprir até ao ano 2020 (APA, 2018 a):

- Reduzir a produção de resíduos urbanos em 10% do seu peso, em relação ao valor de 2012, até 31 de dezembro de 2020. Em 2018 apenas se atingiu uma redução de 1,11% em relação a 2012, observando-se nos últimos anos uma tendência no aumento de produção de RU. Este estará relacionado com uma melhoria da situação económica de Portugal que, por consequência, aumenta o poder de compra dos consumidores;
- Reciclar pelo menos 70%, em peso, dos resíduos de embalagens até 2020. Em 2018 este valor rondava os 50%;
- Aumentar para 50% em peso a preparação para a reutilização e reciclagem de resíduos urbanos (incluindo o papel, o cartão, o plástico, o vidro, o metal, a madeira e os resíduos urbanos biodegradáveis). Em 2018, Portugal ficou-se pelos 40%;
- Até julho de 2020, os resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterro devem ser reduzidos para 35% da quantidade total em peso dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995. Em 2018 este valor atingiu os 46% face aos valores de 1995, tendo já sido atingido a sua meta.

Após o Relatório de Avaliação de 2017 do PERSU 2020, concluiu-se que a tendência de aproximação às metas para que fossem alcançados os objetivos delineados para 2020 era insuficiente (como também pode ser verificado nos dados acima), assinalando a necessidade urgente de ajustamentos na estratégia nacional para os resíduos urbanos.

Estes resultados são consequência de constrangimentos na mobilização do financiamento do Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos (PO SEUR), que condicionaram a execução atempada de investimentos no setor durante um período de 2 anos. Paralelamente, ocorreu a revisão das legislações europeias através da “Diretiva Quadro dos Resíduos”, “Diretiva das Embalagens e Resíduos de Embalagens” (Diretiva 94/62/CE) e “Diretiva Aterros” (Diretiva 1999/31/CE), que trazem novos desafios com vista à estabilização de uma Economia Circular.

De modo a combater estes fatores, foi assegurado um processo de realinhamento do PERSU 2020, designado PERSU2020+, que se foca nas metas previstas da União Europeia e nas estratégias das SGRUs para as atingirem. Este plano efetua ajustamentos ao PERSU 2020, não o substituindo, sendo que o seu horizonte temporal para monitorização e avaliação será efetuada até final de 2022, de modo a compensar os dois anos de contingência do financiamento do PO SEUR (APA, 2019 c). Algumas das medidas tomadas neste plano serão estudadas mais à frente neste capítulo.

## 2.2. Gestão de Resíduos de Embalagem

### 2.2.1. Gestão de Resíduos de Embalagem na Europa

Pode-se entender como embalagens o seguinte: “São embalagens todos e quaisquer produtos feitos de materiais de qualquer natureza utilizados para conter, proteger, movimentar, manusear, entregar e apresentar mercadorias, tanto matérias-primas como produtos transformados, desde o produtor ao utilizador ou consumidor, incluindo todos os artigos descartáveis utilizados para os mesmos fins”. (Diário da República, 1997, cf. Artigo 2º).

Os resíduos de embalagens presentes nos países da UE medidos em peso são maioritariamente constituídos por papel e cartão (41%), seguidos de plástico (19%), vidro (18%), madeira (17%) e metal (5%) (Eurostat, 2017). Para cada um destes materiais há formas diferentes de tratamento e uma meta de reciclagem diferente.

Na Figura 6 temos acesso ao progresso dos países Europeus entre 2005 e 2016 no que toca aos objetivos para reciclagem dos resíduos de embalagem delineados para 2008, 2025 e 2030 (55%, 65% e 70% de reciclagem, respetivamente). Podemos observar uma grande discrepância nos valores obtidos pelos países europeus, dada a diferença nos investimentos, políticas adotadas ou até mesmo da consciencialização ambiental. O país com melhores resultados relativos é a Bélgica, e o país mais aquém dos objetivos é Malta. Portugal está perto da média europeia, registando um crescimento de 44.3% de reciclagem em 2005, para 60.9% em 2016.

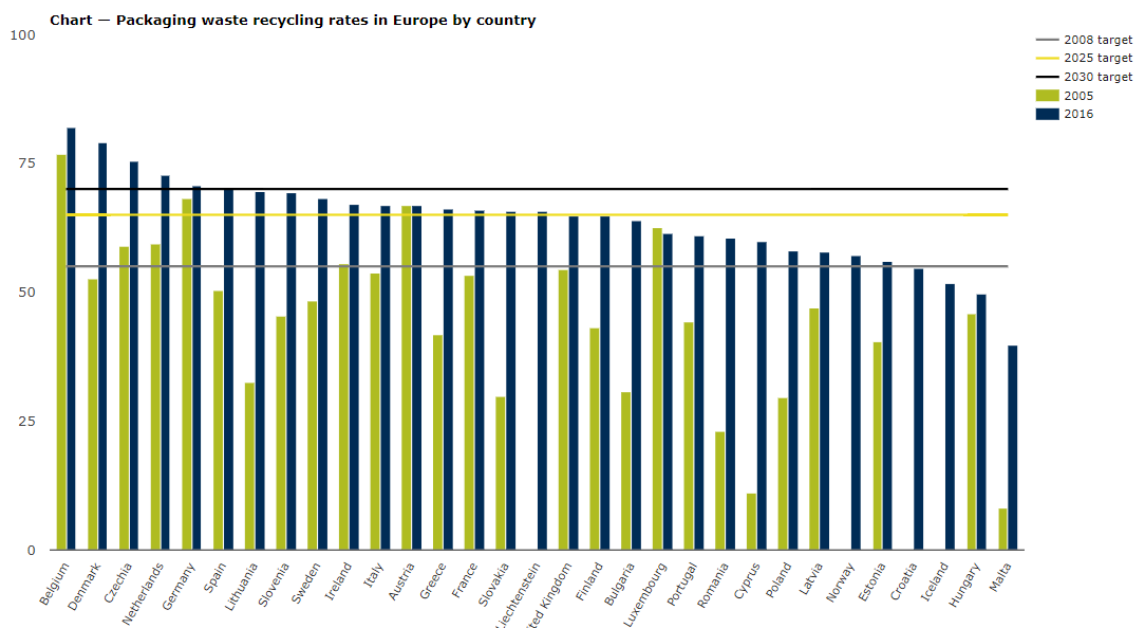


Figura 6: Percentagem de reciclagem de resíduos de embalagem nos países da Europa (fonte: EEA,2019)

No domínio da reciclagem, a Diretiva (UE) 2018/852 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 estabelece um objetivo comum para os Estados-Membros de se preparar para reutilizar e reciclar 65% dos resíduos de embalagens até 2025 e reciclar pelo menos 70% até dezembro de 2030. Para 2025, as seguintes metas diferenciadas por materiais foram estabelecidas: 75% papel/cartão; 70% vidro; 70% metais ferrosos (aço); 50% alumínio; 50% plástico; 25% madeira.

## 2.2.2. Gestão de Resíduos de Embalagem em Portugal

As embalagens são consideradas um fluxo específico de resíduos, sendo a sua gestão realizada de forma diferenciada, mediante a criação de legislação específica. Estas embalagens incluem embalagens do fluxo urbano e do fluxo não urbano (embalagens industriais não reutilizáveis).

A gestão dos resíduos de embalagens do fluxo urbano é assegurada pela recolha seletiva, que resulta da deposição voluntária destes resíduos nos ecopontos, nos ecocentros ou através da recolha porta-a-porta, bem como pela triagem dos resíduos de embalagens que se retiram através de infraestruturas que recebem resíduos da recolha indiferenciada. A figura 7 ilustra os diferentes fluxos e formas de tratamento utilizados para os resíduos de embalagem.

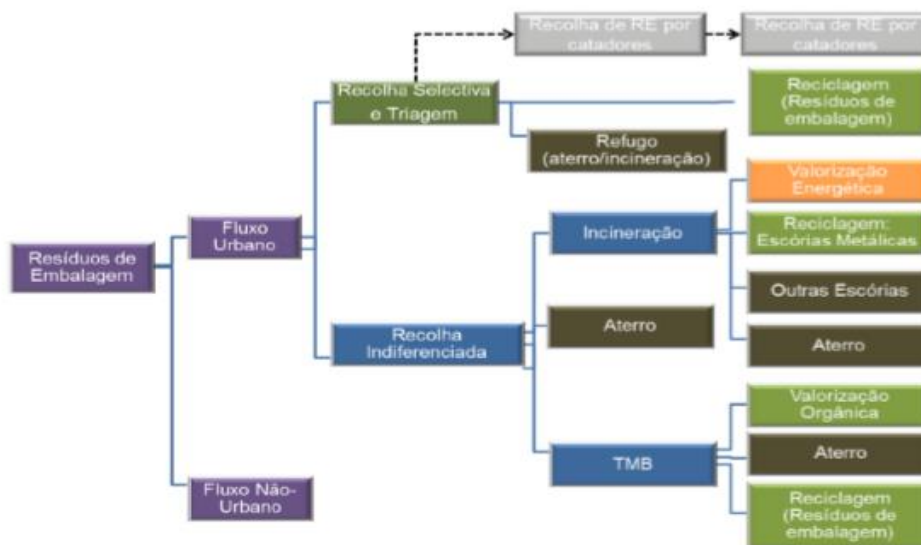


Figura 7: Destino dos Resíduos de Embalagem em Portugal (fonte: Dias, 2015)

Dado que, de acordo com o Decreto-Lei nº 152-D/2017, o produtor ou embalador fica responsável por financiar a gestão dos resíduos que resultem dos seus próprios produtos ou embalagens, este acaba por optar por cumprir esta obrigação através de uma destas formas: suportando individualmente os custos da gestão dos seus resíduos, assegurando que são recolhidos, valorizados e eliminados corretamente – que geralmente é considerada uma tarefa virtualmente impossível - ou aderindo a um sistema integrado de gestão que se encarregue da gestão destes – sendo esta a opção usualmente escolhida. Os circuitos são geralmente assegurados pelas Entidades Gestoras (EG), que fazem parte do Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagens, SIGRE – onde estão inseridos a Sociedade Ponto Verde (SPV), a Novo Verde e a Electrão - em articulação com os Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) – que são sistemas multimunicipais e intermunicipais de gestão de resíduos urbanos.

### Recolha Seletiva

O Sistema Integrado de Gestão de Resíduos de Embalagem (SIGRE) mencionado anteriormente é um sistema que dá cumprimento às obrigações ambientais e legais, através da organização e gestão de um circuito que garante a retoma, valorização e reciclagem de resíduos de embalagens não-

reutilizáveis. A figura 8 mostra todos os passos relativos à recolha seletiva em Portugal. As empresas embaladoras que aderem a uma das entidades gestoras (SPV, Novo Verde e Electrão) transferem a sua responsabilidade pela reciclagem e valorização dos resíduos das embalagens que anualmente colocam no mercado. Após a empresa distribuir o produto ao consumidor e este depositar os resíduos de embalagem nos ecopontos próprios, estes são encaminhados para uma estação de triagem, sendo posteriormente reciclados e valorizados por um retomador para nova utilização. Este material é depois distribuído às empresas embaladoras que colocam o produto novamente no mercado, distribuindo-o para os consumidores, fechando assim o ciclo.



Figura 8: SIGRE para o Fluxo Urbano, Recolha Seletiva (fonte: SPV, 2019)

### **Recolha Indiferenciada e Estações de Tratamento Mecânico-Biológico**

De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE) e a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), o fluxo de recolha indiferenciada em 2018 foi de cerca de 4150 mil toneladas em Portugal, enquanto que a recolha seletiva atingiu 1000 mil toneladas (PORDATA, 2019). Isto demonstra a grande quantidade de resíduos ainda depositados de forma indiferenciada, sendo que é prioridade máxima evitar que estes tenham como último destino a deposição em aterro.

A recolha indiferenciada representa a fração de resíduos em que não existe qualquer tipo de distinção entre materiais, o que torna bastante difícil a sua recuperação, dado que serão mais propensos a não atingir as especificações técnicas necessárias devido à contaminação com orgânicos e inertes variados. Este fluxo de resíduos é encaminhado para estações de tratamento mecânico-biológico (TMB), que consiste na separação mecânica dos resíduos indiferenciados em três categorias: matéria orgânica, materiais recicláveis e rejeitados.

Para o cumprimento das metas estabelecidas pela Diretiva Aterros (Diretiva n.º 1999/31/CE) para o horizonte 2009 a 2016, surgiu a necessidade de reduzir para 35% em peso os Resíduos Urbanos Biodegradáveis (RUB) enviados para aterro, em relação à quantidade total de RUB produzidos em 1995. Concluiu-se que, tendo em conta os custos necessários à implementação de soluções e à situação económica em Portugal, a melhor opção seria avançar para um modelo baseado em unidades

de tratamento mecânico e biológico (TMB) que permite separar e proceder ao tratamento orgânico da fração de biorresíduos e recuperar outras frações de materiais valorizáveis (APA, 2019 a). Houve então um investimento concentrado na construção de mais estações TMB: em 2012 havia 7 instalações registadas em Portugal - 5 em operação, 1 em construção e 1 em projeto - e à data, existem 18 sob a alçada de 16 entidades.

Uma TMB combina processos de triagem mecânicos (redução de tamanho, separação e recuperação de recicláveis) com tratamento biológico (tratamentos de digestão anaeróbica, aeróbica ou compostagem, em que o output será utilizado como fertilizante ou corretor de solos, podendo ainda haver a possibilidade de se produzir energia elétrica ou calor a partir do biogás originado), com o objetivo de desviar os resíduos urbanos biodegradáveis da solução de aterro, para reduzir a lixiviação e a quantidade de gases libertados aquando em aterro. No entanto, também é possível recuperar recicláveis como vidro, cartão, plástico, metais ferrosos e não ferrosos e, em alguns casos, produzir Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Embora úteis, estes processos são algo ineficientes quer para a matéria orgânica (qualidade reduzida), quer para recicláveis (devido à presença de orgânicos e inertes), o que faz com que viabilidade económica deste tipo de processo seja posta em causa.

O grande objetivo destas instalações é que, no final do processo, se obtenha materiais recicláveis (que são encaminhados para a reciclagem), orgânicos (encaminhados para produção de composto) e o rejeitado (que geralmente é depositado em aterro). Este último, é dividido por fluxo de rejeitado leve, à base de plásticos finos e papel, e fluxo de rejeitado pesado, (denominado de TMB<sub>r</sub>), que, dado à ineficácia dos processos até aqui sofridos para a sua separação, tem uma forte presença de vidro. Ou seja, é no TMB<sub>r</sub> que se encontra o potencial não explorado para obtenção de vidro. A Figura 9 apresenta o conjunto de TMBs presentes em Portugal Continental.

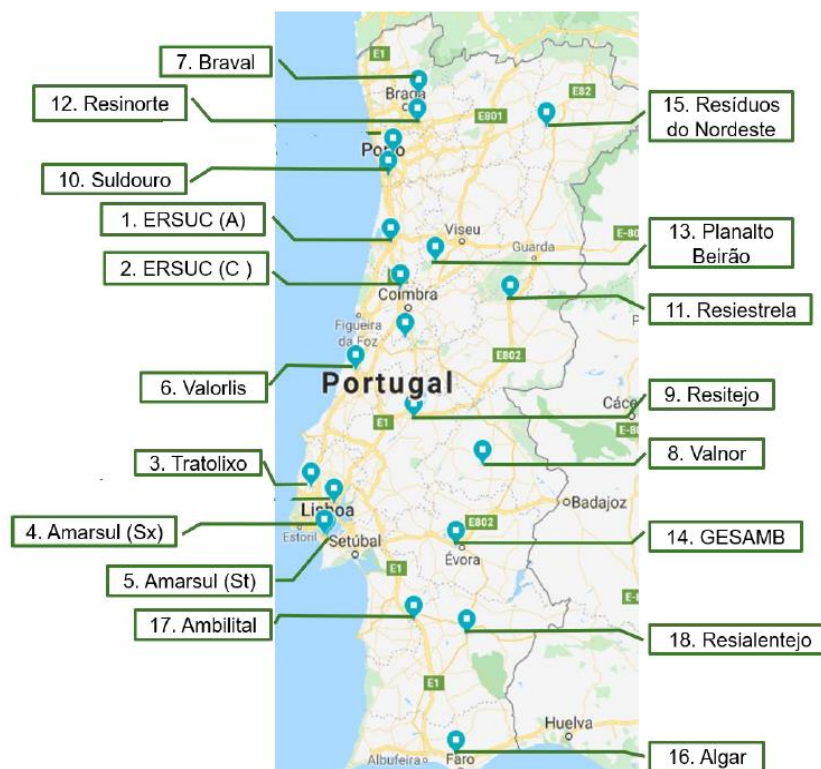


Figura 9: Localização das TMBs em Portugal Continental (fonte: Castel-branc, 2019)



Das 18 TMBs presentes na imagem, pode-se destacar um grupo pertencente à EGF – *Environmental Global Facilities* – constituído pelas instalações Valorminho, Resinorte, Suldouro, Resisestrela, Ersuc, Valorlis, Valnor, Valorsul, Amarsul e Algar. Trata-se de uma “*empresa europeia de referência no setor ambiental e líder no tratamento e valorização de resíduos em Portugal*” (EGF, 2020), sendo que a sua atividade passa pela integração em projetos de carácter ambiental e sustentável. Do contacto estabelecido com a SPV, foi indicado que devido ao enquadramento do Projeto Mobile-Pro-U nesta temática, a integração nas atividades deste projeto poderá ser uma oportunidade atrativa para este grupo explorar.

## 2.3. Vidro de Embalagem

### 2.3.1. Vidro de Embalagem na Europa

O vidro tem um potencial bastante elevado no que toca à sua recuperação, visto que é infinitamente reciclável, como nenhum dos restantes materiais de embalagem. Uma tonelada de casco de vidro origina uma tonelada de vidro reciclado, enquanto que para produzir uma tonelada de vidro de origem, são necessárias 1.2 toneladas de matéria prima (GPI, 2010). O entrave principal da sua reciclagem para manufatura de outras embalagens de vidro recai na contaminação observada no casco de vidro, dado que as especificações das recicladoras exigem pelo menos 99% de vidro de embalagem.

A taxa de reciclagem de vidro dos países europeus regista uma grande dispersão nos valores obtidos. Em dados relativos a 2017 retirados da *European Container Glass Federation* (FEVE, 2019), países como a Eslovénia, Bélgica e Suécia registam resultados muito próximos dos 100% de reciclagem e muito acima da média europeia de 76%, enquanto países como a Grécia, Hungria e Malta encontram-se com valores a rondar os 30%.

Uma das formas utilizadas para um maior controlo da reciclagem destes materiais é através de sistemas de incentivo à devolução e depósito de embalagens de vidro, como sistemas de depósito de embalagens, que entrarão em vigor em Portugal a partir de 1 de janeiro de 2022 (Lei nº69/2018) e que já integravam a estratégia de vários países europeus. Os esquemas de depósito de embalagens funcionam adicionando um pequeno depósito extra sobre o preço de garrafas de plástico e vidro (por exemplo), que é devolvido ao consumidor quando este devolver o recipiente de bebida vazia para reciclagem. Dados de 2015 relativos à percentagem de reciclagem de vidro (Oakdene Hollins, 2018) mostram que os países que implementaram esta estratégia até à data do estudo revelam valores geralmente elevados, tendo atingido a meta dos 60% para 2020 (Alemanha – 85%; Dinamarca – 79%; Finlândia – 78%; Lituânia – 74%; Croácia – 65%; Estónia – 62%).

A Diretiva de Embalagens e Resíduos de Embalagens, Diretiva (UE) 2018/852, que alterou a Diretiva 94/62/CE já existente, aumentou as metas de reciclagem de vidro de embalagem por país para 70% em 2025 e 75% em 2030. Para atingir estas novas metas, os Estados-Membros com mais dificuldade em reciclar este recurso, como Portugal, vêem-se obrigados a tomar ação e a procurar novas metodologias para recuperação do vidro.

### 2.3.2. Vidro de Embalagem em Portugal

De acordo com o Relatório de Atividades da Sociedade Ponto Verde de 2018 (SPV, 2019), a quantidade total de embalagens de vidro declaradas à SPV foi de 361.645 toneladas. No entanto, desse valor, aproximadamente 161.580 toneladas de vidro de embalagem (equivalendo a uma taxa de reciclagem de 45% para 2018 tendo em conta apenas esta EG) foram encaminhadas para a retoma, sendo que apenas 235 toneladas, ou seja, 0,14%, são referentes à recolha indiferenciada com recuperação através das TMBs, com o restante referente à recolha seletiva. Dado que a SPV apresenta uma quota de mercado de vidro de embalagem estimada de 93,2% (estando o resto repartido pelas Entidades Gestoras Eletrão e Novo Verde), podemos assumir que estes valores não serão muito diferentes tendo em conta todos os valores adicionados, pelo que é possível denotar um potencial pouco explorado de recuperação do vidro dos resíduos não diferenciados.

Na figura 10, o percurso das embalagens de vidro desde o momento em que são utilizadas pelo consumidor até ao destino final é demonstrado, tendo em conta as diferenças observadas na deposição seletiva e deposição indiferenciada.

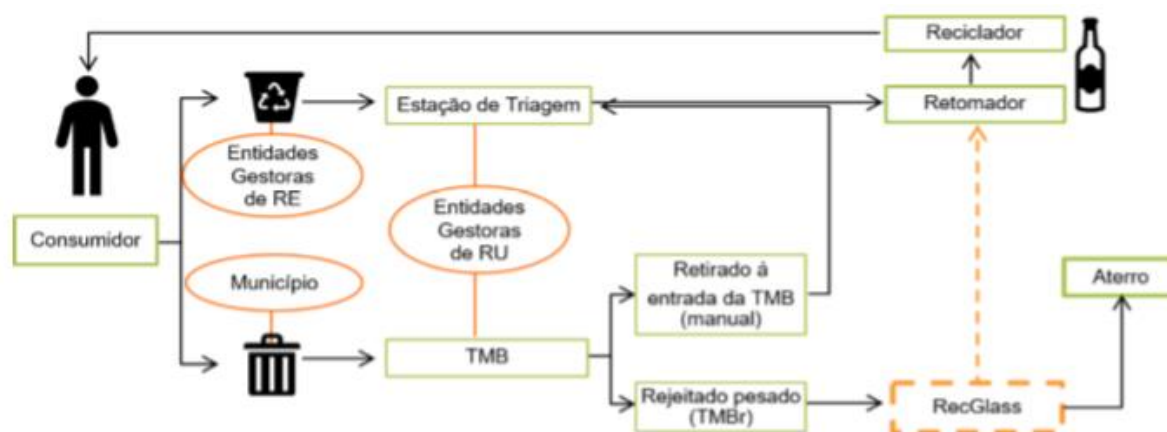


Figura 10: Ciclo de vida do Vidro de Embalagem com processo RecGlass (fonte: Castel-branc, 2019)

Como é possível observar, se a embalagem for depositada em ecoponto, esta acaba armazenada numa estação de triagem e é diretamente encaminhada para o retomador com fim a ser reciclada. Se a embalagem é colocada em contentores indiferenciados passará pelos processos intrínsecos da TMB e terá a possibilidade de ser retirado manualmente e ser encaminhado para a estação de triagem. O outro fluxo passível de ser recuperado através deste projeto recai na recuperação do fluxo de rejeitado pesado, onde se encontra o vidro que não foi recuperado a montante no processo da TMB. O processo de recuperação eficaz deste material é possível através da passagem por um sistema capaz de o recuperar, estando incluído o equipamento RecGlass, permitindo separar o rejeitado sem fim para reutilização – que será depositado em aterro – do vidro recuperado. Este vidro é de seguida encaminhado para retomadores – como por exemplo a Maltha Glass Recycling Portugal –, que têm a função de passar o material por uma sequência de processos, de modo a assegurar que este se encontra nas condições ideais para ser reciclado, sendo depois transportado para o cliente final.

Em Portugal, muitas das recicladoras recorrem a casco de vidro estrangeiro para dar vazão às suas necessidades de produção, com fim a gerar receitas com a venda do mesmo em leilões organizados

pelas entidades gestoras dos resíduos de embalagem. Enquanto Portugal importa para fazer face às despesas de funcionamento do sistema de gestão de resíduos de embalagem, noutros países europeus regista-se precisamente o contrário, ou seja, as entidades pagam para exportar o produto, de forma a reduzir a necessidade de providenciar tratamento e espaço de aterro para esse produto. Isto mostra que, do ponto de vista das recicladoras, a obtenção de uma maior quantidade de vidro em Portugal também é atrativa.

## 2.4. Caracterização do Projeto Mobile-Pro-U

Como descrito anteriormente, o projeto Mobile-Pro-U pretende alterar a tendência de incumprimento na matéria de reciclagem de vidro em Portugal. O projeto divide-se em três tarefas interdependentes (ver Figura 11), findas as quais se espera obter informação suficiente para tomar uma decisão em relação ao *go/no go* do investimento da SPV nas unidades de recuperação de vidro.

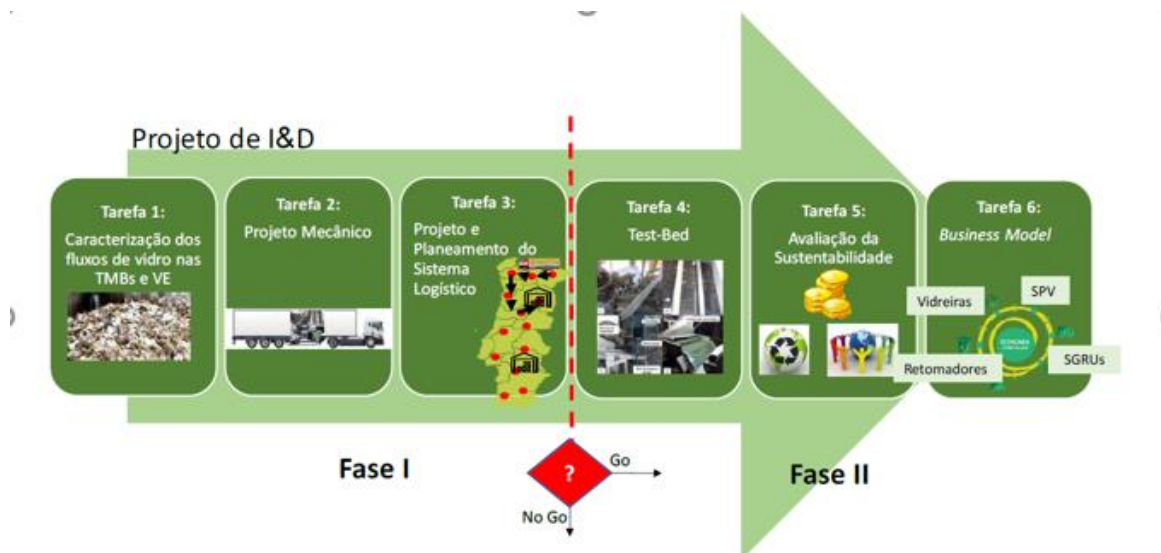


Figura 11: Organização das tarefas no Projeto Mobile Pro U (Fase I e Fase II)

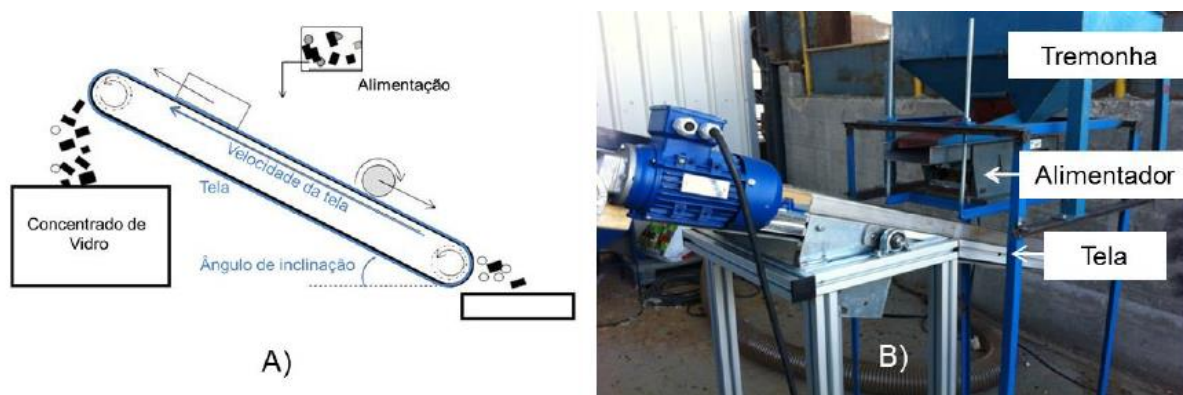
### 2.4.1. Tarefa 1

A primeira fase do projeto tem o objetivo de caracterizar os fluxos de rejeitado pesado das TMBs. Esta caracterização foi feita em laboratório, onde foi analisado TMBr das várias instalações. Não foi apenas estudado o fluxo de uma TMB porque dependendo das estações e das suas localizações, o TMBr nelas presente terá composições diferentes devido às diferentes origens dos seus fluxos e às diferentes formas de tratamento utilizadas (por exemplo, algumas instalações funcionam com um processo seco em toda a linha, enquanto outras têm um processo húmido).

Deste modo, foi possível determinar a percentagem de vidro presente no rejeitado pesado de cada TMB visitada, que conseqüentemente possibilita que a quantidade de vidro pertencente nessas instalações seja determinada. Outro valor determinado com a caracterização destes fluxos foi a percentagem de TMBr que se encontra na fração granulométrica de 6 a 16 milímetros de diâmetro. A obtenção desta percentagem é relevante, visto que a tecnologia RecGlass, utilizada nos diagramas de recuperação de vidro, apenas processa frações neste intervalo.

## RecGlass

Para a obtenção do casco de vidro do rejeitado pesado, é necessário que o TMBr seja processado por um triador ótico – este opera através de processos de detecção ótica e remoção por sopro, conseguindo assim retirar o vidro presente nestes fluxos. O obstáculo à recuperação de vidro de boa qualidade prende-se com o facto de a remoção por sopro, processo onde é feita a separação de inertes do TMBr (na sua maioria, pedras), ser pouco eficaz devido ao peso e trajetórias imprevisíveis relativas à forma esférica dos contaminantes, como comprovado por Dias (2015). Dado que como referido anteriormente, as especificações técnicas das entidades gestoras de resíduos de embalagem exigem pelo menos 99% de vidro de embalagem nas amostras de casca de vidro (APA, 2018 b), o vidro recuperado nesse processo não é passível de ser reciclado. O RecGlass (RG) permite combater a ineficiência desse processo, removendo do rejeitado pesado as pedras e outros contaminantes que



tenham uma forma esférica/subesférica.

Figura 12: RecGlass, esquema A e foto do protótipo em B (fonte: (Dias, 2015)

Como podemos verificar, ao analisar o esquema A da figura 12, o RG funciona à base da gravidade – o rejeitado pesado, após entrar no tapete inclinado, sofre um processo de separação em que as pedras rodam para baixo dada a sua forma esférica, sendo que o vidro permanece no tapete e fica concentrado num coletor devido à sua forma laminar. O funcionamento ótimo desta máquina foi verificado com partículas entre os 6 e os 16 mm – abaixo de 6 mm o material deixa de ter efeito para retoma, e até 16 mm atingiu-se entre 98% a 99% de conteúdo de vidro de embalagem nas amostras caracterizadas na Tarefa 1. Esta tecnologia pode ser considerada então um equipamento chave para a obtenção de vidro de qualidade proveniente do rejeitado pesado, e será incluído nos diagramas concebidos para este projeto.

## 2.4.2. Tarefa 2

O trabalho realizado na Tarefa 2 do projeto tem como objetivo conceber, desenvolver e realizar o projeto mecânico de uma unidade móvel de processamento (UMP), que será utilizada para transportar diagramas de recuperação de vidro (DRV) necessários para o processamento do TMBr presente nas estações TMBs espalhadas pelo país. A sequência de processos (com exclusão do processo RecGlass e de outros processos intermédios) é similar à efetuada pelos retomadores para a obtenção do vidro. Após este tratamento, representado na Figura 13, o vidro é sujeito a um controlo de qualidade no qual

se analisa o grau de contaminação, e é de seguida vendido e deslocado ao reciclador caso esteja conforme.

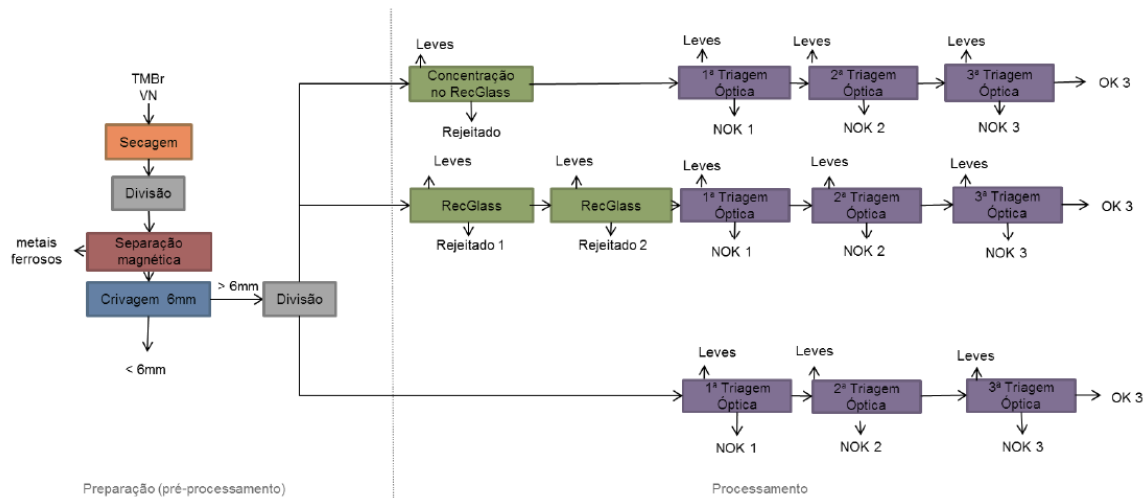


Figura 13: Diagrama associado ao equipamento RecGlass (fonte: (Dias,2015))

A disposição dos processos de recuperação de vidro pode ser dividida em duas fases distintas: pré-processamento ou preparação, onde o rejeitado é tratado de modo a estar devidamente preparado para ser processado; e processamento, onde são realizadas as operações necessárias para a obtenção do vidro. Abaixo encontram-se os processos associados a estas fases e as suas funções.

