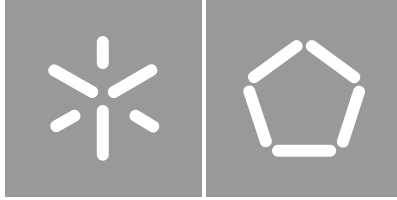


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Ana Paula Morais Salgado

Gestão de resíduos urbanos:
estudo de caso



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Ana Paula Morais Salgado

**Gestão de resíduos urbanos:
estudo de caso**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Sistemas

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)

Professora Doutora Ana Maria Coutinho da Rocha

Professor Doutor César Analide da Costa Rodrigues

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho:



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Quero expressar o meu profundo agradecimento aos meus orientadores, a Professora Doutora Ana Maria Alves Coutinho da Rocha e o Professor Doutor César Analide Freitas Silva da Costa Rodrigues.

Além da constante disponibilidade, deram-me a oportunidade de desenvolver o tema, orientaram-me e esclareceram as minhas dúvidas, permitindo-me atingir o meu objetivo e ampliar os meus conhecimentos.

Um especial agradecimento às minhas filhas Joana e Ana Beatriz por todo o carinho e incentivo que me transmitem nas minhas incursões de aprendizagem, e ao meu marido Jorge por me apoiar ao longo desses percursos.

Concluir a presente dissertação corresponde a uma conquista pessoal.

Estou eternamente grata pelo caminho percorrido, pela presença das pessoas que me acompanharam e pela chegada.

Um bem-haja a todos.

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Gestão de resíduos urbanos: estudo de caso

Resumo

O desenvolvimento económico dos países ocidentais traduz-se num aumento na produção e no consumo de bens, na sua maioria de pouca durabilidade, com o consequente incremento de resíduos. Os resíduos crescem exponencialmente e os sistemas de gestão encontram-se sob uma elevada pressão, não só no contexto ambiental (novos locais para deposição e aterros existentes no limite das capacidades de receção de resíduos, e emissão de gases com efeito de estufa) como no contexto económico e de gestão (sustentabilidade do setor e qualidade do serviço prestado).

Nos últimos anos, Portugal tem enfrentado desafios na gestão de resíduos urbanos, mas também tem demonstrado compromisso com a implementação de políticas e práticas mais sustentáveis.

As aplicações de modelos económicos mais sustentáveis decorrem da imposição de diretivas europeias e planos nacionais de regulamentação, sendo que os planos no âmbito dos resíduos concretizam a política nacional de resíduos constante na Resolução do Conselho de Ministros n.º 31/2023, e a Lei de Bases do Clima sustenta a política climática publicada no Decreto-lei n.º 98/2021.

A consciência ambiental da população e o investimento em infraestrutura e tecnologia são essenciais para superar estes desafios e promover uma gestão de resíduos mais eficiente e ambientalmente responsável.

Esta dissertação pretende avaliar o modelo de organização de uma entidade municipal de gestão de resíduos urbanos, com rotas e equipamentos de contentorização instalados há vários anos, e estudar as técnicas de *Machine Learning* (ML) na vertente da análise de dados, com a utilização da plataforma KNIME.

A análise de dados orientada por Inteligência Artificial (IA) pode fornecer informações valiosas sobre padrões de produção de resíduos, composição e desempenho operacional.

Ao analisar grandes conjuntos de dados, a IA pode identificar tendências, otimizar a alocação de recursos, melhorar estratégias de gestão de resíduos e apoiar processos de tomada de decisão baseados em dados, e assim tornar os processos de gestão de resíduos, mais eficientes, económicos e sustentáveis.

Palavras chave: KNIME, *Machine Learning*, Resíduos, Resíduos Sólidos Urbanos, Sistema de Gestão de Resíduos

Urban waste management: a case study

Abstract

The economic development of western countries provokes an increase in the production and consumption of goods, most of which are single use, with a consequent increment in waste.

Thus, waste grows exponentially and management systems are under high pressure, not only in the environmental context (new sites for disposal and existing landfills at the limit of waste reception capacities, and emission of greenhouse gases), as well as in the economic and management context (sustainability of the sector and quality of the service provided).

In recent years, Portugal has faced challenges in urban waste management, but has also demonstrated a commitment to implementing more sustainable policies and practices.

The applications of more sustainable economic models result from the imposition of European directives and national regulatory plans, with waste plans implementing the national waste policy approved by RCM no. 31/2023, and the Climate Basic Law supports climate policy published in Decree-Law No. 98/2021.

The population's environmental awareness and investment in infrastructure and technology are essential to overcome these challenges and promote more efficient and environmentally responsible waste management.

This dissertation aims to evaluate the organizational model of a municipal urban waste management entity, with routes and containerization equipment installed several years ago, and aims to study Machine Learning techniques of data analysis, using the KNIME platform.

AI-driven data analysis can provide valuable insights of waste production patterns, composition and operational performance.

By analyzing large data sets, Artificial Intelligence can identify trends, optimize resource allocation, improve waste management strategies, and support data-driven decisions, so that waste management processes can become more efficient, cost-effective and sustainable.

Keywords: KNIME, Machine Learning, Municipal Solid Waste, Waste, Waste Management System

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Lista de Abreviaturas	ix
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xii
1 – Introdução.....	1
1.1 Justificação do tema	1
1.2 Objetivos gerais	1
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 - Revisão da literatura	3
2.1 Enquadramento geral	3
2.2 Resíduos sólidos urbanos – enquadramento teórico	3
2.2.1 Conceitos	3
2.2.2 Enquadramento legal	4
2.2.3 Instrumentos de política ambiental - Enquadramento europeu	5
2.2.4 Instrumentos de política ambiental - Enquadramento nacional	5
2.2.5 Instrumentos de política ambiental - Regulamentos municipais de gestão de resíduos	7
2.2.6 - Emissões de gases efeito de estufa no setor dos resíduos.....	8
2.2.7 Instrumentos económicos	10
2.3 Produção e composição de resíduos urbanos.....	11
2.4 Gestão de resíduos urbanos.....	12
2.5 Deposição, recolha e transporte de resíduos	13
2.5.1 Deposição	13
2.5.2 Recolha	14

2.5.3 Frequência e horário de recolha	16
2.5.4 Circuitos de recolha	17
2.5.5 Transporte de resíduos	18
2.6 Tratamento de RSU	18
2.7 Os resíduos urbanos em Portugal Continental	18
2.7.1 Destinos	20
2.7.2 Indicadores de qualidade do serviço de gestão de resíduos urbanos	21
3 – Modelos analíticos com aplicação de <i>Machine Learning</i>	22
3.1 Enquadramento do tema	22
3.2 Aplicabilidade	23
3.3 Metodologia técnica	25
3.4 KNIME	26
4 – Estudo de caso	30
4.1 Descrição	30
4.2 Evolução dos quantitativos de RSU indiferenciados e recolhidos seletivamente	30
4.3 Caracterização e estrutura dos dados	32
5 - Análise dos dados do caso de estudo	38
5.1 Enquadramento	38
5.2 Caracterização do caso de estudo: visão geral	38
5.3 Avaliação de parâmetros da recolha de resíduos	44
5.4 Avaliação de parâmetros do transporte de resíduos	49
6 – Conclusões	52
6.1 Considerações finais	52
6.2 Trabalho Futuro	53
Referências	55

Lista de Abreviaturas

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CAGER - Comissão de Acompanhamento da Gestão de Resíduos

CO2 – Dióxido de Carbono

ERSAR - Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos

EU – União Europeia

GEE – Gases com Efeito de Estufa

IA – Inteligência Artificial

KNIME - Konstanz Information Miner

ML – *Machine Learning*

OAU – Óleo Alimentar Usado

PAYT – *Pay As You Throw*

PERSU – Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos

PERNU - Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos

PNGR - Plano Nacional de Gestão de Resíduos

REEE – Resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos

RGGR - Regime Geral de Gestão de Resíduos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RU – Resíduos Urbanos

RPA – Resíduos de Pilhas e Acumuladores

SGRU - Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos

Índice de Figuras

Figura 1 - Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor de Resíduos em 2021 (adaptado de APA, 2023).....	9
Figura 2 - Emissões de Gases de Efeito Estufa, por Setor, em Portugal (adaptado de APA, 2022; 2023).....	9
Figura 3 - Evolução da Produção de RU (t) e Capitação Diária (kg/hab.dia) em Portugal Continental, entre 2019 e 2021 (adaptado de RARU APA, 2022).	19
Figura 4 - Caracterização física dos RU produzidos em Portugal Continental, no ano de 2021 (%) (adaptado de RARU APA, 2022).	19
Figura 5 - Evolução da Recolha RU (%) entre 2019 e 2021 (adaptado de RARU APA, 2022).	20
Figura 6 - Destino dos RU em 2021 (%) (adaptado de RARU APA, 2022).	20
Figura 7 - Aplicações da análise de dados à gestão de resíduos (adaptado PRO2030 FEFAL, 2023).....	24
Figura 8 - Plataforma KNIME.....	26
Figura 9 - Fluxo de trabalho composto por nodos. De UPDATA “KNIME: Guia de boas práticas para construção de <i>workflows</i> ”.	27
Figura 10 - Nodos KNIME	27
Figura 11 - Exemplo de Fluxo KNIME	28
Figura 12 – Nodos de pré-processamento	28
Figura 13 – Nodos de processamento.....	29
Figura 14 – Nodos de visualização.....	29
Figura 15 - Origem dos RU produzidos em 2022.....	30
Figura 16 - Distribuição dos Resíduos Seletivos Recolhidos em 2022.....	31
Figura 17 - Composição Física dos Resíduos Indiferenciados em 2022.....	32
Figura 18 - <i>Equipamentos de Contentorização Georreferenciados</i>	33
Figura 19 - Circuitos de Recolha e Dispersão de Contentores por Circuito.....	35
Figura 20 - Circuito Percorrido por Camião, e Sinalização de Elevação de Carg Traseira – Registos de Pesagens	36
Figura 21 - Fluxo de Trabalho “Número de. Contentores por Circuito e Sub-circuito”.....	39
Figura 22 - Número Contentores por Circuito e Sub-circuito.....	40
Figura 23 - Fluxo de trabalho “Número de contentores por freguesia”	40

Figura 24 - Número de Contentores por Freguesia	41
Figura 25 - Fluxo de trabalho “Número de Contentores por Freguesia e Rua”	41
Figura 26 - Número de Contentores por Freguesia e Rua.....	42
Figura 27 - Fluxo de trabalho “Peso Médio Mensal por Contentor e por Circuito”	43
Figura 28 - Fluxo de trabalho “Avaliação da Capacidade de Contentorização Função do Número de Habitantes”	45
Figura 29 - Fluxo de trabalho “Falhas eventuais na Recolha de Resíduos”	47
Figura 30 - <i>Falhas na Frequência de Recolha de Resíduos</i>	48
Figura 31 - Fluxo de trabalho “Avaliação da Sobrecarga da Recolha”	49
Figura 32 - Número de Ocorrências de Excesso de Carga (Circuito-dia)	50

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Emissões de Gases de Efeito de Estufa, por Tonelada de Resíduos Urbanos das Viaturas de Recolha de Resíduos (Kg CO ₂ /t).....	10
Tabela 2 - Recolha de RU (10 t3) em Portugal Continental, entre 2019 e 2021.	20
Tabela 3 - Quantitativos de Resíduos Recolhidos e Tratados na Origem em 2022.	30
Tabela 4 - Composição da recolha seletiva multimaterial.	31
Tabela 5 - Equipamentos de Deposição.....	33
Tabela 6 - Atributos 1 dos Contentores.....	33
Tabela 7 - Atributos 2 dos Contentores.....	34
Tabela 8 - Viaturas de Recolha.	34
Tabela 9 - Circuitos de Recolha de Resíduos Urbanos.....	34
Tabela 10 - Frequências por Circuito.....	35
Tabela 11 - Elevações de Carga Traseira.....	36
Tabela 12 - Deposições Diárias em Aterro (ton.)	36
Tabela 13 - Agregados Mensais por Circuito.....	37
Tabela 14 - Número de Contentores por Freguesia e Rua	43
Tabela 15 - Peso Médio Mensal por Contentor e por Circuito.....	44
Tabela 16 - ID INE de Freguesia.....	44
Tabela 17 - Total de contentores por freguesia e união de freguesias.....	45
Tabela 18 - Agregação de Contentores com Número de Habitantes	46
Tabela 19 - Capacidade de Contentorização Instalada	46
Tabela 20 - Análise do Serviço de Recolha	48
Tabela 21 - Análise de sobrecarga.....	50

1 – Introdução

1.1 Justificação do tema

A avaliação da quantidade de resíduos produzidos e do respetivo ciclo de vida, são indicadores relevantes para avaliar a sustentabilidade económica e ambiental de um território, assim como fornecer uma noção sobre a eficiência e impacto ambiental das atividades económicas e atividades domésticas.

Um território que gera poucos resíduos por atividade, progride no sentido de um modelo de desenvolvimento mais sustentável uma vez que é mais eficiente no uso de recursos e minimiza o desperdício, o que é fundamental para preservar os recursos naturais e reduzir a pegada ecológica.

O aumento da quantidade de resíduos e, consequentemente, o aumento de tipos de resíduos, exige que os operadores de gestão desenvolvam processos mais sofisticados e complexos de os valorizar ou mesmo de os eliminar. Neste sentido, a gestão dos resíduos urbanos requer um sistema de recolha eficiente, uma correta rastreabilidade dos fluxos de resíduos, infraestruturas adequadas e uma avaliação económica ponderada.

Adicionalmente, a gestão dos resíduos é uma matéria prioritária no âmbito da descarbonização e neutralidade carbónica.

1.2 Objetivos gerais

Esta dissertação tem como objetivo geral, aplicar uma ferramenta de *Machine Learning* (ML) aos dados dos sistemas de informação (sistema de informação geográfico e sistema de sensores) de uma entidade gestora municipal de resíduos urbanos.

Neste contexto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Enquadrar a atividade de gestão de resíduos urbanos;
- Caracterizar a entidade gestora municipal de resíduos urbanos do caso de estudo, C.M. Felgueiras, a partir da informação existente: quantitativos de resíduos urbanos recolhidos, rotas de recolha, tipologia e quantidade de contentores, equipamentos afetos à recolha e consumos associados, tipo de resíduos recolhidos, população residente, entre outros;
- Avaliar os dados e obter uma visão integral do problema em análise;
- Desenhar modelos de ML nas vertentes analíticas e de apoio à decisão.

Considera-se relevante a aplicação de técnicas de *Machine Learning*, a problemas específicos da gestão dos resíduos sólidos urbanos do estudo de caso, nomeadamente no que respeita à verificação de circuitos, a análises sobre a qualidade do serviço prestado aos cidadãos, tais como eventuais falhas

na recolha e aglomerado populacional envolvido em cada circuito, entre outros, assim como propostas de melhorias e alertas de reincidências.

1.3 Estrutura da dissertação

Além do capítulo introdutório, onde se abordam as bases da dissertação como a justificação do tema e, os objetivos gerais e específicos, a dissertação é organizada nos seguintes capítulos:

No Capítulo 2 são descritos vários conteúdos que servem de enquadramento ao tema dos RSU, nomeadamente, os conceitos, a legislação europeia e nacional, e regulamentos municipais.

O Capítulo 3 apresenta os fundamentos para a aplicabilidade de *Machine Learning* e introduz a plataforma KNIME.

O Capítulo 4 caracteriza o Estudo de Caso.

O Capítulo 5 expõe a análise dos dados, a descrição do trabalho desenvolvido e a apresentação dos resultados.

No Capítulo 6 são tecidas as conclusões e é efetuada uma reflexão sobre o tema em análise e sobre alguns problemas encontrados, e finalmente, é discutida uma perspetiva futura de trabalhos a desenvolver.

2 - Revisão da literatura

2.1 Enquadramento geral

O desenvolvimento económico e o crescimento populacional são fatores que potenciam a produção de resíduos. A crescente prosperidade dos países, medida como o crescimento do produto interno bruto (PIB) *per capita*, e a migração urbana constante têm aumentado a produção de resíduos sólidos urbanos (Kaza et al., 2018).

No contexto atual, a produção de resíduos e a sua correta gestão são temáticas objeto de análise, regulamentação e avaliação pública, pelo que, segundo Faria (2019), a gestão de resíduos sólidos urbanos é um tema preocupante para os agentes públicos, com impactos diretos na saúde, no ambiente e na qualidade de vida dos cidadãos.

Gerir adequadamente os resíduos com o menor impacto possível no ambiente é um desafio, essencialmente no âmbito do cumprimento das metas estabelecidas pela União Europeia (EU), aliado às preocupações ambientais dos impactos negativos na qualidade do solo, na água e na saúde pública.