### Pré-processamento

- Secagem, para redução do teor de humidade da alimentação;
- Separação magnética, para remoção de contaminação metálica ferromagnética;
- Crivagem, para eliminação de frações de rejeitado pesado com calibre granulométrico inferior a 6mm e superior a 16mm.

### Processamento

- RecGlass, para certificar a remoção eficaz dos inertes, no qual o mesmo rejeitado passado é processado por duas vezes;
- Triagem óptica, para obter o casco de vidro pretendido, sendo que exige que sejam realizadas três passagens pelo triador ótico (TO), certificando assim a sua qualidade.

Estando a UMP limitada às dimensões de um contentor ISO de 40 pés e sabendo que, até à data, todos os equipamentos a implementar são de natureza industrial e alguns não estão disponíveis no mercado com capacidades de processamento adequadas a pequena escala (como por exemplo os equipamentos para secagem e separação magnética, que terão de estar presentes nas TMBs) concluiu-se que a integração de todas as componentes da Figura 13 na UMP é fisicamente impossível. Optou-se então por criar unidades móveis capazes de realizar a fase de processamento, deixando a fase de pré-processamento localizada nas TMBs. Os camiões apresentados na figura 14 ilustram as duas opções estabelecidas referentes à fase de processamento do diagrama móvel.

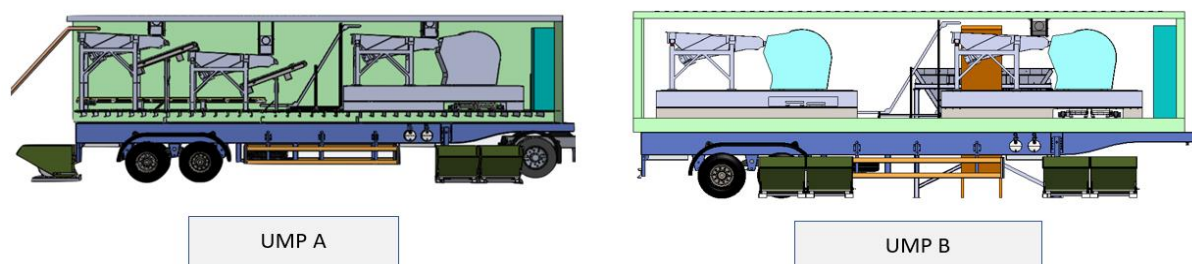


Figura 14: UMPs concebidas para recuperação de vidro

A UMP A é constituída por dois RG e um TO e a sua capacidade de processamento estimada é de 5.33 toneladas por hora. Esta capacidade é limitada pela passagem no triador ótico, sendo este o *bottleneck* do sistema, que se trata de um equipamento com um preço consideravelmente maior que os restantes, dada a complexidade da sua função. A UMP B é constituída por dois TOs, o que possibilita que a capacidade de processamento do diagrama seja duplicada para 10.66 toneladas por hora. Dado que o equipamento RecGlass não é pequeno o suficiente para ser introduzido nesta unidade conjuntamente com os dois triadores óticos, este terá de estar presente nas estações de tratamento mecânico biológico.

O investimento necessário para a o desenvolvimento das unidades móveis de processamento e para o equipamento de suporte necessário para introduzir o rejeitado pesado nos diagramas - utilizado nas TMBs e comum a todos os diagramas estudados - está apresentada na Tabela 2, onde estão referidas também as fontes dos valores.

Tabela 2: Custo do investimento nas unidades móveis e em material de apoio às TMBs

UMP A (Arrais, 2019)		UMP B (Batista, 2019)	
Descrição	Valor	Descrição	Valor
Triador Ótico	215 000 €	Triador Ótico (2)	430 000 €
Contentor e outros materiais	16 000 €	Contentor	11 000 €
Telas transportadoras (7)	29 500 €	Telas transportadoras (2)	20 000 €
Veículo trator	100 000 €	Veículo trator	100 000 €
Semirreboque	23 500 €	Semirreboque	23 500 €
RecGlass (2)	30 000 €	<b>Total</b>	<b>584 500 €</b>
<b>Total</b>	<b>413 000 €</b>	<b>Equipamento Suporte na TMB UMP B</b>	
<b>Equipamento Suporte na TMB UMP A</b>		Tremonha	10 000 €
Tremonha	10 000 €	Contentor de retenção (3)	3 600 €
Contentor de retenção (3)	3 600 €	Sistema aspiração	45 000 €
Sistema aspiração	45 000 €	Tela transportadora	4 400 €
Tela transportadora	4 400 €	RecGlass (2)	4 400 €
<b>Total</b>	<b>63 000 €</b>	<b>Total</b>	<b>93 000 €</b>
<b>Capacidade de Processamento da UMP A</b>		<b>Capacidade de Processamento da UMP B</b>	
$\dot{M} = 5.33 \text{ ton/h}$		$\dot{M} = 10.66 \text{ ton/h}$	

### 2.4.3. Tarefa 3

Esta última tarefa procura planear o sistema logístico associado à implementação das unidades móveis descritas na Tarefa 2 e de unidades fixas concebidas para o mesmo propósito. O trabalho presente encontra-se inserido nesta fase, podendo ser interpretado como a continuação do estudo iniciado por Castel-branc (2019), no qual foi projetado um sistema logístico com diagramas de recuperação de vidro considerando bases fixas instaladas nas TMBs, denominado de sistema fixo. O estudo referido foi analisado com recurso a um modelo matemático, desenvolvido e implementado no software GAMS, que permite maximizar o VAL do investimento de todo o projeto para um horizonte temporal de 10 anos. Os valores de investimento no diagrama fixo estudado encontram-se indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Custo de investimento no diagrama fixo (Adaptado de Castel-branc, 2019)

Variável	Descrição	Valor	Descrição
<b>Custo Diagrama</b>	Triador Ótico	215 000 €	Retirado de <i>Dias</i> (2015)
	RecGlass	30 000 €	2 RecGlass
<b>Custo Projeto + Material de Suporte na TMB</b>	Material Suporte	63 000 €	Inclui: tremonha, contentor de retenção, sistema de aspiração e telas transportadoras
	Projeto	200 000 €	Inclui: Projeto de obra, instalação elétrica, construção civil e expansão do armazém
<b>Custo de Investimento Total = 508 000 €</b>			

Neste estudo foi realizada uma análise entre um cenário descentralizado e um cenário otimizado. O primeiro estuda a situação onde cada TMB tem instalado pelo menos um diagrama de recuperação de vidro, independentemente da quantidade de rejeitado pesado a processar. O segundo considera quais as localizações ótimas para processar, sendo naturalmente o cenário que atinge melhores resultados. As duas análises têm por base a maximização do valor atualizado líquido (VAL). Adicionalmente, foram estudados os seguintes subcenários:

1. As TMBs são consideradas na sua totalidade (18) ou apenas consideradas as 9 maiores;
2. A quantidade de TMBr processado é livre (o modelo escolhe a quantidade de rejeitado tendo em conta a viabilidade económica) ou total (obriga a que todo o rejeitado seja processado);
3. A percentagem de vidro ao longo do horizonte temporal é constante ou a percentagem decresce ao longo dos anos;
4. A separação granulométrica é efetuada (as TMBs realizam este processo e enviam apenas a fração de 6 a 16mm de diâmetro) ou não é realizada (as TMBs enviam todo o rejeitado pesado para o processamento independentemente da sua fração).

O modelo criado define o número de unidades fixas a instalar, a sua localização e o seu dimensionamento em termos de capacidade de processamento. A tabela 4 regista os dados relevantes do cenário considerado mais realista e que atinge um VAL positivo, na medida em que assume que a percentagem de vidro presente no TMBr irá decrescer ao longo dos anos e que as TMBs não são capazes ou não estão dispostas a efetuar a separação granulométrica.

Tabela 4: Resultados do cenário selecionado referente ao sistema fixo

<b>Unidades fixas instaladas</b>	2
<b>Diagramas instalados</b>	4
<b>Capacidade Total de Processamento</b>	84,5k ton/ano
<b>Investimento total</b>	1,8m €
<b>Casco de vidro recuperado</b>	21600 ton
<b>VAL do projeto</b>	2500k €

De uma análise preliminar realizada também por Castel-branc (2019) foi concluído que um sistema puramente móvel (no qual apenas as UMPs ficariam encarregues de processar o vidro das instalações) não faria sentido, visto que o sistema era convertido num sistema fixo, pois as UMPs ficariam essencialmente paradas em muitas das TMBs pela dificuldade de dar vazão à quantidade de TMBr a processar. Um dos pressupostos tomados nesta primeira análise foi que os intervalos de análise considerados eram anuais. Estes intervalos não se mostram eficazes, já que implicava que cada unidade móvel só poderia ter a oportunidade de se movimentar para outra TMB após passar um ano. Dado que o rejeitado nas instalações seria novamente produzido e introduzido nos diagramas, a unidade móvel continuava a processar no mesmo local, atuando assim como um diagrama fixo.

Será lógico afirmar que quanto maior for a fragmentação dos intervalos de tempo a analisar durante o horizonte temporal, mais otimizada será a solução do sistema, já que a unidade móvel conseguirá deslocar-se a outras instalações de forma mais ágil após se encontrar “livre”, ou seja, quando não tiver mais produto para processar na localização em que está. O obstáculo a uma análise com intervalos de tempo bastante reduzidos, como por exemplo a cada minuto ou hora, está no tempo que o modelo demora a simular, já que o incremento destes intervalos irá exigir um número de cálculos superior. Isto obriga à criação de um equilíbrio entre a otimização e o tempo computacional, no qual se determine um intervalo de análise pequeno o suficiente para se registar mudanças nas deslocações das unidades móveis, mas também grande o suficiente para não ter um tempo computacional exageradamente demorado. A determinação desse período temporal é essencial para a integração das decisões do número e tipo de unidade móveis a utilizar num sistema que já inclui diagramas fixos, chegando assim a um sistema logístico misto.

Pode-se concluir que o objetivo principal do trabalho presente é de desenvolver e aplicar técnicas de otimização para apoiar os processos de planeamento e desenho logístico de um sistema de recuperação de vidro de embalagem, considerando unidades fixas e móveis. As tarefas antecedentes revelam-se fulcrais na aquisição de dados importantes para a sua aplicação em contexto real.



## **2.5. Caracterização do Problema**

Os investimentos na modernização de equipamentos de triagem e no reforço das redes de recolha seletiva em Portugal continuam a ser insuficientes para atingir os valores de reutilização e reciclagem desejados, já que o país regista valores de cerca de 50%, nesta área, sendo que está longe dos 60% preconizados para 2020 (APA, 2018 a). A falta de casco de vidro de qualidade, como consequência dos valores baixos de reciclagem de vidro, representa uma oportunidade, visto que os retomadores não necessitariam de recorrer tanto à importação destes recursos.

O projeto Mobile-Pro-U vem no sentido de ajudar na criação de uma solução viável que permita aumentar a taxa de reciclagem de vidro, e, conseqüentemente, da reutilização e reciclagem de RUs. O problema principal refere-se à identificação da forma mais benéfica de aplicar as ferramentas propostas, que está implicitamente relacionado com a criação do sistema logístico que possibilite que a solução de recuperação de vidro seja aplicada da maneira mais correta e financeiramente mais proveitosa. Uma análise efetuada por Castel-branc (2019) permitiu provar a viabilidade económica da instalação de diagramas de recuperação de vidro (DRV) nas instalações TMB tendo em conta bases fixas. O que ainda não foi explorado foi a integração destes DRVs em unidades móveis, e analisar se é economicamente viável a utilização de sistemas de recuperação de vidro utilizando uma integração mista, onde é recuperado vidro de diagramas de base fixa e de base móvel. Para tal, a obtenção de um período temporal de análise ótimo e a integração de parâmetros incertos na ferramenta de apoio a desenvolver revelam-se importantes para a obtenção de um grau de certeza elevado nos resultados obtidos.

A viabilidade da configuração mista será determinada pelo Valor Atualizado Líquido do projeto, num horizonte temporal de 10 anos. Caso se prove que o projeto é economicamente viável, a sua aplicação pode ser explorada, valorizando potencialmente uma maior quantidade de vidro, já que esta solução não interfere com a recuperação de outros fluxos, como por exemplo, da recolha seletiva.

## **2.6. Conclusões do Capítulo**

Neste capítulo foi efetuada uma contextualização do mercado dos resíduos urbanos, com particular atenção ao vidro de embalagem. Aqui se verificou que, em 2018, de acordo com dados da Entidade Gestora Sociedade Ponto Verde, que detém grande parte do mercado de resíduos de embalagem de vidro em Portugal, registaram-se valores de reciclagem de vidro a rondar os 50%, que estão bastante abaixo das metas de 60% previstas para 2020 para os Estados-Membros da União Europeia, e ainda mais longínquos se tivermos em conta os 70% e 75% necessários atingir para 2025 e 2030 respetivamente. O projeto Mobile-Pro-U apresentado pretende alterar a tendência de incumprimento na matéria desta reciclagem em Portugal, através da recuperação de vidro no fluxo de rejeitado pesado existente nas unidades de Tratamento Mecânico-Biológico. O objetivo será estabelecer decisões referentes ao planeamento logístico de um sistema misto que inclui diagramas de recuperação de vidro com base fixa e base móvel, utilizando como ferramenta de suporte um modelo matemático de otimização, que será apresentado neste trabalho.

### 3. Revisão de Literatura

Este capítulo representa uma revisão dos tópicos e trabalhos com possíveis abordagens a implementar no projeto. Estes são considerados relevantes para a problemática apresentada no capítulo anterior. Na secção 3.1 apresenta-se o conceito de logística e de algumas das suas vertentes, e a evolução da sua utilização. A secção 3.2. refere problemas comuns na recolha e tratamento de resíduos urbanos e a sua ligação com o Projeto Mobile-Pro-U. A secção 3.3. descreve o tema do desenho da rede de distribuição e de *Facility Location Problems* e, seguidamente, na unidade 3.4, apresentam-se estudos relacionados com as unidades móveis, como *Vehicle Routing Problems* e *Location Routing Problems*. A secção 3.5. apresenta propostas de inclusão de incerteza nos modelos de localização e de roteamento e, por fim, a secção 3.6. descreve as informações mais relevantes e as conclusões retiradas deste capítulo.

#### 3.1. Logística

As definições de logística e de gestão de cadeia de abastecimentos estão diretamente relacionadas. Uma cadeia de abastecimento é um processo dinâmico que inclui o fluxo contínuo de materiais, fundos e informações em várias áreas funcionais entre os membros da cadeia (Jain *et al.*, 2009). Considerando o facto de que a cadeia de abastecimentos contempla o produto desde o processamento inicial de matérias-primas até a entrega ao cliente final, o foco nela é considerado um passo em direção à adoção e desenvolvimento mais amplos da sustentabilidade (Ashby *et al.*, 2012). O conceito da gestão de cadeia de abastecimentos (GCA) foi desenvolvido no início dos anos 80 por consultores (Oliver, R. K. *et al.*, 1992), que interpretavam a gestão de cadeia de abastecimentos como uma logística fora da empresa de modo a incluir clientes e fornecedores. O entendimento de gestão de cadeias de abastecimento evoluiu, deixando de representar apenas a integração da logística na cadeia de abastecimentos, e passando a ser vista como a integração e gestão dos principais processos de negócios na cadeia de abastecimentos (Cooper, M. C. *et al.*, 1997). A maior organização mundial de profissionais e académicos da área, *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP), refere que “A gestão da cadeia de abastecimento envolve o planeamento e a gestão de todas as actividades de compra, aprovisionamento e todas as actividades logísticas” (CSCMP 2013, p.187). Estas atividades envolvem a coordenação e colaboração entre parceiros de cadeia ou de canal, sejam eles fornecedores, intermediários, prestadores de serviços logísticos ou clientes. Em essência, integram as componentes de abastecimento e procura dentro e entre empresas. Quanto à definição de logística a mesma organização declara que esta é apenas uma parte da GCA: “Logística ou gestão logística é a parte da cadeia de abastecimento que é responsável por planear, implementar e controlar o eficiente e eficaz fluxo direto e inverso e as operações de armazenagem de bens, serviços e informação relacionada entre o ponto de origem e o ponto de consumo de forma a ir ao encontro das necessidades dos clientes” (CSCMP 2013, p.117). No fundo, pode-se definir gestão logística através de três grandes variáveis - o tempo, o custo e a qualidade do serviço - e quatro objetivos principais - entregar os produtos certos, na quantidade certa, no tempo certo e com o mínimo custo (Stock e Lambert, 2001).

Conceitos como logística inversa têm atraído cada vez mais o interesse de empresas e profissionais, quer seja por questões legislativas, económicas, sociais ou éticas. Esta pretende auxiliar a enfrentar o desafio geral da sustentabilidade (Montreuil B, 2011), sendo que pode ser considerada como “o processo de planeamento, implementação e controlo do fluxo eficiente e económico de matérias-primas, materiais em processamento, produtos acabados e informações, do ponto de consumo até ao ponto de recuperação de valor ou eliminação adequada” (D.S. Rogers & Tibben-Lembke 2001, p.130). A esta definição, o *European Group on Reverse Logistics* acrescenta que a logística inversa também abrange a gestão de produtos que se encontram no local de produção ou num ponto de distribuição, ao invés de apenas produtos que se encontram no ponto de consumo, existindo então o potencial de usar produtos e embalagens devolvidos pelo cliente para gerar mais valor (em vez de descartar os materiais em aterro). Logística inversa e gestão de resíduos referem-se a dois conceitos relacionados, embora algo diferentes, já que este último apenas se refere à recolha e processamento de produtos para os quais não há uma nova utilização. A logística inversa concentra-se em fluxos em que há algum valor a ser recuperado, sendo que os outputs do sistema entram de novo na cadeia de abastecimento (Brito & Dekker, 2002).

Outra vertente logística que tem recebido interesse considerável atualmente é a logística 4.0, que se foca na otimização da logística direta e inversa, através do uso de sistemas inteligentes embutidos em softwares e bancos de dados, a partir dos quais as informações relevantes são fornecidas e compartilhadas por sistemas de *Internet of Things* (IoT), acabando por alcançar através destes processos automatizados uma maior eficiência (Barreto, Amaral & Pereira, 2017). Este termo combina os usos já conhecidos da logística com as inovações e aplicações adicionadas por *cyber-physical systems*, que são sistemas físicos cujas operações podem ser monitorizadas, coordenadas, controladas e integradas por um sistema de computação e comunicação (Szymańska *et al.*, 2017). A utilização destes sistemas reduz a complexidade da gestão logística, possibilitando um maior controlo e flexibilidade no sistema – o que geralmente acaba por reduzir os custos de transporte. Embora vantajoso, podemos identificar alguns entraves para sua implementação, tais como: i) custo elevado de implementação; ii) requisitos rigorosos aplicáveis à implementação avançada de hardware, implementação de métodos de gestão de processos orientados (como, *Just-in-Time* ou *Lean Management*) e implementação de tecnologias da Indústria 4.0; iii) novidade da abordagem e baixo nível de consciencialização das empresas (Szymańska *et al.*, 2017).

### **3.2. Recolha e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos**

De acordo com Or e Curi (1993), a atividade de recolha representa aproximadamente 80% de todos os custos associados ao tratamento e eliminação de resíduos. Daí se infere que a escolha da localização e das rotas a efetuar para o sistema de resíduos urbanos sejam bastante importantes na ótica de redução de custos. Embora o projeto apresentado esteja mais relacionado com o tratamento do que a própria recolha destes resíduos, a lógica aplicada acaba por ser bastante semelhante dada as suas características. Beliën, J., *et al* (2014) realizaram uma revisão literária acerca destes problemas, tendo-os dividido em várias temáticas, sendo que se destacam as seguintes:

- Tipo de resíduo – os resíduos podem ser domésticos ou provenientes de clientes industriais, que produzem quantidades de resíduos maiores, requerendo assim um sistema de recolha diferente; também podem ser problemas relacionados com materiais recicláveis – como o caso deste trabalho – que têm vindo a receber mais atenção dada a crescente preocupação ambiental e os escassos recursos muitas vezes possibilitados; finalmente, podem ser divididos em resíduos perigosos e não perigosos;
- Dimensão do problema – as recolhas podem ser avaliadas numa perspetiva macro, ou seja, verificando toda a gestão de resíduos desde a geração destes até ao seu tratamento; ou numa perspetiva micro, onde o problema centra-se na localização e atribuição de diferentes locais de processamento e eliminação de resíduos e ao estabelecimento de rotas para os veículos de recolha (*Tin et al.1995*). No caso do projeto Mobile-Pro-U, estes últimos serão o foco de estudo;
- Número de recursos e instalações a considerar – os recursos, no caso destes problemas, são geralmente os veículos, sendo que a frota a utilizar pode ser homogénea caso os veículos sejam apenas de um tipo ou heterogénea, caso existam diferentes características para cada um; os problemas podem também ser caracterizados pela existência de uma só central de tratamento ou de várias instalações. Do capítulo 2 é possível concluir que o problema do projeto será caracterizado pela utilização de uma frota com 2 tipos de veículos, que poderão ser alocados a várias instalações, que também têm a hipótese de processar;
- Incerteza do problema – os problemas podem ainda ser identificados como determinísticos – no qual o modelo é definido tendo em conta estimativas de valor fixo ou valores médios – ou estocásticos – que incorporam a incerteza na formulação do modelo. No contexto real, os problemas de recolha de resíduos estão quase sempre sujeitos a incerteza, que acaba muitas vezes por estar ligada à geração de resíduos. No caso específico deste trabalho, a incerteza acaba por estar relacionada com a quantidade de vidro presente na matéria a processar;
- Objeto de estudo - a minimização dos custos e do tempo de recolha são os objetos mais frequentemente analisados, sendo que também existe literatura concentrada nas distâncias entre rotas, definindo os custos como não prioritários. Outros modelos optam pela utilização de modelos matemáticos multiobjectivo, que se verifica em situações em que a definição do problema é mais complexa. No caso específico deste trabalho, embora seja claro o propósito de recuperação do vidro de embalagem, pode-se definir que a viabilidade económica do projeto será o fator principal para a progressão do mesmo. Por muito que se reduza os custos associados aos processos de recuperação de vidro, caso estes não registem receitas que justifiquem o seu investimento, será considerado que o projeto não reúne as condições para ser realizado.

Os pontos referidos nesta secção permitem fazer o enquadramento do trabalho a efetuar e identificar quais as metodologias necessárias ao desenvolvimento do mesmo. Estas serão discutidas mais detalhadamente de seguida.

### 3.3. Desenho da Rede de Distribuição

Um dos grandes desafios a nível logístico numa cadeia de abastecimentos está relacionado com o desenho da rede de distribuição, no qual é determinado o número, localização, tamanho das instalações necessárias, atribuição de pontos de venda aos armazéns e principais decisões de fornecimento (Simchi-Levi *et al*, 2007). Estas decisões da configuração física da cadeia de abastecimentos têm um carácter estratégico, já que se considera que os altos custos associados à aquisição de propriedades e construção de instalações, tornam os projetos de localização em programas de longo prazo, pois geralmente só assim é que poderão tornar-se lucrativos (Owen, S. H. & Daskin, 1998). O principal objetivo do desenho da rede de distribuição é equilibrar o nível de serviço com os custos de transportes, custos das instalações, recursos humanos, inventário e sistemas de informação (Carvalho *et al*, 2017). As componentes de maior relevância são o mapeamento, que permite a visualização da cadeia de abastecimento e das possíveis soluções; os dados, que especificam os custos associados à cadeia e quantificam financeiramente as diferentes propostas; e a utilização de técnicas de otimização (Simchi-Levi *et al*, 2007), que serão discutidas de seguida.

Na maior parte dos casos, a escolha das localizações já não se faz apenas com base em distâncias, mas com muitos outros fatores a serem considerados, sendo que muitas das vezes recorre-se a modelos de programação linear, em que a decisão de abrir ou utilizar um armazém num dado local é definida através de variáveis binárias (Akkerman *et al.*, 2010). A literatura relativa a problemas de localização é extensa devido à elevada complexidade e às diferentes particularidades de cada empresa, sendo por isso estudado e aplicado em vários casos. Os modelos de *Facility Location Problem*, (FLP) envolvem um conjunto de clientes e um conjunto de localizações possíveis para as instalações que servirão o cliente. O desafio é decidir onde colocar as instalações e como alocar os clientes e a sua procura às instalações em funcionamento (Owen & Daskin, 1998). Os modelos apresentados nesta secção pretendem responder a perguntas relativas ao número de instalações necessárias e à localização e dimensão das mesmas, tendo em consideração o trade-off entre o número de instalações existentes e os custos que são incorridos. Estes modelos de localização podem ser classificados de várias formas (Klose & Drexl, 2005):

- Modelos estáticos (*inputs* não variam ao longo do tempo) ou dinâmicos (*inputs* variam ao longo do tempo);
- Modelos determinísticos (*inputs* são certos) ou probabilísticos (incerteza quanto aos *inputs*);
- Modelos contínuos (localização ótima pode ser em qualquer posição do espaço) ou discretos (localizações têm de ser selecionadas de um conjunto pré-definido de pontos);
- Número de instalações definido à *priori* ou à *posteriori*;
- Modelos de um só produto ou de múltiplos produtos.

Estes modelos podem ainda ser divididos em *Single Facility Location*, onde se pretende encontrar a localização ótima de uma só instalação, e em *Multiple Facility Location*, determinando múltiplas localizações ótimas, sendo que são geralmente resolvidos utilizando três diferentes métodos (Rushton *et al.*, 2014): 1) algoritmos matemáticos, que utilizam técnicas de programação linear para atingir uma solução ótima exata. As componentes principais são os objetivos (o que se pretende otimizar no

programa matemático), as restrições (as regras necessárias para uma solução ser considerada legítima), variáveis de decisão (decisões tomadas pelo modelo) e dados (inputs do modelo); 2) heurísticas, que procuram atingir uma solução de boa qualidade, mas em que não é garantida a solução ótima, dado que utiliza critérios de rejeição, reduzindo assim o tempo de processamento e possibilitando que se analisem problemas com instâncias maiores; 3) simulação, que representa geralmente sistemas com elevada variabilidade e analisa com mais facilidade o seu comportamento a partir de várias repetições do processo.

### ***Single Facility Location Problem***

O método mais simples e mais usado para determinar a localização ótima de apenas uma instalação é o método gravítico (Ballou, 2004). Trata-se de um modelo contínuo que localiza a instalação desejada tendo apenas por base os custos de transporte, coordenadas de várias localizações pré-definidas e os volumes de transporte de cada ponto. O conjunto de localizações, que representa fornecedores ou mercados, pretende encontrar as coordenadas do centro de gravidade que minimizam o custo total. Este é calculado através da multiplicação do volume transportado pela distância ponderada e pelo custo de transporte por unidade de distância e unidade transportada.

Um dos exemplos de casos de aplicação deste método encontra-se em Ballou (2004), que o aplicou a uma empresa petrolífera para localizar a posição ideal da sua unidade de recolha de petróleo, tendo em conta que recebia o petróleo extraído de várias plataformas através de um sistema de canalização. Como já referido, este método é benéfico pela sua simplicidade e é muitas das vezes utilizado como ponto de partida para tomada de decisão, visto que remove complexidade ao modelo através da redução do espaço de pesquisa, eliminando possíveis localizações iniciais. Embora não se obtenham soluções ótimas, as soluções são de boa qualidade, especialmente se houver um número elevado de pontos no problema (<30) e se o volume de transporte de nenhum ponto for de grande proporção quando comparado com o volume total. As suas limitações prendem-se pelo facto de ser uma abordagem estática e não dinâmica, dos custos de transporte serem lineares, no sentido em que não consideram a curvatura da Terra, das direcções do movimento serem assumidas como linhas retas e do facto do ponto determinado poder ser localizado num ponto não viável - como por exemplo, caso o centro gravítico seja localizado num lago (Drezner e Drezner, 2006).

### ***Multiple Facility Location Problem***

Na maioria das cadeias de abastecimento, as decisões de localização envolvem a implementação de mais que uma instalação. Numa abordagem contínua existem limitações quanto à implementação de múltiplas instalações, referentes à forma de determinar vários pontos gravíticos ou de como determinar um número mínimo de centros gravíticos, sendo que para este tipo de problemas usualmente são utilizadas abordagens discretas com um conjunto de possibilidades pré-determinadas, sendo que o objetivo passa por minimizar as distâncias e o número de instalações (Ballou, 2004).

Dois modelos discretos comuns são o *p-median* e o *p-centre*. O objetivo do primeiro é localizar *p* instalações, de modo a que a soma das distâncias de cada ponto de procura até à instalação mais próxima (distâncias médias) seja minimizada, conseguindo assim reduzir os custos de transporte

(Senne *et al*, 2005); o segundo pretende localizar  $p$  instalações que minimizem as distâncias máximas entre cada ponto de procura e a instalação mais próxima, facilitando assim a acessibilidade a todos os locais do sistema (Drezner, Z., 1984). Estes problemas funcionam como base para muitos dos problemas de localização discretos como por exemplo o *Uncapacitated Fixed Charge Problem* que é formulado através da adição de um custo fixo à função objetivo do  $p$ -*median*, removendo também a restrição que determina o número  $p$  de instalações a localizar. O objetivo passa por minimizar os custos totais do sistema, tendo em conta não só os valores de custo de transporte, mas também os custos de construção da localização. O *Fixed Charge Facility Location Problem* é outra vertente, que adicionalmente inclui custos fixos associados a cada localização instalada.

Referente ao tópico de gestão de resíduos, destaca-se um caso real realizado por Rathore e Sarmah (2019), no qual foi proposto uma vertente do *Facility Location Problem* utilizando um modelo *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) para encontrar a localização ótima para as estações de transferência de resíduos, tendo em conta a sua viabilidade económica. Para tal, foram utilizados sistema de informação geográfica para armazenar inputs necessários ao modelo. O problema tem em conta diferentes cenários, considerando a separação de resíduos pelo consumidor final e a criação de um planeamento logístico assumindo que cada tipo de resíduos será encaminhado para estações de transferências específicas, ou não considerando a separação de resíduos, sendo que, conseqüentemente, neste caso, as estações de transferência recebem todo o tipo de resíduos. Estes cenários têm repercussões em termos dos produtos que se recebem, da sua quantidade e da sua frequência. Diretamente ligado ao presente projeto, pode-se referir o modelo de localização e dimensionamento para o estudo de um sistema de ponto fixo referente à recuperação do vidro desenvolvido por Castel-branc (2019), no qual o objetivo baseava-se na maximização do VAL, e no qual eram determinados o número de instalações fixas a abrir e a sua localização, o número de diagramas necessário em cada instalação, os fluxos de rejeitado pesado para outras TMBs e para aterro e a quantidade de vidro recuperada.

A utilização de modelos de localização é também explorada em conjunto com outro tipo de problemas, como é o caso do presente projeto. A próxima secção surge da necessidade de representar a componente móvel do sistema logístico.

### **3.4. Sistemas Móveis**

Uma unidade móvel (também denominada de *mobile facility*) pode ser utilizada num variado leque de contextos, sendo normalmente usadas para fornecer serviços a áreas urbanas densas, onde o custo de estabelecer uma instalação fixa permanente é muito elevado, ou onde a procura por serviços é esporádica. Dado que a procura de um serviço num determinado local muda com o tempo, as unidades móveis permitem fornecer um serviço estacionário podendo ser transferidas de local para local de seguida. Halper, R., & Raghavan, S. (2011) estudam o problema de implementar uma frota limitada de unidades móveis quando a procura pelo serviço que estes fornecem muda ao longo do tempo, também denominado *Mobility Facility Routing Problem* (MFRP). O MFRP procura determinar rotas para a frota de instalações móveis determinada, de modo a maximizar a quantidade de procura atendida num horizonte de planeamento de tempo contínuo. O problema apresenta um conjunto discreto de locais

onde uma instalação móvel pode ser posicionada para prestar serviço e um conjunto discreto de pontos que geram procura (podem ser cidades, eventos ou indivíduos). Quando a instalação móvel estiver num determinado local, esta pode atender à procura de um determinado subconjunto de pontos nas proximidades. O MFRP pode ser caracterizado como um FLP, no qual as instalações são de novo implementadas tendo em conta as mudanças na procura provocadas pela passagem do tempo. Trabalhos recentes sobre esta problemática são apresentados por Gil-carrera *et al.* (2019) que estudam a viabilidade de ter unidades móveis a deslocarem-se entre locais de produção de biogás e zonas remotas, em comparação com cenários centralizados, focando-se na análise económica e de Raghavan *et al.* (2019) que apresentam formulações para um problema de *Capacitated Mobile Facility Location Problem* (CMFLP), no qual foram utilizadas heurísticas complexas e se concluiu que o método do *branch-and-price* acaba por ser eficaz quando o rácio de clientes e unidades móveis é pequeno.

Para além das ferramentas já apreendidas em relação a problemas de localização e problemas de unidades móveis, é também necessário definir o planeamento de rotas e o momento no qual cada cliente deve ser visitado. *Vehicle Routing Problems* são considerados de grande relevância, sendo que se trata de um problema enfrentado diariamente por milhares de distribuidores mundial e tem importância económica significativa. A emergência de modelos de otimização de rotas resulta não só de crescentes preocupações das organizações em reduzir os custos de transporte, mas também de impactos negativos das emissões de  $CO_2$  e pressões empresariais em aumentar a eficiência com que os produtos chegam aos clientes (Tseng, 2005). Para o desenvolvimento destes sistemas, é necessária a reunião de informação que permita interpretar quais as melhores estratégias a adotar. Destas informações pode-se destacar: objetivos principais da empresa; custos associados a cada atividade; localização, tempos de entrega e capacidades de clientes e fornecedores; número e capacidade dos veículos; condições físicas dos pontos de distribuição; e recursos humanos - condutores, condições de trabalho, preparação para descarregamento e carregamento de material para o veículo. (Ballou, R.H., 2004).

### 3.4.1. Vehicle Routing Problem

O *Vehicle Routing Problem* (VRP) consiste em encontrar os percursos que permitam a um conjunto de veículos (com uma ou várias localizações iniciais) chegar a um número de pontos geograficamente dispersos. Os percursos deverão satisfazer por completo as necessidades de procura das entidades dessa rota, que inicia e termina no mesmo ponto. Geralmente estes problemas têm como principal objetivo a minimização dos custos totais das rotas, da soma dos custos fixos e variáveis, da distância total percorrida, do número de veículos utilizados ou até mesmo dos impactos ambientais. Por outro lado, a percentagem de utilização dos veículos e dos condutores, o nível de serviço e as prioridades e preferências dos clientes são interpretados como objetos a maximizar em muitos destes casos (Caric & Gold, 2008; Baldacci *et al.*, 2010).

Dantzig e Ramser (1959) introduziram o "*Truck Dispatching Problem*", que consistia na otimização de abastecimento de bombas de gasolina através de uma frota de camiões homogéneos que saíam de uma central, com o intuito de minimizar o custo ou a distância percorrida. Cinco anos depois, Clarke e Wright (1964) generalizaram o problema para um contexto de otimização linear, que é normalmente



encontrado no domínio da logística e transporte e ficou conhecido como o "Vehicle Routing Problem" (VRP). Os modelos atuais, no entanto, são imensamente diferentes dos introduzido por Dantzig e Ramser (1959) e Clarke e Wright (1964), pois cada vez mais visam incorporar a complexidade dos problemas confrontados atualmente, como tempos de viagem variáveis, janelas de tempo para recebimento e entrega, e informações sobre a procura que mudam dinamicamente durante as horas. Dada a sua complexidade computacional, algoritmos exatos são eficientes apenas para pequenas instâncias (Lenstra & Rinnooy Kan, 1981). Heurísticas e metaheurísticas são frequentemente mais adequadas para aplicações práticas, porque os problemas mais adaptados aos desafios de contexto real são consideravelmente maiores em escala (por exemplo, uma empresa pode precisar de fornecer milhares de clientes a partir de dezenas de depósitos com inúmeros veículos e sujeitos a uma variedade de restrições). Dentro do universo de VRP, os mais estudados e mais provavelmente adaptados ao contexto do problema são os seguintes (Braekers et al., 2016; Toth & Vigo, 2002):

Traveling Salesman Problem (TSP): Este trata-se do problema de roteamento mais fundamental e estudado, no qual um vendedor visita um conjunto de cidades (que apenas visita uma vez), voltando a seguir à cidade onde iniciou a rota. Ou seja, dada uma rede com diferentes pontos de procura e possíveis arcos entre eles com as distâncias correspondentes, o objetivo passa por determinar o ciclo entre todos os pontos de modo que a distância percorrida seja a menor possível. O VRP trata-se de um caso específico do TSP. (Applegate, D. L. et al., 2006);

Capacitated VRP (CVRP): O objetivo do CVRP mantém-se igual ao do TSP, mas nesta situação o veículo tem uma capacidade previamente determinada, sendo que esta terá de ser igual ou superior à procura total dos clientes atendidos por esse veículo (Baldacci et al., 2010). É possível estender este problema variando as capacidades, o que resulta no chamado *Heterogeneous Fleet VRP* (HFVRP) ou *Mixed Fleet VRP* (MFVRP);

VRP with Time Windows (VRPTW): Esta vertente pressupõe que as entregas a um determinado cliente devem ocorrer num intervalo de tempo estabelecido. Caso o veículo chegue ao local antes do começo do intervalo de tempo, este deverá esperar até o atingir e só depois pode realizar a operação. O seu objetivo passa por minimizar o número de veículos necessários e as distâncias ou tempos de viagem, e trata-se de um problema utilizado com frequência em problemas de recolha de resíduos (Cordeau, J. F., et al 2000);

Multi-Depot VRP (MDVRP): Neste problema assume-se que vários centros de distribuição estão geograficamente distribuídos entre os clientes (Montoya-Torres et al., 2015). O procedimento engloba a organização de clientes por clusters, sendo cada um deles abordado como VRPs independentes entre si, com os seus próprios veículos e próprio depósito (Tansini et al., 2003). Para além da minimização das distâncias, a minimização do número de veículos face à procura dos clientes também é considerada;

Relativamente à temática da recolha de resíduos, pode-se destacar o trabalho de Ramos et al. (2018), no qual foi estudado um Smart Waste Collection Routing Problem, cujo objetivo é a de redução da incerteza associada ao momento ideal para recolher os contentores do lixo. Deste modo, a recolha torna-se o mais eficiente possível, maximizando o lixo recolhido e minimizando o custo de transporte. O trabalho inclui três abordagens diferentes, sendo a primeira uma abordagem limitada, baseada numa

heurística Cluster First-Route Second, onde é estipulada uma regra de nível de enchimento mínimo, que é acoplado a um CVRP que visa maximizar a quantidade de resíduos recolhidos, minimizando a distância percorrida; e duas abordagens Smart Collection: a primeira através de um modelo matemático que decide quais os contentores e a sequência ótima a realizar tendo em conta a maximização do lucro; e a segunda através de um método heurístico no qual os dias de recolha são obtidos de acordo com o nível de serviço estabelecido, sendo posteriormente aplicado o modelo matemático definido. Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. (2016) também realizaram um trabalho relacionado com a recolha de resíduos, onde propõem a resolução de um VRP integrando uma frota fixa heterogénea e uma atribuição flexível de depósitos de destino. Estão também incluídas várias restrições, tais como períodos de pausa obrigatório (que dependem da hora de início da viagem), capacidades dos veículos e limitações de cada localidade. O problema é modelado como um MILP (Mixed-Integer Linear Programming), sendo que dada a natureza complexa do problema, a sua aplicação só é válida em casos de pequena a média dimensão. Para a resolução de casos mais realistas, é proposta uma heurística multiple neighborhood search, capaz de incluir todas as características dos problemas e das suas restrições.

Os problemas referidos durante este subcapítulo sobre VRP permitem tomar decisões a nível operacional, enquanto que os problemas de localização mencionados anteriormente permitem tomar decisões a nível estratégico. De facto, estas decisões são interdependentes e estudos mostram que o custo geral do sistema pode ser excessivo se forem abordados separadamente (Salhi e Rand, 1989). O modelo apresentado de seguida, permite estudar a combinação destas variantes, sendo possível alcançar uma análise mais ótima que estudando os problemas em separado.

### **3.4.2. Location Routing Problems**

O *Location Routing Problem* (LRP) clássico integra dois tipos de decisões dado um conjunto de potenciais centrais com custos de abertura, uma frota de veículos idênticos e um conjunto de clientes com procuras conhecidas: abrir um subconjunto de centrais (atribuindo clientes a estas) e determinar rotas de veículos, de modo a minimizar o custo total. Algoritmos exatos para o Capacitated LRP (CLRP) são observados utilizando métodos branch-and-cut (Belenguer et al, 2011) e formulações *set-partitioning* (Akca et al, 2009). Estes métodos podem resolver consistentemente instâncias com 50 clientes e 5 a 10 centrais. Caballero, et al (2007) estudam um caso real no qual é necessário localizar um determinado número de instalações de incineração de resíduos sólidos de animais localizados em diferentes cidades. O problema é analisado através de um LRP multi-objetivo com veículos capacitados, restrição de distância máxima e centrais sem capacidade máxima e com custos de abertura, sendo que o método da solução proposto foi uma metaheurística multi-objetivo baseada em tabu search. Asefi, H. et al (2019) apresentam modelos matemáticos e abordagens heurísticas para o LRP associado à gestão de resíduos urbanos, tendo em conta a sua viabilidade económica. Nestes modelos, o número de localizações, no qual estão incluídas estações de transferência, tratamento e aterro, e o roteamento dos veículos do sistema são otimizados. Para resolver este problema foi utilizado um MILP e uma heurística híbrida. Tanto um método como o outro foram capazes de reduzir os custos totais do sistema em cerca de 20%. Samanlioglu, F. (2013) desenvolve também um LRP multi-objetivo, focado na

decisão de localização dos centros de tratamento de resíduos industriais perigosos, no qual são utilizadas diferentes tecnologias. O modelo é resolvido utilizando um algoritmo de formulação linear multiobjectivo e é calculado em CPLEX. Os diferentes tipos de resíduos industriais são encaminhados para os centros de tratamento compatíveis, centros de reciclagem e estações de eliminação. O modelo considera três critérios: minimização do custo total, que inclui o custo total de transporte e o custo fixo de abertura dos centros de tratamento, eliminação e reciclagem; minimização do risco total de transporte, que está relacionado com a exposição da população ao longo das rotas a efetuar; minimização do risco total para a população em redor dos centros de tratamento e eliminação.

### **3.5. Incerteza em Modelos de Localização e Roteamento**

Na sua forma clássica, tanto os problemas de localização (FLP) como os de roteamento (VRP) são problemas estáticos e determinísticos, onde todas as informações são conhecidas com precisão e estão disponíveis antes do início da resolução do problema. Contudo, por natureza, estes são problemas de otimização que lidam com eventos futuros num ambiente que normalmente inclui fontes significativas de incerteza. Quando o horizonte temporal do projeto é consideravelmente elevado (como é o caso do projeto em questão), é de prever que exista uma incerteza acrescida em alguns dos parâmetros do modelo. A inclusão dessa tal imprevisibilidade no modelo permite ter uma análise mais correta dos possíveis cenários e um maior grau de confiança nos valores obtidos (Oyola, J., 2018).

Rosenhead et al. (1972) dividem os ambientes de tomada de decisão em três categorias: (i) certeza; (ii) risco; e (iii) incerteza. Em situações de certeza, todos os parâmetros são determinísticos e conhecidos, enquanto que as situações de risco e incerteza envolvem ambas aleatoriedade. Em situações de risco, existem parâmetros incertos cujos valores são obtidos por distribuições de probabilidade que são conhecidas pelo decisor. Em situações de incerteza, os parâmetros são incertos, e além disso, não se conhece nenhuma informação sobre probabilidades. Os problemas em situações de risco são conhecidos como problemas de otimização estocástica; um objetivo comum é otimizar o valor esperado de alguma função objetiva. Problemas com incerteza são conhecidos como problemas de otimização robustos e tentam muitas vezes otimizar o pior dos desempenhos do sistema (*worst-case performance*). O objetivo tanto da otimização estocástica como da robusta é de encontrar uma solução que funcione bem sob qualquer possível realização dos parâmetros aleatórios. A definição de "bom desempenho" varia de aplicação para aplicação, e a escolha de uma medida de desempenho adequada faz parte do processo de modelação. Os parâmetros aleatórios podem ser contínuos ou definidos por cenários discretos. Se a informação de probabilidade for conhecida, a incerteza é descrita utilizando uma distribuição de probabilidade (contínua ou discreta) nos parâmetros. Se não for conhecida qualquer informação de probabilidade, os parâmetros contínuos são geralmente restringidos a alguns intervalos pré-especificados.

#### ***Incerteza em FLP***

Um dos exemplos da inclusão da incerteza nos modelos de localização está demonstrado no trabalho de Yu, H. *et al* (2020), que propuseram um programa linear estocástico bi-objectivo (MILP) para apoiar decisões relacionadas com a gestão de resíduos perigosos, a fim de reduzir a exposição

da população ao risco, mantendo simultaneamente uma elevada eficiência de custos do transporte e tratamento de resíduos perigosos. Para tal, a incerteza inerente no horizonte de planeamento - o custo, a procura (na ótica de quantidade de resíduos a tratar) e a população afetada - são definidos como parâmetros estocásticos. Para resolver o modelo matemático é utilizada uma abordagem de programação com base numa amostra de aproximação média (SAA-GP). O modelo e o método de solução propostos são validados através de experiências numéricas cujos resultados mostram que a incerteza pode não só afetar o valor da função objetivo mas também levar a diferentes decisões estratégicas na conceção da rede de um sistema de gestão de resíduos perigosos. O modelo é também aplicado num estudo real da gestão de resíduos sanitários em Wuhan, China, a fim de mostrar a sua aplicabilidade. Popela, P. et al (2017) desenvolveram também um problema da localização referente a instalações de tratamento de resíduos (FLP), onde foi utilizada uma abordagem de programação estocástica. Este modelo permite estabelecer um conjunto de unidades de tratamento de resíduos operacionais ótimas em relação ao custo total esperado, que engloba custos de processamento, transporte e investimento. A modelação do problema de localização é realizada tendo em conta produção aleatória e variável de resíduos, obtida através de um programa linear estocástico, baseado em cenários. O modelo também avalia o comportamento dos produtores de resíduos tendo como pressuposto que estes são amigos do ambiente. As ideias de modelação são ilustradas num exemplo de tamanho limitado resolvido no GAMS, sendo que as computações em instâncias maiores foram realizadas com algoritmos tradicionais e heurísticos, implementados dentro do MATLAB.

### ***Incerteza em VRP***

Dentro dos modelos VRP que incluem incerteza, o caso mais estudado é o *Stochastic VRP* (SVRP). Os parâmetros mais comuns a serem estudados incluem procura (e/ou tempos de viagem estocásticos atribuindo a cada parâmetro uma certa probabilidade de acontecimento). Um exemplo de um SVRP resolvido através do uso de algoritmos exatos é apresentado em Gendreau *et al* (1995), onde a procura é aleatória, sendo que os clientes têm uma probabilidade de presença. O problema é resolvido em dois passos: o primeiro é a criação de rotas para os veículos e o segundo passo, que é executado após saber quais os clientes presentes, envolve a execução dessa mesma rota ignorando os clientes ausentes. Relativamente à otimização robusta, Sungur *et al.* (2008) introduziram pela primeira vez o Robust Capacitated VRP (RCVRP), onde adotaram um sistema *branch-and-cut* para resolver o RCVRP com a procura dos clientes e os tempos de viagem incertos. A utilização deste método torna-se favorável em sistemas em que a colaboração entre os vários veículos e a sua capacidade seja facilmente alcançada. Embora geralmente alcancem custos mais baixo que noutros modelos estocásticos, os modelos robustos são mais difíceis de resolver para problemas de grande escala e requerem algoritmos específicos muitas das vezes. Cao, E. *et al* (2014) consideraram uma configuração VRP com procura incerta (RVRP), no qual as procuras dos clientes pertencem a intervalos de incertezas específicos, utilizando um valor de procura esperado (ou valor de procura nominal) e um possível desvio desse valor. Esta otimização visa minimizar os custos de transporte e as procuras não satisfeitas através de um algoritmo de evolução diferencial e da avaliação de quatro estratégias de robustez para lidar com a incerteza da procura. Ao otimizar estas duas vertentes, os objetivos estão

mais próximos da situação prática do que apenas considerando o custo mínimo. As experiências computacionais indicaram que a otimização robusta evita com grande eficácia a procura não satisfeita, ocorrendo de apenas um pequeno custo extra. Cao, E., Gao, R. e Lai, M. (2018) apresentaram também um VRP com intervalos de procura (*VRP with Interval Demands* -VRPID), com o objetivo de determinar a quantidade de veículos necessária para entregar produtos perecíveis. Neste caso, pressupõe-se que a procura dos clientes está inserida em determinados intervalos. Um método de programação de intervalos não linear foi utilizado para considerar o intervalo de procura, e dependendo desse intervalo o veículo pode ou não avançar para o próximo cliente. Para calcular o problema de roteamento foi utilizado um algoritmo híbrido, que foi melhorado através da implementação de uma estratégia de coordenação de veículos para resolver o problema de falha de serviço e fazer pleno uso da capacidade do veículo.

### 3.6. Conclusões do capítulo

No capítulo apresentado realizou-se uma caracterização de conceitos de logística, *Facility Location Problems*, *Vehicle Routing Problems*, *Location Routing Problems* e a inclusão de incerteza nos modelos FLP e VRP. Os problemas de *Facility Location* foram referidos tendo em mente a criação de instalações fixas para o processamento de TMBR, ou de centrais temporárias para as unidades móveis. É de referir o trabalho realizado por Castel-branc (2019), que desenvolveu um modelo de sistema localização e dimensionamento com fim a implementar diagramas de recuperação de vidro, sendo este o estudo mais próximo sobre o desenvolvido nesta dissertação. De seguida foram apresentados os modelos de *Mobility Facility Location*, em que se destaca o estudo realizado por Gil-carrera *et al.* (2019) que se foca na viabilidade económica (tal como o modelo desejado, que tem como função objetivo o VAL do projeto) da utilização de unidades móveis em prol de sistemas centralizados. Foi realizada uma análise sobre *Vehicle Routing Problems*, definindo vários tipos de modelos e as suas aplicações práticas, onde se pode destacar o CVRP como um modelo capaz de responder às necessidades do projeto caso seja adaptado corretamente. Os *Location Routing Problems* também estão enquadrados no trabalho a desenvolver, embora seja necessário perceber que o problema imposto não seja apenas da alocação de veículos a um subconjunto de instalações por definir, mas também à possibilidade destas instalações serem utilizadas de modo a realizar o tratamento do material no próprio local. Dada a incerteza associada com a implementação deste sistema logístico, particularmente na evolução da quantidade de vidro existente no produto a processar, pode-se referir que a inclusão da incerteza no modelo é crucial para obter resultados robustos, já que inclui o estudo de diferentes cenários agregadamente. Neste caso, os modelos estocásticos serão aqueles mais adaptados à descrição do problema.

Tendo em conta a informação partilhada neste capítulo pode-se assumir que há condições necessárias para a obtenção do modelo desejado, que será implementado no software GAMS com a utilização de algoritmos exatos, embora se possa prever algo desafiante com a introdução de bastantes variáveis no modelo.

## 4. Desenvolvimento da Solução Proposta

Neste capítulo serão demonstrados os modelos desenvolvidos para o estudo do sistema logístico misto. Na secção 4.1. insere-se a visão geral do método de solução, no qual serão apresentados os passos a realizar para o estudo completo do sistema e onde se encontra a justificação da sua divisão em partes. Na secção 4.2. encontra-se descrito o modelo de localização e dimensionamento e na secção 4.3. o modelo de roteamento, sendo que para estas duas secções são apresentados os pressupostos, formulação e explicação em cada uma das equações.

### 4.1. Visão Geral do Método de Solução

Como referido anteriormente, o objetivo principal deste trabalho prende-se com a definição do número de instalações fixas a abrir e ao tipo e número de diagramas móveis a utilizar em cada TMB, de modo a recuperar casco de vidro e maximizar o Valor Atualizado Líquido do projeto.

A existência de uma componente móvel no modelo implica que apenas um modelo de localização e dimensionamento é insuficiente para a caracterização do sistema ótimo, já que carece de informações relativas à sequência das visitas das unidades móveis e do valor dos custos de transporte associados a essas deslocações, que acabam por ser características de modelações de roteamento. O problema da literatura que se revela adequado ao problema em questão é o *Location Routing Problem*, já que concilia estas duas vertentes de maneira integrada, embora se registem algumas limitações na sua aplicação em modelos matemáticos exatos. Adicionalmente, as características do projeto (onde o processamento pode ocorrer também das instalações fixas) podem não ser as ideais para este tipo de problemas.

A solução proposta neste trabalho divide o estudo do sistema logístico em duas partes interligadas: um modelo estocástico de localização e dimensionamento, no qual as decisões de investimento nos diagramas de diferentes tipologias e as localizações de processamento serão definidos, em que o objetivo é a maximização do VAL esperado tendo em conta os cenários e probabilidades de acontecimento; e um modelo de roteamento que, ao introduzir *outputs* do modelo de localização referentes aos tempos de permanência em cada TMB, irá definir os percursos ótimos a realizar pelas unidades móveis, tendo como objetivo a minimização dos custos de transporte. O sequenciamento do estudo a realizar está apresentado na Figura 15, onde também se encontram os objetivos de cada etapa.

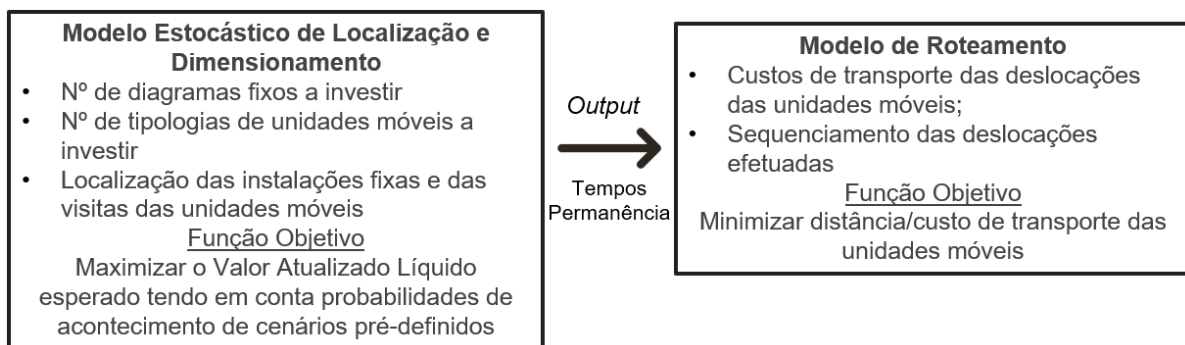


Figura 15: Representação da Análise do Sistema Misto

Uma das críticas a esta análise faseada é a não consideração dos custos de transporte das unidades móveis nas decisões de investimento, já que estas são tomadas na primeira parte da solução (modelo de localização). O custo destas deslocações podem ter impacto na solução final, guiando assim a uma tomada de decisão não ótima. A influência deste custo no resultado final será tanto maior quanto maior for o custo associado a essas deslocações.

De modo a perceber a possível influência destes custos de deslocação nas decisões do modelo, foi feita uma análise *Worst Case Scenario* no qual se pretende simular um cenário bastante pessimista do valor do custo de transporte dos diagramas móveis. Esta análise é realizada tendo em consideração o número de veículos investidos e os kms percorridos por cada um. De notar que o custo de transporte utilizado é de 1€/km e considera os custos de manutenção dos veículos. (Fonte: ERSUC).

Tabela 5: Análise preliminar ao custo de transporte das unidades móveis

Número de Veículos	Kms Percorridos/ano	Custo Transportes/ano
1	600	<b>600 €</b>
2	1200	<b>1 200 €</b>
3	1800	<b>1 800 €</b>
...	...	...
16	9600	<b>9 600 €</b>
17	10200	<b>10 200 €</b>
18	10800	<b>10 800 €</b>

A análise descrita na Tabela 5 tem como pressuposto que cada unidade móvel tem de percorrer uma distância de 600 km por ano, que corresponde aproximadamente à distância de Norte a Sul de Portugal. Esta trata-se de uma situação bastante improvável de se verificar, já que nem todas as instalações justificam um investimento num diagrama móvel e é expectável que cada uma destas não realize viagens suficientes para perfazer um número de quilómetros tão elevado durante um ano. O valor registado tendo em conta um conjunto de 18 unidades móveis é de 10800€/ano. Para se ter uma noção do que este valor representa para o projeto em termos comparativos, o custo anual de investimento no salário de um trabalhador para garantir o funcionamento de uma unidade móvel é aproximadamente o dobro deste valor (que pode ser confirmado no subcapítulo 5.2. referente aos dados do problema). Tendo em conta que é necessário um trabalhador por unidade móvel (ou seja, no estudo descrito ainda seria necessário multiplicar esse valor por 18 diagramas móveis), pode-se concluir que em termos comparativos o custo de transporte das unidades móveis tem pouca influência nos resultados e, conseqüentemente, a análise faseada destas duas vertentes não deverá alterar as decisões de investimento.

## 4.2. Desenvolvimento do Modelo Estocástico de Localização e Dimensionamento

O modelo desenvolvido pretende determinar o número de diagramas fixos e/ou móveis (e respetiva tipologia) a utilizar e definir em que localizações devem atuar de modo a maximizar o Valor Atualizado Líquido (VAL). Este trata-se de um modelo estocástico, já que para combater a incerteza associada à percentagem de vidro presente no rejeitado pesado  $Vp_{a,s}$ , será incluído um conjunto de cenários pré-definidos, que terão uma probabilidade de acontecimento  $Pr_s$  associada a cada um deles. A solução ótima será aquela que atinge um valor esperado de VAL superior, utilizando a mesma combinação de diagramas fixos e móveis pelos diferentes cenários.

O VAL atingido inclui os ganhos obtidos pela venda do vidro obtido e pelo espaço de aterro resgatado devido ao processamento do rejeitado, e retém custos associados ao investimento em diagramas, custos operacionais, recursos humanos e custos de transporte referente às deslocações de rejeitado entre instalações fixas (que são distintos dos custos de transporte das unidades móveis, que não estão incluídos neste modelo). Isto porque as instalações fixas funcionam de forma centralizada, ou seja, permitem o processamento de produto de instalações distintas, através do transporte do rejeitado. As unidades móveis são avaliadas tendo em conta períodos temporais inferiores a um ano (de modo a permitir a deslocação destes veículos) e as unidades fixas em períodos anuais. O cálculo do VAL é realizado também em termos anuais, no qual é necessário somar os períodos temporais das unidades móveis equivalentes a cada um dos anos.

Primeiramente serão demonstrados todos os pressupostos assumidos na realização do modelo matemático e de seguida será apresentada a formulação do modelo, incluindo os parâmetros, as variáveis e as equações, sendo que estas últimas serão explicadas individualmente.

### Pressupostos

1. Não foram consideradas possíveis limitações de espaço nos aterros, ou de armazenamento em TMBs no espaço de um ano;
2. Fases de processamento anteriores à atuação do processo RecGlass não são contabilizados como custos para o projeto;
3. O rejeitado do diagrama é encaminhado para aterro, localizado numa TMB;
4. O produto final (casco de vidro) é totalmente escoado e é o cliente final que trata desse transporte;
5. Não se recupera outro material que não o vidro, devido à reduzida presença destes materiais (Rocha, 2019);
6. Tempo de deslocação das unidades móveis e dos camiões com TMBr para processamento nas TMBs é considerado desprezável;
7. Investimento é amortizado na sua totalidade com exceção do investimento no terreno;
8. Terreno não é sujeito a reavaliação financeira, ou seja, retém o mesmo valor ao longo do horizonte temporal;
9. TMBs têm a mesma produção anual de rejeitado pesado durante o horizonte temporal;



## 4.2.1. Formulação Matemática do Modelo

### Conjuntos

- $I$  Conjunto das localizações de TMBs/aterros  $i \in I$
- $J$  Conjunto das localizações de processamento  $j \in J$
- $T$  Conjunto de períodos temporais  $t \in T$
- $A$  Conjunto de períodos anuais  $a \in A$
- $K$  Conjunto de tipologias de diagramas  $k \in K$
- $S$  Conjunto de cenários  $s \in S$

### Índices

- $i$  Entidade TMBs/aterros –  $i = e1, \dots, I$
- $j$  Entidade Localização Processamento –  $j = c1, \dots, J$
- $t$  Conjunto de períodos temporais  $t = 1, \dots, T_{\text{máx}}$ ,  $t = \{a(t), b(t)\}$
- $a$  Conjunto de períodos temporais anuais –  $a = a1, a2, \dots, A_{\text{máx}}$
- $k$  Diagrama –  $k = k1, \dots, K$ ,  $k = \{f(k), m(k)\}$
- $s$  Cenários –  $s = s1, \dots, S$

### Variáveis binárias

$Y_{j,k}$  Existência ou não de diagramas fixos em  $j$  durante o horizonte temporal;  $Y_{j,k} = 1$  se sim,  $Y_{j,k} = 0$  se não

$Ya_{j,k,a,s}$  Instalação fixa em funcionamento em  $j$ , no ano  $a$  e cenário  $s$ ;  $Ya_{j,k,a,s} = 1$  se sim,  $Ya_{j,k,a,s} = 0$  se não

### Variáveis discretas e não negativas

$NDf_{j,k}$  Número de diagramas fixos a investir na instalação  $j$

$NDfa_{j,k,a,s}$  Número de diagramas fixos em funcionamento em  $j$ , no ano  $a$  e cenário  $s$

$NDfm_{j,k,t,s}$  Número de diagramas fixos em funcionamento em  $j$ , no período  $t$  e cenário  $s$

$NDgm_k$  Número de diagramas móveis de tipologia  $k$  a investir no sistema

$NDma_{k,a,s}$  Número de diagramas móveis de tipo  $k$  em funcionamento no ano  $a$  e cenário  $s$

$NDm_{j,k,t,s}$  Número de diagramas móveis de tipo  $k$  em funcionamento na instalação  $j$ , no período  $t$  e cenário  $s$

$FNDma_{j,k,a,s}$  Fração do número de diagramas móveis do tipo  $k$  existentes em  $j$ , no ano  $a$  e período  $s$

$H_j$  Número máximo de diagramas móveis num determinado período  $t$  na instalação  $j$ , ao longo do horizonte temporal

$G_j$  Número máximo de diagramas móveis tipo  $k$  num determinado período  $t$  na instalação  $j$ , ao longo do horizonte temporal

### **Variáveis contínuas e não negativas**

$Qm_{i,j,k,t,s}$  Quantidade de TMBr (em ton) processado pelo diagrama  $k$ , proveniente da TMB  $i$  e deslocado para a instalação de processamento  $j$ , no período  $t$  e cenário  $s$  (fluxo de entrada na instalação)

$Qa_{i,j,k,a,s}$  Quantidade de TMBr (em ton) processado pelo diagrama  $k$ , proveniente da TMB  $i$  e deslocado para a instalação de processamento  $j$ , no ano  $a$  e cenário  $s$  (fluxo de entrada na instalação)

$QDm_{j,i,k,t,s}$  Quantidade de TMBr processado pelo diagrama  $k$ , que não contém vidro, proveniente da instalação de processamento  $j$  e deslocado para a TMB  $i$ , no período  $t$  e cenário  $s$  (fluxo saída)

$QDa_{j,i,k,a,s}$  Quantidade de TMBr processado pelo diagrama  $k$ , que não contém vidro, proveniente da instalação de processamento  $j$  e deslocado para a TMB  $i$ , no ano  $a$  e cenário  $s$  (fluxo saída)

$TMBr_{i,t,s}$  Quantidade de rejeitado por processar em  $i$ , no período  $t$  e cenário  $s$

### **Variáveis auxiliares na função objetivo**

$CI$  Custo de investimento inicial

$CL$  Custo de investimento em instalações fixas e equipamentos de suporte

$CD$  Custo de investimento nos diagramas

$CDu_j$  Custo de investimento nos diagramas fixos na instalação de processamento  $j$

$CHu_{a,s}$  Custo com recursos humanos no ano  $a$  e cenário  $s$

$Ce_{a,s}$  Custos com eletricidade no ano  $a$  e cenário  $s$

$Cm_{a,s}$  Custos de manutenção da totalidade dos diagramas no ano  $a$ , no cenário  $s$

$CTr_{a,s}$  Custos de transporte associados às deslocações de TMBr entre estações TMB para utilização nos diagramas fixos, no ano  $a$ , no cenário  $s$

$P_{i,j,k,a,s}$  Quantidade de produto final para vender (casco de vidro em ton) da TMB  $i$ , processado na instalação  $j$ , no ano  $a$  e cenário  $s$

$CF_{a,s}$  Cash Flow no ano  $a$  e cenário  $s$

$Res_{a,s}$  Resultado no ano  $a$  e cenário  $s$

$RL_{a,s}$  Resultado Líquido no ano  $a$  e cenário  $s$

$DC_a$  Depreciação do Capital ano  $a$

### **Parâmetros**

#### Instalação, Diagrama e Unidades Móveis

$CLu$  Custo de investimento num terreno para utilização dos diagramas fixos

$Arm$  Custo de investimento num armazém para utilização dos diagramas fixos

$CEq$  Custo de equipamento de suporte para os diagramas

$RG$  Custo de equipamento de suporte próprios para o diagrama  $k$

$E$  Eficácia dos diagramas na recuperação do vidro

$Cap_k$  Capacidade de processamento para cada período  $t$  no diagrama de tipo  $k$

$U$  Taxa de utilização dos diagramas

$CDg_k$  Custo do diagrama de tipologia  $k$

### Operacionais

$d_{i,j}$  Distância entre  $i$  e  $j$ , em km

$Ckmt$  Custo por ton, por km, em €

$Cw$  Custo anual por trabalhador

$N$  Número de turnos a operar por dia

$Cel$  Custo da eletricidade por tonelada

$Cmt_k$  Custo de manutenção para cada diagrama do tipo  $k$  e por período  $t$

$Ai$  Custo de aterro interno por tonelada

$Aex$  Custo de aterro externo por tonelada

### Produto

$V_i$  Percentagem de vidro presente no rejeitado pesado em  $i$

$Vp_{a,s}$  Percentagem de vidro presente no rejeitado pesado no ano  $a$  e cenário  $s$

$Pu$  Preço ou valor de retorno por tonelada de produto final, em €

$RP_i$  Quantidade de rejeitado pesado produzido anualmente em  $i$

$\alpha_i$  Percentagem de TMBR em  $i$  que se encontra no intervalo granulométrico de 6 a 16 mm

### Financeiros

$Ti_{a,s}$  Taxa IRC no ano  $a$  e cenário  $s$

$Ta$  Taxa de atualização

### Outros

$Pr_s$  Probabilidade do cenário  $s$  se realizar

$MA$  N° de períodos  $t$  em cada ano  $a$

## **FUNÇÃO OBJETIVO**

Equação 1: Maximização do Valor Atualizado Líquido (VAL)

$$Max VAL = \sum_{a \in A} \sum_{s \in S} \left( Pr_s * \frac{CF_{a,s}}{(1 + Ta)^a} \right) - CI \quad [1]$$

A função objetivo na equação [1], pretende maximizar o valor atualizado líquido referente ao sistema durante o horizonte temporal do projeto. Para tal, são somados todos os Cash Flows atualizados dos anos de análise e multiplicados pela probabilidade de acontecimento  $Pr_s$  de cada cenário, sendo que a esse valor é subtraído o custo de investimento inicial no projeto. A atualização dos CF é feita através da divisão dos valores obtidos na equação [6] pela taxa de atualização  $Ta$ , que é elevada à potência do ano  $a$  que corresponde.