É fundamental avaliar regularmente a eficácia da gestão de resíduos urbanos para garantir que os esforços e investimentos geram os resultados satisfatórios considerando as vertentes ambientais, sociais e económicas.

A contextualização da problemática da gestão de resíduos urbanos em Portugal envolve várias vertentes, nomeadamente no contexto das diretrizes e regulamentações europeias e na gestão dos mesmos.

2.2 Resíduos sólidos urbanos – enquadramento teórico

2.2.1 Conceitos

Segundo o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, entende-se por resíduo: “qualquer substância ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer ” e, por Resíduo urbano: “o resíduo proveniente de habitações, bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações”.

Por “Produtor de resíduos”, entende-se qualquer pessoa, singular ou coletiva, cuja atividade produza resíduos (produtor inicial de resíduos) ou que efetue operações de pré-processamento, de mistura ou outras que alterem a natureza ou a composição desses resíduos.

A 'Recolha' consiste na apanha de resíduos, incluindo a triagem e o armazenamento preliminares dos resíduos para fins de transporte para uma instalação de tratamento de resíduos.

Deste modo, são considerados resíduos urbanos (RU), os resíduos produzidos pelos agregados familiares (resíduos domésticos); por pequenos produtores de resíduos semelhantes (produção diária inferior a 1100 litros; e por grandes produtores de resíduos semelhantes (produção diária igual ou superior a 1100 litros) (APA, 2021b).

A quantificação e caracterização física dos resíduos sólidos urbanos são essenciais no âmbito de uma gestão integrada de resíduos sólidos, sendo que, a informação processada a partir destes dois parâmetros é fundamental para avaliar a execução dos objetivos de gestão destes (Carvalho, E., 2005).

A Quantificação dos resíduos é um aspeto importante, pois sem este, não é possível estimar as produções de uma atividade (Tchobanoglous et al., 1993).

De acordo com o referido Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, entende-se por “Gestão de resíduos”, 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.

Um Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos é uma estrutura composta por recursos humanos, logísticos, equipamentos e infraestruturas, com o objetivo de fazer a gestão dos Resíduos Urbanos (APA, 2021b).

2.2.2 Enquadramento legal

A União Europeia incentiva as cidades a aplicarem políticas de planeamento e ordenamento do território sustentáveis, que incluem a mobilidade urbana, os edifícios sustentáveis, eficiência energética e a conservação da biodiversidade urbana (CE, 2019).

É neste enquadramento que a problemática dos resíduos urbanos é considerada como prioritária, não só pela sua importância ambiental como pelo seu impacto numa gestão mais eficiente dos recursos naturais.

Assim, a gestão de resíduos tem evoluído no sentido de proteger, preservar e melhorar a qualidade do ambiente, proteger a saúde humana, assegurar uma utilização prudente, eficiente e racional dos recursos naturais.

Neste contexto, surgem a nível europeu para transposição para a legislação nacional, os planos no âmbito dos resíduos que concretizam a política nacional de resíduos, dando forma aos objetivos de prevenção de resíduos e do seu aproveitamento como recurso, garantindo a utilização eficiente dos recursos naturais e devolvendo materiais e energia à economia.

Para tal, os planos definem orientações, objetivos, ações e metas para a prevenção e gestão de resíduos, a nível nacional, que se traduzem em planos de ação a nível municipal.

2.2.3 Instrumentos de política ambiental - Enquadramento europeu

As políticas e regulamentações nacionais e europeias sobre a gestão de resíduos urbanos desempenham um papel crucial na promoção de práticas sustentáveis de gestão de resíduos, na proteção do meio ambiente e na saúde pública.

Da plataforma da Agência Portuguesa do Ambiente (APA), algumas das principais políticas, diretivas e regulamentações da União Europeia, relevantes, são:

- Diretiva Quadro de Resíduos (2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008) que estabelece um quadro para a gestão de resíduos na União Europeia, com ênfase na prevenção, reutilização, reciclagem e outras formas de recuperação de resíduos.
- Diretiva sobre Aterros Sanitários (1999/31/CE de 26 de abril de 1999) que estabelece normas e requisitos para a gestão de aterros sanitários, visando reduzir a deposição de resíduos biodegradáveis e prevenir a poluição do solo e da água.
- Diretiva sobre Embalagens e Resíduos de Embalagens (94/62/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de dezembro de 1994) que estabelece metas de reciclagem e recuperação de embalagens e resíduos de embalagens, bem como requisitos para minimizar o impacto ambiental desses resíduos.
- Estratégia Europeia para os Plásticos (2018), que promovida pela Comissão Europeia, visa abordar os desafios relacionados com a poluição por plásticos, promovendo a circularidade destes, a sua reciclagem e a redução do uso de plásticos descartáveis.

2.2.4 Instrumentos de política ambiental - Enquadramento nacional

Em 1987, surge uma primeira legislação do Ambiente (Lei n.º 11/1987, de 7 de Abril), que define as bases da política de ambiente. Esta emana ao abrigo da Constituição da República Portuguesa, de acordo com o disposto dos artigos 9º e 66º, que indica como princípio geral, *“todos os cidadãos têm direito a um ambiente humano ecologicamente equilibrado e o dever de o defender, incumbindo ao Estado, por meio de organismos próprios e por apelo a iniciativas*

populares e comunitárias promover a melhoria da qualidade de vida, quer individual, quer coletiva."

Em 2020, é atualizado o Regime Geral da Gestão de Resíduos, o Regime Jurídico da Deposição de Resíduos em Aterro e alterado o Regime da Gestão de Fluxos Específicos de Resíduos, através do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro.

Este decreto, na sua atual redação, pretende promover e dar especial ênfase às abordagens circulares, que dão prioridade aos produtos reutilizáveis e aos sistemas de reutilização sustentáveis e não tóxicos em vez dos produtos de utilização única, tendo primordialmente em vista a redução dos resíduos gerados.

No que se refere ao Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR) são introduzidas normas relativas à prevenção da produção de resíduos, prevendo-se objetivos e metas de prevenção tanto ao nível da produção de resíduos urbanos, como medidas com vista à promoção da reutilização, inserindo-se ainda medidas com vista à minimização na produção de resíduos perigosos.

No que respeita ao regime jurídico da deposição de resíduos em aterro, é novamente reforçado o princípio da hierarquia dos resíduos, especificando-se que as operações prévias de tratamento de que depende a admissibilidade da sua deposição em aterro devem incluir, no mínimo, uma seleção adequada dos diferentes fluxos de resíduos, e proibindo-se a deposição de resíduos que tenham sido objeto de recolha seletiva para efeitos de preparação para a reutilização e reciclagem.

Os planos nacionais no âmbito dos resíduos concretizam a política nacional de resíduos, dando forma aos objetivos de prevenção de resíduos e do seu aproveitamento como recurso, garantindo a utilização eficiente dos recursos naturais e devolvendo materiais e energia à economia.

Para tal, os planos definem orientações, objetivos, ações e metas para a prevenção e gestão de resíduos, a nível nacional, que se traduzem em planos de ação a nível municipal.

Na atualidade, as orientações fundamentais da política de resíduos são dadas pelos seguintes instrumentos (APA,2021b):

- Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR);
- Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU);
- Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos (PERNU);
- Estratégia para os Biorresíduos.

Cabe à APA a elaboração e a implementação destes planos, incluindo o seu acompanhamento e monitorização, cuja aprovação é feita por resolução do Conselho de Ministros, após audição das entidades que integram a Comissão de Acompanhamento da Gestão de Resíduos (CAGER), no caso do PNGR e do PERNU, e da Associação Nacional de Municípios Portugueses, no caso do PERSU.

A política nacional de resíduos apresenta-se preconizada, a nível macro, pelo Plano Nacional de Gestão de Resíduos, que estabelece as orientações estratégicas, de âmbito nacional, e as regras orientadoras de atuação, as prioridades a observar, as metas a atingir e as ações a implementar, no sentido de garantir a concretização dos princípios da gestão de resíduos, bem como o cumprimento dos objetivos definidos no RGGR, no período compreendido entre 2021 e 2030.

O PERSU segue a visão subjacente ao PNGR 2030 e foca-se na implementação da hierarquia de resíduos, centrada na prevenção, perspetivando uma inversão da tendência - que tem sido verificada ao longo dos últimos anos - de aumento da produção de resíduos, através, nomeadamente, de medidas que fomentem a reutilização e/ou o prolongamento do tempo de vida de produtos.

Essas políticas e regulamentações fornecem o arcabouço legal e institucional para a gestão de resíduos urbanos tanto a nível nacional quanto europeu, estabelecendo metas, padrões e diretrizes para promover uma gestão mais eficiente, sustentável e integrada desses resíduos.

A definição, por Portugal, do novo ciclo de planeamento em matéria de resíduos para o período até 2030 deve, assim, ter presente as prioridades definidas pela União Europeia, sem descuidar a necessidade de consagrar objetivos claros e estratégias que assegurem a sua exequibilidade e sustentabilidade.

2.2.5 Instrumentos de política ambiental - Regulamentos municipais de gestão de resíduos

Para a gestão integrada dos RU e prossecução das prioridades que têm vindo a ser definidas na legislação, previram-se dois tipos de entidades: os municípios ou associações de municípios, em que a gestão do sistema pode ser concessionada a qualquer empresa, e as entidades multimunicipais, cujos sistemas são geridos por empresas concessionárias.

No contexto local ou municipal, e no âmbito das competências atribuídas aos municípios, há a necessidade de definir e estabelecer as regras e condições relativas aos sistemas de gestão de resíduos na área respetiva área de atuação, através de regulamentos municipais de gestão de

resíduos, podendo estes incluir, entre outros, a Tarifa de Gestão de Resíduos Urbanos, penalidades e as atividades de limpeza e higiene urbana.

O Regime Jurídico das Autarquias Locais, aprovado pela Lei n.º 75/2013, de 12 de janeiro, na sua redação atual, atribui aos órgãos municipais, em matéria de ambiente, um conjunto de competências de planeamento, gestão de equipamentos e realização de investimento nos sistemas municipais de limpeza pública, de recolha, transporte e tratamento de resíduos urbanos.

A gestão dos serviços municipais de abastecimento público de água, de saneamento de águas residuais urbanas e de gestão de resíduos urbanos é uma atribuição dos municípios, sendo que as regras de prestação desse serviço aos utilizadores devem estar previstas num regulamento de serviço, que deve ser aprovado pela entidade titular. No entanto, quando os serviços são objeto de delegação ou concessão, a proposta de regulamento de serviço é elaborada pela entidade gestora, competindo a esta entidade fiscalizar o cumprimento das normas constantes do regulamento de serviço relativas aos utentes.

2.2.6 - Emissões de gases efeito de estufa no setor dos resíduos

Portugal comprometeu-se internacionalmente com o objetivo de redução das suas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) por forma a que o balanço entre as emissões e as remoções da atmosfera (ex., pela floresta) seja nulo em 2050. A este objetivo deu-se o nome de “neutralidade carbónica” (Fernandes, 2019).

O objetivo principal do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 é a identificação e análise das implicações associadas a trajetórias alternativas, tecnicamente exequíveis, economicamente viáveis e socialmente aceites, e que permitam alcançar o objetivo de neutralidade carbónica da economia Portuguesa em 2050.

Atingir a neutralidade carbónica em Portugal implica a redução de emissões de gases com efeito de estufa entre 85% e 90% até 2050 e a compensação das restantes emissões através do uso do solo e florestas, a alcançar através de uma trajetória de redução de emissões entre 45% e 55% até 2030, e entre 65% e 75% até 2040, em relação a 2005 (APA, 2018).

O sector dos resíduos desempenha um papel importante nas emissões de GEE e consequentemente nas Alterações Climáticas. As emissões associadas à gestão de resíduos podem ser significativamente reduzidas através da prevenção da produção de resíduos, da valorização multimaterial, da valorização orgânica, da utilização de resíduos como fonte de

energia e da adoção de procedimentos de operação que garantam um melhor controlo de emissões.



Figura 1 - Emissões de Gases de Efeito Estufa do Setor de Resíduos em 2021 (adaptado de APA, 2023).

A **Figura 1** apresenta as emissões de gases de efeito de estufa do setor de resíduos em 2021, sendo que estes representaram cerca de 9% das emissões portuguesas.

Este aumento é principalmente relacionado com o aumento da geração de resíduos (associado ao desenvolvimento de renda e o crescimento da urbanização) e a deposição de resíduos predominantemente em aterros, cuja evolução de 2019 a 2021 pode ser verificado na **Figura 2**.

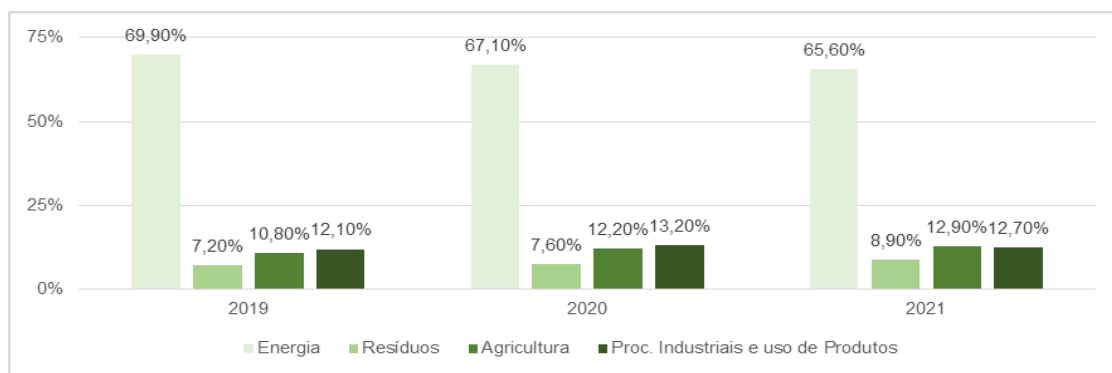


Figura 2 - Emissões de Gases de Efeito Estufa, por Setor, em Portugal (adaptado de APA, 2022; 2023)

Assim, consideram-se importantes as questões relacionadas da interação do setor dos resíduos com as alterações climáticas, pelo que a minimização dos impactos associados ao transporte dos resíduos, é uma questão que deve ser tida em conta.

Num sistema de gestão de RU, a componente recolha e transporte pode representar a componente mais dispendiosa do sistema, pelo que é imperativa uma gestão cuidada e eficiente, nomeadamente um bom planeamento e otimização dos circuitos, uma boa gestão dos

recursos humanos e equipamentos afetos ao sistema de recolha e uma boa sensibilização dos utentes do serviço para adotarem os comportamentos de deposição mais corretos.

Assim, os circuitos de recolha de RU devem ser objeto de uma cuidada análise, recorrendo-se, por exemplo, à determinação de um conjunto de indicadores que permitam caracterizar e avaliar a sua produtividade.

Na **Tabela 1** apresentam-se os valores de CO₂ com origem nas viaturas de recolha seletiva e indiferenciada, entre 2017 e 2019, em Portugal.

Tabela 1 - Emissões de Gases de Efeito de Estufa, por Tonelada de Resíduos Urbanos das Viaturas de Recolha de Resíduos (Kg CO₂/t).

	2017	2018	2019
Recolha indiferenciada	904	2 312	2 111
Recolha seletiva	4 747	4 637	4 580

Nota: Adaptado de APA (2023)

2.2.7 Instrumentos económicos

Segundo Taskin e Demir (2020), os desafios económicos da gestão dos resíduos, presentes nas tarifas suportadas pelos utentes do serviço de gestão de resíduos, assim como os impactos ambientais desta gestão são fatores que constituem uma preocupação crescente, não só dos gestores públicos como do menor cidadão comum, dado que o transporte de resíduos, é responsável por emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂).

Os instrumentos de suporte económico à gestão de resíduos urbanos apoiam-se nas tarifas municipais, sedimentadas nos regulamentos municipais.

O modelo tarifário atual dos resíduos urbanos para os utilizadores domésticos e não domésticos contempla uma tarifa fixa e uma variável, indexada ao consumo da água.

Adicionalmente, e em 2006, é acrescida uma taxa nacional, designada por Taxa de Gestão de Resíduos (Decreto-Lei n.º 178/2006) cuja regulamentação estabelece o quadro para a aplicação de taxas de gestão de resíduos em Portugal, visando incentivar práticas sustentáveis de gestão de resíduos e financiar investimentos em infraestrutura.

O Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, estabelece uma alteração do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de Setembro e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008, relativa aos resíduos.

A Assembleia da República resolve, nos termos do n.º 5 do artigo 166.º da Constituição, recomendar ao Governo que adote a recomendação das opções políticas apresentadas pelo estudo europeu “utilização de instrumentos económicos associados à performance da gestão de resíduos” que refere a necessidade de aplicar o uso de tarifário de gestão de resíduos através do sistema PAYT como estímulo para a redução da produção de resíduos, aumento da reciclagem e diminuição dos custos e encargos dos tarifários de resíduos para as famílias (II Série A - 074/2013 de 28 de Janeiro).

É assim entendido que é necessária a aplicação de um instrumento económico mais justo e equitativo.

2.3 Produção e composição de resíduos urbanos

A produção de resíduos urbanos refere-se à quantidade de resíduos gerada em áreas urbanas. Essa produção pode variar significativamente de acordo com fatores como densidade populacional, atividades económicas, hábitos de consumo e padrões de vida, e em geral, tende a aumentar com o crescimento populacional e o desenvolvimento económico (Levy & Cabeças, 2008).

A quantidade de resíduos produzidos está sempre relacionada com a atividade humana, e quanto maior for o crescimento populacional, maior será a taxa de geração de resíduos (Ghinea et al., 2016).

A produção de resíduos não é constante ao longo do tempo, sendo que se verificam variações diárias, semanais, mensais e até anuais, função de (Martinho & Gonçalves, 2000): nível de vida da população; clima e estação do ano; modo de vida e hábitos da população; localização geográfica da região; desenvolvimento tecnológico e nível de consumo; e Tipo de urbanização.

O sucesso de um plano de gestão de resíduos sólidos urbanos depende fundamentalmente do conhecimento das suas características: quantidade e composição (Peruchin et al., 2018).

O conhecimento da composição dos resíduos, permite uma gestão eficiente dos sistemas de recolha, armazenamento, tratamento, valorização e eliminação e permite ainda determinar o tipo, a dimensão e a localização das infraestruturas, os equipamentos necessários assim como os impactos ambientais e económicos da sua gestão (Martinho & Gonçalves, 2000).

A Composição dos resíduos é assim o termo utilizado para descrever os componentes individuais que constituem um fluxo de resíduos e a sua distribuição relativa nesse grupo, recorrendo geralmente a valores percentuais em peso.

Segundo Pichtel (2005), quando as propriedades físicas dos resíduos são conhecidas, o transporte e processamento são mais eficazes. Sendo que as propriedades físicas dos resíduos são influenciadas por fatores geográficos, estações do ano e até mesmo por fatores sazonais. Enquanto a finalidade da quantificação é estimar a quantidade total, em peso, dos resíduos, no fluxo dos mesmos, a caracterização consiste em analisar a composição do fluxo dos resíduos por tipo de material ou por tipo de produto (Yu & Maclaren, 1995).

2.4 Gestão de resíduos urbanos

Um Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU) é uma estrutura de meios humanos, logísticos, equipamentos e infraestruturas, estabelecida para levar a cabo as operações inerentes à gestão dos Resíduos Urbanos, que contemplam as seguintes fases: recolha e transporte, triagem e, valorização/ eliminação dos resíduos.

O Decreto-Lei n.º 73/2011 define os princípios gerais da gestão de resíduos, designadamente:

- Princípio da autossuficiência e da proximidade – as operações de gestão de resíduos devem decorrer preferencialmente em território nacional, reduzindo ao mínimo possível os movimentos transfronteiriços de resíduos;
- Princípio da responsabilidade pela gestão – a gestão do resíduo constitui parte integrante do seu ciclo de vida, sendo da responsabilidade do respetivo produtor, à exceção dos resíduos urbanos cuja produção diária não exceda 1100 l por produtor, caso em que a respetiva gestão é assegurada pelos Municípios; em caso de impossibilidade de determinação do produtor do resíduo, a responsabilidade pela respetiva gestão recai sobre o seu detentor;
- Princípio da proteção da saúde humana e do ambiente - evitar e reduzir os riscos para a saúde humana e para o ambiente, garantindo que a produção, a recolha e transporte, o armazenamento preliminar e o tratamento de resíduos sejam realizados recorrendo a processos ou métodos que não sejam suscetíveis de gerar efeitos adversos sobre o ambiente, nomeadamente poluição da água, do ar, do solo, afetação da fauna ou da flora, ruído ou odores ou danos em quaisquer locais de interesse e na paisagem;
- Princípio da hierarquia das operações de gestão de resíduos – a gestão de resíduos deve assegurar que à utilização de um bem sucede uma nova utilização ou que, não sendo viável a sua reutilização, se procede à sua reciclagem ou ainda a outras formas de valorização; a eliminação definitiva de resíduos, nomeadamente a sua deposição em aterro, constitui a última

opção de gestão, justificando-se apenas quando seja técnica ou financeiramente inviável a prevenção, a reutilização, a reciclagem ou outras formas de valorização;

- Princípio da responsabilidade do cidadão – os cidadãos contribuem para a prossecução dos princípios e objetivos referidos nos artigos anteriores, adotando comportamentos de carácter preventivo em matéria de produção de resíduos, bem como práticas que facilitem a respetiva reutilização e valorização;
- Princípio da regulação da gestão de resíduos – a gestão de resíduos é realizada de acordo com os princípios gerais fixados nos termos do decreto-lei nº 73/2011 e demais legislação aplicável e em respeito dos critérios qualitativos e quantitativos fixados nos instrumentos regulamentares e de planeamento;
- Princípio da equivalência – o regime económico e financeiro das atividades de gestão de resíduos visa a compensação tendencial dos custos sociais e ambientais que o produtor gera à comunidade ou dos benefícios que a comunidade lhe faculta, de acordo com um princípio geral de equivalência.

A qualidade na gestão de resíduos é essencial para garantir a proteção do meio ambiente e da saúde pública, além de ser uma obrigação legal.

2.5 Deposição, recolha e transporte de resíduos

O sistema de recolha de RSU decompõe-se em três operações. A deposição, que consiste no conjunto de operações que envolvem a armazenagem domiciliária de RSU e a sua colocação em recipientes para serem removidos; a operação de remoção, efetuada por pessoal e equipamento adequado para esse fim, mediante a transferência dos RSU para as viaturas de recolha; e o transporte, que corresponde à distância que a viatura de recolha efetua entre o último ponto de recolha dos resíduos e o local do seu destino (Martinho & Gonçalves, 2000).

2.5.1 Deposição

Os municípios têm a responsabilidade de definir o tipo de equipamento de deposição de resíduos urbanos a utilizar, sendo que tanto o tipo, como a localização dos equipamentos são fatores que irão influenciar o sucesso de uma gestão de resíduos urbanos.

Assim, e para o estudo em causa, haverá que considerar os seguintes fatores:

- Localização e número de equipamentos necessários;
- Frequência de recolha;
- Tipo de veículo de recolha;

- Densidade populacional;
- Custos e implementação e exploração;
- Recursos humanos disponíveis.

Um sistema de deposição, é constituído por um conjunto de infraestruturas e equipamentos destinados exclusivamente ao acondicionamento dos resíduos sólidos urbanos, e que constituem os meios de apoio à posterior recolha, sendo que no caso em estudo, referem-se os contentores de superfície e os contentores enterrados e semienterrados.

A deposição dos resíduos envolve a criação de mecanismos e a provisão de equipamentos de deposição por parte das entidades responsáveis pela gestão dos RSU, sendo necessário conhecer a zona de recolha, e a forma como vai ser efetuado o transporte, pois este envolve equipas e veículos adaptados para o efeito, bem como o desenho dos circuitos de recolha e a criação de instalações de apoio a todo o sistema de recolha (Graça, 2015).

A otimização de uma gestão de resíduos pode ser avaliada pelos contentores utilizados (tipo e tamanho) e pela frequência da recolha.

2.5.2 Recolha

O conhecimento do tipo de produtores de resíduos, das quantidades produzidas identificadas pelo volume e o peso, assim como da composição dos resíduos permite determinar as características mais adequadas para a recolha dos resíduos.

A recolha de RSU pode ser classificada de acordo com diferentes critérios, nomeadamente o tipo de resíduos recolhidos, o local de recolha e a frequência e horário da recolha.

Por recolha indiferenciada, considera-se o sistema em que os resíduos são recolhidos sem qualquer critério de seleção prévia e encaminhados para um centro de triagem, se esta infraestrutura existir, ou encaminhados diretamente para um aterro ou incineração.

Por recolha seletiva, considera-se a separação na fonte de produção de uma ou mais categorias de resíduos, que poderão ou não ser alvos de uma nova separação em estações de triagem (Levy et al., 2002).

A componente recolha e transporte de RSU assume uma especial importância devido, essencialmente, aos seguintes fatores (Martinho & Gonçalves, 1999):

- É a componente mais dispendiosa do sistema de gestão de RSU, podendo representar entre 40 a 70% dos custos totais do sistema de gestão de RSU;

- É a imagem do serviço de gestão de resíduos, pois é a componente de interface entre o sistema e os utentes.

Quanto ao local de recolha, distinguem-se entre recolha porta-a-porta, ou individual, e recolha em determinados pontos da via pública, ou coletiva (Levy e Cabeças 2006).

- Recolha porta a porta

O princípio deste modelo de recolha consiste na deslocação dos serviços de recolha à habitação do produtor de resíduos, para proceder à recolha dos mesmos, podendo, esta recolha, ser feita em contentor (de diferentes volumetrias), a granel (no caso de verdes, resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos (REEE), Monstros, etc) ou em saco.

- Recolha coletiva de proximidade

Neste modelo, o produtor de resíduos desloca-se a um local onde se encontra um equipamento de deposição para aí colocar os seus resíduos.

Este sistema utiliza contentores de média e grande capacidade e tem menores custos de remoção que o sistema de recolha porta-a-porta, pois o número de pontos de recolha é menor, para uma mesma população, o que representa menos paragens e menos tempo no circuito (Levy & Cabeças 2006).

Para a recolha coletiva por proximidade, são habitualmente utilizados contentores de média capacidade, com volumes até aos 1.100 litros, e contentores de profundidade e molok, com capacidade para 1.1, 3 ou 5 m³.

Das principais vantagens dos contentores de profundidade, destacam-se as seguintes: ocupam menos espaço na via pública, não sofrem choques porque estão fixos no solo, são feitos com material mais resistente e podem representar custos de investimento e exploração mais baixos (Martinho & Gonçalves, 2000).

A grande desvantagem de muitos destes contentores é a recolha dos mesmos carecer de um veículo específico dotado de grua, nem sempre adaptado à recolha de outros tipos de contentores (Levy & Cabeças 2006).

No entanto, como a sua capacidade de recolha é grande, induzem a menores custos em combustível, manutenção e recursos humanos.

2.5.3 Frequência e horário de recolha

A frequência e horário de recolha são muito variáveis, e dependentes das condições locais e das características do serviço.

Em relação à frequência, a recolha pode classificar-se em diária, semanal, bissemanal ou tri-semanal.

Relativamente ao horário, este pode ser diurno ou noturno.

Os fatores que influenciam a frequência de recolha são:

- Volume a recolher;
- Composição dos RU;
- Efeito na taxa de produção;
- Proliferação de vetores de doença e riscos para a saúde pública;
- Características do aglomerado;
- Características do tráfego;
- Condições climáticas;
- Hábitos da população;
- Produtividade e rendimento do serviço;
- Custos.

São vários os fatores a considerar quanto à escolha de uma destas alternativas, nomeadamente o volume a recolher, as características do aglomerado urbano, as características do tráfego, os custos, entre outros (Martinho & Gonçalves, 2000).

Nos centros urbanos mais densos e com mais tráfego diurno, a recolha é habitualmente noturna.

Um sistema de recolha mal concebido tem um forte impacto nos custos operacionais, na saúde pública e no meio ambiente.

Os sistemas de recolha devem prever circuitos que minimizem as distâncias e os tempos de percurso, uma vez que, para além da redução de custos, circuitos otimizados significam também redução de impactos ambientais. Por exemplo, poder-se-á referir que as inúmeras paragens dos veículos de recolha, durante os circuitos, têm mais consequências no congestionamento do tráfego, na poluição do ar e no ruído do que outros tipos de transportes de carga.

A maior parcela dos custos de gestão dos resíduos corresponde às operações de recolha, pelo que pequenas melhorias na recolha podem traduzir-se em poupanças significativas, em todo o sistema (Graça, 2015).

2.5.4 Circuitos de recolha

Segundo Levy e Cabeças (2006), a área da recolha de resíduos urbanos é estruturada em diferentes zonas, para as quais são estabelecidos os circuitos de recolha.

Cada circuito corresponde a um percurso que a viatura tem que realizar, num determinado dia de recolha, segundo um planeamento pré-definido por fatores como o tipo de resíduos a recolher, as características urbanísticas e topográficas do terreno a percorrer, as características e capacidade das viaturas e a dimensão e horário da equipa de recolha, tendo em vista a definição de circuitos equilibrados (Moreira, 2008).

A este processo, de determinação de circuitos de recolha bem equilibrados, Tchobanoglous et al. (1993) denomina de análise micro-circuito.

De acordo com os mesmos autores, num circuito de recolha de resíduos com contentores fixos, a duração do mesmo consiste no somatório dos seus tempos parciais função dos fatores: tempo ou distância de e para o estaleiro (tempo ou distância que a viatura percorre até ao primeiro ponto de recolha, acrescido do equivalente a partir do último local de deposição quando finaliza a recolha); Tempo ou distância efetiva de recolha (tempo ou distância que o veículo demora a encher a caixa, desde o primeiro até ao último ponto de recolha do circuito); Tempo ou distância de transporte (tempo ou distância percorrida pela viatura desde o último ponto de recolha, quando o veículo atinge a sua capacidade máxima, até ao local de despejo da carga); Tempo e distância ao local de deposição (tempo ou distância necessária ao esvaziamento da carga do veículo no destino final dos resíduos); Tempo e distância fora do circuito ou não produtivo (tempo ou distância não produtivo como paragens provocadas por trânsito).

Para além de circuitos equilibrados, o sistema de recolha de resíduos deve incluir circuitos que minimizem as distâncias e os tempos de percurso das viaturas, ou seja, que sejam otimizados no sentido de uma redução de custo e impacto ambiental, de que resultam menores consumos de combustível e decréscimo das emissões de CO₂ (Martinho & Gonçalves, 2000).

Além destas variáveis, deve também ter-se em conta, o número de trabalhadores, os diferentes tipos de veículos de recolha, as diferentes condições das vias de acesso, as variações nas quantidades de resíduos produzidos em diferentes épocas do mês e do ano, que também contribuem para a complexidade de uma otimização de circuitos de recolha (Keller, 1973).

Para o desenho dos circuitos de recolha é necessário ter em conta vários aspetos, nomeadamente a tipologia de recolha, os veículos, as equipas, os horários, as condições geográficas, de tráfego e a população residente. Estes fatores condicionam a frequência de

recolha da área em causa, podendo esta ser caracterizada como diária, bi-semanal ou tri-semanal.

2.5.5 Transporte de resíduos

A operação de transporte consiste na alteração de localização dos resíduos, e consiste essencialmente na transferência dos resíduos do ponto de deposição para uma estação de transferência ou, para uma estação de tratamento ou eliminação.

Nas situações em que são utilizadas estações de transferência, função da distância entre o ponto de recolha e a central de tratamento ou eliminação, os resíduos são armazenados no estado físico da recolha ou comprimidos função de um processo de enfardamento, para a redução do seu volume, o que facilita o seu transporte posterior para as centrais de tratamento e valorização ou locais de eliminação (Levy et al., 2002).

Os veículos de recolha de RSU podem classificar-se segundo critérios distintos, ou pelo método de descarga, pelo tipo de sistema de elevação dos contentores ou sistema de transferência dos resíduos para o interior da caixa (Pereira, 2005).

2.6 Tratamento de RSU

Segundo o Decreto-lei n.º 183/2009 de 10 de agosto, o tratamento é qualquer operação de valorização ou de eliminação de resíduos, incluindo a preparação prévia à valorização ou eliminação.

Segundo o mesmo Decreto-lei, a deposição de resíduos em aterro deve ser reduzida ao mínimo indispensável e é considerada como última opção de tratamento de resíduos.

A União Europeia, segundo o princípio da hierarquia de gestão dos resíduos, definiu como prioridade a prevenção da produção de resíduos. Não sendo possível, a produção de resíduos deverá ser objeto de tratamento e valorização, privilegiando-se a reutilização, a reciclagem ou outro tipo de valorização.

De acordo com relatório do Banco Mundial, 3,4 bilhões de toneladas de RSU serão gerados em todo o mundo até 2050, em comparação com os 2 bilhões produzidos em 2018 (aumento de 70%), dos quais apenas 13,5% são reciclados e 5,5% compostados (Kaza et al., 2018).

2.7 Os resíduos urbanos em Portugal Continental

Em 2021, foram produzidas em Portugal 5,311 milhões de toneladas (t) RU, verificando-se um crescimento de 1%, em comparação com o ano anterior.

Conforme apresentado na **Figura 3**, verifica-se que, os últimos 3 anos, foram pautados por uma produção de resíduos urbanos com um crescimento pouco significativo, mantendo-se uma produção diária de cerca de 1,4 Kg/dia por habitante.