## **FUNÇÕES AUXILIARES**

Equação 2: Cash Flow por ano  $a$  e cenário  $s$

$$CF_{a,s} = RL_{a,s} + DC_a, \quad \forall a \in A \setminus \{Amáx\} \quad [2(a)]$$

$$CF_{a,s} = RL_{a,s} + DC_a + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CLu * Y_{j,k}, \quad \forall a = Amáx \quad [2(b)]$$

O cálculo dos Cash Flows encontra-se dividido em duas partes: a equação [2(a)] representa a fórmula para todos os anos de análise à exceção do último, e resulta da adição da depreciação do capital  $DC_a$  aos Resultados Líquidos  $RL_{a,s}$ . Para o último ano  $Amáx$ , é adicionado o valor residual do investimento no projeto, que neste caso é igual ao custo de investimento em terreno. Para os restantes investimentos é assumido que após a conclusão do projeto todos os equipamentos perdem o seu valor e/ou não têm forma de ser reaproveitados financeiramente por serem específicos para a funcionalidade de recuperação de vidro de lixo indiferenciado.

Equação 3: Resultados anuais por cenário  $s$

$$Res_{a,s} = \left[ \left( Pu * \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} P_{i,j,k,a,s} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (Qa_{i,j,k,a,s} * Ai) - \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (QDa_{j,i,k,a,s} * Aex) \right) - (Ce_{a,s} + CH_{a,s} + CTr_{a,s} + Cmu_{a,s} + DC_a) \right] \quad [3]$$

O cálculo dos Resultados em cada ano e cada cenário  $Res_{a,s}$  está representado na equação [3]. Aqui consideram-se todas as fontes de receita e todos os custos variáveis do sistema. As receitas são determinadas pelo valor de retorno do vidro recuperado (que resulta da multiplicação do valor de retorno por tonelada de vidro recuperado  $Pu$  pela quantidade recuperada  $P_{i,j,k,a,s}$ ) e pelo ganho referente ao espaço liberado no aterro por essa mesma recuperação. Este ganho é calculado através da subtração da quantidade de vidro processado  $Qa_{i,j,k,a,s}$  - que é a quantidade que iria para a aterro caso não existisse nenhum processamento - pela quantidade de vidro sem presença de vidro  $QDa_{j,i,k,a,s}$ . Ao primeiro é aplicado o custo de aterro interno  $Ai$ , que é o custo a que as TMBs recorrem quando depositam uma tonelada de rejeitado e ao segundo é aplicado o custo de aterro externo  $Aex$ , que representa o custo caso o rejeitado seja depositado no aterro por uma entidade externa, ou seja, uma entidade que não seja a própria TMB. Os custos operacionais que diminuem o valor dos resultados anuais são os custos de eletricidade  $Ce_{a,s}$ , custos em recursos humanos  $CH_{a,s}$ , custos de transporte das deslocações de TMBr entre instalações fixas  $CTr_{a,s}$ , custo de manutenção dos diagramas  $Cmu_{a,s}$  e a depreciação anual do capital investido  $DC_a$ .

Equação 4: Resultados Líquidos anuais por cenário  $s$

$$RL_{a,s} = (1 - Ti_{a,s}) * Res_{a,s} \quad [4(a)]$$

$$RL_{a,s} = Res_{a,s} \quad [4(b)]$$

Os resultados líquidos para cada ano  $RL_{a,s}$  resultam de duas equações: [4(a)] caso o resultado  $Res_{a,s}$  seja positivo nesse ano, e [4(b)] caso seja zero ou negativo. O cálculo consiste em retirar o valor do IRC ao lucro gerado. Teoricamente esta taxa IRC devia atuar como variável dependente de  $a$  e  $s$ , mas dada a impossibilidade de integrar no modelo GAMS uma relação que permita aplicar a taxa IRC caso o resultado seja positivo e não aplicar caso contrário, esta taxa é descrita como um parâmetro neste modelo. Para saber em que anos é que a taxa IRC é aplicável, o modelo é numa primeira análise

simulado cenário a cenário com o valor da taxa igual a 0. Os valores finais de cada simulação permitem registrar em que anos é que o resultado é positivo, passando então a ser parametrizados. Dada a influência que este passo extra tem no valor final do VAL (ver Anexos III e IV) e de modo a realizar uma análise o mais próxima possível do contexto real, considerou-se importante acrescentar esta etapa.

Equação 5: Depreciação anual do Capital investido

$$DC_a = \frac{(CI - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} CLu * Y_{j,k})}{Amáx} \quad [5]$$

A depreciação anual do capital  $DC_a$  é dada através do uso do método *straight-line*, utilizado também em (Cardoso et al, 2013). onde se assume que durante a vida útil dos ativos investidos, estes têm um custo associado que será igual à sua divisão em parcelas iguais durante o período considerado (neste caso, divisão no número total de anos  $Amáx$ ). Neste cálculo não está presente o custo das localizações das instalações fixas, já que não são depreciáveis.

Equação 6: Cálculo dos investimentos iniciais

$$CI = CL + CD \quad [6]$$

O custo de investimento inicial  $CI$  do projeto está presente na equação [6] e inclui o custo de localização, armazém e equipamentos de suporte  $CL$  e o custo da totalidade dos diagramas  $CD$ .

Equação 7: Custos de Localização e Equipamentos de Suporte

$$CL = \sum_{j \in J} \sum_{k \in f(k)} (CLu + Arm + CEq) * Y_{j,k} + \sum_{j \in J} (CEq * H_j + RG * G_j) \quad [7]$$

O custo da localização  $CLu$ , armazém  $Arm$  e de equipamento  $CEq$  são multiplicados pela variável binária  $Y_{j,k}$ , referente à existência ou não de diagramas fixos para processamento em  $j$  – ou seja, aplicáveis apenas à tipologia fixa  $f(k) = \{k1\}$ . No caso dos diagramas móveis pertencentes ao subconjunto  $m(k) = \{k2, k3\}$  (no qual  $k2$  representa a UMP A e  $k3$  a UMP B) o custo de equipamento  $CEq$ , é multiplicado pela variável  $H_j$  correspondente ao número máximo de diagramas móveis que se encontram em  $j$  no mesmo instante  $t$ . Isto porque caso se encontrem duas UMPs para processar no mesmo momento, a instalação TMB terá de ter equipamento para estas duas. Também é contabilizada a variável  $G_j$ , que representa o número máximo de diagramas  $k3$  no sistema, já que a sua presença implica o custo de investimento em dois RecGlass  $RG$ .

Equação 8: Custo da totalidade dos Diagramas

$$CD = \sum_{j \in J} CDu_j + \sum_{k \in K} (CDg_k * NDgm_k) \quad [8]$$

O custo dos diagramas  $CD$  está presente na equação [8] e tem uma parcela referente ao investimento em diagramas fixos existentes em  $j$   $CDu_j$  e uma parcela referente ao investimento em

diagramas móveis, que resulta da multiplicação do custo do diagrama  $CDg_k$  pelo número de diagramas móveis dessa tipologia  $NDgm_k$

Equação 9: Custos dos Diagramas fixos em entidade j

$$CDu_j = \sum_{k \in K} \left[ \left( \frac{CDg_k}{2} \right) * Y_{j,k} + \left( \frac{CDg_k}{2} \right) * NDf_{j,k} \right] \quad [9]$$

Os custos dos diagramas fixos em cada entidade j  $CDu_j$  apresentam um fator escala. Isto significa que caso se instale mais que um diagrama fixo  $NDf_{j,k}$  numa certa instalação j, o investimento por diagrama será menor. Este decréscimo do custo dos diagramas é obtido de forma linear.

Equação 10: Custo com eletricidade anual por cenário s

$$Ce_{a,s} = Cel * \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{s \in S} Qa_{i,j,k,a,s} \quad [10]$$

Os custos de eletricidade anuais  $Ce_{a,s}$  traduzem-se na multiplicação do custo de eletricidade por tonelada processada  $Cel$  pela quantidade de rejeitado processado  $Qa_{i,j,k,a,s}$  em todas as instalações.

Equação 11: Custos de manutenção anual por cenário s.

$$Cmu_{a,s} = Cmt_k * \left( \left( \frac{Ya_{j,k,a,s}}{2} \right) + \left( \frac{NDfa_{j,k,a,s}}{2} \right) + NDm_{k,a,s} \right) \quad [11]$$

A aplicação do custo de manutenção por cada diagrama do tipo k  $Cmt_k$  é diferente tendo em conta a tipologia fixa ou móvel. Os diagramas fixos em funcionamento numa mesma localização j  $NDfa_{j,k,a,s}$  beneficiam de economias de escala, já que, acabam por ser utilizados os mesmos recursos, tanto em termos de equipamento como de recursos humanos necessários ao processo. Os diagramas móveis do tipo k a processar no ano a não beneficiam dessa vantagem pois possivelmente não se encontram na mesma localização j, sendo multiplicados pelo custo de manutenção associado  $Cmt_k$ .

Equação 12: Custos com recursos humanos anuais por cenário s

$$CHu_{a,s} = Cw * N * \left( \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Ya_{j,k,a,s} + \sum_{k \in K} NDma_{k,a,s} \right) \quad [12]$$

O cálculo dos recursos humanos anuais  $CHu_{a,s}$  é efetuado através do somatório do número de instalações fixas abertas  $Ya_{j,k,a,s}$  e do número de diagramas móveis no sistema durante o ano, multiplicado pelo salário anual do trabalhador  $Cw$  e pelo número de turnos a realizar por dia  $N$ . No caso das instalações fixas, estas necessitam apenas de um trabalhador, já que os diagramas fixos têm a particularidade de conseguir trabalhar em série, acabando então por se comportarem como um diagrama individual, mas com uma capacidade de processamento maior. Nas unidades móveis será necessário investir num trabalhador por cada diagrama.

Equação 13: Custos de transporte do rejeitado pesado por ano a e cenário s

$$CTr_{a,s} = Ckmt * \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Qa_{i,j,k,a,s} * d_{i,j} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} QDa_{j,i,k,a,s} * d_{j,i} \right) \quad [13]$$

Os custos de transporte  $CTr_{a,s}$  representados na equação [16] demonstram os custos de deslocação do rejeitado pesado para os diagramas fixos. O seu valor resulta da multiplicação do custo por km por tonelada de rejeitado  $Ckmt$  por dois fluxos e as respetivas distâncias: o rejeitado pesado proveniente da TMB  $i$  a processar na instalação fixa  $j$   $Qa_{i,j,k,a,s}$  e o rejeitado sem presença de vidro  $QDa_{j,i,k,a,s}$  que é deslocado da instalação de processamento para o aterro da mesma TMB  $i$ , local do qual o rejeitado é originário.

Equação 14: Quantidade de TMBr na entidade i, no período t e cenário s

$$TMBr_{i,t,s} = RP_i - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Qm_{i,j,k,t,s} \quad , \forall t \in a(t) \quad [14(a)]$$

$$TMBr_{i,t,s} = TMBr_{i,t-1,s} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Qm_{i,j,k,t,s} \quad , \forall t \in b(t) \quad [14(b)]$$

O cálculo da quantidade de rejeitado em cada instalação  $i$  é diferente tendo em conta o período  $t$  de análise. No caso de se tratar de um instante  $t$  imediatamente após o início de cada ano (definido como o conjunto de intervalos de tempo  $a(t)$ ), resulta da diferença entre a produção anual de TMBr em cada instalação  $RP_i$  e a quantidade processada nesse período  $Qm_{i,j,k,t,s}$ . Nos restantes anos (conjunto de intervalos de tempo  $b(t)$ ) trata-se do rejeitado a processar no período anterior  $TMBr_{i,t-1,s}$  menos a quantidade processada nesse período  $Qm_{i,j,k,t,s}$ .

Equação 15: Quantidade de produto final obtido em cada ano a e cenário s

$$P_{i,j,k,a,s} = Qa_{i,j,k,a,s} * V_i * Vp_{a,s} * E * U * \alpha_i \quad [15]$$

A quantidade de casco de vidro obtido anualmente  $P_{i,j,k,a,s}$  é obtido através do processamento anual do rejeitado  $Qa_{i,j,k,a,s}$ . O seu valor depende da percentagem de vidro em cada instalação TMB  $V_i$ , da percentagem de vidro presente no rejeitado pesado em cada ano a e em cada cenário s  $Vp_{a,s}$ , da taxa de utilização  $U$ , da eficiência dos diagramas  $E$  e da percentagem de rejeitado em cada instalação  $i$  que se encontra dentro do intervalo granulométrico entre 6 e 16mm  $\alpha_i$ . A multiplicação de todas estas variáveis calcula o seu valor.

Equação 16: Balanço de material proveniente da entidade i, para a entidade j, com a tecnologia k, por ano a e cenário s

$$QDa_{j,i,k,a,s} = Qa_{i,j,k,a,s} - P_{i,j,k,a,s} \quad [16]$$

Equação 17: Balanço de material em cada entidade  $j$ , com a tecnologia  $k$ , por ano  $a$  e cenário  $s$

$$\sum_{i \in I} QDa_{j,i,k,a,s} = \sum_{i \in I} (Qa_{i,j,k,a,s} - P_{i,j,k,a,s}) \quad [17]$$

Equação 18: Balanço de material por ano  $a$  e cenário  $s$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} QDa_{j,i,k,a,s} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (Qa_{i,j,k,a,s} - P_{i,j,k,a,s}) \quad [18]$$

As equações [16] a [18] estabelecem a relação entre o fluxo de entrada do TMBr a ser processado  $Qa_{i,j,k,t,sc}$ , com o fluxo de saída  $QDa_{j,i,k,t,sc}$  para aterro e o fluxo de vidro recuperado  $P_{i,j,k,a,s}$ .

Equação 19: Processamento de TMBr em cada entidade  $i$ , por período  $t$  e cenário  $s$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Qm_{i,j,k,t,s} \leq TMBr_{i,t,s} + RP_i, \quad \forall i \in I, \forall t \in a(t), \forall s \in S \quad [19(a)]$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Qm_{i,j,k,t,s} \leq TMBr_{i,t,s}, \quad \forall i \in I, \forall t \in b(t), \forall s \in S \quad [19(b)]$$

As equações [19] demonstram a restrição de processamento de TMBr, que está associada com a quantidade de rejeitado que se encontra na instalação  $i$  num determinado período  $t$ , tendo em consideração que no início de todos os anos (períodos  $a(t)$ ) a quantidade de rejeitado produzida anualmente é repostada nas instalações, através do parâmetro  $RP_i$ . Nos restantes anos (período  $b(t)$ ), este valor apenas está restrito à quantidade  $Qm_{i,j,k,t,sc}$  presente na TMB.

Equação 20: Restrição de capacidade em cada entidade  $j$ , com a tecnologia  $k$ , por período  $t$  e cenário  $s$

$$Cap_k * N * (Ndfm_{j,k,t,s} + Ndm_{j,k,t,s}) \geq \sum_{i \in I} Qm_{i,j,k,t,s}, \quad \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S \quad [20]$$

A equação [20] representa restrições de capacidade durante cada período  $t$ , no qual está determinado que só entra na instalação material possível de ser processado, ou seja, a soma dos fluxos oriundos das várias TMBs a chegar a cada instalação de processamento  $j$   $Qm_{i,j,k,t,s}$ , terá de ser menor ou igual que a multiplicação da capacidade máxima de processamento dessa instalação em cada período  $t$   $Cap_k$ , pelo número de turnos  $N$  que trabalha e pelo número de diagramas de cada tipologia instalados  $Ndfm_{j,k,t,s}$  e  $Ndm_{j,k,t,s}$ .

Equação 21: Restrição de capacidade anual em cada entidade  $j$ , com a tecnologia  $k$  e cenário  $s$

$$Cap_k * N * MA * (Ndfa_{j,k,a,s} + FNdma_{j,k,a,s}) \geq \sum_{i \in I} Qa_{i,j,k,a,s}, \quad \forall j \in J, \forall k \in K, \forall a \in A, \forall s \in S \quad [21]$$

A equação [21] representa a restrição de capacidade em termos anuais, cujo raciocínio é idêntico ao apresentado na equação [20] já descrita, mas apresentando as variáveis anuais. Para tal, a primeira parcela tem que ser multiplicada também pelo parâmetro  $MA$ , que representa o número de períodos  $t$



em cada ano  $a$  (já que a capacidade  $Cap_k$  é apresentada por período  $t$ ). A fração do número de diagramas móveis em cada ano  $FNDma_{j,k,a,s}$  permite alocar a cada instalação  $j$  a fração da capacidade anual da UMP aproveitada nesse local.

Equação 22: Quantidade de rejeitado processado anualmente por cenário  $s$

$$Qa_{i,j,k,a,s} = \sum_{t \in an(t)} Qm_{i,j,k,t,s} \quad [22]$$

A equação [22] calcula a quantidade processada anual em cada instalação  $j$   $Qa_{i,j,k,a,s}$ . O seu valor resulta do somatório das quantidades de processamento por período  $t$   $Qm_{i,j,k,t,s}$  pertencentes ao ano de análise  $an(t)$  correspondente.

Equação 23: Fração de diagramas móveis do tipo  $k$  na instalação  $j$  no ano  $a$  e cenário  $s$

$$FNDma_{j,k,a,s} = \frac{\sum_{t \in an(t)} NDm_{j,k,t}}{MA} \quad [23]$$

A fração de diagramas móveis de cada tipo nas instalações  $j$  e em cada ano  $a$  é dada pela divisão entre o somatório dos períodos pertencentes ao ano  $a$ ,  $an(t)$  do número de diagramas em cada localização  $j$  e período  $t$   $NDm_{j,k,t}$ , pelo número de períodos  $t$  existentes num ano  $MA$ .

Equação 24: Número de diagramas móveis de tipo  $k$  no sistema durante o ano  $a$  e cenário  $s$

$$NDma_{k,a,s} \geq \sum_{j \in J} FNDma_{j,k,a,s} \quad , \forall k \in K, \forall a \in A, \forall s \in S \quad [24]$$

O número de diagramas móveis  $k$  a atuar em cada ano é uma variável inteira que é caracterizada por ter um valor maior ou igual ao somatório de frações de diagramas móveis  $FNDma_{j,k,a,s}$  em todas as instalações  $j$ .

Equação 25: Número de diagramas fixos em funcionamento durante o ano  $a$  e cenário  $s$

$$NDfa_{j,k,a,s} \geq NDfm_{j,k,t,s} \quad , \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in an(t), \forall a \in A, \forall s \in S \quad [25]$$

O número de diagramas fixos em funcionamento em cada ano  $a$  é uma variável inteira com um valor igual ou superior ao número de diagramas fixos em funcionamento nos períodos  $t$  pertencentes ao ano  $an(t)$ .

Equação 26: Restrição do número de diagramas a atuar no sistema em cada período  $t$  e cenário  $s$

$$\sum_{j \in J} NDm_{j,k,t,s} \leq NDgm_k \quad , \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S \quad [26]$$

Equação 27: Restrição do número de diagramas a atuar no sistema em cada ano  $a$  e cenário  $s$

$$NDma_{k,a,s} \leq NDgm_k \quad , \forall k \in K, \forall a \in A, \forall s \in S \quad [27]$$

Equação 28: Restrição do número de diagramas em cada instalação  $j$  em cada período  $t$  e cenário  $s$

$$NDm_{j,k,t,s} \leq NDgm_k, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S \quad [28]$$

As equações [26] a [28] representam a restrição do número de diagramas móveis a atuar em cada período  $t$  [26], em cada ano  $a$  [27] e em cada instalação  $j$  [28], sendo que para cada um destes casos, o seu valor terá que ser menor que o número de diagramas móveis  $NDgm_k$  existentes no sistema.

Equação 29: Restrição do número de diagramas fixos em cada período  $t$  e cenário  $s$

$$NDfm_{j,k,t,s} \leq Ndf_{j,k}, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S \quad [29]$$

Equação 30: Restrição do número de diagramas fixos em cada ano  $a$  e cenário  $s$

$$NDfa_{j,k,a,s} \leq Ndf_{j,k}, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall a \in A, \forall s \in S \quad [30]$$

As equações [29] e [30] registam as restrições do número de diagramas fixos em funcionamento em  $j$ , em cada período  $t$  [29] ou ano  $a$  [30], que são menores ou iguais ao número de diagramas fixos no sistema em cada  $j$ .

Equação 31: Relação entre o número de diagramas fixos e instalações fixas em  $j$

$$Ndf_{j,k} \geq Y_{j,k}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad [31]$$

Equação 32: Relação entre o número de diagramas fixos e instalações fixas em  $j$  no ano  $a$

$$NDfa_{j,k,a,s} \geq Ya_{j,k,a,s}, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall a \in A, \forall s \in S \quad [32]$$

As equações [31] e [32] estabelecem que a variável binária correspondente à existência de uma instalação fixa de processamento  $Y_{j,k}$  e à variável binária correspondente ao funcionamento dessas instalações por ano  $a$   $Ya_{j,k,a,s}$  são menores ou iguais ao número de diagramas existentes nessa localização.

Equação 33: Número de diagramas móveis máximo associado a cada instalação  $j$  num determinado período

$$H_j \geq \sum_{k \in K} NDm_{j,k,t,s}, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall s \in S \quad [33]$$

Equação 34: Número de diagramas móveis  $k3$  máximo associado a cada instalação  $j$  num determinado período

$$G_j \geq \sum_{k \in (k3)} NDm_{j,k,t,s}, \forall j \in J, \forall t \in T, \forall s \in S \quad [34]$$

As restrições [33] e [34] permitem calcular o número máximo de diagramas móveis  $H_j$  e o número máximo de UMPs do tipo B ( $k3$ )  $G_j$  presentes em cada instalação  $j$  num mesmo período de tempo  $t$ . Estas variáveis têm um valor maior ou igual que o somatório dos diagramas móveis em cada instalação  $j$  e período  $t$   $NDm_{j,k,t,s}$ .

Equação 35: Existência de fluxo proveniente de tipologias fixas na estação TMB em cada ano a

$$Qa_{i,j,k,a,s} \leq BigM * Ya_{j,k,a,s} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in f(k), \forall a \in A, \forall s \in S \quad [35]$$

Equação 36: Existência de fluxo proveniente de tipologias móveis na estação TMB em cada período t

$$Qm_{i,j,k,t,s} \leq BigM * NDm_{j,k,t,s} \quad , \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in m(k), \forall t \in T, \forall s \in S \quad [36]$$

As equações [35] e [36] estabelecem que só haverá processamento do rejeitado na localização j  $Qa_{i,j,k,a,s}$  e  $Qm_{i,j,k,t,s}$  para as respetivas tipologias fixas ( $f(k)$ ) e móveis ( $m(k)$ ) caso exista uma instalação fixa em funcionamento no ano a  $Ya_{j,k,a,s}$  ou um diagrama móvel no período t  $NDm_{j,k,t,s}$

Equação 37: Relação entre as instalações fixas em funcionamento em a e a existência da instalação fixa

$$Ya_{j,k,a,s} \leq Y_{j,k} \quad , \forall j \in J, \forall k \in K, \forall a \in A, \forall s \in S \quad [37]$$

A restrição [37] assegura que uma instalação fixa só pode estar em funcionamento num determinado ano e cenário caso essa instalação exista.

Equação 38: Quantidade de rejeitado processado com diagramas móveis com entidades i diferentes de entidades j

$$\sum_{k \in m(k)} Q_{i,j,k,t,s} = 0 \quad , \forall i, j \neq IJ \quad , \forall k \in f(k), \forall t \in T, \forall s \in S \quad [38]$$

A equação [38] obriga a que os diagramas móveis processem apenas o rejeitado proveniente de uma instalação i associada a uma entidade j com a mesma localização. Ou seja, é apenas permitido o processamento do conjunto  $IJ$  demonstrado na equação, que diz respeito ao par de instalações i e j com o mesmo índice (por exemplo  $i1$  e  $j1$ ,  $i10$  e  $j10$ ).

Equação 39: Obrigatoriedade de processamento no sistema

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Y_{j,k} + \sum_{k \in K} NDgm_k \geq 1 \quad [39]$$

A restrição [39] obriga a que seja implementado pelo menos um diagrama fixo ou móvel. Esta restrição pode ser contraditória quanto ao objetivo de maximização do VAL, já que será possível obter valores negativos no caso de esta implementação não ser lucrativa, sendo que esta equação é aplicada por questões de análise.

Equação 40: Restrição do número de diagramas fixos de tipologia móvel

$$\sum_{k \in m(k)} NDf_{j,k} = 0 \quad , \forall j \in J \quad [40]$$

Equação 41: Restrição do número de diagramas móveis a investir de tipologia fixa

$$\sum_{k \in f(k)} NDgm_k = 0 \quad [41]$$

As equações [40] a [41] asseguram que os diagramas fixos e móveis estão estritamente associados aos seus grupos  $f(k)$  e  $m(k)$  respetivamente.

Equação 42: Restrição do Processamento Total de TMBr

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} Qa_{i,j,k,a,s} = RP_i \quad , \forall i \in I, \forall a \in A, \forall s \in S \quad [42]$$

A equação [42] resulta da necessidade de análise do processamento total do sistema logístico. Para tal, a quantidade processada anualmente  $Qa_{i,j,k,a,s}$  terá de ser igual ao processamento anual de cada TMB  $RP_i$ .

### 4.3. Desenvolvimento do Modelo de Roteamento das Unidades Móveis

O modelo de roteamento desenvolvido tem como objetivo minimizar os custos de transporte associados às deslocações entre TMBs nas unidades móveis. Estes vão depender apenas da distância que é percorrida entre instalações. A definição de rotas é realizada através da formulação matemática proposta por Baldacci *et al* (2004) para o *Capacitated Vehicle Routing Problem*, que foi adaptada às necessidades deste problema. Nesta formulação *two-commodity flow* são utilizadas duas variáveis de fluxo,  $y_{i,j}$  e  $y_{j,i}$ , sendo que efetivamente só é realizada uma viagem no troço entre  $(i, j)$ . Após simular o modelo de localização demonstrado anteriormente, fica-se a saber o número exato de intervalos de tempo que cada veículo tem de permanecer numa dada TMB durante um ano (dado pelo número de variáveis  $Qm_{i,j,k,t,s}$  em cada  $j$ ), sendo que estes serão os *inputs* do modelo. Ou seja, o fluxo  $y_{i,j}$  é traduzido em intervalos de tempo realizados para o troço  $(i,j)$ . A capacidade associada a cada veículo é representada pelo número de intervalos de tempo que este possui durante um ano. Por exemplo, caso seja feita uma análise semestral, o veículo terá uma capacidade  $Q$  igual a 2, já que existem dois semestres num ano. Caso um veículo viaje de  $i$  para  $j$ , o fluxo  $y_{i,j}$  representa os intervalos de tempo já “utilizados” pelo veículo e o fluxo  $y_{j,i}$  representa os intervalos de tempo “por utilizar” no mesmo veículo, de modo a que,  $y_{i,j} + y_{j,i} = Q$ . Cada rota é definida por dois caminhos: um caminho do armazém 0 (armazém real) até ao armazém  $n+1$  (armazém cópia, que é uma réplica do real e que é representado pela variável de fluxo,  $y_{i,j}$ ) e um caminho do armazém  $n+1$  até ao armazém 0 (representado pela variável de fluxo  $y_{j,i}$ ). O modelo tem como pressuposto que o conjunto de veículos analisados é homogéneo, ou seja, a simulação dos custos de transporte de cada tipologia é realizada individualmente. A representação deste sistema encontra-se representado na Figura 16:

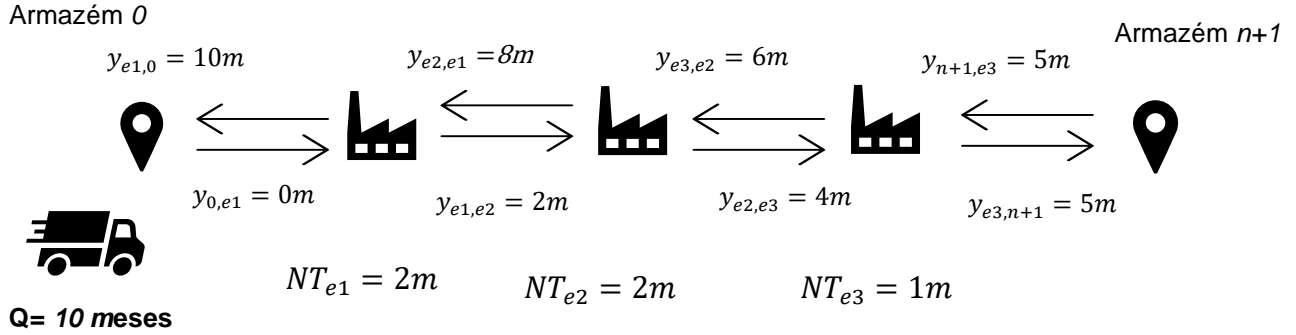


Figura 16: Representação do funcionamento do Modelo de Roteamento

### 4.3.1. Formulação Matemática do Modelo

#### Conjuntos

$I$  Conjunto das localizações de TMBs/aterros  $i \in I$

#### Índices

$i$  Entidade TMBs/aterros –  $i = \{0, e1, \dots, n + 1\}$

#### Variáveis binárias

$x_{i,j}$  Variável cujo valor é 1 caso exista uma rota entre o nodo  $i$  e nodo  $j$  e 0 caso contrário

#### Variáveis discretas e não negativas

$y_{i,j}$  Variável que representa o fluxo de intervalos de tempo entre o nodo  $i$  e o nodo  $j$

#### Variáveis auxiliares na função objetivo

$QT$  Quantidade de intervalos de tempo de toda a frota homogénea

#### Parâmetros

$d_{i,j}$  Distância entre  $i$  e  $j$ , em km

$NT_i$  Número de intervalos de tempo que os veículos necessitam para processamento na instalação  $i$ , durante o período de um ano

$V$  Número de veículos homogéneos disponíveis

$Q$  Intervalos de tempo em que está dividido o período de um ano

$C$  Custo de deslocação em euros por km

$N$  Número de anos em que é há processamento destes veículos

#### FUNÇÃO OBJETIVO

Equação 43: Custo de transporte relativo às deslocações das unidades móveis

$$\min CTr = 0.5 \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in I, (j \neq i)} x_{i,j} * d_{i,j} * C * N \right) \quad [43]$$

A função objetivo apresentada na equação [43] considera a minimização do custo de transporte CTr. Esta é traduzida pela multiplicação da variável binária  $x_{i,j}$  que representa as rotas efetuadas, a multiplicar pela distância entre esse troço  $d_{i,j}$ , pelo custo por km  $C$  e pelo número de anos em que se registam estas rotas  $N$ . Dado que esta formulação se trata de uma *two-commodity flow*, cada instalação

i contabiliza dois fluxos, fazendo com que seja necessário multiplicar o valor obtido por 0.5 de modo a obter o custo real destas deslocações.

## FUNÇÕES AUXILIARES

Equação 44: Relação entre fluxos e número de veículos no sistema

$$\sum_{j \in I, (j \neq i)} (y_{i,j} - y_{j,i}) = 2NT_i \quad [44]$$

A equação auxiliar [44] assegura que o fluxo de saída  $y_{i,j}$  menos o fluxo de entrada  $y_{j,i}$  em cada instalação  $i$  é igual ao dobro do número de intervalos de tempo necessários em cada instalação  $NT_i$ , devido à existência de dois fluxos a passar pela mesma TMB.

Equação 45: Fluxo de entrada armazém  $n+1$

$$\sum_{i \in I \setminus \{0, n+1\}} y_{i, n+1} = \sum_{i \in I \setminus \{0, n+1\}} NT_i \quad [45]$$

A equação [45] define que o fluxo de entrada do armazém cópia  $n+1$  ( $y_{i, n+1}$ ) é igual ao número total de intervalos de tempo em cada instalação. Ou seja, cada veículo chega ao armazém  $n+1$  depois de ter realizado todas as rotas e visitado todas as instalações a ele associados.

Equação 46: Fluxo de saída armazém  $n+1$

$$\sum_{j \in I \setminus \{0, n+1\}} y_{n+1, j} = QT - \sum_{i \in I \setminus \{0, n+1\}} NT_i \quad [46]$$

A equação [46] define que o fluxo de saída total do armazém cópia  $n+1$  ( $y_{n+1, j}$ ) é igual à capacidade restante da frota.

Equação 47: Quantidade intervalos de tempo total

$$QT = V * Q \quad [47]$$

A equação [47] representa a capacidade da frota  $QT$ , que pode ser interpretada neste contexto como a quantidade de intervalos de tempo existentes no sistema. Este valor é calculado através da multiplicação do número de veículos no sistema  $V$  pela capacidade  $Q$  dos veículos (número de intervalos de tempo de cada um).

Equação 48: Fluxo de entrada armazém 0

$$\sum_{j \in I \setminus \{0, n+1\}} y_{i, 0} \leq QT \quad [48]$$

A equação [48] garante que o fluxo de entrada total do armazém real 0  $y_{i, 0}$  é menor ou igual à capacidade da frota  $QT$ , e que esta capacidade não pode ser ultrapassada.

Equação 49: Fluxo de saída armazém 0

$$\sum_{i \in I, (i \neq j)} y_{0,j} = 0 \quad [49]$$

A restrição [49] garante que o fluxo de saída total do armazém real 0  $y_{0,j}$  é igual a 0, ou seja, a capacidade do veículo não é utilizada nos armazéns fictícios.

Equação 50: Entrada e saída de instalações

$$\sum_{i \in I, (i \neq j)} x_{i,j} = 2 \quad , \forall j \in I \setminus \{0, n + 1\} \quad [50]$$

A equação [50] assegura que existe uma rota de entrada e uma rota de saída nas instalações (exceto nos armazéns fictícios), ou seja, o número de variáveis binárias  $x_{i,j}$  associadas a cada instalação é igual a dois.

Equação 51: Restrição de capacidade para cada veículo

$$y_{i,j} + y_{j,i} = Q * x_{i,j} \quad , \forall i, j \in I, i \neq j \quad [51]$$

A restrição [51] relaciona as variáveis  $x$  e  $y$ , garantindo que a soma dos fluxos para cada nodo  $(i,j)$  que é efetuado por um veículo é igual à sua capacidade multiplicada pela variável binária  $x_{i,j}$ .

## 5. Resultados da Análise do Modelo Misto

O capítulo 5 apresenta os resultados da aplicação dos modelos propostos anteriormente, de modo a definir o sistema logístico misto para a recuperação de vidro. Para tal, o capítulo está dividido nas seguintes secções: secção 5.1., na qual se apresentam os cenários a analisar; 5.2. onde se encontram definidos os dados utilizados nos modelos; 5.3., onde são apresentados os resultados dos cenários independentes; 5.4., onde o modelo estocástico desenvolvido é simulado tendo em conta todas as suas variantes; 5.5. onde se inserem as análises de sensibilidade a alguns dos parâmetros de maior influência nos resultados; 5.6., no qual se apresentam os resultados computacionais; e por fim a secção 5.7. onde se regista as conclusões do capítulo.

### 5.1. Apresentação dos cenários

De modo a obter uma análise robusta do projeto em questão, foram delineados três aspetos gerais que serão avaliados de maneira mais aprofundada:

- 1) Instalações TMB a serem incluídas no sistema logístico;
- 2) Quantidade de rejeitado pesado a ser processado;
- 3) Previsão da percentagem de vidro existente no rejeitado pesado.

A análise destes aspetos em conjunto, dá origem à árvore de cenários apresentada na Figura 17.

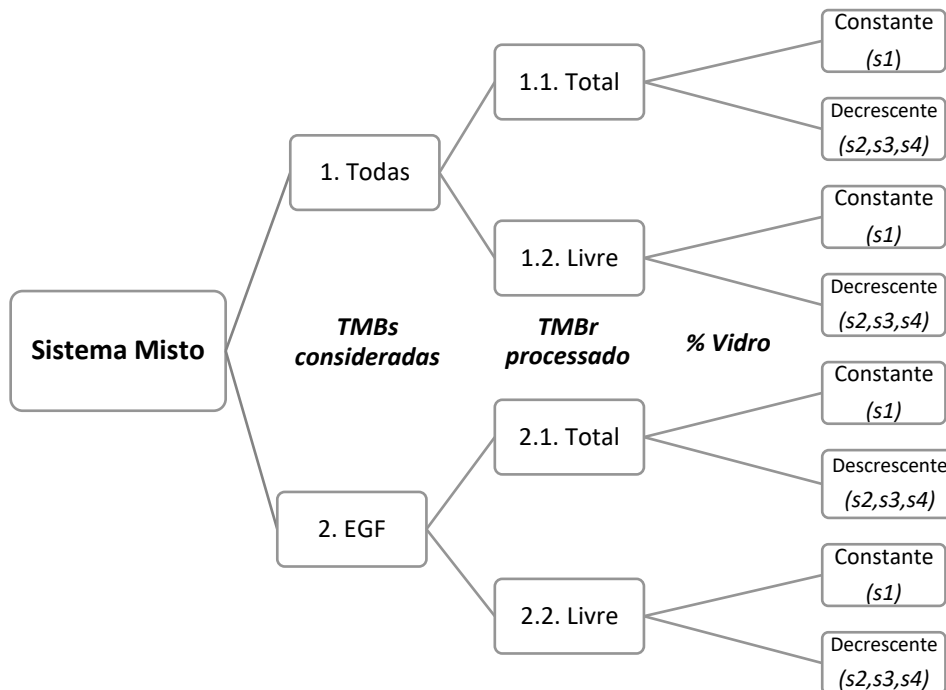


Figura 17: Árvore de cenários do estudo do Sistema Logístico Misto

O ponto 1) é referente ao estudo de dois grupos de TMBs: o primeiro inclui todas as TMBs existentes em Portugal Continental, e o segundo é um subgrupo deste, no qual se consideram apenas as instalações pertencentes ao grupo EGF. A análise deste último subgrupo permitirá verificar a viabilidade financeira de realizar o projeto apenas nestas instalações, que podem beneficiar de um sistema mais integrado e cooperativo, no qual a utilização de economias de escala como forma de



redução de custos da totalidade do sistema pode ser vantajosa. No entanto, há a possibilidade de se ignorar possíveis oportunidades de recuperação de vidro noutras instalações do país, pelo que se considera também fundamental o estudo do sistema com todas as instalações existentes.

O ponto 2) analisa a quantidade de rejeitado a processar, podendo ser realizado de duas formas: na sua totalidade, no qual se obriga a que o rejeitado de todo o sistema seja processado, independentemente de ser lucrativo; ou livremente, ou seja, apenas é processado o rejeitado que é financeiramente benéfico para o sistema. Dado que o projeto se insere numa iniciativa de recuperação de vidro de embalagem, considera-se oportuno o estudo da possibilidade de todo o vidro existente nas instalações TMB ser processado. Contudo, dado que a viabilidade financeira é crucial para o avanço no projeto, será também necessário fazer uma análise mais seletiva da quantidade de rejeitado que pode trazer benefícios tanto ambientais como financeiros.

O ponto 3) diz respeito à percentagem de vidro existente no rejeitado ao longo do horizonte temporal. Esta análise é relevante, já que é de prever que o seu valor registre uma diminuição faseada nos próximos anos, devido ao aumento da consciencialização ambiental da população e a um conjunto de medidas referentes à recolha de resíduos que serão aplicadas nos próximos anos (e que serão explicadas de seguida). Esta parcela é caracterizada por quatro cenários diferentes *s1*, *s2*, *s3* e *s4*. O primeiro é um cenário onde se assume que os valores que se obtiveram na caracterização efetuada na Tarefa 1 do projeto Mobile-Pro-U se mantêm constantes ao longo do período de análise. Os restantes cenários resultam de uma previsão feita pela Sociedade Ponto Verde da evolução desta percentagem. Os seus valores estão apresentados na Tabela 6, sendo de seguida justificados.

Tabela 6: Estimativa de percentagem de vidro presente nos Resíduos Urbanos Indiferenciados ao longo do horizonte temporal

Ano\ Cenário	1 (2021)	2 (2022)	3 (2023)	4 (2024)	5 (2025)	6 (2026)	7 (2027)	8 (2028)	9 (2029)	10 (2030)
$Vp_{t,s1}(\%)$	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
$Vp_{t,s2}(\%)$	100%	90%	90%	85%	85%	24%	24%	20%	20%	20%
$Vp_{t,s3}(\%)$	100%	50%	30%	13%	13%	13%	10%	10%	10%	10%
$Vp_{t,s4}(\%)$	100%	45%	27%	11%	11%	3%	2%	2%	2%	2%

#### **Cenário s1: Implementação Recolha Seletiva de bio-resíduos**

Este é o cenário mais improvável de se realizar, já que resulta da hipótese de nenhuma das medidas expectáveis de entrar em vigor nos próximos 10 anos, sejam de facto aplicadas. Adicionalmente, será necessário registar-se a não existência de um desvio positivo de vidro para recolha seletiva ao longo dos anos, justificando assim uma estagnação da percentagem de vidro no TMB.

#### **Cenário s2: Implementação Recolha Seletiva de bio-resíduos**

A diminuição observada do ano 1 ao ano 5 resulta do desvio positivo de vidro para a recolha seletiva expectado, sendo que o seu valor é decrescente, mas continua a registar valores próximos dos iniciais. As percentagens decrescentes obtidas a partir do ano 6, têm por base a estimativa da população dos SGRU (APA,2019), que prevê não ter recolha seletiva de resíduos orgânicos, já que em 2027 a recolha

proveniente do fluxo indiferenciado deixa de poder ser contabilizada para as metas de reciclagem. O que é retirado deste fluxo, após esta data, só é contabilizado para valorização e para desvio de aterro.

### **Cenário s3: Introdução do Sistema de Depósito Obrigatório**

O decréscimo registado a partir do ano 2 diz respeito à obrigatoriedade a partir de 1 de janeiro de 2022 da existência de um sistema de depósito de embalagens de bebidas em plástico, vidro, metais ferrosos e alumínio com depósito não reutilizáveis (Diário da República, 2018). O cenário considera um período de implementação do sistema obtido através de registos de taxas médias de recuperação de embalagens por via destes sistemas de recolha noutros países e do peso que as embalagens de bebidas em vidro, têm no total do vidro de embalagem colocado no mercado.

### **Cenário s4: Implementação da Recolha Seletiva de bio-resíduos e Introdução do Sistema de Depósito Obrigatório**

O último cenário resulta da combinação dos dois cenários independentes s2 e s3. Este é o cenário mais provável, já que considera todas as mudanças expectáveis de se realizarem durante os próximos 10 anos.

## **5.2. Dados utilizados**

A Tabela 7 apresenta os valores atribuídos aos parâmetros necessários para a otimização. Todos os parâmetros, à exceção do parâmetro C, - custo de deslocação em euros por km - que é utilizado no modelo de roteamento, pertencem à parametrização do modelo de localização e dimensionamento.

Tabela 7: Valores dos parâmetros dos modelos apresentados

Parâmetro	Descrição	Valor	Observações
<b>CLu</b>	Terreno	100.000€	Terreno rural com licença de construção; retirado de (Castel-branc, 2019)
<b>Arm</b>	Processamento e armazenagem do equip.	190.000€	Retirado e adaptado de (Castel-branc, 2019)
<b>CEq</b>	Custo de Equipamento de Suporte	63.000€	Inclui tremonha de alimentação, sistema de aspiração, tela transportadora e contentor de resíduos (Fonte: IDMEC, Manuel Sardinha)
<b>RG</b>	Custo de Investimento em 2 RecGlass	30.000€	Fonte: Reunião IDMEC 04/03/2020
<b>E</b>	Eficácia do diagrama	80%	Retirado de (Dias, 2015)
<b>U</b>	Taxa de utilização do diagrama	90%	Retirado de (Dias, 2015)
<b>Ckmt</b>	Custo de transporte por quilómetro por tonelada	0,094€/ton	Retirado de (Castel-branc,2019)
<b>C</b>	Custo de deslocação em euros por km	1€/km	Valor inclui custo de manutenção do veículo (Fonte: ERSUC)
<b>N</b>	Número de turnos de 8 horas por dia	2	Fonte: Reunião IDMEC 04/03/2020
<b>Cw</b>	Custo anual por trabalhador	20.000€	Retirado de (Castel-branc, 2019)
<b>Ce</b>	Custo de eletricidade por tonelada	3.2€/ton	Atualizado de (Dias, 2015)
<b>Cm</b>	Custo de manutenção anual por diagrama	1)35.380€ 2)50.360€	1) Diagramas fixos e UMP A; 2) UMP A [Retirado de (Dias, 2015)]
<b>Pu</b>	Valor de retorno do vidro resgatado	71€/ton	Despacho n.º 14202-C/2016
<b>Cap</b>	Capacidade processamento (ton/h)	1) 10523 2) 21064	Retirado de (Castel-branc, 2019)
<b>Ai</b>	Custo de aterro por tonelada para as TMB	8€/ton	Retirado de (Castel-branc, 2019) (Fonte: TMBs)
<b>Aex</b>	Custo de aterro externo p/ton	46€/t	Retirado de (Castel-branc, 2019) (Fonte: Maltha)
<b>Ta</b>	Taxa de atualização	10%	Valor estimado tendo em conta taxa de risco elevada baseada no risco e na taxa de juro sem risco (Yahoo Finance, 2020)
<b>Ti</b>	Taxa IRC anual	21%	Depende do resultado de cada período ser positivo ou negativo; Valor de (PwC, 2020)

Todos os valores observados na Tabela 7 são introduzidos como *input* no modelo, à exceção do custo de aterro externo (Aex). Isto porque é assumido que o rejeitado será encaminhado para aterro

pelas próprias TMBs, significando então que o projeto está sob a alçada destas e não de uma entidade externa, o que seria bastante benéfico em termos de custos. Esta situação é mais provável de se realizar no Grupo EGF, devido à interligação entre as estações de tratamento e possíveis benefícios de economias de escala (como já referido), sendo mais difícil de se registar num sistema com todas as TMBs. Assumiu-se as mesmas condições e valores para ambos os casos, sendo que estes valores serão posteriormente estudados mais detalhadamente nas análises de sensibilidade. Os valores da capacidade *Cap* provêm da multiplicação de capacidade de processamento (de 5.33ton/h ou 10.66ton/h dependendo do diagrama) pelo nº de horas em funcionamento por dia (8 horas) e pelo nº de dias úteis durante um ano (247 dias).

Outros dados que serão introduzidos como *inputs* do modelo estão registados na Tabela 8, que apresentam os dados obtidos na Tarefa 1 deste projeto. Os dados do processamento anual de TMBr nas TMBs foi retirado de relatórios da Agência Portuguesa do Ambiente de 2018 (APA, 2018 b), os dados públicos mais recentes.

Tabela 8: Resultados das TMBs estudadas na Tarefa 1 do projeto Mobile-Pro-U

Índice da TMB	Entidade	Localização	TMBr (ton/ano)	TMBr <80mm (ton/ano)	% vidro no TMBr	%TMBr [6-16] mm ( $\alpha$ )
1	ERSUC (A)	Aveiro	112748	41231	71%	51%
2	ERSUC (C)	Coimbra	112748	31196	66%	55%
3	Tratolixo	Malveira	128793	13261	57%	9%
4	Amarsul (Sx)	Seixal	68266	11333	42%	34%
5	Amarsul (St)	Setúbal	68266	7247	47%	35%
6	Valorlis	Marinha Grande	62220	6501	57%	52%
7	Braval	Braga	65171	3463	12%	20%
8	Valnor	Avis	41638	7154	25%	38%
9	Resitejo	Abrantes	20949	13404	18%	10%

Dado que as restantes instalações não foram visitadas no âmbito da Tarefa 1, os dados destas foram recolhidos junto de fontes secundárias: para as instalações Suldouro e Resiestrela utilizou-se informação de (Dias, 2015); para as restantes instalações utilizaram-se rácios no qual se consideraram as somas das quantidades de TMBr das 9 instalações visitadas (ver Anexo VI). A Tabela 9 apresenta os dados obtidos.

Tabela 9: Lista das restantes TMBs a serem consideradas no projeto Mobile Pro-U

Índice da TMB	Entidade	Localização	TMBr (ton/ano)	TMBr <80mm (ton/ano)	% vidro no TMBr	%TMBr [6-16]mm ( $\alpha$ )
10	Suldouro	Porto	26187	5185	67%	44%
11	Resiestrela	Serra da Estrela	45568	9022	53%	44%
12	Resinorte	Guimarães	138093	27341	55%	44%
13	Planalto Beirão	Tondela	82720	16378	55%	44%
14	GESAMB	Évora	21674	4291	55%	44%
15	Resíduos Nordeste	Macedo Cavaleiros	36550	7236	55%	44%
16	Algar	Faro	14232	2818	55%	44%
17	Ambital	Sines	23369	4627	55%	44%
18	Resialentejo	Beja	16204	3208	55%	44%

A Tabela 10 representa a matriz de distâncias  $d(i,j)$  que foi calculada recorrendo a uma aplicação desenvolvida no âmbito do projeto WSMART Route (2019) convertendo a lista de coordenadas geográficas dos vários pontos numa matriz de distâncias reais, em quilómetros.

Tabela 10: Matriz distâncias entre instalações TMB (Retirado de (Castel-branc, 2019))

		Instalação																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TMB	1	0	45	234	243	205	88	210	175	131	158	59	241	143	103	306	311	440	357
	2	45	0	269	278	231	118	245	143	166	126	71	235	221	72	341	346	475	392
	3	232	268	0	24	61	162	161	398	163	381	284	462	291	326	115	120	249	166
	4	242	278	25	0	70	171	145	408	173	390	294	471	301	336	99	104	233	149
	5	205	232	62	71	0	121	207	371	146	354	257	439	274	300	161	166	294	211
	6	88	116	163	172	120	0	173	254	90	236	140	322	218	182	249	253	382	299
	7	212	248	161	145	206	173	0	377	102	360	242	329	158	306	83	200	329	171
	8	177	143	401	410	372	256	377	0	298	34	201	191	322	84	474	478	607	524
	9	129	165	165	146	153	90	102	295	0	277	159	326	155	223	155	202	331	248
	10	161	127	385	394	356	239	361	34	281	0	185	151	306	65	457	462	591	508
	11	60	71	286	295	257	140	243	201	164	183	0	191	169	129	358	363	492	409
	12	241	235	463	472	463	346	328	189	326	150	192	0	183	183	418	540	669	500
	13	144	216	292	301	281	218	157	317	155	300	167	180	0	245	247	369	498	329
	14	100	63	324	333	287	178	299	82	220	64	126	180	246	0	396	401	530	446
	15	303	339	114	98	159	246	88	469	161	452	355	430	260	397	0	92	217	89
	16	309	345	120	104	165	253	200	475	202	458	361	539	368	404	99	0	140	59
	17	438	474	249	233	294	382	329	604	330	587	490	668	497	533	224	140	0	129
	18	355	391	166	150	211	298	170	521	247	503	407	500	329	449	96	59	130	0

Por fim, para determinar o tempo de análise (correspondente ao conjunto  $t$  do modelo de localização efetuado), retirou-se dados relativos às capacidades de processamento diário e à quantidade de TMBr a processar (ou seja, quantidade de rejeitado abaixo de 80mm) na instalação de menor dimensão. Assumiu-se que o intervalo de tempo adequado será um valor intermédio dos dias de processamento necessários para escoar todo o produto desta instalação de menor dimensão (TMB Algar). Os cálculos encontram-se descritos na Tabela 11.

Tabela 11: Obtenção Período de Análise Adequado

Cap. Proc. Diária	TMBr <80mm Mínimo	Dias para processamento total
5,33ton/h x 8h x 2turnos = 85,28 ton/dia	3115 ton/ano	$\frac{3115}{85,28} \cong 37$ dias
10,66ton/h x 8h x 2turnos = 170,56 ton/dia		$\frac{3115}{170,56} \cong 19$ dias

Com resultados a variar entre os 19 e os 37 dias (dependendo da capacidade de processamento), assumiu-se que um mês (30 a 31 dias) seria um intervalo de análise adequado. Como consequência, o conjunto  $T$  do modelo de localização e dimensionamento será traduzido por intervalos de tempo mensais, estando cada ano dividido em 12 períodos iguais. Adicionalmente, no modelo de roteamento, a variável  $Q$  terá o valor 12.

### 5.3. Resultados dos Cenários Independentes

Esta secção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos na otimização dos cenários apresentados no subcapítulo 5.1 de forma independente. Dado que o modelo estocástico desenvolvido analisa todos os cenários conjuntamente, de forma a obter os valores de VAL dos cenários independentes, será atribuída uma probabilidade de 100% ao cenário que se pretende analisar e uma probabilidade de 0% aos restantes cenários. Este estudo está dividido em duas partes:

- Estudo do sistema que envolve todas as TMBs de Portugal Continental – referente aos cenários 1 apresentados na árvore da Figura 17;
- Estudo do sistema que integra apenas as TMBs pertencentes ao grupo EGF – referentes aos cenários 2 da árvore da Figura 17.

#### 5.3.1. Resultados Cenário 1

Os resultados das simulações do modelo de localização e dimensionamento para o cenário 1 estão presentes na Tabela 12, onde se encontram definidos os valores obtidos da maximização do VAL e de outros *outputs* relevantes na criação do sistema logístico: número e tipologia de diagramas a implementar, custo de investimento total no projeto e quantidade de vidro recuperado. Encontram-se apresentados 8 cenários diferentes: 4 referentes ao processamento total nas instalações (1.1) e 4 referentes ao processamento livre do rejeitado (1.2.).

Tabela 12: Análise Resultados do Cenário 1

Cenários	Nº Instal. Fixas (Diagramas Fixos)	Nº Diag. Móveis (Tipo UMP)	Custo Investimento Total (€)	Vidro recuperado (ton)	VAL (€)
1.1 s1	1 (2)	5 (1 k2, 4 k3)	4 902 500	376 240	4 300 000
1.1. s2	1(2)	5 (1 k2, 4 k3)	4 902 500	209 942	-1 360 000
1.1. s3	1 (2)	5 (1 k2, 4 k3)	4 902 500	97 446	-6 690 000
1.1. s4	1(2)	5 (1 k2, 4 k3)	4 902 500	77 505	-7 540 000
1.2. s1	1 (2)	3 (3 k3)	3 407 000	343 617	5 950 000
1.2. s2	1 (2)	2 (2 k3)	2 171 500	126 457	2 000 000
1.2. s3	1 (3)	0	753 000	25 095	57 000
1.2. s4	1 (3)	0	753 000	24 235	10 000

Como esperado, as opções em que o processamento do rejeitado é livre (designadas por 1.2.) têm um VAL superior ao processamento total (1.1.), já que este módulo permite escolher qual a quantidade ótima de produto a processar de modo a ser o mais rentável possível. No entanto, o custo de investimento total do sistema é mais elevado nos cenários 1.1, já que estes obrigam a que a capacidade instalada seja maior, pois se processa todo o TMBR existente no sistema, implicando também um maior número de diagramas. Considerando o VAL do projeto dos cenários em que há processamento total do rejeitado do sistema, o subcenário s1 é o único lucrativo.

Analisando em particular os cenários livres 1.2., estes registam valores de VAL positivos em todos os cenários de evolução de presença de vidro. O subcenário 1.2. s1 acaba por ter valores bastante superiores aos restantes, já que não regista nenhuma descida da percentagem de vidro presente no TMBR, registadas em cada um dos outros subcenários s2, s3 e s4 (Tabela 6). Esta descida faz com que o processamento de rejeitado não seja justificável para todos os 10 anos do horizonte temporal estabelecido, porque os custos implícitos à recuperação do vidro começam a ser superiores às receitas geradas. Isto significa que nos restantes anos em que os diagramas não estão ativos, o resultado anual será negativo, devido à depreciação anual do capital investido (equação [5]). A Tabela 13 apresenta os anos de processamento verificados em cada um dos cenários livres 1.2.

Tabela 13: Anos de Processamento dos diagramas para cada cenário

Cenário	Anos de Processamento
1.2. s1	10 anos
1.2. s2	5 anos
1.2. s3	3 anos
1.2. s4	3 anos

Em todos os cenários 1 são escolhidos diagramas fixos, sendo que estes são utilizados nas instalações TMB de maior dimensão, onde há uma quantidade substancial de rejeitado para processar, como por exemplo na ERSUC Aveiro (TMB 1), que não só é a estação com mais rejeitado, como também é aquela que gera maior lucro por tonelada processada, devido à forte presença de vidro no

produto (ver Tabela 8). Estes diagramas fixos acabam por ser utilizados não só para processamento na própria TMB em que se encontram, como também para processamento noutras instalações (caso se verifique excedente de capacidade de processamento e seja financeiramente benéfico). Isto acontece devido ao carácter centralizado dos diagramas fixos, que permite o processamento de rejeitado oriundo doutras localizações, como verificado nos cenários 1.2. s3 e 1.2. s4, onde o rejeitado proveniente da instalação ERSUC Coimbra (TMB 2) é deslocado para a ERSUC Aveiro durante o primeiro ano do projeto. Nos anos 2 e 3, o sistema opera apenas com dois diagramas fixos ao invés de três, já que o processamento do TMBr de Coimbra deixa de ser lucrativo. Pode-se concluir então que este terceiro diagrama é implementado apenas com o propósito de processar TMBr da ERSUC Coimbra no primeiro ano do projeto. As economias de escala existentes no investimento dos diagramas fixos da mesma instalação de processamento (equação [9]) e a proximidade relativa entre as duas TMBs são os elementos chave para esta conclusão se registar. A Figura 18 ilustra o desenho do sistema logístico descrito para os cenários 1.2.s3 e 1.2. s4.

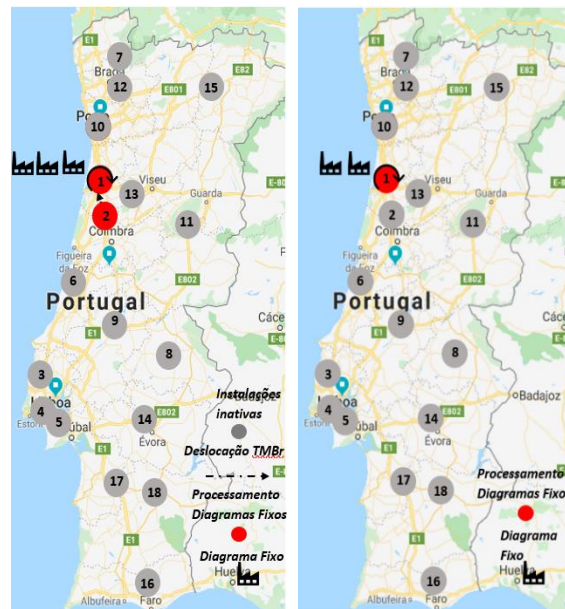


Figura 18: Desenho do sistema logístico associados aos cenários 1.2. s3 e 1.2.s4 durante o 1º ano do projeto (à esquerda) e durante o 2º e 3º ano (à direita)

Contrariamente à tipologia fixa, as unidades móveis são utilizadas para processamento em unidades com menor rejeitado produzido anualmente. Após terminar de processar o rejeitado destas instalações mais pequenas, a unidade móvel desloca-se a outra estação de tratamento, tirando assim proveito máximo da sua capacidade.

A Tabela 14 apresenta os tempos de permanência (em meses) de cada tipologia de unidade móvel nas diferentes instalações TMB obtidos na otimização do modelo de localização. Este tempo de permanência irá variar com a quantidade TMBr a processar em cada uma das instalações. A TMB 1 (ERSUC Aveiro) não se encontra referida nesta tabela, visto que o seu TMBr é sempre processado por um diagrama fixo. Os cenários 1.2. s3 e s4 também foram excluídos desta secção por não terem unidades móveis nos sistemas delineados.



Tabela 14: Tempo de Permanência das unidades móveis nas instalações

TMB	1.1. s1, s2, s3, s4		1.2. s1	1.2. s2
	Tempo Permanência UMP A ( $NT_i$ )	Tempo Permanência UMP B ( $NT_i$ )	Tempo Permanência UMP B ( $NT_i$ )	Tempo Permanência UMP B ( $NT_i$ )
2	-	9 meses	9 meses	9 meses
3	-	4 meses	-	-
4	1 mês	3 meses	-	-
5	1 mês	2 meses	2 meses	-
6	-	2 meses	2 meses	2 meses
7	-	1 mês	-	-
8	-	2 meses	-	-
9	-	4 meses	-	-
10	3 meses	-	2 meses	-
11	-	3 meses	3 meses	-
12	-	8 meses	8 meses	8 meses
13	-	5 meses	5 meses	5 meses
14	3 meses	-	1 mês	-
15	1 mês	2 meses	2 meses	-
16	-	1 mês	-	-
17	1 mês	1 mês	1 mês	-
18	2 meses	-	1 mês	-
TOTAL (QT)	12 meses	47 meses	36 meses	24 meses
Nº de anos em que processamento se repete (N)	10 anos		10 anos	5 anos

Os dados indicados na tabela 14, conjuntamente com as informações relativas ao número de diagramas móveis verificado anteriormente, são utilizados como *inputs* para o modelo de roteamento. O seu resultado permite visualizar o desenho ótimo dos sistemas logísticos que tenham unidades móveis e permite determinar o valor dos custos de deslocação associados a estas. A Figura 19 demonstra os desenhos dos sistemas logísticos verificados no cenário 1.1., onde estão estabelecidas as rotas efetuadas pelos diagramas móveis. As setas indicam as deslocações efetuadas no primeiro ano, sendo que para os restantes anos se realiza o percurso contrário. Ou seja, é assumido que a unidade móvel começa o ano a processar na instalação que se encontrava no final do ano anterior. Isto é registado devido à reintrodução do rejeitado pesado após o começo do novo ano de análise (equação [14]).

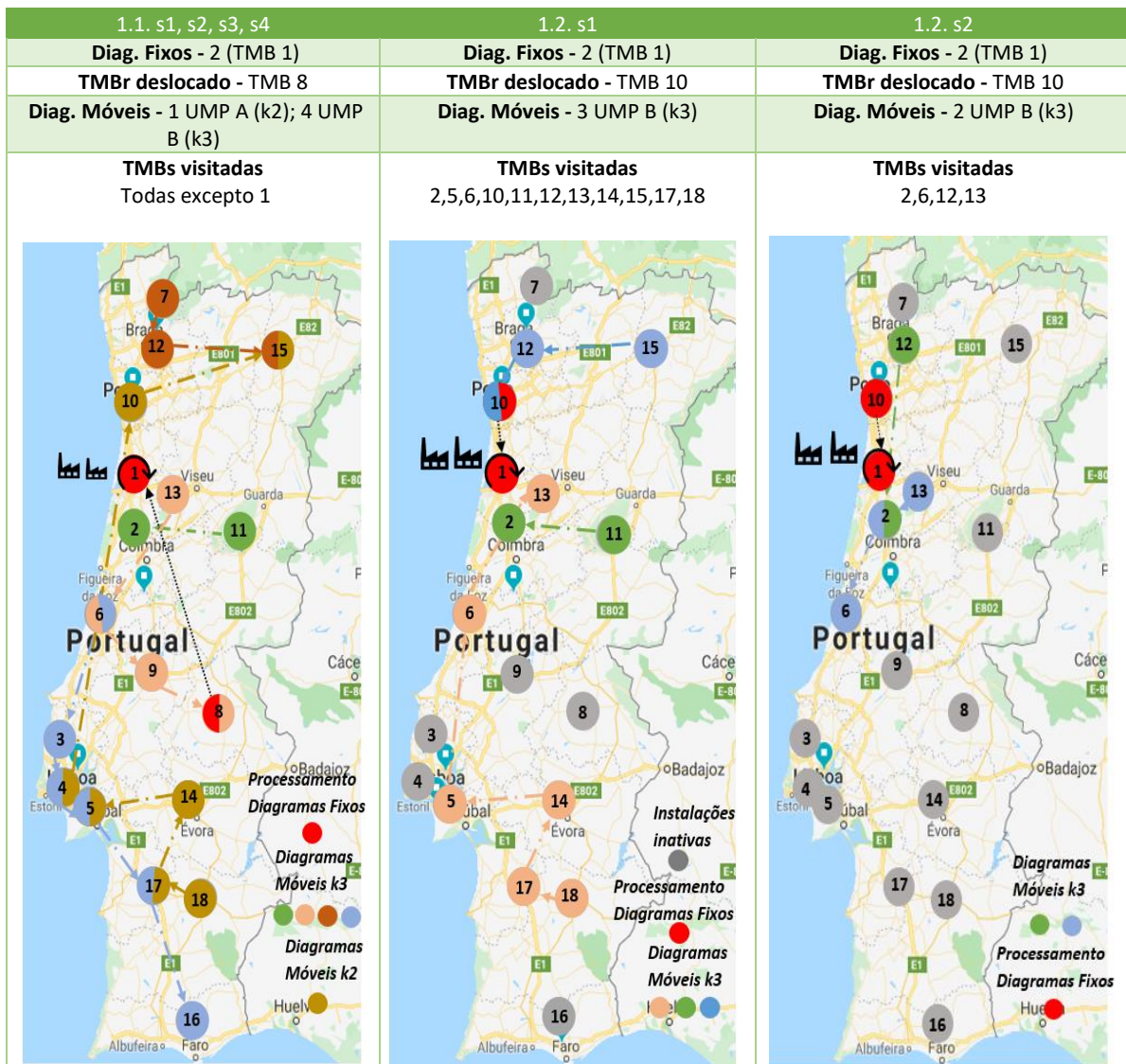


Figura 19: Representação de todos os fluxos dos cenários 1.1., 1.2. s1 e 1.2 s2 respetivamente

Da figura 19 observa-se que existem instalações ilustradas com mais do que uma cor, representando a visita de mais do que uma unidade móvel durante o ano (ver Anexo V). No caso dos cenários 1.1., esta situação verifica-se devido ao processamento de diagramas móveis de tipologias diferentes (UMP A e UMP B). No cenário 1.2.s2, que detém apenas uma tipologia de unidade móvel, a TMB 2 é também visitada por mais do que um diagrama móvel. Isto verifica-se porque não existe uma combinação capaz de processar o TMBr das 4 instalações através da visita de apenas uma unidade móvel em cada uma (TMB 2 - 9 meses; TMB 6 - 2 meses; TMB 12 - 8 meses; TMB 13 - 5 meses).

De modo a avaliar se o pressuposto referente à influência desprezável dos custos de deslocação das unidades móveis nos custos totais foi aplicado corretamente, encontram-se na Tabela 15 os valores relativos à percentagem que os custos de transporte destas unidades móveis têm nos custos operacionais totais do sistema ao longo dos 10 anos. Estes incluem custos de eletricidade, manutenção, recursos humanos e custos de transporte das deslocações de rejeitado entre instalações fixas.

Tabela 15: Custo de Transportes das Unidades Móveis Comparativamente ao Custo de Investimento Total do Projeto

Cenário	Custo de Transporte Diagramas Móveis Totais	Custos Operacionais	Custos Transp Diag. Móveis + Operacionais	% CTr no Custo Op. Total
1.1. s1, s2, s3, s4	17 405 €	12 127 600 €	12 145 005 €	0,14%
1.2. s1	9 050 €	8 797 490 €	8 806 540 €	0,10%
1.2. s2	1 500 €	3 395 439 €	3 396 939 €	0,04%

Daqui se conclui que o pressuposto assumido no desenvolvimento da solução proposta foi bem aplicado, já que, no caso concreto dos cenários analisados, a influência no custo operacional do sistema é mínima (menor que 1%).

### 5.3.2. Resultados Cenário 2

Esta secção avalia os resultados do modelo na ótica de integração exclusiva das instalações do grupo EGF num sistema comum. Esta análise é relevante dada a possibilidade de cooperação entre instalações para coordenar todas as atividades implícitas e para tirar proveito de economias de escala. Para efeitos da análise comparativa com o cenário 1, não foi aplicada nenhuma alteração aos parâmetros dos custos de investimento nos diagramas e equipamentos deste sistema específico (ou seja, não há visibilidade da possível vantagem das economias de escala). A Tabela 16 tem registado os valores de todos os cenários 2 apresentados.