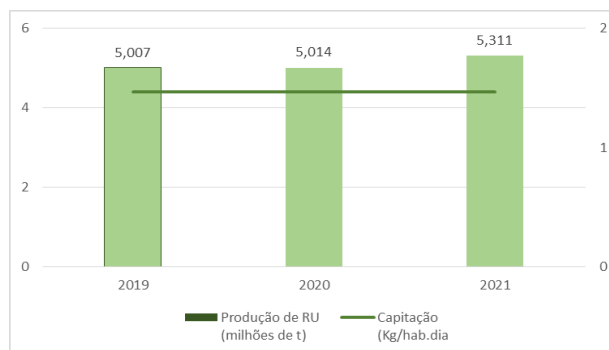


Figura 3 - Evolução da Produção de RU (t) e Capitação Diária (kg/hab.dia) em Portugal Continental, entre 2019 e 2021 (adaptado de RARU APA, 2022).

Os resultados da caracterização física média dos RU produzidos no Continente, em 2021, ilustrada na **Figura 4**, revelam que as frações dominantes na composição dos RU produzidos consistem nos biorresíduos, cerca de 37%, seguindo-se o plástico (10,6%), papel/cartão (9%), têxteis sanitários (8%) e vidro (7%).

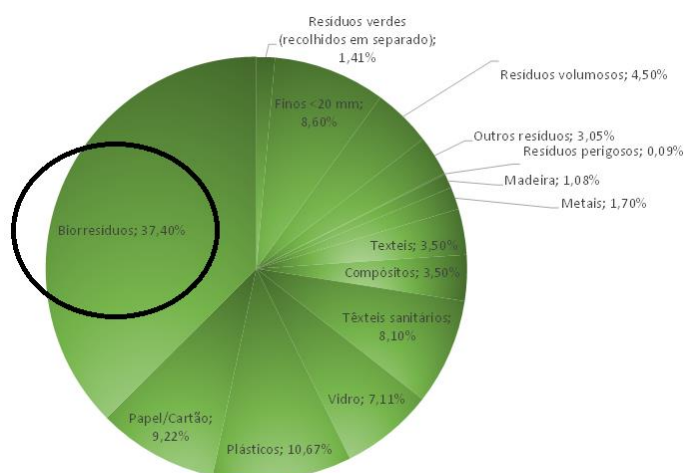


Figura 4 - Caracterização física dos RU produzidos em Portugal Continental, no ano de 2021 (%) (adaptado de RARU APA, 2022).

Ao nível da recolha, entre 2019 e 2021, não se verificaram diferenças significativas, sendo a recolha indiferenciada o tipo de recolha preferencial para a recolha de resíduos urbanos, conforme esquematizado na **Tabela 2** e **Figura 5**.

Tabela 2 - Recolha de RU (10 t3) em Portugal Continental, entre 2019 e 2021.

Tipo de recolha	2019	2020	2021
Recolha Indiferenciada	3955	3950	3916
Recolha Seletiva	949	989	1058
Outros Produtores RU	102	75	69
Total	5007	5014	5043

Nota: Adaptado de RARU (APA, 2022).

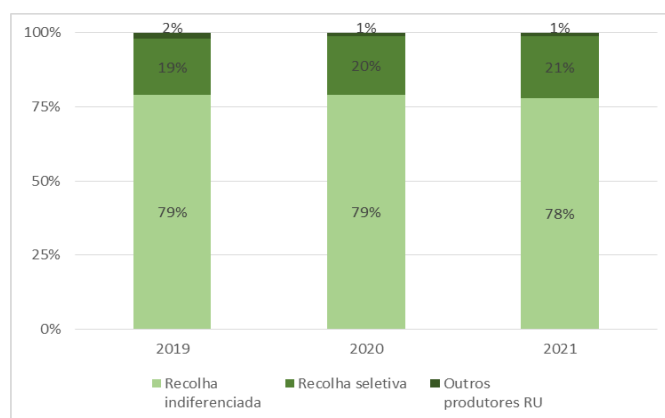


Figura 5 - Evolução da Recolha RU (%) entre 2019 e 2021 (adaptado de RARU APA, 2022).

2.7.1 Destinos

Em 2021, os resíduos urbanos produzidos tiveram vários destinos finais conforme apresentado na **Figura 6**, sendo que o encaminhamento para deposição em aterro é predominante, com um valor percentual significativo de 56% em 2021.

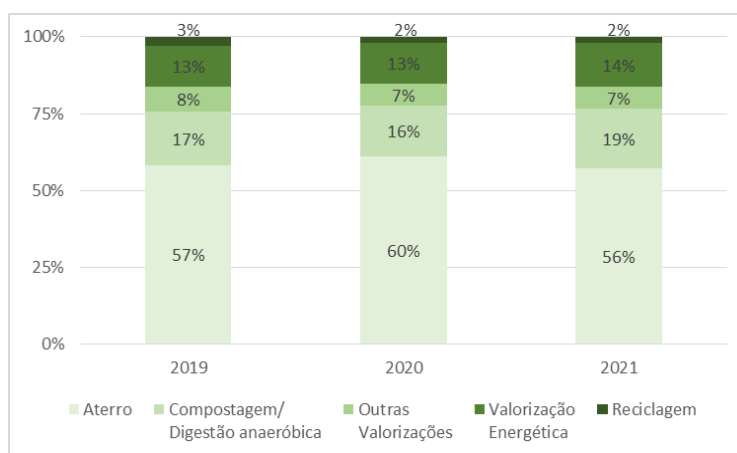


Figura 6 - Destino dos RU em 2021 (%) (adaptado de RARU APA, 2022).

2.7.2 Indicadores de qualidade do serviço de gestão de resíduos urbanos

Em Portugal, a entidade responsável pela regulação do setor dos resíduos é a Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos (ERSAR).

O modelo de regulação desenvolvido pela ERSAR divide-se pela regulação estrutural do setor, pela regulação comportamental das entidades gestoras do serviço de resíduos e por atividades complementares.

A regulação comportamental das entidades gestoras contempla a regulação da qualidade de serviço prestado, avaliando o serviço aos utilizadores e comparando as entidades gestoras entre si (*benchmarking*), desde que sejam similares e que atuem em zonas geográficas distintas, através da aplicação de um sistema de indicadores (regulação *sunshine*), para promover a eficiência (ERSAR, 2022).

O sistema de avaliação da qualidade de serviço prestado aos utilizadores conta com dezasseis ID para a gestão dos resíduos sólidos urbanos, divididos em três subsistemas distintos (ERSAR, 2024):

- *Adequação da interface com o utilizador* - Indicadores que traduzem a defesa dos interesses dos utilizadores, correspondentes a aspetos que estão diretamente relacionados com a qualidade de serviço que lhes é prestado e por eles sentidos diretamente;
- *Sustentabilidade da gestão do serviço* - Indicadores que traduzem a sustentabilidade da entidade gestora, correspondentes a aspetos relacionados com a sua capacidade económica e financeira, infraestrutural, operacional e de recursos humanos;
- *Sustentabilidade ambiental* - Indicadores que traduzem a sustentabilidade ambiental, correspondentes a aspetos relacionados com o impacto ambiental da atividade gestora, nomeadamente em termos de conservação dos recursos naturais.

É neste subsistema que se enquadra o indicador RU16 referente à Emissão de gases com efeito de estufa (Kg CO₂/t).

A ERSAR efetua a avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores através da comparação do valor obtido com o correspondente valor de referência. Os valores de referência servem não só para medir o grau de desempenho, como também para estabelecer metas para o futuro, aspetos fundamentais da qualidade (Silva et al. 2015).

3 – Modelos analíticos com aplicação de *Machine Learning*

3.1 Enquadramento do tema

Uma consciência crescente das influências imediatas e de longo prazo dos efeitos adversos de uma má gestão de resíduos sólidos, provocou uma atenção crescente dos decisores e legisladores para os aspetos específicos da sustentabilidade (Heidari, et al., 2019).

Para que um sistema de gestão de resíduos seja sustentável, ele precisa ser ambientalmente eficaz, economicamente acessível e socialmente aceitável (Seadon, 2010).

De acordo com os objetivos e metas de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, os impactos ambientais mundiais adversos, gerados pelas cidades, devem ser reduzidos até 2030, incluindo-se nestas metas sistemas sustentáveis de recolha e transporte de resíduos urbanos (Nações Unidas, 2015).

É, portanto, necessário um sistema de gestão bem planeado em prol da viabilidade económica, da melhoria da qualidade ambiental e da aceitabilidade social para alcançar objetivos sustentáveis.

Pode afirmar-se que a recolha e o transporte dos resíduos sólidos urbanos são os principais fatores influenciadores do custo do serviço, das emissões atmosféricas, da indignação social e do consumo de combustível em todo o sistema de gestão.

Nesta perspetiva, a implementação dos planos de ação para sistemas sustentáveis de GRSU tornaram-se temas críticos para os gestores urbanos, municípios e decisores.

Considerando o tema em discussão, têm sido abordadas e analisadas diferentes técnicas em meio urbano, em vários países, na tentativa de conseguir uma aproximação teórico-prática a uma recolha e transporte de resíduos economicamente viável, ambientalmente sustentável, socialmente conveniente e tecnologicamente atualizada.

Os métodos estatísticos convencionais e descritivos de previsão da produção de RSU apoiam-se no crescimento populacional e na produção média de resíduos *per capita* como principais variáveis (Abdoli et al., 2012). No entanto, este método deixou de ser eficaz devido às características dinâmicas do processo de produção de RSU (Abbasi et al., 2013).

Sistemas avançados de previsão com suporte de inteligência artificial (IA) têm demonstrado superioridade aos modelos convencionais em problemas de engenharia, bem como no âmbito da problemática da produção de resíduos (Abdoli et al., 2012).

Abordagens baseadas em inteligência artificial têm demonstrado um bom desempenho para estabelecer modelos de previsão de resíduos sólidos urbanos. O uso de algoritmos de *Machine Learning* ou aprendizagem máquina pode prever com segurança a produção mensal de RSU por meio da sua aplicação a períodos de produção de resíduos (Abbasi et al, 2016).

Nos últimos anos, modelos de inteligência artificial e aprendizagem máquina, têm ganho popularidade devido à sua alta flexibilidade e características de previsão, comprovadas (Antanasijević et al., 2013).

Pesquisas recentes neste tópico concentram-se no uso de modelos de inteligência artificial para o tratamento de dados históricos não lineares (Abbasi et al., 2016).

Neste contexto, o projeto pretende abordar modelos de análise de dados para reduzir custos, minimizar o impacto ambiental e, melhorar a eficiência e a eficácia do processo de recolha de resíduos, tornando-o mais ágil e sustentável, com a utilização de uma ferramenta de *Machine Learning*, a plataforma KNIME.

3.2 Aplicabilidade

Segundo Siddiqui (2024), a análise de dados e a IA podem desempenhar um papel significativo na melhoria dos processos de gestão de resíduos e na abordagem dos seus principais desafios, nomeadamente, manutenção preventiva, circuitos otimizados de recolha de resíduos, sistemas inteligentes de gestão de resíduos e suporte à tomada de decisão. Além destas vertentes, os algoritmos de IA podem influir na monitorização ambiental e na prevenção da poluição, assim como no envolvimento do público e educação ambiental.

A **Figura 7** apresenta as várias vertentes da aplicação da análise de dados nos processos de gestão de resíduos.

As várias vertentes identificadas nesta Figura são descritas:

1 - Otimização dos circuitos de recolha

A análise de dados históricos de recolhas e dados em tempo real de sensores de níveis de enchimento de contentores assim como outros dados relevantes, pode apoiar a otimização dos circuitos de recolha de resíduos.

Esta vertente permite uma gestão de recolha de resíduos, mais eficiente e económica, assim como redução do consumo de combustíveis, emissão de CO₂ e custos de operação



Figura 7 - Aplicações da análise de dados à gestão de resíduos (adaptado PRO2030 FEFAL, 2023).

2 - Contentores inteligentes

A análise em tempo real de grandes quantidades de dados associados a sensores acoplados aos contentores de resíduos, permite otimizar os horários de recolha de resíduos, dado que permite assegurar que os equipamentos de deposição somente são recolhidos no seu nível de enchimento máximo. Permite, assim, evitar recolhas desnecessárias, colocação de resíduos na imediação dos contentores por estes estarem cheiros e permite otimizar os recursos associados à operação de deposição e recolha.

3 - Reciclagem de materiais

A aplicação de *Machine Learning*, pode apoiar a separação e otimização dos processos de triagem de resíduos seletivos. Sistemas suportados por esta tecnologia podem identificar e classificar tipos distintos de resíduos, nas fileiras mais significativas do papel, plástico, vidro e metal, melhorando a eficácia da triagem e a eficiência da reciclagem.

4 - Manutenção preventiva

A análise de dados provenientes de sensores acoplados a equipamentos, permite uma prévia deteção de potenciais problemas nas estruturas e infraestruturas de gestão de resíduos. Esta abordagem proactiva permitirá manutenções de curta duração, tempos reduzidos de inoperacionalidade e uma performance melhorada do sistema de gestão de resíduos.

5 - Análise de dados e apoio à decisão

Na análise de grandes quantidades de informação, os algoritmos de ML podem identificar estrangulamentos, otimizar a alocação de recursos, melhorar a estratégia de gestão e dar suporte aos processos de decisão, tornando-se mais eficiente, de menor custo e sustentável.

6 - Monitorização ambiental e prevenção da poluição

A análise de dados por ML pode apoiar a problemática ambiental, ao identificar contextos de poluição e assim assegurar a conformidade com a legislação em vigor.

7 - Sistemas inteligentes de gestão de resíduos

A análise por ML integra dados provenientes de diversos componentes do sistema de gestão de resíduos, tais como sensores, veículos, contentores, e outros. Desta integração e da análise da respetiva informação, é possível otimizar a generalidade das operações de gestão de resíduos, melhorar a alocação de recursos e melhorar a eficiência de todo o sistema.

8 - Educação e envolvimento da população

Numa vertente mais abrangente, *chabots* de IA e assistentes virtuais podem melhorar a disponibilização de informação, responder a questões e apoiar nas campanhas de sensibilização ambiental à população.

3.3 Metodologia técnica

Neste caso de estudo, pretende-se aplicar as técnicas de ML aos dados, utilizando a plataforma KNIME, e na vertente de análise dos dados e apoio à decisão, com o objetivo de melhorar os processos da gestão de resíduos, otimizar a prestação do serviço aos utentes e diminuir o impacto ambiental.

Para atingir os objetivos propostos, executar-se-ão de forma sequencial, várias etapas, nomeadamente, seleção dos dados, leitura, processamento e transformação, aplicação dos fluxos de ML e avaliação dos resultados.

Na etapa de seleção, os dados serão obtidos a partir das bases de dados da georreferenciação do sistema de gestão de resíduos e da base de dados de sensores de elevação dos contentores.

O processamento e transformação agregará várias tabelas interligadas por chaves primárias e chaves estrangeiras, e transformará os dados para a aplicação dos fluxos.

Na etapa seguinte, os dados serão sujeitos aos fluxos de ML e por fim, os resultados serão analisados.

3.4 KNIME

O Konstanz Information Miner (KNIME) é um ambiente modular que permite uma montagem visual e uma execução interativa de uma sequência de dados. Foi concebido como uma plataforma de ensino, pesquisa e colaboração, que permite a integração simples de novos algoritmos e ferramentas, bem como manipulação de dados ou métodos de visualização na forma de novos módulos ou nós (Berthold et al., 2009).

KNIME distingue-se de outros sistemas por não ser uma solução de uma área em específico, mas uma ferramenta de integração com boas características de pré-processamento e análise de dados.

O KNIME já é amplamente usado em várias áreas de pesquisa, por exemplo, em informática química ou análise clássica de dados (Dietz & Berthold, 2016).

Esta plataforma simplifica a análise de dados através de um interface gráfico intuitivo.

No ambiente do KNIME, os dados são manipulados de forma simples e eficiente, bastando arrastar e soltar os elementos necessários na área de trabalho, conforme representado na

Figura 8.

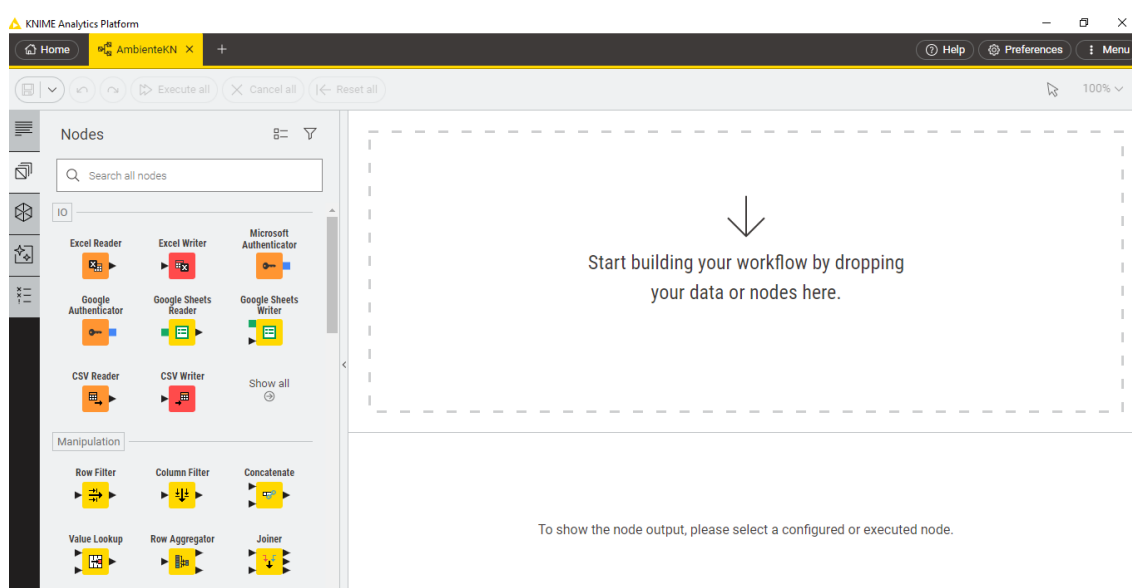


Figura 8 - Plataforma KNIME

Os utilizadores têm a capacidade de criar um fluxo de trabalho composto por nodos, constituindo assim um “pipeline” de análise. Cada nodo desempenha uma função específica, representando uma etapa na análise de dados. A interconexão entre estes nodos é estabelecida para permitir a

passagem e o processamento contínuo dos dados ao longo do pipeline, conforme representado na **Figura 9**.

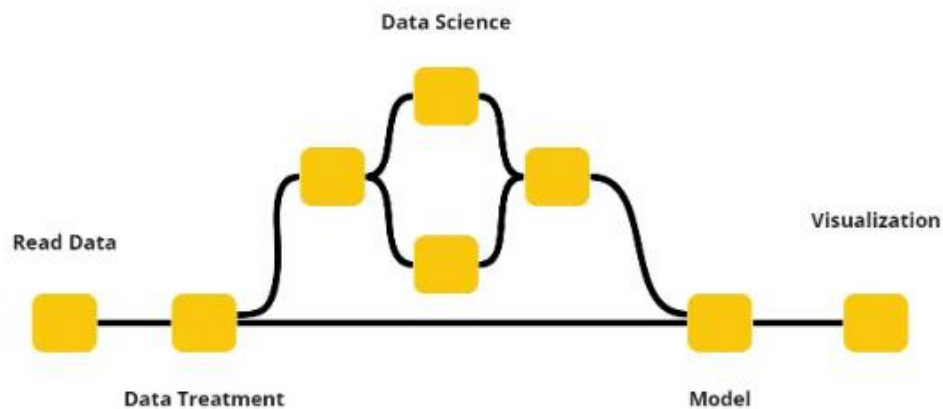


Figura 9 - Fluxo de trabalho composto por nodos. De UPDATA “KNIME: Guia de boas práticas para construção de *workflows*”.

As etapas de um *pipeline* correspondem a leitura ou importação dos dados, pré-processamento dos dados, análise e transformação, visualização dos dados e exportação para tabela ou ficheiro. A **Figura 10** apresenta nodos da plataforma KNIME, sendo que alguns foram aplicados nas análises efetuadas.

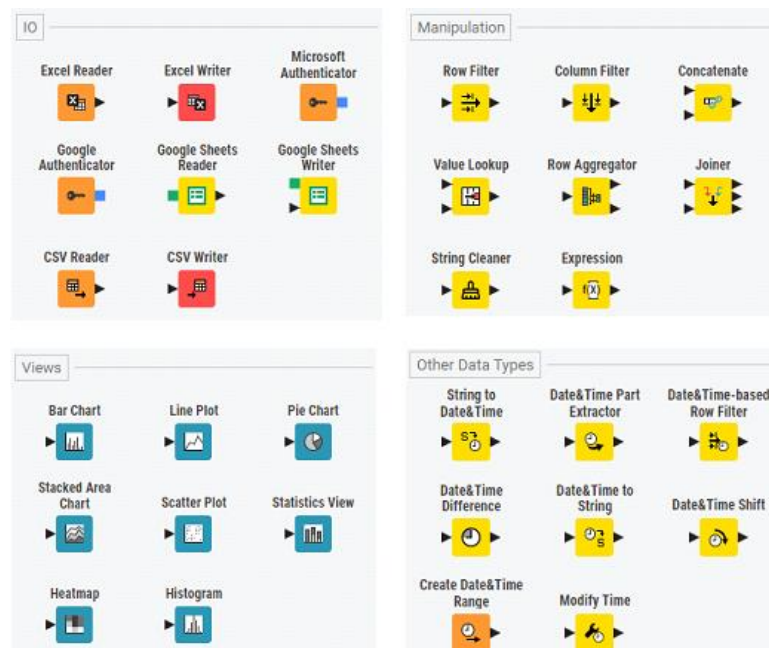


Figura 10 - Nodos KNIME

A **Figura 11** apresenta um exemplo simples de um fluxo KNIME.

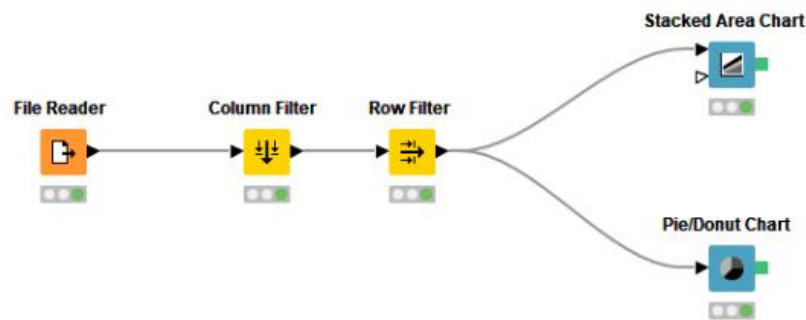


Figura 11 - Exemplo de Fluxo KNIME

No âmbito do caso de estudo, descrevem-se de seguida, as várias etapas e os nodos aplicados nas análises dos dados efetuadas.

Para a primeira etapa, e com o intuito de carregar os dados na plataforma KNIME, para posterior tratamento e utilização nos modelos a serem definidos, recorreu-se ao uso de um nodo de leitura. Considerando que os *dataset* foram exportados para o formato Excel, o nodo escolhido foi o “Excel Reader”.

A etapa seguinte incide sobre o pré-processamento de dados, com o objetivo de os modificar ou adaptar para posterior utilização, sendo que se recorreu ao uso de nodos de alterações, como por exemplo, o “Rule Engine” e o “Column Filter”, conforme extratos de fluxos desenhados no âmbito deste trabalho e representados nos separadores A, B e C da **Figura 12**.

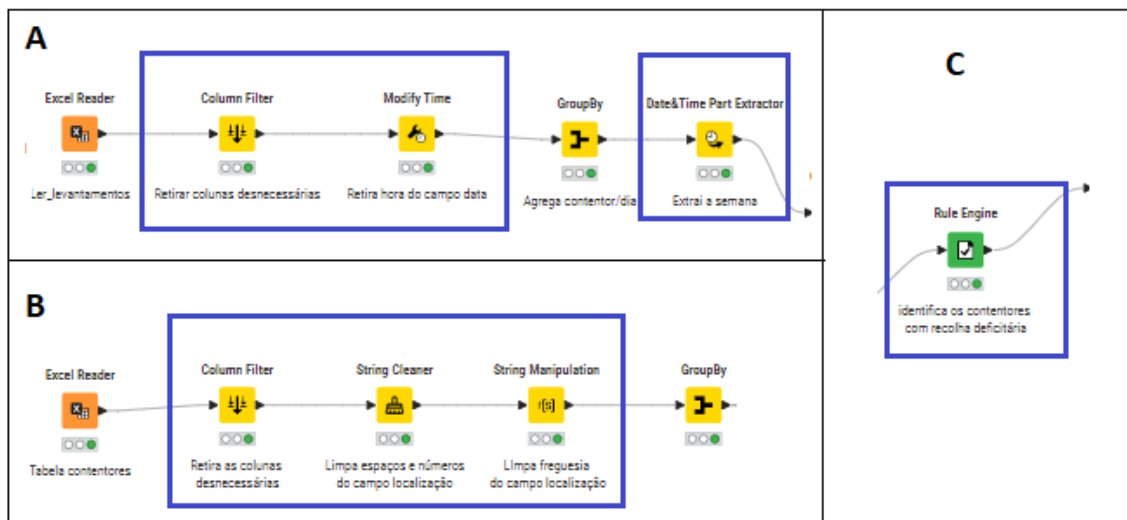


Figura 12 – Nodos de pré-processamento

Com o objetivo de processar os dados previamente tratados, foram utilizados diversos nodos de processamento. Esta etapa de análise e transformação pode direcionar-se para a clusterização,

ou classificação e regressão, sendo que no trabalho efetuado utilizaram-se, entre outros, os nodos “GroupBy” e “Joiner”, conforme representado na **Figura 13**.

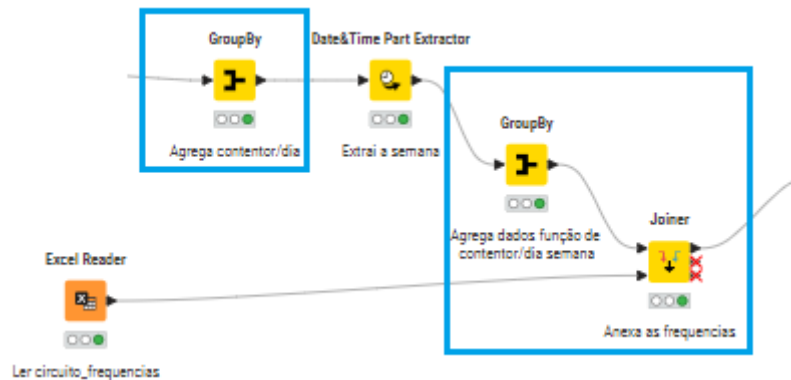


Figura 13 – Nodos de processamento

A etapa da visualização dos dados resultantes da aplicação dos nodos das etapas anteriores, e que pode ser considerada como uma das etapas conclusivas, integra gráficos e tabelas para interpretar o resultado final do *pipeline*. No caso em estudo utilizou-se, por exemplo, o nodo “Bar Chart” e “Stacked Area Chart”, conforme se apresenta nos separadores A e B da **Figura 14**.

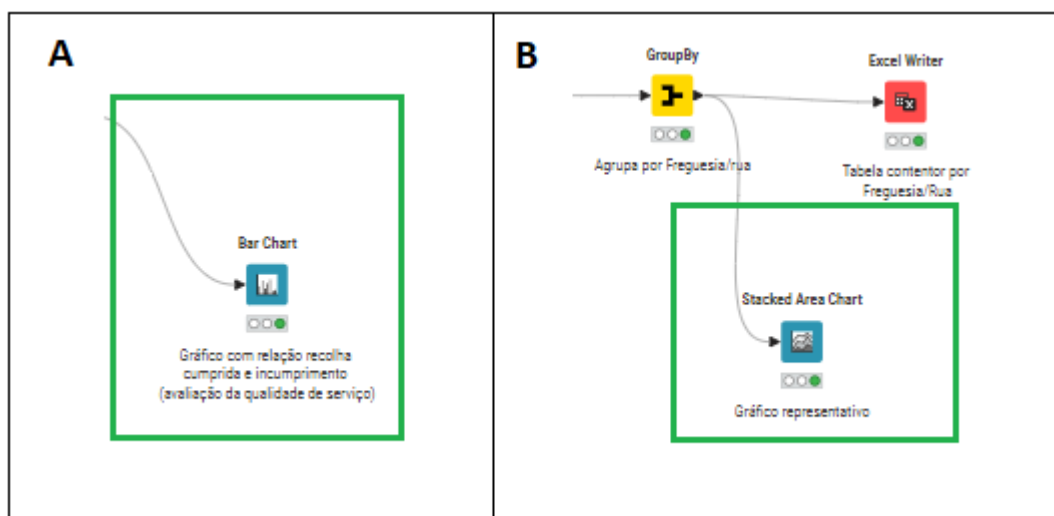


Figura 14 – Nodos de visualização

A restante etapa final é a que permite guardar numa tabela de base de dados, ficheiro ou documento, os dados resultantes da execução do *pipeline* KNIME. Nesta etapa utilizou-se essencialmente o nodo “Excel Writer”.

4 – Estudo de caso

4.1 Descrição

O concelho de Felgueiras, onde é realizado o caso de estudo, detém uma área de 116 km², e constitui um dos 6 municípios que integram a região do Vale do Sousa.

De acordo com a Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP 2022) o concelho está subdividido em 12 freguesias e 8 Uniões de Freguesias e, tendo por base os dados do INE referente aos censos de 2021, a população residente no concelho totalizava 55 654 habitantes.

O concelho do caso de estudo configura uma área mediantemente urbana.

4.2 Evolução dos quantitativos de RSU indiferenciados e recolhidos seletivamente

Em termos de caracterização de produção de resíduos, em 2022, foram recolhidas 25 711 toneladas de resíduos urbanos, segundo a distribuição constante na **Tabela 3**.

Tabela 3 - Quantitativos de Resíduos Recolhidos e Tratados na Origem em 2022.

Designação	t/ano	kg/hab.ano
Recolha indiferenciada	23 219,60	417,20
Recolha seletiva multimaterial	2 308,60	41,50
Tratamento na origem	183,30	3,30
Produção total RU	25 711,50	462,00

Nota: Adaptado do Relatório Anual da Reciclagem 2022 (Ambisousa,2023)

A componente da recolha indiferenciada tem ainda o peso mais significativo (90%) nas quantidades totais produzidas, 23 220 toneladas, conforme traduzido na **Figura 15**.

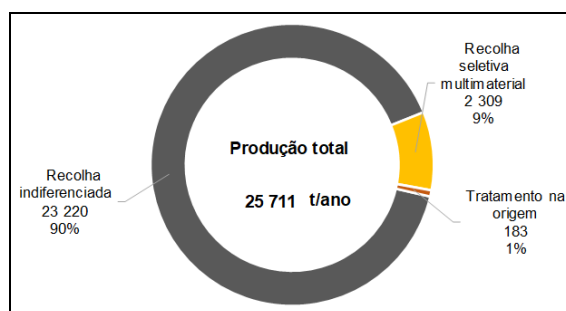


Figura 15 - Origem dos RU produzidos em 2022.

No contexto da recolha seletiva multimaterial, o peso da recolha dos resíduos correspondentes à fração 3F (papel/cartão, vidro e, embalagens plásticas, metálicas e ECAL) é substancial, comparativamente às restantes frações, conforme é possível verificar na **Tabela 4**, e cujo peso destes resíduos no total de resíduos seletivos recolhidos, pode ser verificado na **Figura 16**.

Tabela 4 - Composição da recolha seletiva multimaterial.

Designação	t/ano	kg/hab.ano
Vidro	915,90	16,50
Papel/cartão (embalagem/não embalagem)	722,30	13,00
Embalagens plásticas, metálicas e ECAL	499,10	9,00
Biorresíduos	9,20	0,00
Têxteis	0,00	0,00
Volumosos	20,10	0,40
OAU	3,30	0,10
REEE	20,50	0,40
RPA	0,50	0,00
Frações não embalagem - plástico, metal	9,60	0,20
Madeira	108,30	1,90

Nota: Adaptado do Relatório Anual da Reciclagem 2022 (Ambisousa,2023).

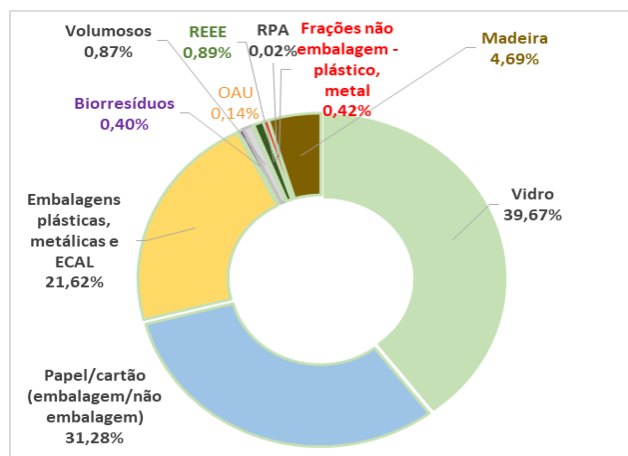


Figura 16 - Distribuição dos Resíduos Seletivos Recolhidos em 2022

Os resíduos recolhidos pelo Município são encaminhados para as instalações da entidade de gestão em alta para tratamento final (triagem ou deposição).