Tabela 16: Análise Resultados do Cenário 2

Cenários	Nº Instal. Fixas (Diagramas Fixos)	Nº Diag. Móveis (Tipo UMP)	Custo Investimento Total (€)	Vidro recuperado (ton)	VAL (€)
2.1 s1	1 (2)	3 (3 k3)	3 221 000	306 733	4 900 520
2.1. s2	1 (2)	3 (3 k3)	3 221 000	124 512	393 379
2.1 s3	1 (2)	3 (3 k3)	3 221 000	79 444	- 3 830 151
2.1. s4	1 (2)	3 (3 k3)	3 221 000	63 185	-4 509 159
2.2. s1	1 (2)	2 (2 k3)	2 264 500	276 690	5 500 000
2.2. s2	1 (2)	2 (2 k3)	2 264 500	124 512	1 900 000
2.2. s3*	1 (3)	0	753 000	25 095	57 000
2.2. s4*	1 (3)	0	753 000	24 235	10 000

\*Mesmo valores que cenário 1

Analisando os resultados dos cenários 2.1., conclui-se que para o processamento total deste sistema mais reduzido, são necessários no mínimo dois diagramas fixos e três diagramas móveis k3. Consequentemente, regista-se um custo de investimento total mais reduzido que nos cenários 1.1. O VAL obtido para o processamento total no Grupo EGF é superior ao observado quando se inclui no sistema todas as TMBs. Isto acontece porque o prejuízo obtido por processar as TMBs que não são

lucrativas é menor, já que estão integradas menos TMBs e porque grande parte das instalações deste sistema acabam por gerar lucro - que também pode ser observado pela diferença mais pequena nos resultados do cenário 2 em relação ao processamento total e livre quando comparados com o 1 (Tabelas 12 e 16).

Relativamente aos cenários 2.2. em que o processamento é livre, era expectável que dado o número mais reduzido de oportunidades de processamento, os valores do VAL destes cenários fossem menos proveitosos que os observados no cenário 1.2., da secção anterior. No entanto, pode-se também verificar que não existe uma grande diferença entre os valores de VAL obtidos, o que leva a crer que a análise deste cenário é igualmente pertinente - nos cenários 2.2. s3 e s4 e 1.2 s3 e s4, esta diferença chega mesmo a ser nula (ver Tabela 12 e 16). Isto porque o cenário 1.1. s3 e s4 apenas trabalha o processado proveniente das instalações ERSUC, sendo que a de Aveiro (TMB 1) detinha uma instalação com 3 diagramas fixos, que era aproveitada também pela instalação de Coimbra (TMB 2). Estas instalações pertencem igualmente ao grupo EGF.

De modo a efetuar o desenho do planeamento logístico do sistema integrado deste conjunto de instalações, o procedimento relativo aos tempos de permanência em cada instalação foi de novo efetuado para estes cenários. A Figura 20 demonstra o resultado da simulação do modelo de roteamento.

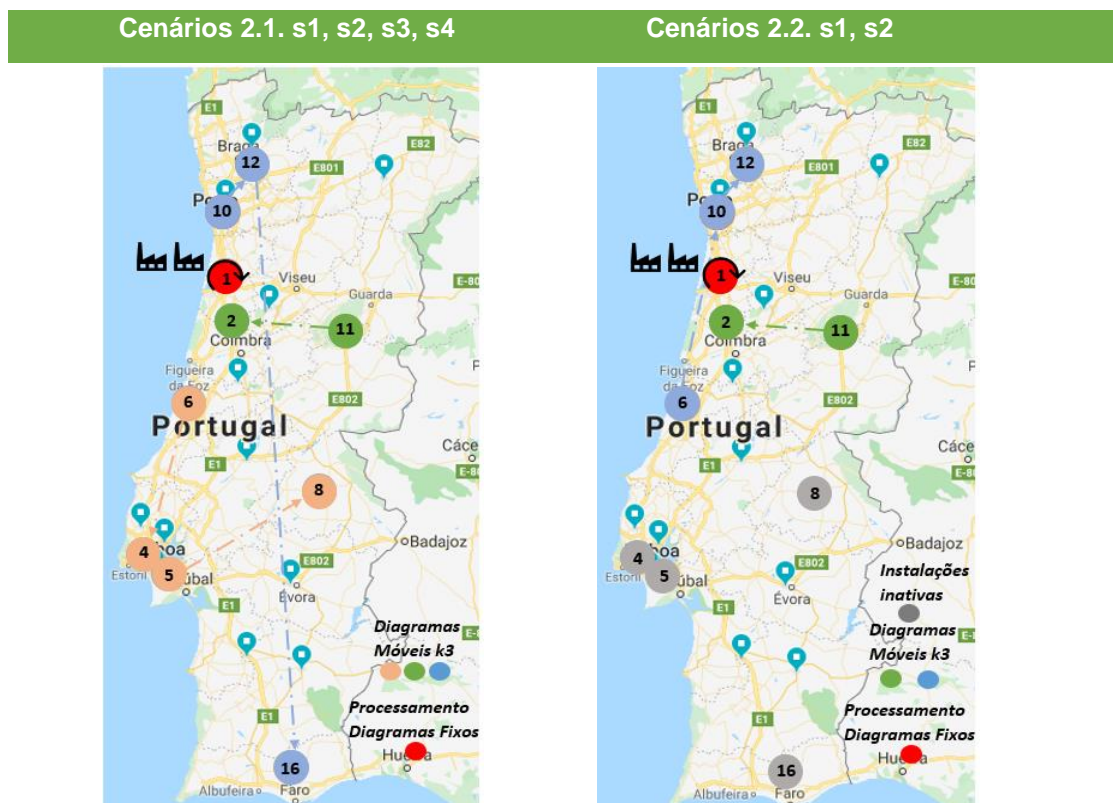


Figura 20: Representação do sistema logístico associado aos cenários 2.1. e 2.2. s1 e s2

## 5.4. Resultados do Modelo Estocástico

Após o estudo dos cenários independentes, o modelo estocástico será aplicado para obter a melhor combinação de investimento no sistema considerando todos os subcenários da evolução de vidro no TMBr e as suas probabilidades de acontecimento (estabelecidas pela Sociedade Ponto Verde). Estas probabilidades foram apresentadas em intervalos de valores, pelo que se utilizou a média de cada conjunto para efeitos de análise (ver Tabela 17).

Tabela 17: Probabilidade de Acontecimento de cada Cenário s (Fonte: SPV)

Modelo Estocástico		
Cenário	Probabilidade de Acontecimento	P (s)
s1	[0 - 5] %	2,5%
s2	[5 - 10] %	7,5%
s3	[5 - 10] %	7,5%
s4	[80 - 85] %	82,5%

Como se verificou nos cenários 1.1. e 2.1., referentes ao processamento total do rejeitado do sistema, as decisões de investimento em diagramas mantêm-se iguais independentemente da evolução da presença de vidro no rejeitado (ver Tabela 12 e 16). Isto significa que estas decisões de investimento são aquelas que asseguram um VAL máximo ao processar todo o TMBr presente no sistema. Caso esta análise fosse efetuada para o modelo estocástico, os resultados em termos de investimento seriam iguais e apenas o valor do VAL esperado seria diferente em relação às análises já efetuadas. Sendo que a principal função do modelo é de suportar a decisão de investimento nos diagramas, foi considerado que uma análise ao processamento total seria redundante. Adicionalmente, os cenários s1, s2, s3 e s4 independentes deixam também de fazer sentido, já que serão considerados conjuntamente no modelo estocástico. Concluindo, a análise estabelecida na árvore de cenários da Figura 17, fica reduzida à aplicação deste modelo para os cenários em que o processamento é livre e tendo em conta os dois possíveis sistemas de TMBs (todas ou apenas o Grupo EGF).

O sistema logístico definido pelo modelo será aquele que matematicamente se adequa mais a todas as previsões de percentagem de vidro no rejeitado presente ao longo dos anos e às suas probabilidades, possibilitando um VAL esperado mais elevado. Os resultados obtidos na otimização do modelo estocástico estão presentes nas Tabelas 18 e 19. Os *outputs* do modelo apresentam-se divididos por cenário, sendo que o único valor que se encontra agregado é o valor do VAL (função objetivo). Por isso, foi também realizado o cálculo de uma média ponderada que permite obter o valor da quantidade de vidro recuperada tendo em conta os subcenários e as probabilidades de acontecimento.

Tabela 18: Resultados do Investimento e VAL do modelo estocástico

Nº Instalações Fixas	Nº Diagramas Fixos	Nº Diagramas Móveis	VAL do Projeto
1 (TMB 1)	3	0	206 400 €

Tabela 19: Quantidade de vidro recuperado no modelo estocástico e cálculo da média ponderada

Quantidade de Vidro recuperado (ton)				
Ano	s1	s2	s3	s4
1	16495,4	16495,4	16495,4	16495,4
2	16495,4	14845,87	5374,7	4837,2
3	16495,4	14845,87	3224,8	2902,3
4	16495,4	14021,1	-	-
5	16495,4	14021,1	-	-
6	16495,4	-	-	-
7	16495,4	-	-	-
8	16495,4	-	-	-
9	16495,4	-	-	-
10	16495,4	-	-	-
Total	164954	74229,34	25094,9	24234,9
Probabilidade de acontecimento	2,5%	7,5%	7,5%	82,5%
Total * Probabilidade	4123,85	5567,2005	1882,1175	19993,7925
Média Ponderada Vidro Recuperado	<b>31566,9 ton</b>			

O sistema logístico misto ótimo obtido é, na verdade, um sistema puramente fixo, caracterizado pela existência de uma instalação fixa de processamento na ERSUC Aveiro (TMB 1), no qual estão inseridos três diagramas de processamento, sendo que o rejeitado da ERSUC Coimbra é também reencaminhado para esta estação de tratamento. Este foi também o resultado obtido para os cenários independentes 1.2. e 2.2. s3 e s4. A partir deste resultado pode-se então concluir que o sistema para o Grupo EGF seria idêntico, já que também inclui as TMBs da ERSUC, fazendo com que esta seja a decisão ótima para os dois casos.

Da Tabela 18 verifica-se que o valor VAL de 206 400€ é mais elevado que os valores obtidos nos cenários de processamento livre 1.2. e 2.2. s3 e s4 e menores que os dos cenários 1.2. e 2.2. s1 e s2 (ver Tabela 12). Isto porque as probabilidades de acontecimento associadas aos cenários s1 (2,5%) e s2 (7,5%) são reduzidas comparativamente às registadas em s4 (82,5%). O cenário s3 (7,5%), embora tenha uma probabilidade igualmente reduzida, é um cenário com valores próximos dos registados no cenário s4, sendo que as diferenças no valor do VAL obtido entre os dois são pequenas (ver Tabela 12 e 16). A média ponderada do vidro recuperado é também superior aos registados em 1.2. e 2.2. s3 e s4 e inferior aos de 1.2. e 2.2. s1 e s2. A Figura 21 apresenta a rede de distribuição ótima obtida pelo modelo estocástico desenvolvido.



Figura 21: Representação da solução ótima do Modelo Estocástico

Na realidade, embora o modelo decida investir em três diagramas fixos, estes podem estar ativos ou não dependendo da percentagem de vidro no rejeitado verificado em cada ano, já que como mencionado anteriormente, o deslocamento do rejeitado da ERSUC Coimbra ou até mesmo o processamento do TMBR como um todo pode passar a ser economicamente inviável caso estas percentagens sejam demasiado reduzidas, acabando por não se registar processamento e recuperação de vidro. A Tabela 20 apresenta o número de diagramas fixos em funcionamento em cada um dos cenários s1, s2, s3 e s4, representado pela variável  $NDfa_{j,k,a,s}$  do modelo de localização.

Tabela 20: Número de diagramas fixos em funcionamento em cada cenário s

Diagramas Fixos em Funcionamento				
Ano	s1	s2	s3	s4
1	3	3	3	3
2	3	3	2	2
3	3	3	2	2
4	3	3	-	-
5	3	3	-	-
6	3	-	-	-
7	3	-	-	-
8	3	-	-	-
9	3	-	-	-
10	3	-	-	-

## 5.5. Análise de Sensibilidade

As análises de sensibilidade de seguida apresentadas têm o intuito de acrescentar robustez no estudo do sistema. Estas irão consistir na variação de parâmetros do modelo que são suscetíveis de ser modificados tendo em conta o contexto do projeto. Os parâmetros analisados e a relevância dos seus estudos são os seguintes:

1. Preço do vidro recuperado ( $P_u$ ) - Legalmente o valor de retorno de recuperação de vidro nas instalações TMB é de 71€/tonelada. No entanto, será expectável que este valor diminua, já que as iniciativas previstas nos próximos anos têm o intuito de incentivar as TMBs a serem mais eficazes na recolha seletiva e, como tal, a recuperação dos materiais de recolha indiferenciada não será priorizada. Adicionalmente, caso o projeto esteja ao encargo de uma entidade externa, este preço de retorno será muito inferior;
2. Custo de aterro externo ( $A_{ex}$ ) - A parametrização dos custos de aterro externo no modelo estudado tem como pressuposto que o projeto fica sob a alçada das TMBs, o que significa que o seu valor está na ordem dos 8€/tonelada. Na verdade, este pode não ser o contexto em que o projeto vai ser aplicado, havendo a hipótese do projeto estar sob a alçada de uma entidade externa. Nesse caso, de acordo com valores fornecidos pela Maltha, este custo pode variar entre [46-64] €/tonelada, contemplando o transporte;
3. Eficácia dos diagramas ( $E$ ) - O último parâmetro a ser avaliado é a eficácia nos diagramas, cujo valor estabelecido foi de 80%, assumindo um conjunto de condições ótimas para o seu processamento (como por exemplo, a secagem correta de todo o produto). Será expectável que o pressuposto registado seja alvo de variações, não só pela complexidade dos processos efetuados, mas também pela natureza diversa do TMBr, que dependendo de instalação para instalação, detém composições e granulometrias diversas.

Dado que as informações relativas às percentagens de vidro no rejeitado foram fornecidas pela SPV em forma de intervalo, as alterações aos parâmetros serão aplicadas ao modelo estocástico tendo em conta três cenários diferentes, apresentados na Tabela 21:

Tabela 21: Cenários da Análise de Sensibilidade

Análises de Sensibilidade				
Cenário	s1	s2	s3	s4
	[0 – 5] %	[5 – 10] %	[5 – 10] %	[80 – 85] %
A (Base)	2,50%	7,50%	7,50%	82,50%
B (Otimista)	5%	10%	5%	80%
C (Pessimista)	0%	5%	10%	85%

A explicação dos novos cenários encontra-se descrita abaixo:

- Cenário A – cenário em que é utilizado a média dos intervalos de probabilidade existentes. Este foi o cenário estudado na secção 5.5;
- Cenário B – cenário otimista em relação à evolução da percentagem de vidro, já que inclui o valor máximo dos intervalos de probabilidade registados em s1 e s2 – que são



aqueles que registam valores mais elevados - e os valores mais baixos dos intervalos apresentados para s3 e s4;

- Cenário C – cenário pessimista, no qual se utilizou o raciocínio inverso ao apresentado em B, ou seja, utilização dos valores máximo registados em s3 e s4 e os valores mínimos presentes em s1 e s2.

A estrutura da análise de sensibilidade realizada encontra-se descrita na árvore de cenários da Figura 22.

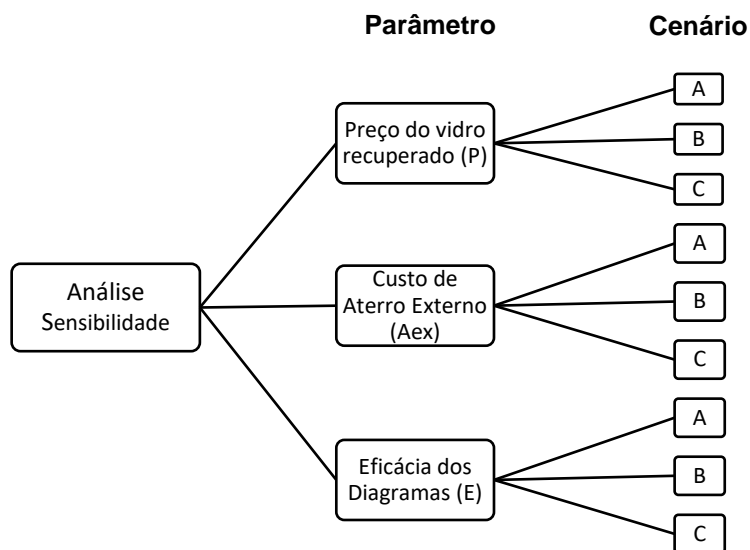


Figura 22: Árvore de cenários das análises de sensibilidade a efetuar

As análises de sensibilidade efetuadas serão suportadas pela apresentação de gráficos referentes às alterações dos parâmetros nos três cenários A, B e C. Nessas imagens estarão representados os valores do VAL (linhas contínuas) e da média ponderada de vidro recuperado (linhas a tracejado), cujo método de cálculo encontra-se já demonstrado na Tabela 19. O cenário A estará assinalado a amarelo, o cenário B a verde e o cenário C a vermelho.

#### Análise de Sensibilidade ao Valor de retorno do vidro recuperado (Pu)

A Tabela 22 apresenta os valores do preço de recuperação de vidro considerados nesta análise, estando representado a negrito o valor assumido nos cenários estudados anteriormente:

Tabela 22: Preços de recuperação do vidro nas instalações TMB a considerar

Parâmetro Pu	Valor (€/ton)
	50
60	
65	
<b>71</b>	

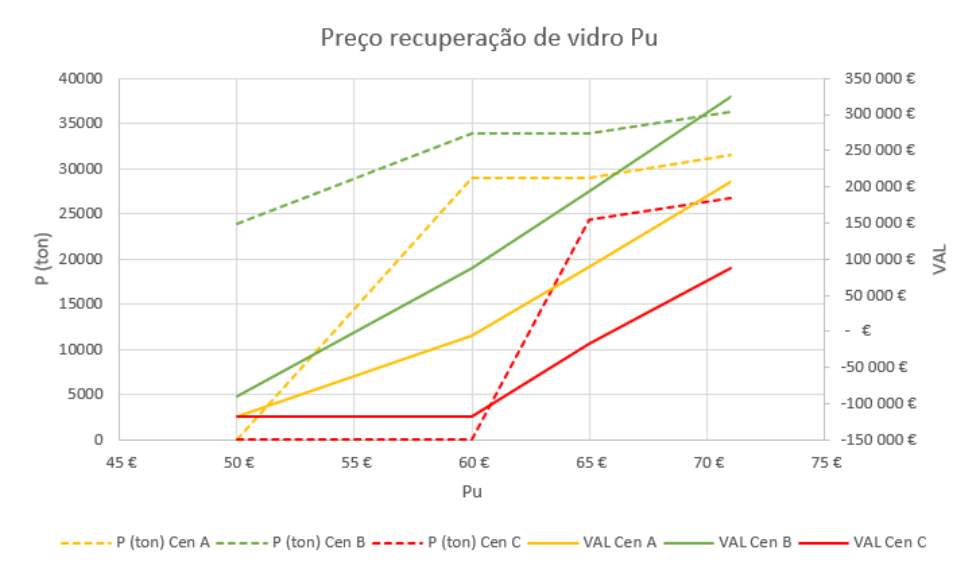


Figura 23: Análise de Sensibilidade Pu

Da análise de sensibilidade da Figura 23, pode-se concluir que quanto maior for o preço de recuperação do vidro, maior será o VAL e a quantidade de vidro recuperada no sistema. No cenário A, observa-se que o VAL atinge valores positivos a partir de um valor próximo dos 60€/tonelada, ou seja, este preço poderá reduzir cerca de 10€ sem pôr em causa a viabilidade financeira do projeto (tendo em conta todos os pressupostos assumidos no modelo). Quando o valor é de 50€/tonelada, o modelo decide não processar por completo. O VAL obtido é negativo devido à equação [39] do modelo de localização, no qual é obrigatório o investimento em pelo menos um diagrama. Quando o processamento não se realiza, o modelo escolhe investir num diagrama fixo, já que é aquele que acarreta menos custos totais para o sistema. Nos restantes valores deste parâmetro (65€/ton e 71€/ton) a decisão ótima continua a ser no investimento em três diagramas fixos na ERSUC Aveiro, com deslocação do rejeitado da ERSUC Coimbra quando é benéfico em termos financeiros (ver Anexo VII). Contudo, a quantidade de vidro recuperado quando o valor é de 71€/tonelada é mais elevado do que os registados com 60€ e 65€, devido ao processamento durante mais um ano no cenário s4 (passa de 2 anos de processamento para 3, porque revela-se benéfico em termos financeiros).

O cenário B, embora também apresente valores de VAL negativos para valores de 50€/tonelada, apresenta quantidades de vidro recuperado maiores que zero. Isto significa que o processamento para esta situação continua a ser benéfico (ou seja, as receitas são maiores que os custos operacionais), embora o lucro obtido com a recuperação de vidro não seja capaz de compensar o investimento inicial efetuado nos diagramas. Neste caso, a decisão ótima de investimento é em apenas dois diagramas fixos na ERSUC Aveiro, continuando a registar-se deslocamento de rejeitado para a ERSUC Coimbra, embora em menor quantidade. Nos restantes valores (60€/ton, 65€/ton e 71€/ton) a decisão é a de investir em três diagramas fixos na mesma localização. Os valores do VAL começam a ser positivos quando o preço de recuperação do vidro se encontra entre os 50 e os 60€/tonelada. O VAL obtido neste cenário, com um preço de 71€/tonelada, é de 325 340€ e a média ponderada de quantidade de vidro recuperada é de 36313 toneladas. O cenário A, em termos comparativos, apresenta um VAL de 206 401€ e uma recuperação de 31566 toneladas de vidro.

O cenário C apresenta processamento a partir dos 65€/tonelada, registando um VAL próximo de 0 para esse valor. As decisões de investimento no caso de existir processamento mantêm-se semelhantes aos cenários anteriores— três diagramas fixos na ERSUC Aveiro. O VAL para 71€/tonelada em C é de 86 742€ (Cenário A – 206 401€; Cenário B – 325 340€) e a média ponderada de quantidade de vidro recuperada é de 26820 toneladas (A – 31566 ton; B – 36313 ton). Pode-se então concluir através desta análise que o preço relativo à recuperação de vidro das operações de aterro poderá oscilar entre os 55 e os 65€/tonelada para assegurar a viabilidade financeira do projeto, dependendo do contexto verificado.

### Análise de Sensibilidade do Custo de Aterro Externo (Aex)

A Tabela 23 apresenta os valores considerados no estudo do custo de aterro externo Aex:

Tabela 23: Custos de aterro externo a considerar

Parâmetro Aex	Valor (€/ton)
	8
	10
	12
	14

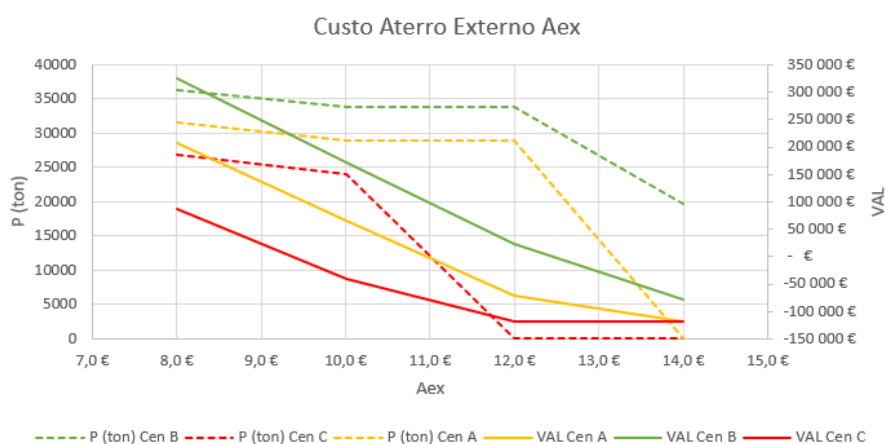


Figura 24: Análise Sensibilidade Aex

Da Figura 24 verifica-se que o aumento do custo de aterro externo tem um efeito contrário ao registado no preço de retorno do vidro  $P_u$ , ou seja, quanto maior é o valor deste custo, menor será o VAL do projeto e a quantidade de vidro recuperada. No cenário A o valor do VAL atinge valores positivos com um custo de aterro externo entre os 10 e os 12€/tonelada. O processamento regista-se até um valor máximo de 12€/tonelada, sendo que acima desse valor não há recuperação de vidro. Para valores entre 8 e 12€ por tonelada a decisão ótima é a do investimento em três diagramas fixos na ERSUC Aveiro.

O cenário B apresenta valores de VAL positivos até um valor ligeiramente superior a 12€. Um custo de 14€ acarreta prejuízos, embora a decisão passe pelo investimento em dois diagramas fixos

na ERSUC Aveiro, onde se regista processamento. Nos restantes cenários inferiores a 12€/tonelada, o investimento é em três diagramas.

No cenário C apenas é justificável processar o rejeitado pesado até um valor de 10€/tonelada, registrando-se um VAL positivo até um valor próximo deste. Na hipótese de o custo de aterro externo ser de 12 ou 14€/tonelada, o modelo decide não processar. Quando há processamento, este é alavancado através do investimento em três diagramas na ERSUC Aveiro. Em suma, pode-se concluir que o custo de aterro externo poderá oscilar entre os 10 e os 12€/tonelada, dependendo do contexto verificado. Tendo em consideração que o valor do custo de aterro externo pode chegar aos 46€/tonelada no caso de o projeto estar sob a alçada de uma entidade externa, é possível concluir que será necessário um modelo de negócios que inclua as TMBs, sendo que se tal não acontecer, não existe processamento no sistema.

### Análise de Sensibilidade da Eficácia dos Diagramas (E)

A Tabela 24 apresenta os valores considerados neste estudo:

Tabela 24: Eficácias dos Diagramas a considerar

Parâmetro Aex	Valor (%)
	60
	65
	<b>80</b>

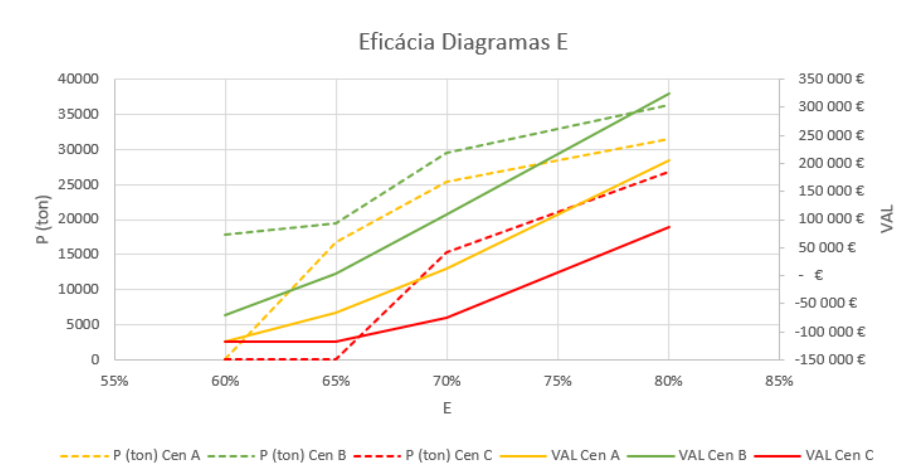


Figura 25: Análise Sensibilidade E

Da análise da Figura 25 verifica-se que quanto maior for a eficácia dos diagramas do sistema, maior será o valor do VAL e da quantidade de vidro recuperada. O cenário A regista valores de VAL positivo até uma eficácia mínima de aproximadamente 70%. Caso esta eficácia seja de 65%, ainda se obtém processamento do rejeitado, embora com valores de VAL negativos. Para esta percentagem, o

sistema ótimo é representado por dois diagramas fixos na ERSUC Aveiro. Nas percentagens com valor mais elevado (70% e 80%) o investimento será de três diagramas.

Relativamente ao cenário B, o VAL será nulo se a eficácia dos diagramas for ligeiramente inferior a 65%. Mesmo na hipótese de a eficácia ser de 60%, regista-se processamento, sendo que o investimento adequado será em dois diagramas fixos. Para as restantes eficácias (65%, 70% e 80%), os três diagramas fixos na ERSUC Aveiro continuam a ser o melhor investimento.

O cenário C só atinge valores positivos de VAL para uma eficácia entre os 70 e 80%. Valores abaixo de 70% não justificam sequer processar, sendo que se este valor for exatamente 70%, o investimento ótimo é em dois diagramas fixos. Com uma eficácia de 80%, este investimento aumenta para três diagramas. Pode-se concluir então, que a eficácia do diagrama pode registar valores mínimos entre os 65 e os 75%, dependendo do contexto verificado. Dado que se trata de valores de eficácia algo elevados, será necessário garantir que o rejeitado introduzido nestes diagramas esteja nas melhores condições possíveis.

## 5.6. Resultados Computacionais

Os *mixed integer linear programming models* (MILPs) apresentados foram implementados na linguagem de programação genérica GAMS e resolvidos através do CPLEX (versão 31.2.0). Os tempos de corrida foram maioritariamente satisfatórios, registando-se um tempo de execução consideravelmente elevado apenas nas análises relativas ao processamento total do rejeitado nas 18 TMBs de Portugal Continental (cenários 1.1. s1, s2, s3 e s4), pelo que se considerou um GAP = 5%. Todos os restantes cenários apresentados na Tabela 25, no corpo de dissertação e nos anexos apresentam um GAP =0%.

Tabela 25: Estatísticas dos Modelos Simulados

Estatísticas do Modelo							
Cenário	GAP	Tempo de execução (seg. CPU)	Memória Usada	Nº Equações	Nº Total de variáveis	Elem. não nulos	Var. discretas
1.1. s1	5%	308188	88 MB	193711	167006	994755	14382
1.2. s3	0%	291	93 MB	186997	167006	971967	14382
2.1. s2	0%	19578	33 MB	66609	55878	323599	8006
2.2. s4	0%	18	33 MB	66509	55878	320599	8006
Estocástico	0%	2505	392 MB	773806	667484	4013478	57087
VRP 1.1. s1	0%	0.156	6 MB	2551	4901	16569	4900
VRP 2.1. s1	0%	0.313	5 MB	1483	2813	9387	2812
Versão GAMS			GAMS 31.2.0 r8ba6aed Released Jun 19, 2020				
Sistema Operativo			64bit/MS Windows				
Processador			Intel Core i5-1135G7				

## 5.7. Conclusões do Capítulo

A análise dos cenários independentes permitiu ter uma visão geral do modo como as decisões do modelo variam comparativamente ao modelo estocástico. Destes, foi possível denotar que o processamento livre é bastante mais vantajoso em termos financeiros que o processamento total do rejeitado. Adicionalmente, caso se incluam todas as 18 TMBs existentes em Portugal Continental na análise, ao invés de apenas as 10 instalações pertencentes ao grupo EGF, o potencial de lucro aumenta, embora também se registem valores bastante otimistas na alternativa do cenário 2. Foi também possível utilizar o modelo de roteamento desenvolvido e obter os valores das deslocações das unidades móveis, e o seu sequenciamento. Após a determinação dos custos de transporte das UMP e da comparação com os restantes custos operacionais, ficou concluído que de facto o custo destas deslocações acaba por ser desprezável, pelo que a análise da solução em separado acaba por ser possível no contexto deste projeto. Das unidades móveis também se pode concluir que a UMP B ( $k_3$ ) é aquela que mais vezes é escolhida para processamento. A sua explicação pode estar no facto de esta solução ter o dobro da capacidade de processamento e ter um preço relativamente baixo quando comparado com a opção móvel A ( $k_2$ ).

Ficou estabelecido através da análise do modelo estocástico, que a decisão ótima passa pelo investimento em três diagramas fixos que se encontram na mesma instalação (ERSUC Aveiro), sendo que o investimento em unidades móveis não é acionado. Dos modelos simulados, este será aquele mais perto da realidade, pois tem em consideração todas as previsões possíveis da evolução da percentagem de vidro no rejeitado. Pode-se dizer que este modelo é algo limitado pelo cenário s4, que detém 82.5% das probabilidades de acontecimento totais.

A análise de sensibilidade efetuada a parâmetros cujo valor é incerto permitiu concluir que o projeto está bastante suscetível a variações nessas componentes. Isto porque o VAL esperado comparativamente ao investimento efetuado não é considerável, fazendo com que um pequeno grau de incerteza nos valores assumidos possa ter um grande impacto no valor final, o que é de considerar, já que o modelo assume à partida valores otimistas (preço de retorno de vidro elevado, custo de aterro externo reduzido e taxa de eficácia constante e elevada).

Adicionalmente, encontram-se abaixo enumeradas algumas das limitações no estudo aplicado ao sistema logístico misto apresentado:

- As quantidades de resíduos indiferenciados em cada TMB podem estar desatualizadas, já que os valores disponíveis mais atualizados são de 2018;
- Grande parte das TMBs não se encontra de momento a funcionar devido a avarias em equipamentos, falta de qualidade relevante de resíduos ou falta de compradores para o produto da afinação (composto orgânico);
- Desde o estudo realizado por Dias (2015), não foram testadas novas potencialidades e eficácias dos equipamentos a utilizar;
- Foi assumido que os equipamentos dos diagramas fixos são iguais aos das unidades móveis. Os diagramas móveis estão limitados em relação aos equipamentos a utilizar, que terão de ser de menor dimensão, mas no caso dos diagramas fixos, estes poderão optar

por outro tipo de opções que podem suscitar diferenças nos custos de investimento e na capacidade destas alternativas;

- Os resultados da caracterização dos resíduos e da quantidade de vidro presente nas TMBs, referente à Tarefa 1, estão sujeitos a erros de análise, nomeadamente as instalações que não foram visitadas (Tabela 9), onde se utilizou um rácio para determinar esses valores;
- Os custos de aterro interno e externo têm valores de intervalo grandes, fruto da não colaboração das TMBs para partilhar os valores reais. Como visto das análises de sensibilidade, uma pequena variação do valor de custo externo pode ter um grande impacto no VAL, pelo que seria importante definir acertadamente este valor para cada uma das instalações analisadas;
- O modelo de roteamento apresentado não considera uma frota heterogénea, sendo necessário realizar simulações para cada tipologia. Considerando que na sua generalidade a UMP B (*k3*) revelou-se a mais vantajosa, esta limitação acaba por não ser um grande entrave na realização das análises;
- O modelo de roteamento assume que as unidades móveis processam no mesmo local em que se encontram no ano anterior, o que pode não ser possível de se verificar no contexto real.

## 6. Conclusões e Trabalho Futuro

A recuperação de vidro de embalagem tem-se mostrado um desafio para Portugal, pelo que a implementação de um projeto neste contexto seria vantajosa. O grande obstáculo a esta implementação encontra-se no custo que a recuperação do vidro acarreta, não só em termos de investimento inicial em infraestruturas e diagramas, como de custos operacionais associados ao processamento do rejeitado. A dissertação apresentada pretende auxiliar este processo de implementação, chegando a uma solução viável do ponto de vista financeiro do desenho e planeamento do sistema logístico misto pretendido.