Apesar do esforço já realizado no terreno para captura e encaminhamento de materiais para valorização, existe ainda um potencial considerável de resíduos valorizáveis na fração indiferenciada, conforme é possível verificar no gráfico da **Figura 17**, relativo à composição física em 2022, sendo particularmente relevante o peso dos biorresíduos, alimentares e verdes, (cerca de 35%) e do plástico, papel-cartão e vidro (cerca de 31% no seu conjunto).

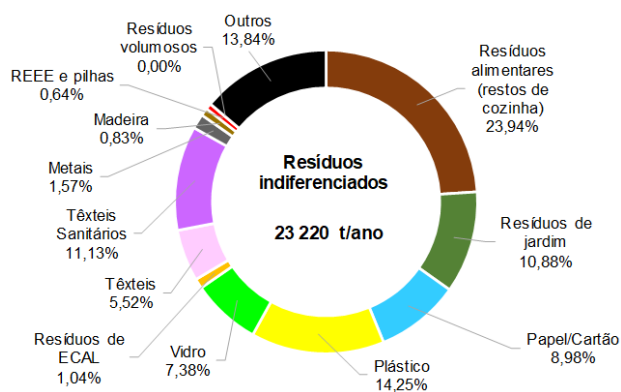


Figura 17 - Composição Física dos Resíduos Indiferenciados em 2022

4.3 Caracterização e estrutura dos dados

A caracterização da gestão de resíduos urbanos do caso de estudo é apresentada nas vertentes dos equipamentos de deposição, meios de recolha, e atividade de despejo e transporte.

Todos os dados em análise são obtidos função de tecnologias de informação, respetivamente georreferenciação de contentores, definição dos parâmetros associados aos circuitos de recolha, deposições em aterro e sensores de elevação de carga traseira.

Estes dados são transpostos para uma base de dados, numa estrutura de camadas ou *layers*, conforme é possível verificar de seguida.

– Equipamentos de deposição

Os equipamentos de deposição agregam a recolha de resíduos, e são caracterizados por contentores de superfície, com capacidades de 800L e 1100L, e contentores enterrados e semienterrados, conforme distribuição expressa na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Equipamentos de Deposição

Fluxo Resíduo	Tipologia de conteúdo (subterrâneo / superfície)	Tipo de deposição	N.º total de contentores	Capacidade (litros)	Capacidade e instalação de deposição (m3)
Indiferenciado	Subterrâneo	Coletiva por proximidade	14	3000	42
Indiferenciado	Superfície	Coletiva por proximidade	19	1100	21
Indiferenciado	Superfície	Coletiva por proximidade	1855	800	1484

Nota: Adaptado de Avaliação da Qualidade do Serviço 2022 (ERSAR, 2023)

Estes equipamentos estão distribuídos pelo concelho, conforme representado na **Figura 18**.

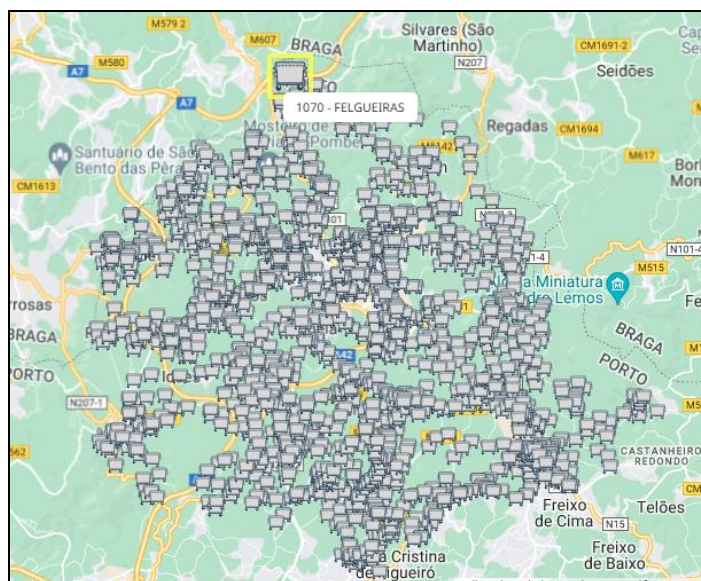


Figura 18 - Equipamentos de Contorização Georreferenciados

A georreferenciação dos equipamentos de contentorização é efetuada no momento da sua colocação, sendo estas coordenadas uma das características (campo) de cada contentor. A **Tabela 6** e **Tabela 7** contêm os atributos de cada contentor, como a localização, tipologia, código, circuito associado e coordenadas geográficas. Dada a dimensão das referidas tabelas, somente serão representados extratos das mesmas.

Tabela 6 - Atributos 1 dos Contentores.

Número	Tipo	Localização	Tipologia	Circuito (RFID)	Código
75	Superfície	Rua das Vessadas, 4610	800 L, plástico, recolha traseira	FLG3-1	FLG1094
76	Superfície	Rua do Zé Fiel 20, 4610	800 L, plástico, recolha traseira	FLG3-1	FLG1095
77	Superfície	Rua da Devesa, 10	800 L, plástico, recolha traseira	FLG3-1	FLG1096
78	Superfície	Rua das Tojeiras, 151	800 L, plástico, recolha traseira	FLG3-1	FLG1097
79	Superfície	EM5141, 661	800 L, plástico, recolha traseira	FLG3-1	FLG1098

Tabela 7 - Atributos 2 dos Contentores.

Número	Inserção /atualização	Latitude	Longitude	Coord. KML
75	18/11/2021	41,401178	-8,217762	41.401178 -8.217762
76	18/11/2021	41,406836	-8,219255	41.406836 -8.219255
77	18/11/2021	41,404837	-8,211490	41.404837 -8.211490
78	18/11/2021	41,404946	-8,211480	41.404946 -8.211480
79	18/11/2021	41,402719	-8,217219	41.402719 -8.217219

- Viaturas

A recolha de resíduos é efetuada por uma empresa privada que afeta 6 viaturas de grande porte, com volumes de caixa de 19m³ e 21 m³, e 1 viatura de menor dimensão para a recolha em vias de acessibilidade reduzida, com volume de caixa de 7 m³, conforme informação constante na **Tabela 8**.

Tabela 8 - Viaturas de Recolha.

Viatura	Volume da caixa da viatura (m3)	Capacidade máxima
1	19	11 400
2	19	11 400
3	21	12 600
4	19	11 400
5	21	12 600
6	19	11 400
7	7	4 200

Nota: Adaptado de Avaliação da Qualidade de Serviço 2022 (ERSAR).

- Descrição dos circuitos de recolha de RI

A recolha de resíduos é efetuada segundo 6 circuitos principais, sendo que 3 destes circuitos (FLG1, FLG2 e FLG3), pela respetiva extensão territorial, foram divididos em sub-circuitos (FLG1-1, FLG1-2, FLG2-1, FLG2-2, FLG3-1 e FLG3-2, respetivamente). A **Tabela 9** apresenta os tipos e recolha associados a cada circuito e o número de contentores.

Tabela 9 - Circuitos de Recolha de Resíduos Urbanos.

Circuito	Tipo de recolha	N.º Contentores	Frequência (dias por semana)
FLG1	Indiferenciada	445	3
FLG2	Indiferenciada	469	3
FLG3	Indiferenciada	429	3
FLG4	Indiferenciada	200	3
FLG5	Indiferenciada	279	3
FLG AR	Indiferenciada	64	3

Nota: Adaptado de Avaliação da Qualidade de Serviço 2022 (ERSAR).

A dispersão geográfica dos contentores é representada na **Figura 18**, sendo que a caracterização visual de cada circuito pode ser analisada com o auxílio da **Figura 19**.

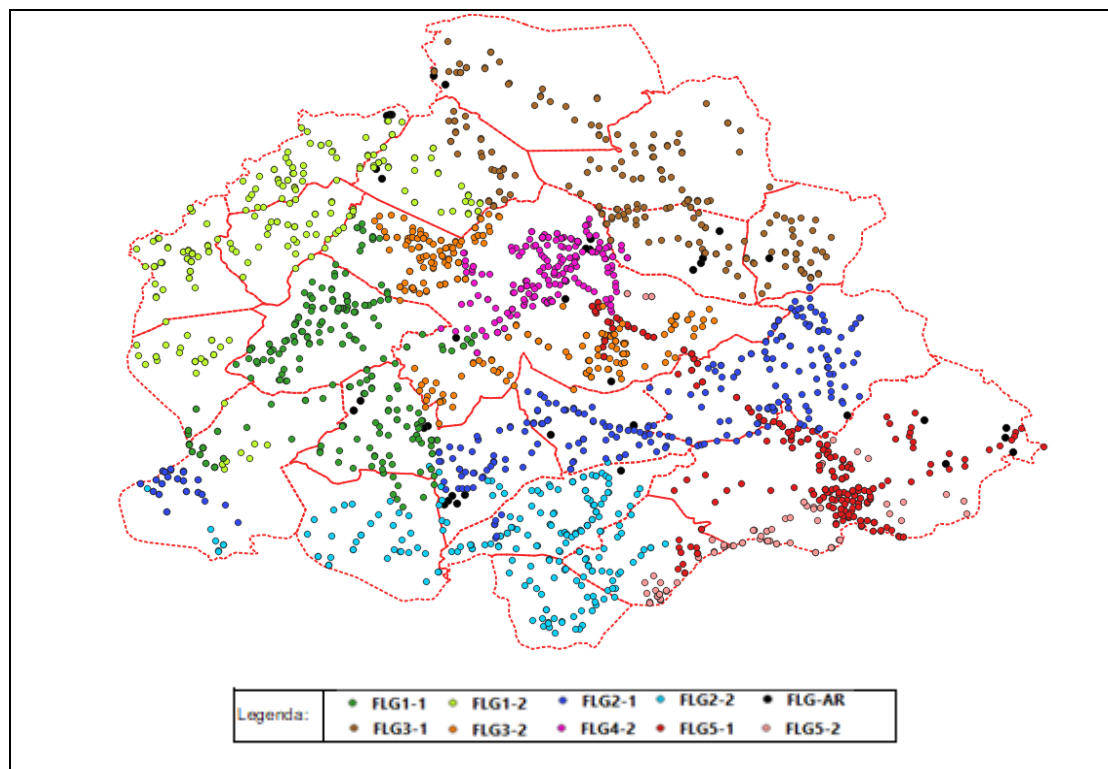


Figura 19 - Circuitos de Recolha e Dispersão de Contentores por Circuito

No âmbito operacional, os circuitos foram segmentados em 2 sub-circuitos, sendo que a hifenização 1 corresponde aos dias de recolha de segunda, quarta e sexta-feira e a hifenização 2 corresponde aos dias de recolha de terça, quinta-feira e sábado, conforme representado na **Tabela 10** infra, com o exemplo do circuito FLG1.

Tabela 10 - Frequências por Circuito.

Circuito	Frequência	dia 1	dia 2	dia 3
FLG1-1	3	segunda-feira	quarta-feira	sexta-feira
FLG1-2	3	terça-feira	quinta-feira	sábado

Em complemento à informação relativa aos contentores, a cada um dos equipamentos está associada uma tabela cujo carregamento de dados é efetuado pelos sensores de elevação de carga traseira, de cada camião afeto aos circuitos de recolha de resíduos. **A Tabela 11** apresenta alguns dos dados armazenados em cada ação nomeadamente, ID do contentor, data e hora, viatura e localização do equipamento.

Tabela 11 - Elevações de Carga Traseira

Contendor	Atividade	Data / Hora	Viatura	Resíduo	Localização
50	Recolha	2023/07/12 10:08:22	1	indiferenciado	Rua das Vessadas, 4610
50	Recolha	2023/07/14 10:08:29	1	indiferenciado	Rua das Vessadas, 4610
50	Recolha	2023/07/17 10:41:36	1	indiferenciado	Rua das Vessadas, 4610
50	Recolha	2023/07/17 10:41:40	1	indiferenciado	Rua das Vessadas, 4610
50	Recolha	2023/07/19 09:50:55	1	indiferenciado	Rua das Vessadas, 4610
50	Recolha	2023/07/21 10:10:02	1	indiferenciado	Rua das Vessadas, 4610

Estes registos permitem validar que os contentores são efetivamente despejados

No contexto visual, a elevação de cada contentor é identificada com o símbolo , conforme é visível em cada circuito de recolha como representado na **Figura 20**.



Figura 20 - Circuito Percorrido por Camião, e Sinalização de Elevação de Carga Traseira – Registos de Pesagens

Os resíduos urbanos recolhidos diariamente no âmbito dos circuitos de recolha são transportados para o aterro, com a contabilização dos respetivos quilogramas de resíduos. Esta informação, identificada na **Tabela 12**, é armazenada e cada linha corresponde a uma pesagem diária de cada despejo dos vários camiões no aterro. Dada a dimensão dos dados, somente se apresenta um extrato da mesma.

Tabela 12 - Deposições Diárias em Aterro (ton.)

Nr. Pesagem	Data	LER	Produto	Tara	Bruto	Liquido	Circuito Viat.
126809	2024/01/02 08:50:41	20 03 01	mistura de resíduos urbanos e equiparados	14 920	26 800	11 880	FLG3
126811	2024/01/02 08:54:53	20 03 01	mistura de resíduos urbanos e equiparados	4 900	7 200	2 300	FLG AR
126813	2024/01/02 09:30:03	20 03 01	mistura de resíduos urbanos e equiparados	14 860	26 500	11 640	FLG2
126814	2024/01/02 09:31:29	20 03 01	mistura de resíduos urbanos e equiparados	14 840	24 400	9 560	FLG1
126823	2024/01/02 10:59:36	20 03 01	mistura de resíduos urbanos e equiparados	14 820	22 560	7 740	FLG3
126824	2024/01/03 10:16:21	20 03 01	mistura de resíduos urbanos e equiparados	13 260	22 400	9 140	FLG4

Nota: Adaptado do Relatório Anual da Reciclagem 2022 (Ambisousa.2023) e Avaliação da Qualidade do Serviço 2022 (ERSAR, 2023).

A partir da informação referida, apresentada na **Tabela 12** e mensalmente, são efetuados os cálculos agregados mensais por circuito, conforme representado na **Tabela 13**.

Tabela 13 - Agregados Mensais por Circuito

Circuito	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	UM
FLG1	377,26	346,62	363,02	369,16	370,64	350,38	410,12	422,52	375	ton
FLG2	373,8	333,04	369,62	371,72	344,96	356,1	407,86	437,46	363,06	ton
FLG3	400,18	364,98	382,58	397,92	388,22	386,5	430,88	451,36	389,04	ton
FLG4	407	361,98	381,68	372,2	371,04	372,48	401,62	433,98	379,78	ton
FLG5	306,24	361,54	314,14	293,62	287,6	295,38	319,66	378,16	301,88	ton
FLG AR	34,02	283,02	33,7	44,68	44,8	38,38	40,32	42,56	41,48	ton

5 - Análise dos dados do caso de estudo

5.1 Enquadramento

A maioria dos dados apresentados decorrem da plataforma de georreferenciação e de apresentação essencialmente visual, que são exportadas para formatos de leitura mais simples e compactos, nomeadamente o formato tabelar, para uma melhor análise.

Para o cumprimento dos objetivos propostos para o presente trabalho, respetivamente, analisar os dados do caso de estudo, com o recurso a ferramentas de análise de dados e apoio à decisão baseadas em técnicas de *machine learning*, para obter uma visão integral do caso de estudo, foram efetuadas 3 análises principais, nomeadamente:

- ✓ Caracterização do caso de estudo: visão geral;
- ✓ Avaliação de parâmetros da recolha de resíduos;
- ✓ Avaliação de parâmetros do transporte de resíduos.

5.2 Caracterização do caso de estudo: visão geral

Esta caracterização pretende trabalhar os dados existentes, no sentido de obter uma visão geral do contexto atual, foi suportada pelos *pipelines*:

- Número de contentores por circuito e sub-circuito;
- Número de contentores por freguesia;
- Número de contentores por freguesia e rua;
- Peso médio mensal de resíduos por contentor.

- Número de contentores por circuito e sub-circuito

O fluxo da **Figura 21** pretende analisar a tabela dos atributos dos contentores e construir uma tabela com a informação do número de contentores por circuito.

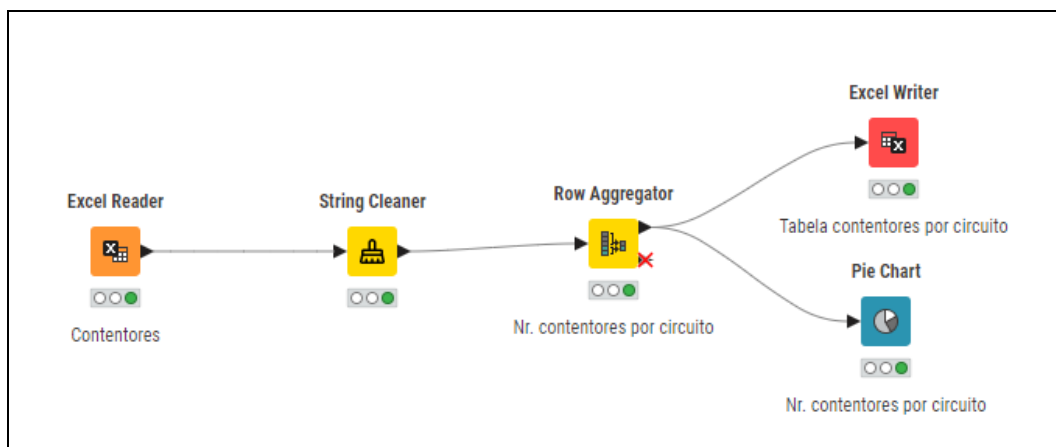


Figura 21 - Fluxo de Trabalho “Número de. Contentores por Circuito e Sub-circuito”.

Neste fluxo foram consideradas todas as etapas descritas anteriormente, sendo que para a leitura dos dados foi aplicado o nodo “Excel Reader”, que lê a tabela dos atributos dos contentores, descritos nas tabelas 6 e 7.

O pré-processamento dos dados incide sobre a limpeza dos dados, executado pelo nodo “String Cleaner”, utilizado para ações de padronização ou correção (remover espaços extras, corrigir maiúsculas/minúsculas ou tratar caracteres especiais em colunas relevantes).

A etapa do processamento utiliza o nodo “Row Aggregator”, que realiza uma agregação dos dados, produzindo um resultado com o número de contentores por circuito. Este nodo, identifica as ocorrências distintas dos valores de uma coluna (neste caso, a identificação do circuito) e calcula a quantidade de contentores associados a cada valor.

A visualização dos dados é obtida a partir da aplicação do nodo “Pie Chart” que cria o gráfico circular da **Figura 22** e que permite visualizar o número de contentores por circuito. Apresenta assim, uma análise visual rápida das proporções ou distribuição.

O resultado do processamento é guardado com a escrita dos dados, neste caso, num ficheiro em excel denominado “Contentores por circuito”, utilizando o nodo “Excel Writer”.

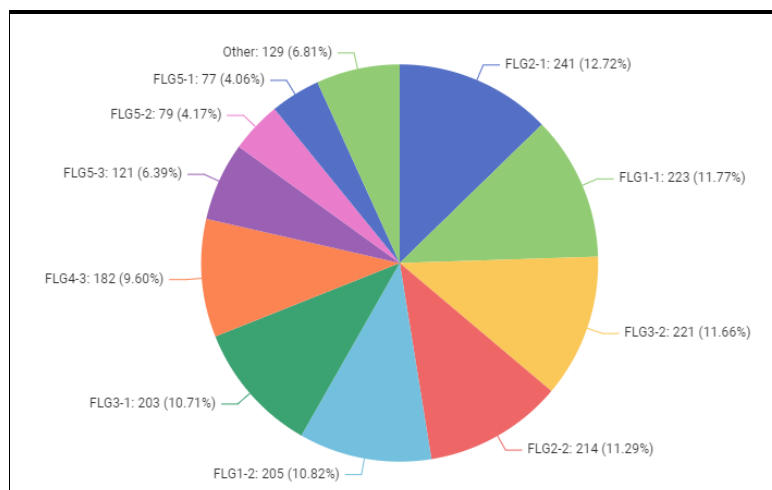


Figura 22 - Número Contentores por Circuito e Sub-circuito

- Contentores por freguesia

O fluxo da **Figura 23** pretende analisar a tabela dos atributos dos contentores e construir uma tabela com a informação do número de contentores por freguesia.

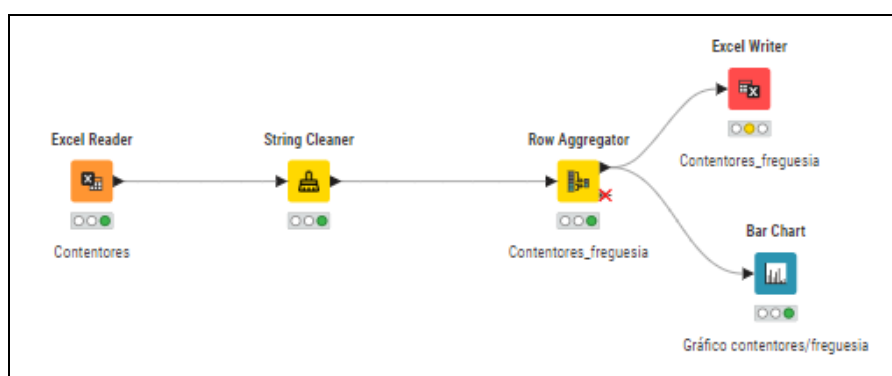


Figura 23 - Fluxo de trabalho “Número de contentores por freguesia”

Tal como o fluxo anterior, a leitura dos dados utiliza o nodo “Excel Reader”, que incide sobre a tabela dos atributos dos contentores, descritos nas Tabelas 6 e 7.

O pré-processamento dos dados incide sobre a limpeza dos dados executado pelo nodo “String Cleaner”, utilizado para ações de padronização ou correção (remover espaços extras, corrigir maiúsculas/minúsculas ou tratar caracteres especiais em colunas relevantes).

A etapa do processamento utiliza o nodo “Row Aggregator”, que realiza uma agregação dos dados, produzindo um resultado com o número de contentores por freguesia. Este nodo, identifica as ocorrências distintas dos valores de uma coluna (neste caso, a freguesia) e calcula a quantidade de contentores associados a cada valor.

A visualização dos dados é obtida a partir da aplicação do nodo “Bar Chart” que cria o gráfico de barras da **Figura 24** e que permite visualizar o número de contentores por freguesia, e tenta apresentar uma análise visual rápida das proporções ou distribuição.

O resultado do processamento é guardado com a escrita dos dados, neste caso, num ficheiro em excel denominado “Contentores_freguesia”, utilizando o nodo “Excel Writer”.

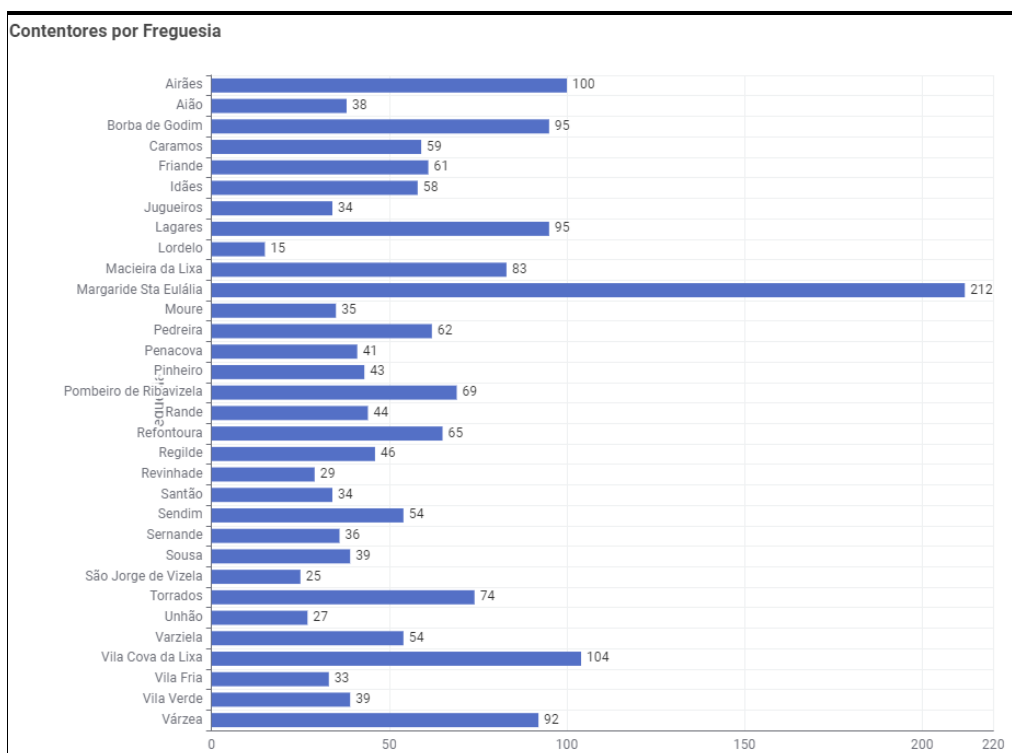


Figura 24 - Número de Contentores por Freguesia

- Contentores por Freguesia e Rua

O fluxo da **Figura 25** pretende analisar a tabela dos atributos dos contentores e construir uma tabela com a informação do número de contentores por freguesia e rua.

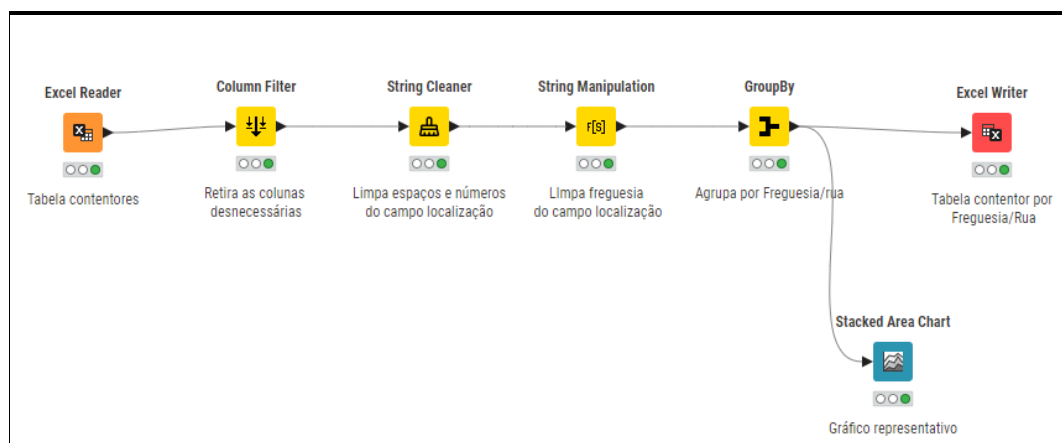


Figura 25 - Fluxo de trabalho “Número de Contentores por Freguesia e Rua”

Tal como nos fluxos anteriores, a leitura dos dados utiliza o nodo “Excel Reader”, que incide sobre a tabela dos atributos dos contentores, descritos nas Tabelas 6 e 7.

O pré-processamento dos dados inicia-se com o nodo “Column Filter” que exclui as colunas desnecessárias, seguindo-se a limpeza dos dados, executada pelo nodo “String Cleaner”, neste caso, utilizado para remover espaços e números do campo de localização. Por fim, é aplicado o nodo “String Manipulation” que retira a informação referente à freguesia, do campo de localização.

A etapa do processamento utiliza o nodo “GroupBy”, que realiza a agregação dos dados, produzindo um resultado com o número de contentores por freguesia e rua. Este nodo, identifica as ocorrências distintas dos valores de duas colunas (neste caso, a freguesia e a rua) e calcula a quantidade de contentores associados a cada valor.

A visualização dos dados é obtida a partir da aplicação do nodo “Stacked Area Chart” que cria o gráfico de barras da **Figura 26** e que permite visualizar o número de contentores por freguesia e rua, e tenta apresentar uma análise visual rápida das proporções ou distribuição.

O resultado do processamento é guardado com a escrita dos dados, neste caso, num ficheiro em excel denominado “Contentores_freguesia_ rua”, utilizando o nodo “Excel Writer”, conforme extrato dos dados da **Tabela 14** infra.

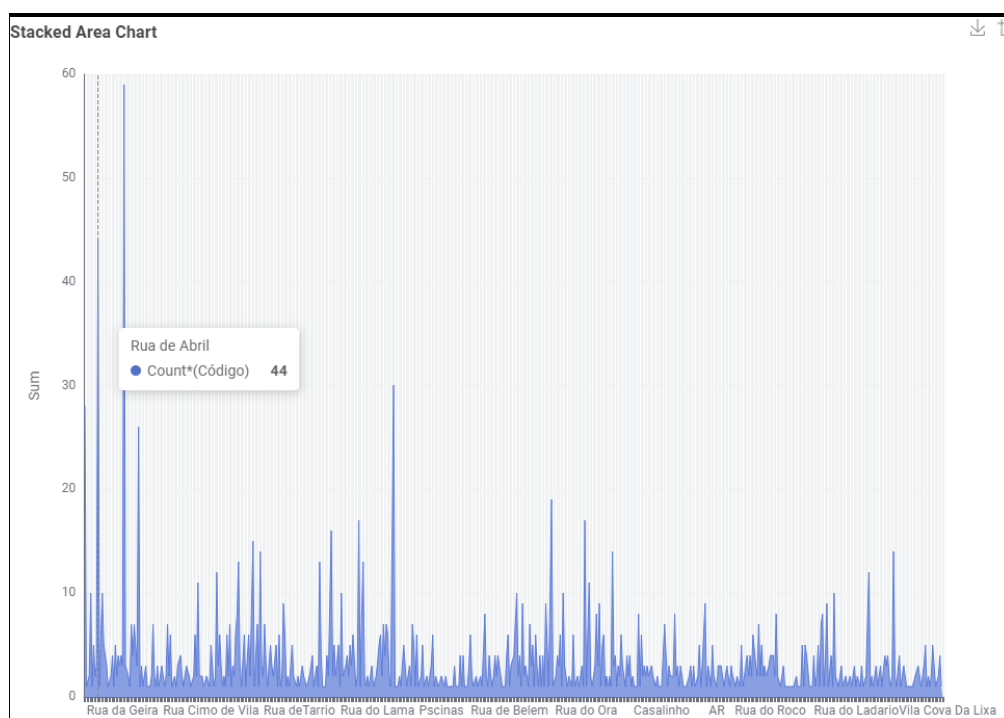


Figura 26 - Número de Contentores por Freguesia e Rua

Tabela 14 - Número de Contentores por Freguesia e Rua

Freguesia	Rua	Count* (Código)
Aiao	Praceta de Pedra Falar	1
Aiao	Rua da Igreja	1
Aiao	Rua de Pedra Falar	2
Aiao	Rua do Padre Alexandre	7
Airões	Rua da Liberdade	18
Airões	Rua da Quitueira	3

- Peso médio mensal por contentor, por circuito

O Fluxo constante na **Figura 27** utiliza os dados da tabela de contentores por circuito, obtida no fluxo “Número de contentores por circuito e sub-circuito” e da tabela dos agregados mensais por circuito apresentada na **Tabela 13**.

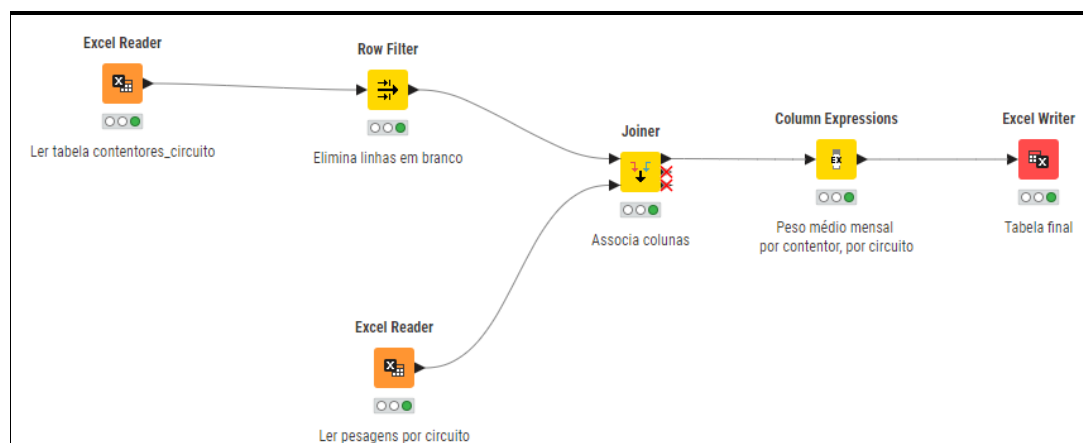


Figura 27 - Fluxo de trabalho “Peso Médio Mensal por Contentor e por Circuito”

Tal como nos fluxos anteriores, a leitura dos dados utiliza o nodo “Excel Reader”, que incide sobre a tabela dos contentores por circuito e tabela dos agregados mensais por circuito.

O pré-processamento dos dados aplica-se com o nodo “Row Filter” que exclui as linhas sem dados.