Para tal, o capítulo 2 referente à descrição do problema revela-se essencial, pois apresenta todas as possíveis opções de investimento em diagramas e demonstra todos os estudos efetuados no âmbito do Projeto Mobile-Pro-U até à data, onde foi necessário trabalhar junto das TMBs para ganhar sensibilidade ao tipo de resíduos e processos a lidar. A revisão da literatura foi também importante na ótica de identificação dos modelos a desenvolver. Pode-se destacar o trabalho desenvolvido por Castelbranc (2019) e Baldacci *et al* (2004) como bases importantes para o desenvolvimento dos modelos de localização e roteamento respetivamente. O modelo estocástico de localização e dimensionamento pode ser caracterizado como flexível em termos de análise, pois pode auxiliar a análise económica de projetos semelhantes e permite o ajustamento a novas restrições. O CVRP efetuado funciona como um complemento a este estudo, tratando-se de uma adaptação direta a um outro modelo de roteamento.

Será de referir que este estudo é ainda insuficiente para a implementação deste sistema, já que para alcançar a viabilidade económica e operacional, é necessária a colaboração de todas as entidades envolvidas: as TMBs terão de assegurar que a separação e secagem do produto é efetuada, de modo a possibilitar a sua deslocação (caso seja necessária); as retomadoras terão de se comprometer a aceitar o produto final; e as entidades gestoras deverão promover a recolha deste produto. Será também necessário implementar estratégias a nível das TMBs, como a reorganização do processo de crivagem e o investimento em novos crivos, – cujos custos não estão considerados no modelo – garantindo assim a separação dos fluxos.

Das abordagens do sistema logístico: fixo e/ou móvel, o sistema fixo acabou por se demonstrar o mais vantajoso, sendo aquele que assegura um VAL esperado superior ao considerar todos os cenários de percentagem de vidro apresentados (incluindo todas as TMBs, ou apenas as do Grupo EGF). O facto de o sistema permitir a deslocação do rejeitado de outras TMBs para as instalações de processamento acaba por ser um fator vantajoso, e que é regularmente verificado nos resultados do modelo. Contudo, a aplicação dos diagramas móveis torna-se bastante eficaz caso existam mais TMBs com uma quantidade de vidro presente no TMBr elevada (sendo que o potencial da sua aplicação está presente nos cenários s1 maioritariamente, em que a percentagem de vidro mantém-se constante ao longo do horizonte temporal). É também de referir que os resultados referentes ao sistema logístico do Grupo EGF registaram valores de VAL promissores quando comparados com os valores do sistema com as 18 TMBs. Estes poderão ser ainda mais otimistas caso se apliquem economias de escala no investimento dos seus diagramas.



O modelo só poderá ser corrido corretamente quando estiver definido o responsável por operar todo este sistema, pois só aí é que se poderá utilizar os valores reais acordadamente e tomar uma decisão final acerca das TMBs que poderão fazer parte deste projeto. Será também necessário atualizar os valores das quantidades de rejeitado pesado, granulometrias, percentagem de vidro e custos de aterro, de modo a representar a situação atual, e assegurar que as TMBs interessadas têm as condições logísticas e autonomia financeira necessárias para prosseguir com o projeto.

A nível mecânico, será necessária uma análise mais detalhada no sentido de perceber que outro tipo de investimento poderá ser verificado para as instalações fixas ou para as unidades móveis, sendo que nestas últimas regista-se uma maior incerteza quanto à sua aplicação. Em termos legislativos e de modelo de negócio a aplicar, devem ser analisadas as implicações e alterações que podem acontecer aos custos de aterro e/ou aos valores de retorno do vidro. A nível do mercado, deve existir um incentivo para os retomadores darem prioridade ao casco de vidro português e haver possibilidade de receber vidro com granulometria inferior aos 10mm estipulados atualmente, que, no contexto do projeto, implicariam um grande desperdício de vidro dada a tendência de quebra ao longo dos processos de separação e de transporte (embora também existam retomadoras em Portugal capazes de reduzir o casco de vidro em pó). A nível logístico, deve ser dada alguma flexibilidade financeira às TMBs para investirem em projetos, e estas devem ser incentivadas a reajustar os seus processos e produto final de forma a que este possa ser mais valorizado. Adicionalmente, pode-se referir que um estudo relativo à análise de sustentabilidade dos pilares social, ambiental e económico seria interessante no contexto deste projeto.

## 7. Referências

- (APA, 2019 c) PERSU 2020+ - Reflexão Estratégica e Ajustamento às Mediadas do PERSU 2020. Disponível em:  
<https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=108&sub3ref=209>. [Acedido a 30/05/2020]
- A. Ashby, M. Leat, M. Hudson-Smith: Making connections: a review of supply chain management and sustainability literature; *Supply Chain Management: An International Journal*, 17 (5) (2012), pp. 497-516
- Akca, Z., Berger, R. T., & Ralphs, T. K. (2009). A branch-and-price algorithm for combined location and routing problems under capacity restrictions. In *Operations research and cyber-infrastructure* (pp. 309-330). Springer, Boston, MA.
- Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: A review of quantitative operations management approaches and challenges. In *Operations Research-Spektrum* (Vol. 32)
- ANAVIDRO (2013). Quanto tempo demora o vidro a decompor. Disponível em:  
[anavidro.com.br/quanto-tempo-o-vidro-leva-para-se-decompor/](http://anavidro.com.br/quanto-tempo-o-vidro-leva-para-se-decompor/) [Acedido: 30/05/2020]
- APA (2019 a). Estudo prévio sobre a implementação da recolha seletiva em Portugal Continental incidindo em especial sobre o fluxo dos biorresíduos. Disponível em:  
<https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933&sub3ref=1591>. [Acedido a 30/05/2020]
- APA. (2018 a) Relatório Resíduos Urbanos Disponível em:  
<https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933&sub3ref=936> [Acedido a 30/05/2020]
- APA. (2018 b) Fichas SGRU 2018. Disponível em:  
<https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933&sub3ref=936> [Acedido a 30/05/2020]
- APA. (2019 b). Resíduos – Reciclagem de Resíduos de Embalagem. Disponível em:  
<https://rea.apambiente.pt/content/reciclagem-de-res%C3%ADduos-de-embalagens> [Acedido a 15/03/2020]
- Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvatal, V., & Cook, W. J. (2006). *The traveling salesman problem: a computational study*. Princeton university press.
- Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G., & Speranza, M. G. (2007). A branch-and-cut algorithm for a vendor-managed inventory-routing problem. *Transportation science*, 41(3), 382-391.
- Asefi, H., Lim, S., Maghrebi, M., & Shahparvari, S. (2019). Mathematical modelling and heuristic approaches to the location-routing problem of a cost-effective integrated solid waste management. *Annals of Operations Research*, 273(1-2), 75-110.
- Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., & Mingozzi, A. (2004). An exact algorithm for the capacitated vehicle routing problem based on a two-commodity network flow formulation. *Operations research*, 52(5), 723-738.

- Baldacci, R., Toth, P., & Vigo, D. (2010). Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 175(1), 213–245.
- Ballou, R.H. (2004) *Business Logistics/Supply Chain Management*, 5th edition, Pearson, Prentice Hall – Chapter 13
- Belenguer, J. M., Benavent, E., Prins, C., Prodhon, C., & Calvo, R. W. (2011). A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, 38(6), 931-941.
- Beliën, J., De Boeck, L., & Van Ackere, J. (2014). Municipal solid waste collection and management problems: a literature review. *Transportation Science*, 48(1), 78-102.
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313.
- Brandão, J. (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 552-564.
- Brito, M. P., & Dekker, R. (2002). Reverse logistics-a framework (No. EI 2002-38). *Econometric Institute Research Papers*.
- C. Archetti, M. G. Speranza, and A. Hertz, "A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem," *Transportation Science*, vol. 40, no. 1, pp. 64–73, 2006.
- Caballero, R., González, M., Guerrero, F. M., Molina, J., & Paralera, C. (2007). Solving a multiobjective location routing problem with a metaheuristic based on tabu search. Application to a real case in Andalusia. *European Journal of Operational Research*, 177(3), 1751-1763.
- Cao, E., & Lai, M. (2010). The open vehicle routing problem with fuzzy demands. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2405-2411.
- Cao, E., Gao, R., & Lai, M. (2018). Research on the vehicle routing problem with interval demands. *Applied Mathematical Modelling*, 54, 332-346.
- Cao, E., Lai, M., & Yang, H. (2014). Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3569-3575.
- Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F., & Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European journal of operational research*, 226(3), 436-451.
- Caric, T., & Gold, H. (2008). *Vehicle Routing Problem*
- Castel-branc, I. (2019) *Desenho e Planeamento do Sistema Logístico de uma Unidade de Recuperação de Vidro de Embalagem*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, Instituto Superior Técnico
- CEWEP (2017). Landfill taxes and bans overview. Disponível em: <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/12/Landfill-taxes-and-bans-overview.pdf>. [Acedido a 30/05/2020]
- Christiansen, C. H., Lysgaard, J., & Wøhlk, S. (2009). A branch-and-price algorithm for the capacitated arc routing problem with stochastic demands. *Operations Research Letters*, 37(6), 392-398.

- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4), 568-581.
- Coelho, L. C., & Laporte, G. (2013). A branch-and-cut algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory-routing problem. *International Journal of Production Research*, 51(23-24), 7156-7169.
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2014). Thirty years of inventory routing. *Transportation Science*, 48(1), 1-19.
- Cooper, M. C., Lambert, D. M., and Pagh, J. D.: Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management* 8(1), 1–13 (1997).
- Cordeau, J. F., & Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (Montréal, Québec). (2000). *The VRP with time windows*. Montréal: Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions.
- CSCMP. (2013). *CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary*. Disponível em: [https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx](https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx) [Acedido a 30/05/2020]
- D.S. Rogers, R. Tibben-Lembke: An examination of reverse logistics practices; *J. Bus. Logist.*, 22 (2001), pp. 129-148
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91.
- David Simchi-Levi, Philip Kaminsky e Edith Simchi-Levi (2007), *Designing and managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies* do, 3ª edição, McGrawHill/Irwin
- Diário da República (1997). Decreto-Lei nº 366-A/97. Disponível em: <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/659564/details/normal?l=1> [Acedido a 30/05/2020]
- Diário da República (2011). Decreto-Lei n.º 73/2011. Disponível em: <https://dre.pt/pesquisa/-/search/670034/details/maximized> [Acedido a 30/05/2020]
- Diário da República (2018). Decreto-Lei nº69/2018. Disponível em: <https://dre.pt/home/-/dre/117484671/details/maximized> [Acedido a 27/12/2020]
- Dias, N. (2015) INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO Recuperação do vidro contido no rejeitado pesado proveniente de instalações de Tratamento Mecânico Biológico para reciclagem.
- Drezner, T., & Drezner, Z. (2006). Multiple Facilities Location in the Plane Using the Gravity Model. 38, 391–406.
- Drezner, Z. (1984). The p-centre problem—heuristic and optimal algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, 35(8), 741-748.
- EFG (2020). Disponível em: <https://www.egf.pt/pt/egf/empresas/> [Acedido a 27/12/2020]
- European Commission(2016b). *Background report on best environmental management practice in the waste management sector*. May 2016.
- European Environment Agency (2015). *The European Environment: State and Outlook 2015*, Synthesis report. Copenhagen.
- European Environmental Agency (2017). *Circular by design. Products in the circular economy*.EEA Report No 6/2017, Copenhagen.

- European Environmental Agency (2019). Packaging waste recycling rates in Europe by country. Disponível em: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/packaging-waste-recycling-2#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/packaging-waste-recycling-2#tab-chart_1) [Acedido a 30/05/2020]
- Eurostat (2019). Municipal Waste Statistics. Disponível em: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics) [Acedido a 30/05/2020]
- FEVE (2019). Record Collection of Glass Containers for Recycling hits 76% in the EU. Disponível em: <https://feve.org/record-collection-of-glass-containers-for-recycling-hits-76-in-the-eu/> [Acedido a 30/05/2020]
- Fleszar, K., Osman, I. H., & Hindi, K. S. (2009). A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 803-809.
- Gebennini, E., Gamberini, R., & Manzini, R. (2009). An integrated production–distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization. *International Journal of Production Economics*, 122(1), 286–304.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1995). An exact algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands and customers. *Transportation science*, 29(2), 143-155.
- Gil-Carrera, L., Browne, J. D., Kilgallon, I., & Murphy, J. D. (2019). Feasibility study of an off-grid biomethane mobile solution for agri-waste. *Applied energy*, 239, 471-481.
- GPI (2010) Life Cycle Assessment of North American Container Glass. 6-7. Disponível em: <http://www.container-recycling.org/assets/pdfs/glass/LCA-GPI2010.pdf>. Acedido a [30/05/2020]
- Halper, R., & Raghavan, S. (2011). The mobile facility routing problem. *Transportation Science*, 45(3), 413-434.
- Hiassat, A., Diabat, A., & Rahwan, I. (2017). A genetic algorithm approach for location-inventory-routing problem with perishable products. *Journal of manufacturing systems*, 42, 93-103.
- J. C. F. Arrais, Projeto de uma unidade móvel de recuperação de vidro, Tese de Mestrado, Lisboa: Instituto Superior Tecnico – Universidade de Lisboa, Out 2019.
- Janus, K. (2014). Experiences with waste incineration for energy production in Denmark Systems Analysis Division Department of Management.
- Janus, K. (2014). Experiences with waste incineration for energy production in Denmark Systems Analysis Division Department of Management.
- Javid, A. A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 582-597.
- José Crespo de Carvalho. 2017. “Logística e Gestão da Cadeia de Abastecimento”. 1-28.
- Klose, A., & Drexel, A. (2005). Facility location models for distribution system design. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 162).
- L. Fisher, M., & Jaikumar, R. (1981). A Generalized Assignment Heuristic For Vehicle Routing. In *Networks* (Vol. 11).

- Laporte, G., Louveaux, F. V., & Van Hamme, L. (2002). An integer L-shaped algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demands. *Operations Research*, 50(3), 415-423.
- Lee, C., Lee, K., & Park, S. (2012). Robust vehicle routing problem with deadlines and travel time/demand uncertainty. *Journal of the Operational Research Society*, 63(9), 1294-1306.
- Letchford, A. N., Lysgaard, J., & Eglese, R. W. (2007). A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 58(12), 1642-1651.
- Lin, C. K. Y., & Kwok, R. C. W. (2006). Multi-objective metaheuristics for a location-routing problem with multiple use of vehicles on real data and simulated data. *European journal of operational research*, 175(3), 1833-1849.
- Markov, I., Varone, S., & Bierlaire, M. (2016). Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection VRP with intermediate facilities. *Transportation research part B: methodological*, 84, 256-273.
- Montoya-Torres, J. R., Franco, J. L., Isaza, S. N., Jiménez, H. F., & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, 79, 115-129.
- Montreuil B (2011) Toward a physical internet: meeting the global logistics sustainability grand challenge. *Logist Res* 3(3):71–87
- Oakdene Hollins. (2018) Raise the Glass – Summary. 1-7.
- Oliver, R. K., and Webber, M. D.: *Supply-Chain Management: Logistics Catches Up with Strategy*. Outlook (1982); cit. Christopher, M. G.: *Logistics, The Strategic Issue*. Chapman and Hall, London, 1992.
- Or, I., & Curi, K. (1993). Improving the efficiency of the solid waste collection system in Izmir, Turkey, through mathematical programming. *Waste management & research*, 11(4), 297-311.
- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. 111, 423–447.
- Oyola, J., Arntzen, H., & Woodruff, D. L. (2018). The stochastic vehicle routing problem, a literature review, part I: models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 7(3), 193-221.
- Popela, P., Hrabec, D., Kúdela, J., Šomplák, R., Pavlas, M., Roupec, J., & Novotný, J. (2017, June). Waste Processing Facility Location Problem by Stochastic Programming: Models and Solutions. In *23rd International Conference on Soft Computing* (pp. 167-179). Springer, Cham.
- PORDATA (2019) Resíduos urbanos de recolha indiferenciada e selectiva. Disponível em: [https://www.pordata.pt/Portugal/Res%\*c3\*%adduos+urbanos+de+recolha+indiferenciada+e+s+electiva-1104-10095](https://www.pordata.pt/Portugal/Res%c3%adduos+urbanos+de+recolha+indiferenciada+e+s+electiva-1104-10095) [Acedido a 30/05/2020]
- Pwc (2020) - <https://www.pwc.pt/pt/pwcinforfisco/guia-fiscal/2020/irc.html> [Acedido a 27/12/2020]

- Raghavan, S., Sahin, M., & Salman, F. S. (2019). The capacitated mobile facility location problem. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 507-520.
- Ramos, T. R. P., de Morais, C. S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2018). The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches. *Expert Systems with Applications*, 103, 146-158.
- Rathore, P., & Sarmah, S. P. (2019). Modeling transfer station locations considering source separation of solid waste in urban centers: A case study of Bilaspur city, India. *Journal of cleaner production*, 211, 44-60.
- REA (2019) – Domínios Ambientais: Resíduos. Disponível em:  
[https://rea.apambiente.pt/dominio\\_ambiental/residuos](https://rea.apambiente.pt/dominio_ambiental/residuos) [Acedido a 30/05/2020]
- Repoussis, P. P., Tarantilis, C. D., Bräysy, O., & Ioannou, G. (2010). A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 37(3), 443-455.
- Reza Sajjadi, S., & Hossein Cheraghi, S. (2011). Multi-products location? routing problem integrated with inventory under stochastic demand. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 7(4), 454-476.
- Rocha, F. (2019). Recuperação de vidro nos fluxos de resíduos indiferenciados, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico
- Rushton, A. (2014). *Handbook of the Distribution Management Management*.
- Salari, M., Toth, P., & Tramontani, A. (2010). An ILP improvement procedure for the open vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2106-2120.
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European journal of operational research*, 39(2), 150-156.
- Samanlioglu, F. (2013). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2), 332-340.
- Senne, E. L., Lorena, L. A., & Pereira, M. A. (2005). A branch-and-price approach to p-median location problems. *Computers & operations research*, 32(6), 1655-1664.
- Shi, C., Li, T., Bai, Y., & Zhao, F. (2016). A heuristics-based parthenogenetic algorithm for the vrp with potential demands and time windows. *Scientific Programming*, 2016.
- Soysal, M., Çimen, M., Belbağ, S., & Toğrul, E. (2019). A review on sustainable inventory routing. *Computers & Industrial Engineering*.
- STOA (2017). *Towards a circular economy - Waste management in the EU*
- Stock, J.R., & Lambert, D. M. (2001). *Strategic Logistics Management ((4a ed.))*. McGraw-Hill.
- Sungur, I., Ordóñez, F., & Dessouky, M. (2008). A robust optimization approach for the capacitated vehicle routing problem with demand uncertainty. *IIE Transactions*, 40(5), 509-523.
- Szymańska, O., Cyplik, P., Adamczak, M.: *Logistics 4.0 A new paradigm or a set of solutions*, Research in logistics and production, vol. 7, No. 4, pp. 299–310, Poznan University of Technology Publishing House, Poznan (2017)
- Tansini, L., Viera, O., & Urquhart, M. (2003). Comparing assignment algorithms for the Multi-Depot VRP.

- Tasan, A. S., & Gen, M. (2012). A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 62(3), 755-761.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Meskini, M., Nasser, H., & Tavakkoli-Moghaddam, H. (2019, September). A Multi-Depot Close and Open Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Vehicles. In *2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)* (pp. 1-6). IEEE.
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tseng, Y. (2005). The role of transportation in logistics chain. 5, 1657–1672.
- Vergara, S. E., & Tchobanoglous, G. (2012). *Municipal Solid Waste and the Environment: A Global Perspective*.
- WSMART Route (2019). (n.d.). *Recolha de Resíduos com Base num Sistema de Planeamento de Rotas em Tempo Real*. Retrieved from [wsmartroute.tecnico.ulisboa.pt](http://wsmartroute.tecnico.ulisboa.pt)
- Yahoo Finance (2020). Germany's 10 year bond yield. <https://finance.yahoo.com/>
- Yu, H., Sun, X., Solvang, W. D., Laporte, G., & Lee, C. K. M. (2020). A stochastic network design problem for hazardous waste management. *Journal of cleaner production*, 277.
- Yuchi, Q., He, Z., Yang, Z., & Wang, N. (2016). A Location-Inventory-Routing Problem in Forward and Reverse Logistics Network Design. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2016, 1–18



# Anexos

## Anexo I: Exemplo Análise Cenário 1 (1.2.s1)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Cenário 1.2. s2		18 TMBs	Processar livre	Cenário SPV I		Instalações Fix	Nº Diagramas Fixos	Nº Diagramas Móveis						
2							1	2	2						
3							TMBs		TMBs visitadas						
4							1 (c1) e c10		4 (c2,c6,c12,c13)						
5	Ano		1	2	3		4	5	6	7	8	9	10		
6															
7	P ton/ano		28101,56	25291,4	25291,4		23886,32	23886,32	0	0	0	0	0		
8	Custos														
9		CH	120000	120000	120000		120000	120000	0	0	0	0	0		
10		Cm	153760	153760	153760		153760	153760	0	0	0	0	0		
11		Ce	395392	395392	395392		395392	395392	0	0	0	0	0		
12		CTr	9819	9936	9936		9994	9994	0	0	0	0	0		
13		CL	635000												
14		CD	1536500												
15		DC	207150	207150	207150		207150	207150	207150	207150	207150	207150	207150		
16	Resultado														
17	Receitas-Custos														
18		R	2220023	1998021	1998021		1887020	1887020	0	0	0	0	0		
19		C	886121,4	886238	886238		886296,3	886296,3	207150	207150	207150	207150	207150		
20															
21		IRC	21%					IRC	0%						
22		RL	1053782,264	878308,57	878308,57		790571,723	790571,723	-207150	-207150	-207150	-207150	-207150		
23		CF	1260932,264	1085458,57	1085458,57		997721,723	997721,723	0	0	0	0	0		100000
24															
25		Ta	10%												
26		CFa	1146302,058	897073,1983	815521,0894		681457,3615	619506,6923	0	0	0	0	0		38554,32894
27		VAL	2026914,729												
28															
29															

Os diagramas visitam as instalações durante 5 anos de análise, sendo que a partir do ano 6 a percentagem de vidro atinge um valor baixo o suficiente para que não seja lucrativo continuar a processar o rejeitado. Neste caso, o IRC é aplicado apenas até ao ano 5, já que os resultados passam a ser negativos após a paragem de processamento; À parte da ERSUC Aveiro (diagrama fixo), nenhum diagrama fica durante todo o horizonte temporal na mesma localização; c2 - 9 meses; c6 - 2 meses; c12 - 8 meses; c13 - 5 meses. A ERSUC Aveiro é então a única instalação que tem TMBR suficiente e condições de rejeitado ótimas para ser instalado um diagrama que necessite de estar presente durante todo o ano. Dada a sua natureza centralizada, a restante capacidade de processamento não aproveitada da ERSUC Aveiro é utilizada através do deslocamento do rejeitado da instalação e10 num dos meses de cada ano (daí a existência de Custos de Transporte). As restantes conseguem ser processadas por um diagrama móvel que após um certo número de meses segue para outra instalação para recuperar vidro.

## Anexo II. Exemplo Análise Cenário 2 (2.2.s2)

		EGF	Processar livre	Cenário SPV I		Instalações Fix	Nº Diagramas Fixos	Nº Diagramas Móveis							
1	Cenário 2.2. s2					1	2	2							
2						Nº TMBs		Nº TMBs							
3						1 (c1)		5 (c2,c6,c10,c11,c12)							
4	Ano		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
5															
6	P ton/ano		27669,44	24902,5	24902,5		23519,03	23519,03	0	0	0	0	0		
7	Custos														
8		CH	120000	120000	120000		120000	120000	0	0	0	0	0		
9		Ce	385523	385523	385523		385523	385523	0	0	0	0	0		
10		Cm	153760	153760	153760		153760	153760	0	0	0	0	0		
11		CTr	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0		
12		CL	728000												
13		CD	1536500												
14		DC	216450	216450	216450		216450	216450	216450	216450	216450	216450	216450		
15	Resultado														
16	Receitas-Custos														
17		R	2185886	1967297	1967297		1858003	1858003	0	0	0	0	0		
18		C	875733,2	875733,2	875733,2		875733,2	875733,2	216450	216450	216450	216450	216450		
19															
20		IRC	21%					IRC	0%						
21		RL	1035020,712	862335,402	862335,402		775993,142	775993,142	-216450	-216450	-216450	-216450	-216450		
22		CF	1251470,712	1078785,402	1078785,402		992443,142	992443,142	0	0	0	0	0		100000
23															
24		Ta	10%												
25		CFa	1137700,647	891558,1835	810507,4395		677852,0197	616229,1088	0	0	0	0	0		38554,32894
26		VAL	1907901,728												
27															
28															

ERSUC Aveiro é a única instalação fixa; 2 diagramas móveis com os seguintes tempos de processamento por ano durante 5 anos ; c2 - 9 meses; c6 - 2 meses; c10 - 2 meses; c11 - 3 meses; c12 - 8 meses

## Anexo III: Exemplo Impacto IRC = 21% Constante (Cenário 2.1. s4)

	IRC	21%	IRC	21%											
	RL	1003365,57	-49511,67	-394089,762	-700381,373	-700381,373	-853527,218	-853527,218	-872670,4506	-872670,4506	-872670,4506	-872670,4506	-872670,4506	-872670,4506	-872670,4506
	CF	1315465,57	262588,33	-81989,762	-388281,373	-388281,373	-541427,218	-541427,218	-560570,4506	-560570,4506	-560570,4506	-560570,4506	-560570,4506	-560570,4506	-560570,4506
	Ta	10%													
	CFa	1195877,791	217015,1488	-61600,12171	-265201,4022	-241092,1838	-305621,5496	-277837,7723	-261510,2523	-237736,593	-177569,8465	-177569,8465	-177569,8465	-177569,8465	-177569,8465
	VAL IRC = 21% constante	-3636276,782													
	VAL CORRETO	-4509159,332													

## Anexo IV: Exemplo Impacto IRC = 0% Constante (Cenário 1.1. s1)

Receitas-Custos												
R		2972299	2972299	2972299	2972299	2972299	2972299	2972299	2972299	2972299	2972299	2972299
C		1693010	1693010	1693010	1693010	1693010	1693010	1693010	1693010	1693010	1693010	1693010
IRC		0%										
RL		1279289	1279289	1279289	1279289	1279289	1279289	1279289	1279289	1279289	1279289	1279289
CF		1759539	1759539	1759539	1759539	1759539	1759539	1759539	1759539	1759539	1759539	1859539
Ta		10%										
CFa		1599580,909	1454164,463	1321967,693	1201788,812	1092535,28	993213,8944	902921,7222	820837,9293	746216,2993	716932,7829	
VAL com IRC=0% constante		5947659,79										
VAL CORRETO		4296917,597										

## Anexo V: Resultados VRP

Cenário	Nº Diagramas Móveis	TIPOLOGIA MÓVEL											Distância		
		Rota TMB (Meses)													
1.1. s1,s2,s3,s4	1 k2	TMB 18 (2 meses)	-----	TMB 17 (1 mês)	-----	TMB 14 (3 meses)	-----	TMB 5 (1 mês)	-----	TMB 4 (1 mês)	-----	TMB 10 (3 meses)	-----	TMB 15 (1 mês)	
	4 k3	6 (1m)	-----	3 (4m)	-----	4 (3m)	-----	5 (2m)	-----	17(1m)	-----	16(1m)	-----		17 405 €
		13 (5m)	-----	6 (1m)	-----	9(4m)	-----	8 (2m)	-----		-----		-----		
		2 (9m)	-----	11 (3m)	-----		-----		-----		-----		-----		
7 (1m)	-----	12 (8m)	-----	15(2m)	-----		-----		-----		-----				
1.2. s1	3k3	2 (9m)	-----	11 (3m)	-----		-----		-----		-----		-----	9 050 €	
		10 (2m)	-----	12 (8m)	-----	15(2m)	-----		-----		-----				
		18 (1m)	-----	17 (1m)	-----	14 (1m)	-----	5 (2m)	-----	6 (2m)	-----	13 (5m)	-----		
1.2. s2	2k3	12 (8m)	-----	2 (5m)	-----		-----		-----		-----		1 500 €		
		13 (5m)	-----	2 (4m)	-----	6 (2m)	-----		-----		-----				
2.2. s1,s2,s3,s4	3k3	2 (9m)	-----	e11 (3m)	-----		-----		-----		-----		5 395 €		
		6 (2m)	-----	4 (3m)	-----	5 (3m)	-----	8(4m)	-----		-----				
		10 (2m)	-----	12 (8m)	-----	16 (1m)	-----		-----		-----				
2.2. s1,s2	2k3	6 (2m)	-----	10 (2m)	-----	12 (8m)	-----		-----		-----		3 765 €		
		2 (9m)	-----	11 (3m)	-----		-----		-----		-----				

## Anexo VI: Cálculo das % de vidro nas TMBs

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
13 Dados Atuais - Ficha SGRU 2018																
14	Entidade	TMB	TMBr Total	TMBr 80 mm	%Vidro	TMBr com Vidro	% intervalo 6 16	TMBr entre [6-16]								
15	1	ERSUC (A)	112748	41231	71%	29274	51%	14930								
16	2	ERSUC (C)	112748	31196	66%	20590	55%	11324								
17	3	Tratolico	128793	13261	57%	7559	9%	680								
18	4	Amarsul (Sx)	68266	11333	42%	4760	34%	1618	Todos os outros rácios são retirados a partir dos valores dos dados atuais das 1* 9 instalações							
19	5	Amarsul (St)	68266	7247	47%	3406	35%	1192								
20	6	Valorlis	62220	6501	57%	3706	52%	1927								
21	7	Braval	65171	3463	12%	416	20%	83								
22	8	Valnor	41638	7154	25%	1789	38%	680								
23	9	Resitejo	20949	13404	18%	2413	10%	241								
24			Total	Total		Total		Total								
25			680799	134791		73911		32676								
26			Rácio			Rácio		Rácio								
27			20%			55%		44%								
28	Entidade	TMB	TMBr Total	TMBr 80 mm	%Vidro	TMBr com Vidro	% intervalo 6 16	TMBr entre [6-16]								
29	10	Suldouro	26187	5185	67%	3474	44%	1536								
30	11	Resiestrela	45568	9022	53%	4782	44%	2114	Valores das % de vidro das entidades 10 e 11 retiradas de (Dias, 2015)							
31	12	Resinorte	138093	27341	55%	14992	44%	6628								
32	13	Planalto Beirão	82720	16378	55%	8980	44%	3970								
33	14	GESAMB	21674	4291	55%	2353	44%	1040								
34	15	Resíduos Nordeste	36550	7236	55%	3968	44%	1754								
35	16	Algar	14232	2818	55%	1545	44%	683								
36	17	Ambilital	23369	4627	55%	2537	44%	1122								
37	18	Resialentejo	16204	3208	55%	1759	44%	778								

## Anexo VII: Análises de Sensibilidade dos Cenários A, B e C

Tabela 26: Análise Pu Cenário A

Cenário A - Valor de retorno de vidro	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
50€/ton	-117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma
60€/ton	-6 119€	28930,8	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1 (s1 10 anos, s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)
65€/ton	88 928€	28930,8	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 3 anos e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1 (s1 10 anos, s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)
71€/ton	206 401€	31566,9	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 3 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	e2 para c1 (s1 10 anos, s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)

Tabela 27: Análise Pu Cenário B

Cenário B - Valor de retorno de vidro	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
50 €/ton	-89 665€	23917,0	1	2	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 2 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (2 diag. nos dois anos)	e2 para c1 (mas com menor quantidades) - (s1 10 anos, s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)
60 €/ton	87 830€	33391,5	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1 (s1 10 anos, s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)
65 €/ton	194 496€	33391,5	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 3 anos e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1 (s1 10 anos, s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)
71 €/ton	325 340€	36313,4	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 3 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	e2 para c1 (s1 10 anos, s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)

Tabela 28: Análise Pu Cenário C

Cenário C - Valor de retorno de vidro	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
50 €/ton	-117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma
60 €/ton	-117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma
65 €/ton	-16 637€	24353,7	1	3	S1 não tem influência no resultado (Pr(s)=0%); s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 3 anos e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1 (s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)
71 €/ton	86 742€	26820,7	1	3	S1 não tem influência no resultado (Pr(s)=0%); Processamento s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 3 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	e2 para c1 (s2 5 anos, s3 1 ano, s4 1 ano)

Tabela 29: Análise Aex Cenário A

Cenário A - Custo Aterro Externo	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
8 €/ton	206 401€	31566,9	1	3	Mesma situação do modelo estocástico (processamento s1 10 anos, s2 5 anos, s3 3 anos, 2 anos)	e2 para c1
10 €/ton	65 562€	28930,7	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1
12 €/ton	-70 570€	28930,7	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1
14 €/ton	-117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma

Tabela 30: Análise Aex Cenário B

Cenário B - Custo Aterro Externo	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
8 €/ton	325 340€	36313,4	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos, s3 3 anos, 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	e2 para c1
10 €/ton	172 649€	33830,3	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1
12 €/ton	23 665€	33830,3	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1
14 €/ton	-79 309€	19778,5	1	2	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 1 ano (2 diag no 1º ano)	e2 para c1

Tabela 31: Análise Aex Cenário C

Cenário C - Custo Aterro Externo	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
8 €/ton	86 742€	26820,7	1	3	S1 não tem influência no resultado (Pr(s)=0%); Processamento s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 3 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	e2 para c1
10 €/ton	172 649€	33830,3	1	3	S1 não tem influência no resultado (Pr(s)=0%); Processamento s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º)	e2 para c1
12 €/ton	- 117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma
14 €/ton	- 117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma

Tabela 32: Análise E Cenário A

Cenário A - Eficácia Diagramas	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
60%	-117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma
65%	-65 635€	16850,0	1	2	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (2 diag. no 1º ano e 2 no 2º )	Rejeitado de e2 para c1
70%	12 183€	25314,41	1	3	s1 processa 10 anos e s2 processa 5 anos.s3 e s4 2 anos (2 diag. no 1º ano e 2 no 2º )	Rejeitado de e2 para c2
80%	206 401€	31566,9	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 3 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	Rejeitado de e2 para c1

Tabela 33: Análise E Cenário B

Cenário B - Eficácia Diagramas	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
60%	-71 124€	17937,7	1	2	s1 processa 10 anos, s2 processa 5 anos, s3 e s4 processam durante 2 anos	Rejeitado de e2 para c1
65%	3 308€	19432,5	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 2 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º )	Rejeitado de e2 para c1
70%	108 325€	29601,5	1	3	s1 processa 10 anos, s2 processa 5 anos, s3 e s4 processam durante 2 anos (3 diagramas no 1º ano e 2 no 2º)	Rejeitado de e2 para c1
80%	325 340€	36313,4	1	3	Processamento s1 10 anos, s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 3 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	Rejeitado de e2 para c1

Tabela 34: Análise E Cenário C

Cenário C - Eficácia Diagramas	VAL	P (ton)	Instalações a abrir	Nº de Diagramas	Comentários	Deslocações
60%	-117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma
65%	-117 355€	0	1	1	Abertura de uma instalação fixa e de um diagrama, mas não se regista processamento	Nenhuma
70%	-75 158€	15365,1	1	2	Abertura de uma instalação fixa e dois diagramas ( processamento s1 10 anos, s2 5 anos, s3 3 anos, 2 anos)	e2 para c1 (mas com menor quantidade)
80%	86 742€	26820,7	1	3	S1 não tem influência no resultado (Pr(s)=0%); Processamento s2 5 anos (com 3 diagramas fixos), s3 e s4 3 anos (3 diag. no 1º ano e 2 no 2º e 3º)	Rejeitado de e2 para c1

## Anexo VIII: Modelo Localização e Dimensionamento Implementado em GAMS

```

$title Tese 1
$eolcom #
option MIP=CPLEX
option limrow = 1000000, limcol = 1000000;
option iterlim=10000000; option reslim=1500000;
option decimals=6;
option optcr=0;
*Alterar dados e equações consoante cenários a analisar
Sets
i 'TMB/aterro' / e1*e18 /
* i 'TMB/aterro' / e1,e2,e4,e5,e6,e8,e10,e11,e12,e16/
j 'central' /c1*c18/
* j 'central' / c1,c2,c4,c5,c6,c8,c10,c11,c12,c16/
s 'Cenários' /s1*s4/
t 'mes' /0*120 /
a 'ano' /0*10/
b(t) 'instante inicial' /0/
ae(t) 'todos os instantes exceto 0' /1*120/
az(t) 'instantes sem passagem de ano' /1*12,14*24,26*36,38*48,50*60,62*72,74*84,86*96,98*108,110*120/
ay(t) 'Passagem de ano' /13,25,37,49,61,73,85,97,109/
ano0(t) 'ano 0' /0/
ano1(t) 'ano 1' /1*12/
ano2(t) 'ano 2' /13*24/
ano3(t) 'ano 3' /25*36/
ano4(t) 'ano 4' /37*48/
ano5(t) 'ano 5' /49*60/
ano6(t) 'ano 6' /61*72/
ano7(t) 'ano 7' /73*84/
ano8(t) 'ano 8' /85*96/
ano9(t) 'ano 9' /97*108/
ano10(t) 'ano 10' /109*120/
ano1(a) /1/
ano2(a) /2/
ano3(a) /3/
ano4(a) /4/
ano5(a) /5/
ano6(a) /6/
ano7(a) /7/
ano8(a) /8/
ano9(a) /9/
ano10(a) /10/
ano1a9(a) /1*9/
ano1a10(a) /1*10/
k 'tipo tecnologia' /k1*k3/
f(k) 'tecnologia fixa' /k1/
m(k) 'tecnologias móveis' /k2,k3/
ba(k) 'tecnologia k3' /k3/
Parameters
V(i) '% vidro TMBi' / e1 0.71 , e2 0.66 , e3 0.57 , e4 0.42 , e5 0.47 , e6 0.57 , e7 0.12 , e8 0.25 , e9 0.18 ,
e10 0.67 , e11 0.53 , e12 0.55 , e13 0.55 , e14 0.55 , e15 0.55 , e16 0.55 , e17 0.55 , e18 0.55 /
* V(i) '% vidro TMBi' / e1 0.71 , e2 0.66 , e4 0.42 , e5 0.47 , e6 0.57 , e8 0.25 ,
e10 0.67 , e11 0.53 , e12 0.55 , e16 0.55 /
*
RP(i) 'TMBr/ano <80mm' / e1 41231 , e2 31196 , e3 13261 , e4 11333 , e5 7247 , e6 6501 , e7 3463 , e8 7154 , e9 13404
e10 5185 , e11 9022 , e12 27341 , e13 16378 , e14 4291 , e15 7236 , e16 2818 , e17 4627 , e18 3208 /
* RP(i) 'TMBr/ano <80mm' / e1 41231 , e2 31196 , e4 11333 , e5 7247 , e6 6501 , e8 7154 ,
e10 5185 , e11 9022 , e12 27341 , e16 2818 /
*
ano(a) /1 1,2,3 3,4 4,5 5,6 6,7 7 ,8 8,9 9,10 10/

Over6(i) '% de TMBr em i 6-16 para diagrama' / e1 0.51 , e2 0.55 , e3 0.09 , e4 0.34 , e5 0.35 , e6 0.52 , e7 0.20 , e8 0.38 ,
e9 0.1 ,
e10 0.44 , e11 0.44 , e12 0.44 , e13 0.44 , e14 0.44 , e15 0.44 , e16 0.44 , e17 0.44 , e18 0.44 /
*
Over6(i) '% de TMBr em i 6-16 para diagrama' / e1 0.51 , e2 0.55 , e4 0.34 , e5 0.35 , e6 0.52 , e8 0.38 ,
e10 0.44 , e11 0.44 , e12 0.44 , e16 0.44 /
*
Cap(k) 'Capacidade mensal de tecnologia k p/diagrama' /k1 878, k2 878, k3 1756/
CDg(k) 'Custo de diagrama de tecnologia k' /k1 245000, k2 413000, k3 584500/
Cmt(k) 'Custo de manutenção mensal para tecnologia k' /k1 35360, k2 35360, k3 50360/
Pr(s) 'Probabilidade dos cenários' /s1 0.025, s2 0.075, s3 0.075, s4 0.825/
;
*$OnText

Table d(i,j) 'distância'
c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 c10 c11 c12 c13 c14 c15 c16 c17 c18
e1 0 45 262 268 262 115 143 245 166 64 221 123 71 341 218 465 346 391

```

e2	45	0	233	233	226	87	174	209	130	104	143	154	59	306	223	429	311	356
e3	260	231	0	39	38	152	397	199	162	326	290	376	283	153	471	277	158	203
e4	266	230	39	0	13	157	396	173	161	325	289	376	282	127	470	251	132	178
e5	262	226	34	13	0	157	392	164	157	321	285	371	278	117	466	242	123	170
e6	117	87	152	157	157	0	253	170	89	171	217	233	139	248	327	371	252	298
e7	143	177	401	400	392	250	0	377	298	84	317	44	201	473	174	597	478	524
e8	245	209	198	175	164	170	375	0	100	304	158	355	240	83	335	242	200	170
e9	165	129	164	164	157	89	295	100	0	224	155	274	159	155	324	321	202	248
e10	64	100	324	323	323	171	82	300	221	0	247	62	126	396	163	520	401	447
e11	216	143	292	291	285	217	317	157	155	246	0	296	167	247	187	401	369	329
e12	122	155	379	379	371	229	42	355	276	63	301	0	180	452	133	575	457	502
e13	71	59	286	285	278	139	201	243	164	130	169	180	0	358	174	482	363	408
e14	339	303	151	128	117	248	469	83	156	398	247	448	355	0	425	167	92	95
e15	217	223	475	474	466	325	172	334	328	166	189	138	174	423	0	671	552	597
e16	464	427	276	252	242	371	593	242	320	522	401	573	480	168	668	0	130	73
e17	345	309	157	134	123	252	475	200	201	404	368	455	361	92	549	130	0	58
e18	392	356	204	180	170	298	522	171	248	451	330	501	408	97	596	72	60	0

;  
\*\$OffText

\$OnText

Table d(i,j) 'distância'

	c1	c2	c4	c5	c6	c8	c10	c11	c12	c16
e1	0	45	268	262	115	245	64	221	123	465
e2	45	0	233	226	87	209	104	143	154	429
e4	266	230	0	13	157	173	325	289	376	251
e5	262	226	13	0	157	164	321	285	371	242
e6	117	87	157	157	0	170	171	217	233	371
e8	245	209	175	164	170	0	100	304	158	335
e10	64	100	323	323	171	300	221	0	247	163
e11	216	143	291	285	217	157	155	246	0	187
e12	122	155	379	371	229	355	276	63	301	133
e16	464	427	252	242	371	242	320	522	401	668

;  
\$OffText

Table Vp(a,s) 'Percentagem de vidro no instante t, com cenário s'

	s1	s2	s3	s4
1	1	1	1	1
2	1	0.9	0.5	0.45
3	1	0.9	0.3	0.27
4	1	0.85	0.13	0.11
5	1	0.85	0.13	0.11
6	1	0.24	0.13	0.03
7	1	0.24	0.1	0.03
8	1	0.2	0.1	0.02
9	1	0.2	0.1	0.02
10	1	0.2	0.1	0.02

;  
Table Ti(a,s) 'Taxa de IRC no instante t, cenário s'

	s1	s2	s3	s4
1	0.21	0.21	0.21	0.21
2	0.21	0.21	0.21	0.21
3	0.21	0.21		
4	0.21	0.21		
5	0.21	0.21		
6	0.21			
7	0.21			
8	0.21			
9	0.21			
10	0.21			

- Scalar CLu 'custo localizaçãõ / 100000/;
- Scalar Arm 'Custo de armazém / 100000/;
- Scalar U 'Taxa utilizaçãõ cada diagrama / 0.9 /;
- Scalar Ckmt 'custo ton km inclui tudo' / 0.094 /;
- Scalar CEq 'custo equipamento de suporte' / 63000/;
- Scalar RG 'custo 2 RecGlass' / 30000/;
- Scalar Cw 'salario' / 20000/;
- Scalar N 'número de turnos/dia' / 2 /;
- Scalar Cel 'custo de electric/ton' / 3.2 /;
- Scalar Ta 'Taxa de atualizaçãõ' / 0.1 /;
- Scalar MA 'Numero de meses num ano' / 12/;
- Scalar Ai 'Custo de aterro interno' / 8/;
- \*MEXER. Fazer análise de sensibilidade a:
- Scalar Aex 'custo aterro em externo' / 8 /;
- Scalar Pu 'preço vidro' / 71 /;
- Scalar E 'eficácia RG' / 0.8 /;

Variables

- VAL 'Valor Atual Líquido'
- CF(a,s) 'CFlow'
- DC(a) 'Depreciação do Capital Investido'
- Qm(i,j,k,t,s) 'Quantidade de TMBR de i para j em t (fluxo in central)'

QDm(j,i,k,t,s) 'Quantidade de TMBr sem vidro de j para i em t (fluxo out central)'  
 Qa(i,j,k,a,s) 'Quantidade de TMBr processada anualmente de i para j (fluxo in central)'  
 QDa(j,i,k,a,s) 'Quantidade de TMBr sem vidro de j para i anualmente (fluxo out central)'  
 TMBr(i,t,s) 'Quantidade de rejeitado em i em t'  
 Y(j,k) 'Abrir instalação fixa ou não'  
 Ya(j,k,a,s) 'Funcionamento da instalação fixa no ano a ou não'  
 H(j) 'Abrir tecnologia móvel ou não'  
 G(j) 'Abrir tecnologia móvel k3 ou não'  
 CI 'custo inv inicial'  
 CL 'custo todas as localizacoes'  
 CD 'custo todos os diagramas'  
 CDu(j) 'custo de todos os diagramas em j'  
 CTr(a,s) 'custo total transporte'  
 CH(a,s) 'custo anual HR associado aos j todos abertos'  
 Ce(a,s) 'custo operacional associado aos j todos abertos'  
 Cm(a,s) 'custo de manutenção em todos os j no período t'  
 Res(a,s) 'Resultados no ano t'  
 RL(a,s) 'Resultados líquidos no ano t'  
 P(i,j,k,a,s) 'Quant de produto P (casco de vidro) em j p/vender por ano'  
 Ndf(j,k) 'Nº diagramas fixos em j'  
 NDfa(j,k,a,s) 'Nº diagramas fixos em funcionamento em j durante o ano a'  
 NDm(j,k,t,s) 'Nº diagramas móveis em j, em cada t'  
 NDgm(k) 'Nº diagramas móveis de cada tecnologia móvel disponível'  
 FNDma(j,k,a,s) 'Fração de diagrama móvel presente em j no ano a'  
 Ndfm(j,k,t,s) 'Nº de diagramas fixos em funcionamento em j durante t'  
 NDma(k,a,s) 'Nº de diagramas móveis em funcionamento durante o ano a'

Binary Variable Y, Ya;

Free Variable CF, Res, RL, VAL;

Positive Variable Qa, Qm, QDa, QDm, CI, CH, CO, P, CTr, CL, CH, Ce, Cm, CDu, TMBr, DC, FNDma;

Integer Variable Ndf, NDm, NDma, NDgm, H, G, Ndfm, NDfa;

\*Restrição 38 do modelo

$Qm.fx(i,j,k,t,s) \$(m(k)) \text{and} (\text{ord}(i) < \text{ord}(j)) = 0;$

$Qm.fx(i,j,k,'0',s) = 0;$

$CH.fx('0',s) = 0;$

$Cm.fx('0',s) = 0;$

$CF.fx('0',s) = 0;$

$NDfa.fx(j,k,'0',s) = 0;$

Equation

FVAL 'funcao objt'

ECF(a,s) 'CFlow nos anos 1 a 9'

ECF1(a,s) 'CFlow no último ano'

EDC(a) 'Depreciação do Capital Investido'

ETMBr0(i,t,s) 'Rejeitado pesado em i no instante 0'

ETMBr(i,t,s) 'Rejeitado pesado em i para instante t'

ETMBr1(i,t,s) 'Renovação do rejeitado pesado em i no novo ano'

ECl 'Custo inv inicial de abrir as unidades j que abrirem'

ECL 'custo todas as localizacoes'

ECD 'custo todos os diagramas'

ECDu(j) 'custo de todos os diagramas em j'

ECTr(a,s) 'Custo Transporte anual'

ECH(a,s) 'Custo Recursos Humanos anual'

ECe(a,s) 'Custos eletricidade anual'

ERL(a,s) 'Resultados líquidos no ano a'

ERes(a,s) 'Resultados no ano a'

EP(i,j,k,a,s) 'Quant de produto P (casco de vidro) em j p/vender por ano'

ECm(a,s) 'custos de manutenção em todos os j, por cada t'

ENDma(k,a,s) 'Número de diagramas móveis de tipo k no sistema durante o ano a e cenário s'

EFNDma1(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 1 e cenário s'

EFNDma2(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 2 e cenário s'

EFNDma3(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 3 e cenário s'

EFNDma4(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 4 e cenário s'

EFNDma5(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 5 e cenário s'

EFNDma6(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 6 e cenário s'

EFNDma7(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 7 e cenário s'

EFNDma8(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 8 e cenário s'

EFNDma9(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 9 e cenário s'

EFNDma10(j,k,a,s) 'Fração de diagramas móveis do tipo k na instalação j no ano 10 e cenário s'

EQa1(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 1 por cenário s'

EQa2(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 2 por cenário s'

EQa3(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 3 por cenário s'

EQa4(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 4 por cenário s'

EQa5(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 5 por cenário s'

EQa6(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 6 por cenário s'

EQa7(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 7 por cenário s'

EQa8(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 8 por cenário s'  
 EQa9(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 9 por cenário s'  
 EQa10(i,j,k,a,s) 'Quantidade de rejeitado processado no ano 10 por cenário s'  
 ENDfa1(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 1 e cenário s'  
 ENDfa2(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 2 e cenário s'  
 ENDfa3(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 3 e cenário s'  
 ENDfa4(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 4 e cenário s'  
 ENDfa5(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 5 e cenário s'  
 ENDfa6(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 6 e cenário s'  
 ENDfa7(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 7 e cenário s'  
 ENDfa8(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 8 e cenário s'  
 ENDfa9(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 9 e cenário s'  
 ENDfa10(j,k,t,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos no ano 10 e cenário s'  
 EQ16(i,j,k,a,s) 'Balanço de material proveniente da entidade i, para a entidade j, com a tecnologia k, por período t'  
 EQ17(j,k,a,s) 'Balanço de material em cada entidade j, com a tecnologia k, por período t'  
 EQ18(a,s) 'Balanço de material por período t'  
 EQ19a(i,t,s) 'Processamento de TMBR em cada entidade i, por período t'  
 EQ19b(i,t,s) 'Processamento de TMBR em cada entidade i, por período t'  
 EQ20(j,k,t,s) 'Restrição de capacidade em cada entidade j, com a tecnologia k, por período t e cenário s'  
 EQ21(j,k,a,s) 'Restrição de capacidade anual em cada entidade j, com a tecnologia k e cenário s'  
 EQ26(k,t,s) 'Restrição do número de diagramas a atuar no sistema em cada período t e cenário s'  
 EQ27(j,k,a,s) 'Restrição do número de diagramas a atuar no sistema em cada ano a e cenário s'  
 EQ28(j,k,t,s) 'Restrição do número de diagramas em cada instalação j em cada período t e cenário s'  
 EQ29(j,k,t,s) 'Restrição do número de diagramas fixos em cada período t e cenário s'  
 EQ30(j,k,a,s) 'Restrição do número de diagramas fixos em cada ano a e cenário s'  
 EQ31(j,k) 'Relação entre o número de diagramas fixos e instalações fixas em j'  
 EQ32(j,k,a,s) 'Relação entre o número de diagramas fixos e instalações fixas em j no ano a'  
 EQ33(j,t,s) 'Número de diagramas móveis máximo associado a cada instalação j num determinado período t'  
 EQ34(j,t,s) 'Número de diagramas móveis k3 máximo associado a cada instalação j num determinado período t'  
 EQ35(i,j,k,a,s) 'Existência de fluxo proveniente de tipologias fixas na estação TMB em cada ano a'  
 EQ36(i,j,k,t,s) 'Existência de fluxo proveniente de tipologias móveis na estação TMB em cada período t'  
 EQ37(j,k,a,s) 'Relação entre as instalações fixas em funcionamento em a e a existência da instalação fixa s'  
 EQ39 'Obrigatoriedade de processamento no sistema'  
 EQ40(j) 'Restrição do número de diagramas fixos de tipologia móvel'  
 EQ41 'Restrição do número de diagramas móveis a investir de tipologia fixa'  
 \*EQ42(i,a,s) 'Restrição do Processamento Total de TMBR'  
 ;  
 FVAL.. VAL =e= sum((a,s), (Pr(s)\* CF(a,s))/((1+Ta)\*\*ano(a)))-Cl;  
 ECF(a,s)\$(ano1a9(a)).. CF(a,s) =e= RL(a,s)+ DC(a);  
 ECF1(a,s)\$(ano10(a)).. CF(a,s) =e= RL(a,s)+ DC(a)+ sum((j,k), CLu\*Y(j,k));  
 EDC(a)\$(ano1a10(a)).. DC(a) =e= (Cl- sum((j,k)\$(f(k), CLu\*Y(j,k)))/(card(a)-1));  
 ETMBR0(i,t,s)\$(b(t)).. TMBR(i,t,s) =e= RP(i);  
 ETMBR(i,t,s)\$(az(t)).. TMBR(i,t,s) =e= TMBR(i,t-1,s)- sum((j,k), Qm(i,j,k,t,s));  
 ETMBR1(i,t,s)\$(ay(t)).. TMBR(i,t,s) =e= RP(i)- sum((j,k), Qm(i,j,k,t,s));  
 ECI.. Cl =e= CL+CD ;  
 ECL.. CL =e= sum((j,k)\$(f(k)), (CLu + Arm + CEq)\*Y(j,k))+ sum(j, (CEq\*H(j) + RG\*G(j)));  
 ECD.. CD =e= sum(j, CDu(j))+ sum(k, CDg(k)\*NDgm(k));  
 ECDu(j).. CDu(j) =e= sum((k)\$(f(k)), ((CDg(k)/2)\*Y(j,k) + ((CDg(k)/2)\*NDf(j,k)));  
 ECTr(a,s).. CTr(a,s) =e= Ckmt\*(sum((i,j,k), Qa(i,j,k,a,s)\*d(i,j))+ sum((j,i,k), QDa(j,i,k,a,s)\*d(i,j)));  
 ECH(a,s).. CH(a,s) =e= Cw\*N\*(sum((j,k), Ya(j,k,a,s))+ sum(k, NDma(k,a,s)));  
 ECe(a,s).. Ce(a,s) =e= Cel\* sum((i,j,k), Qa(i,j,k,a,s));  
 ECm(a,s).. Cm(a,s) =e= sum((j,k), Cmt(k)\*((Ya(j,k,a,s)/2)+(NDfa(j,k,a,s)/2))) + sum(k, Cmt(k)\*NDma(k,a,s));  
 ENDma(k,a,s).. NDma(k,a,s) =g= sum(j, FNDma(j,k,a,s));  
 ERes(a,s).. Res(a,s) =e= Pu\* sum((i,j,k), P(i,j,k,a,s))+ (sum((i,j,k), Qa(i,j,k,a,s)\*Ai)-sum((j,i,k), QDa(j,i,k,a,s)\*Aex))-(Ce(a,s)+ CH(a,s)+ Cm(a,s)+CTr(a,s)+DC(a));  
 ERL(a,s).. RL(a,s) =e= (1-Ti(a,s))\*Res(a,s);  
 EP(i,j,k,a,s).. P(i,j,k,a,s) =e= Qa(i,j,k,a,s)\*V(i)\*Vp(a,s)\*E\*U\*Over6(i);  
 EFNDma1(j,k,a,s)\$(ano1(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an1(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma2(j,k,a,s)\$(ano2(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an2(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma3(j,k,a,s)\$(ano3(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an3(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma4(j,k,a,s)\$(ano4(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an4(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma5(j,k,a,s)\$(ano5(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an5(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma6(j,k,a,s)\$(ano6(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an6(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma7(j,k,a,s)\$(ano7(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an7(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma8(j,k,a,s)\$(ano8(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an8(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma9(j,k,a,s)\$(ano9(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an9(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
 EFNDma10(j,k,a,s)\$(ano10(a)).. FNDma(j,k,a,s) =e= sum(t\$(an10(t)), NDM(j,k,t,s))/MA;  
  
 EQa1(i,j,k,a,s)\$(ano1(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an1(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa2(i,j,k,a,s)\$(ano2(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an2(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa3(i,j,k,a,s)\$(ano3(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an3(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa4(i,j,k,a,s)\$(ano4(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an4(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa5(i,j,k,a,s)\$(ano5(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an5(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa6(i,j,k,a,s)\$(ano6(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an6(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa7(i,j,k,a,s)\$(ano7(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an7(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa8(i,j,k,a,s)\$(ano8(a)).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an8(t)), Qm(i,j,k,t,s));



EQa9(i,j,k,a,s)\$ano9(a).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an9(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 EQa10(i,j,k,a,s)\$ano10(a).. Qa(i,j,k,a,s) =e= sum(t\$(an10(t)), Qm(i,j,k,t,s));  
 ENDfa1(j,k,t,a,s)\$ano1(a) and an1(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa2(j,k,t,a,s)\$ano2(a) and an2(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa3(j,k,t,a,s)\$ano3(a) and an3(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa4(j,k,t,a,s)\$ano4(a) and an4(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa5(j,k,t,a,s)\$ano5(a) and an5(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa6(j,k,t,a,s)\$ano6(a) and an6(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa7(j,k,t,a,s)\$ano7(a) and an7(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa8(j,k,t,a,s)\$ano8(a) and an8(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa9(j,k,t,a,s)\$ano9(a) and an9(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 ENDfa10(j,k,t,a,s)\$ano10(a) and an10(t).. NDfa(j,k,a,s) =g= NDfm(j,k,t,s);  
 EQ16(i,j,k,a,s).. QDa(j,i,k,a,s) =e= Qa(i,j,k,a,s) - P(i,j,k,a,s);  
 EQ17(j,k,a,s).. sum(i,QDa(j,i,k,a,s)) =e= sum(i,Qa(i,j,k,a,s)) - sum(i,P(i,j,k,a,s));  
 EQ18(a,s).. sum((j,i,k),QDa(j,i,k,a,s)) =e= sum((i,j,k),Qa(i,j,k,a,s)) - P(i,j,k,a,s);  
 EQ19a(i,t,s)\$az(t).. sum((j,k),Qm(i,j,k,t,s)) =e= TMBR(i,t-1,s);  
 EQ19b(i,t,s)\$ay(t).. sum((j,k),Qm(i,j,k,t,s)) =e= TMBR(i,t-1,s) + RP(i);  
 EQ20(j,k,t,s).. Cap(k)\*N\*(NDfm(j,k,t,s)+NDm(j,k,t,s)) =g= sum(i, Qm(i,j,k,t,s));  
 EQ21(j,k,a,s).. Cap(k)\*N\*MA\*(NDfa(j,k,a,s)+FNDma(j,k,a,s)) =g= sum(i, Qa(i,j,k,a,s));  
 EQ26(k,t,s).. sum(j,NDm(j,k,t,s)) =e= NDgm(k);  
 EQ27(j,k,a,s).. NDma(k,a,s) =e= NDgm(k);  
 EQ28(j,k,t,s).. NDm(j,k,t,s) =e= NDgm(k);  
 EQ29(j,k,t,s).. NDfm(j,k,t,s) =e= NDF(j,k);  
 EQ30(j,k,a,s).. NDfa(j,k,a,s) =e= NDF(j,k);  
 EQ31(j,k).. NDF(j,k) =g= Y(j,k);  
 EQ32(j,k,a,s).. NDfa(j,k,a,s) =g= Ya(j,k,a,s);  
 EQ33(j,t,s).. H(j) =g= sum(k\$(m(k)),NDm(j,k,t,s));  
 EQ34(j,t,s).. G(j) =g= sum(k\$(ba(k)), NDm(j,k,t,s));  
 EQ35(i,j,k,a,s)\$f(k).. Qa(i,j,k,a,s) =e= Ya(j,k,a,s)\*1000000000000;  
 EQ36(i,j,k,t,s)\$m(k).. Qm(i,j,k,t,s) =e= 1000000000000\*NDm(j,k,t,s);  
 EQ37(j,k,a,s)\$f(k).. Ya(j,k,a,s) =e= Y(j,k);  
 EQ39.. sum((j,k),NDF(j,k)) + sum(k, NDgm(k)) =g= 1;  
 EQ40(j).. sum(k\$(m(k)), NDF(j,k)) =e= 0;  
 EQ41.. sum(k\$(f(k)), NDgm(k)) =e= 0;  
 \*EQ42(i,a,s)\$ano1a10(a).. sum((j,k),Qa(i,j,k,a,s)) =e= RP(i);

Model tese / all /;  
 solve tese using MIP maximizing VAL;

Option Y:0:0:1 display Y.I;  
 Option Ya:0:1:1 display Ya.I;  
 Option NDF:0:0:1 display NDF.I;  
 Option NDfm:0:1:1 display NDfm.I;  
 Option NDfa:0:1:1 display NDfa.I;  
 Option NDm:1:1:1 display NDm.I;  
 Option NDgm:0:0:1 display NDgm.I;  
 Option NDma:1:1:1 display NDma.I;  
 Option FNDma:1:1:1 display FNDma.I;  
 Option H:0:0:1 display H.I;  
 Option G:0:0:1 display G.I;  
 Option TMBR:0:1:1 display TMBR.I;  
 Option Qm:1:1:1 display Qm.I;  
 Option Qa:1:1:1 display Qa.I;  
 Option QDa:1:1:1 display QDa.I;  
 Option P:1:1:1 display P.I;  
 Option CTr:0:1:1 display CTr.I;  
 Option CH:0:1:1 display CH.I;  
 Option Cm:0:1:1 display Cm.I;  
 Option Ce:0:1:1 display Ce.I;  
 Option Res:0:1:1 display Res.I;  
 Option RL:0:1:1 display RL.I;  
 Option CF:0:1:1 display CF.I;  
 Option DC:0:0:1 display DC.I;  
 display CL.I;  
 display Cl.I;  
 display CDu.I;  
 display CD.I;

Parameter R(a,s);  
 R(a,s) = sum((i,j,k), P.I(i,j,k,a,s))\*Pu + (sum((i,j,k), Qa.I(i,j,k,a,s)\*Ai) - sum((j,i,k), QDa.I(j,i,k,a,s)));  
 display R;  
 Parameter C(a,s);  
 C(a,s) = CTr.I(a,s) + CH.I(a,s) + Ce.I(a,s) + Cm.I(a,s) + DC.I(a);  
 display C;  
 Parameter Pv(a,s);  
 Pv(a,s) = sum((i,j,k), P.I(i,j,k,a,s));

display Pv;

## Anexo IX: Modelo de Roteamento Implementado em GAMS

\$title Tese 2

\$eolcom #

option MIP=CPLEX  
option limrow = 100000, limcol = 100000;  
option iterlim=10000000; option reslim=1500000;  
option decimals=6;  
option optcr=0;

Sets

i 'TMB/aterro' / 0, n+1,e2,e6,e12,e13/

Alias (i,j);

Parameters

\$onText

Table d(i,j) 'distância'

	0	n+1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12	e13	e14	e15	e16		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
n+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
e2	0	0	0	233	233	226	87	174	209	130	104	143	154	59	306	223	429	311	356
e3	0	0	231	0	39	38	152	397	199	162	326	290	376	283	153	471	277	158	203
e4	0	0	230	39	0	13	157	396	173	161	325	289	376	282	127	470	251	132	178
e5	0	0	226	34	13	0	157	392	164	157	321	285	371	278	117	466	242	123	170
e6	0	0	87	152	157	157	0	253	170	89	171	217	233	139	248	327	371	252	298
e7	0	0	177	401	400	392	250	0	377	298	84	317	44	201	473	174	597	478	524
e8	0	0	209	198	175	164	170	375	0	100	304	158	355	240	83	335	242	200	170
e9	0	0	129	164	164	157	89	295	100	0	224	155	274	159	155	324	321	202	248
e10	0	0	100	324	323	323	171	82	300	221	0	247	62	126	396	163	520	401	447
e11	0	0	143	292	291	285	217	317	157	155	246	0	296	167	247	187	401	369	329
e12	0	0	155	379	379	371	229	42	355	276	63	301	0	180	452	133	575	457	502
e13	0	0	59	286	285	278	139	201	243	164	130	169	180	0	358	174	482	363	408
e14	0	0	303	151	128	117	248	469	83	156	398	247	448	355	0	425	167	92	95
e15	0	0	223	475	474	466	325	172	334	328	166	189	138	174	423	0	671	552	597
e16	0	0	427	276	252	242	371	593	242	320	522	401	573	480	168	668	0	130	73
e17	0	0	309	157	134	123	252	475	200	201	404	368	455	361	92	549	130	0	58
e18	0	0	356	204	180	170	298	522	171	248	451	330	501	408	97	596	72	60	0

;

\$OffText

\*\$OnText

Table d(i,j) 'distância'

	0	n+1	e2	e6	e12	e13
0	0	0	0	0	0	0
n+1	0	0	0	0	0	0
e2	0	0	0	87	154	59
e6	0	0	87	0	233	139
e12	0	0	155	229	0	180
e13	0	0	59	139	180	0

;

\*\$OffText

\*\$onText

Parameters NT(i) 'Número de intervalos de tempo que os veículos necessitam para processamento na instalação i, durante o período de um ano'

/

0 0,n+1 0, e2 9, e6 2, e12 8, e13 5

/

\*\$OffText

Scalar Q Quantidade de períodos em que o ano está dividido /12/;

Scalar V quantidade veículos disponíveis /2/;

Parameter QT Quantidade disponível de visitas durante um ano;

\*EQ47

QT=V\*Q;

Scalar c traveling cost per unit distance EuroPerKm /1/;

Scalar N Número de anos em que distância é percorrida /5/;

Variables

x(i,j)

y(i,j)  
z

Binary variable x;  
Integer variable y;  
x.fx(i,j)\$ (ord(i)=ord(j))=0;  
y.fx(i,j)\$ (ord(i)=ord(j))=0;

Equations

ECTr  
EQ44(i)  
EQ45(j)  
EQ46(j)  
EQ48(i)  
EQ49(i)  
EQ50(j)  
EQ51(i,j)

;

ECTr.. z =e= (0.5\*(sum((i,j),x(i,j)\*d(i,j)\*c))\*N);

EQ44(i)\$ (ord(i)>=3).. sum(j\$(ord(i)<>ord(j)),(y(i,j)-y(j,i))) =e= 2\*SI(i);  
EQ45(j)\$ (ord(j)=2).. sum(i\$(ord(i)>=3),y(i,j)) =e= sum(i\$(ord(i)>=3),SI(i));  
EQ46(j)\$ (ord(j)=2).. sum(i\$(ord(i)>=3),y(j,i)) =e= QT - sum(i,SI(i));  
EQ48(i)\$ (ord(i)=1).. sum(j\$(ord(j)>=3),y(i,j)) =e= QT;  
EQ49(i)\$ (ord(i)=1).. sum(j\$(ord(j)>=3),y(i,j)) =e= 0;  
EQ50(j)\$ (ord(j)>=3).. sum(i\$(ord(i)<>ord(j)), x(i,j)) =g= 2;  
EQ51(i,j)\$ (ord(i)<>ord(j)).. y(i,j)+y(j,i) =e= Q\*x(i,j);

Model TOP /all/  
TOP.optfile=1;

solve TOP using mip minimize z;  
Parameter Distancia;  
Distancia= (0.5\*sum((i,j),x.l(i,j)\*d(i,j))\*N);

Option x:0:0:1 display x.l;  
Option y:0:0:1 display y.l;  
Display Distancia