A etapa do processamento utiliza o nodo “Joiner”, que agrega várias colunas de ambas as tabelas, considerando o código de cada circuito.

Após esta agregação de colunas de dados, é aplicada uma operação matemática com o nodo “Column Expressions”, neste caso, a divisão do campo pesagem pelo campo número de contentores, produzindo como resultado o peso médio mensal por contentor e por circuito, representado na **Tabela 15**.

O resultado do processamento é guardado com a escrita dos dados, neste caso, num ficheiro em excel, utilizando o nodo “Excel Writer”.

Tabela 15 - Peso Médio Mensal por Contentor e por Circuito

Circuito	Nr_contentores	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	média janeiro	média fevereiro	média março	média abril	média maio	média junho	média julho	média agosto	média setembro
FLG1	443	377,26	346,62	363,02	369,16	370,64	350,38	410,12	422,52	375,00	0,8516	0,7824	0,8195	0,8333	0,8367	0,7909	0,9258	0,9538	0,8465
FLG2	473	373,80	333,04	369,62	371,72	344,96	356,10	407,86	437,46	363,06	0,7903	0,7041	0,7814	0,7859	0,7293	0,7529	0,8623	0,9249	0,7676
FLG3	424	400,18	364,98	382,58	397,92	388,22	386,90	430,88	451,36	389,04	0,9438	0,8608	0,9023	0,9385	0,9156	0,9116	1,0162	1,0645	0,9175
FLG4	194	407,00	361,98	381,68	372,20	371,04	372,48	401,62	433,98	379,78	2,0979	1,8659	1,9674	1,9186	1,9126	1,9200	2,0702	2,2370	1,9576
FLG5	277	306,24	361,54	334,14	293,62	287,60	295,38	319,66	378,16	301,88	1,1056	1,3052	1,1341	1,0600	1,0383	1,0664	1,1540	1,3652	1,0898

5.3 Avaliação de parâmetros da recolha de resíduos

A avaliação efetuada incidirá sobre os 2 parâmetros, que abaixo se indicam, e que mais impactam a visibilidade da prestação do serviço de recolha de resíduos urbanos. Estes parâmetros são importantes no âmbito da prestação de um melhor serviço público:

- Distribuição de equipamentos para deposição, função da densidade populacional atual;
- Falhas na recolha de contentores por circuito, função da frequência definida.

- Distribuição de equipamentos para deposição, função da densidade populacional atual

Os dados trabalhados pertencem à tabela de contentores por freguesia, obtida no fluxo “Número de contentores por freguesia” e à tabela do INE que detém o ID e a designação de cada freguesia do caso de estudo e apresentada na **Tabela 16**.

Tabela 16 - ID INE de Freguesia

Freguesia	ID INE
Aiaó	130301
Airaes	130302
Friande	130305
Idaes	130306
Jugueiros	130307
Penacova	130313
Pinheiro	130314
Pombeiro de Ribavizela	130315
Refontoura	130317
Regilde	130318
Revinhade	130319

O fluxo apresentado na **Figura 28** inicia-se pela leitura da tabela de contentores por freguesia, e da tabela ID INE de freguesia, com o nodo “Excel Reader”.

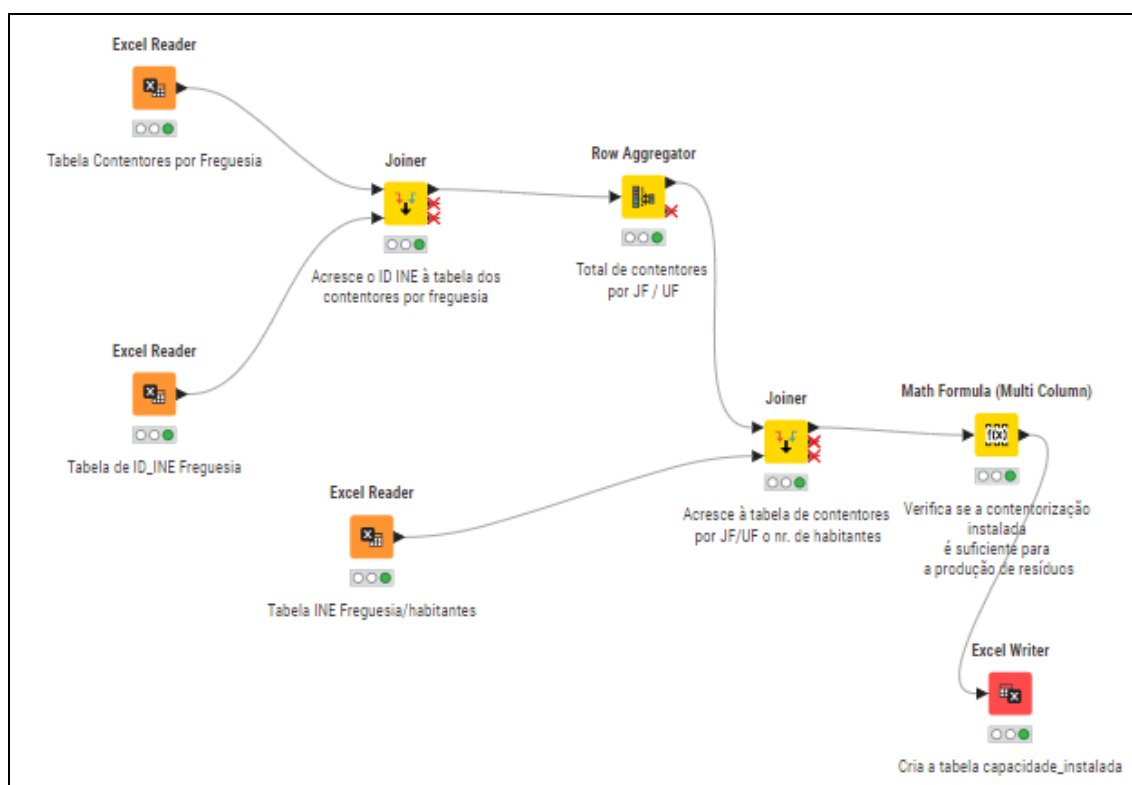


Figura 28 - Fluxo de trabalho “Avaliação da Capacidade de Contentorização Função do Número de Habitantes”

A etapa de processamento, inicia-se com o nodo “Joiner” que acresce a informação do ID INE associado a cada freguesia à tabela de contentores por freguesia. O nodo “Row Aggregator” agrega os contentores por freguesia e por união de freguesia segundo o código ID INE, conforme representação de alguns dos dados na **Tabela 17**.

Tabela 17 - Total de contentores por freguesia e união de freguesias

ID INE	Occurence_count
130301	38
130302	100
130305	61
130306	58
130307	34

À seleção de dados obtida dos nodos anteriores, é acrescida a informação do número de habitantes de cada freguesia e união de freguesia, pela aplicação dos nodos “Excel Reader”, que lê a tabela do número de habitantes por freguesia e união de freguesias, e pelo nodo “Joiner”. O factor de agregação é o ID INE de ambas as tabelas. A **Tabela 18** apresenta um extrato de dados resultantes.

Tabela 18 - Agregação de Contentores com Número de Habitantes

ID INE	OCCURRENCE_COUNT	Freguesia	Habitantes
130301	38	Alão	828
130302	100	Airões	2292
130305	61	Friande	1750
130306	58	Idães	2550
130307	34	Jugueiros	1220
130313	41	Penacova	1062
130314	43	Pinheiro	1053
130315	69	Pombeiro de Ribavizela	2073

Após esta agregação de colunas de dados, é aplicado o nodo “Math Formula (Multi Column)” com a fórmula $(\$OCCURRENCE_COUNT\$ * 310) / (\$HABITANTES\$ * 1.4 * 3)$, para verificar se a capacidade de contentorização instalada satisfaz a produção da população, considerando a produção diária estimada e identificada pela APA, de 1,4 Kg por dia por habitante, a necessidade de retenção de 3 dias (número de máximo de dias permitido sem recolha) e a capacidade mínima dos contentores de 800 L (cuja ficha técnica indica uma capacidade útil de 310 Kg).

Aos dados processados, é aplicado o nodo “Excel Writer” que os armazena em suporte físico. Alguns destes dados são apresentados na **Tabela 19**.

Tabela 19 - Capacidade de Contentorização Instalada

ID INE	OCCURRENCE_COUNT	Freguesia	Habitantes	OCCURRENCE_COUNTCapacidade_instalada
130301	38	Alão	828	3,387
130302	100	Airões	2292	3,220
130305	61	Friande	1750	2,573
130306	58	Idães	2550	1,679
130307	34	Jugueiros	1220	2,057
130313	41	Penacova	1062	2,850
130314	43	Pinheiro	1053	3,014
130315	69	Pombeiro de Ribavizela	2073	2,457

- Falhas na recolha de contentores por circuito, função da frequência definida

Os dados trabalhados pertencem à tabela de elevação de carga traseira, **Tabela 11**, e à **Tabela 9** que apresenta as frequências semanais de recolha por circuito. Considerou-se a amostra do circuito de acessibilidade reduzida e contentores associados.

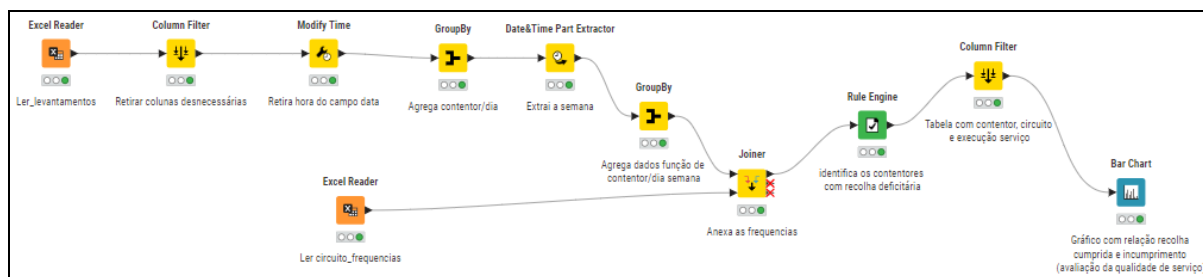


Figura 29 - Fluxo de trabalho “Falhas eventuais na Recolha de Resíduos”

O fluxo apresentado na **Figura 29**, inicia-se pela leitura da tabela de elevação de carga traseira, com o nodo “Excel Reader”.

O pré-processamento dos dados aplica o nodo “Column Filter” que exclui as colunas desnecessárias. Tendo por base a coluna da data/hora do levantamento do contentor (coluna “Data/hora”), a hora é extraída da data tornando-se numa coluna individualizada.

Para eliminar a duplicação de registos com horas aproximadas, ao segundo, e ainda na fase de pré-processamento dos dados, é efetuada a agregação das linhas com o mesmo identificador do contentor e o mesmo dia, aplicando o nodo “GroupBy”.

O nodo “Date&Time Part Extractor” permite criar uma coluna com a informação do número da semana, coluna sobre a qual é contabilizado número de recolhas de resíduos por semana e por contentor, com o nodo “GroupBy”.

Terminada esta primeira análise aos dados, e na etapa de processamento, a tabela resultante do nodo “GroupBy” é acrescida da coluna da frequência de recolha, pela ação conjunta dos nodos “Excel Reader” que efetua a leitura da tabela de circuitos e frequências, da **Tabela 9**, e o nodo “Joiner”. Esta agregação considera cada código de circuito.

Após esta agregação de colunas de dados, é aplicado o nodo “Rule Engine” com a regra $\text{Count(Data/Hora)} < \text{frequência} \Rightarrow \text{"Recolha deficitária"}$, para identificar os contentores com recolha deficitária, ou seja, cuja recolha semanal é inferior à frequência contratada. Um extrato dos dados resultantes é representado na **Tabela 20**.

Tabela 20 - Análise do Serviço de Recolha

Contentor	Nr_semana	Count(Data / Hora)	Localização	circuito	frequência	prediction
3	1	2	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
3	2	3	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	
3	3	3	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	
3	4	2	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
3	5	2	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
3	6	2	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
3	7	1	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
3	8	2	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
3	9	1	Rua do Monte da Costa 234, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
4	1	2	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
4	2	3	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	
4	3	2	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
4	4	3	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	
4	5	3	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	
4	6	3	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	
4	7	2	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
4	8	3	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	
4	9	3	Rua da Vinha 515, 4650, Portugal	FLG AR	3	
5	1	2	Rua de Santa M.nha 2324, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
5	2	2	Rua de Santa M.nha 2324, 4650, Portugal	FLG AR	3	Recolha deficitária
5	3	3	Rua de Santa M.nha 2324, 4650, Portugal	FLG AR	3	

A etapa de processamento contém ainda o nodo “Column Filter” para a exclusão de colunas com informação não necessária, obtendo-se os campos para a análise pretendida, que posteriormente é refletida no gráfico de barras resultante da aplicação do nodo “Bar Chart” e constante na **Figura 30**, permite verificar falhas na frequência de recolha dos contentores da amostra selecionada (3 dias por semana).

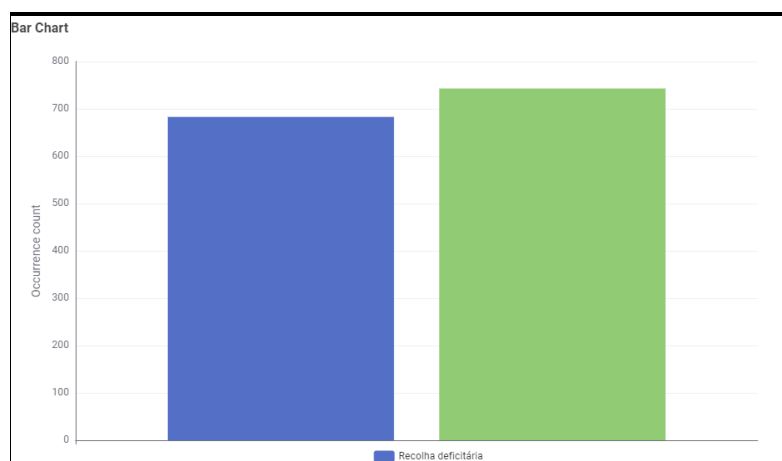


Figura 30 - Falhas na Frequência de Recolha de Resíduos

5.4 Avaliação de parâmetros do transporte de resíduos

Nesta seção, pretendeu-se avaliar os circuitos de recolha, função da quantidade de resíduos recolhida pelos camiões e das deslocações necessárias para a deposição em aterro.

Este indicador é considerado importante, pois permite identificar os dias em que a recolha dos resíduos excede a carga máxima do camião, obrigando a mais do que uma deslocação ao aterro por cada realização do circuito de recolha.

Esta análise pretende obter um indicador para uma melhor distribuição de contentores em cada circuito, nesses dias ou de forma efetiva, de forma a tornar a gestão de resíduos urbanos mais eficiente assim como diminuir as emissões carbónicas associadas aos transportes efetuados com carga excessiva ou mais frequentes do que o desejável, é representada pelo fluxo da **Figura 31**.

Os dados trabalhados pertencem à tabela de deposição diária em aterro, **Tabela 12**, e a tabela de viaturas de recolha, **Tabela 8**.

O fluxo inicia-se pela leitura da **Tabela 8** e da **Tabela 12**, com o nodo “Excel Reader”.

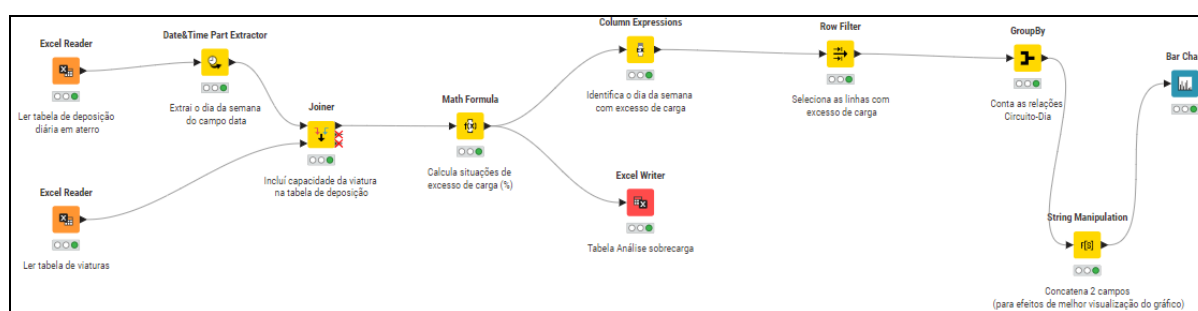


Figura 31 - Fluxo de trabalho “Avaliação da Sobrecarga da Recolha”

O pré-processamento dos dados aplica o nodo “Date&Time Part Extractor” que extrai o dia da semana do campo data, colocando essa informação numa coluna individualizada.

Terminada esta primeira análise aos dados, e na etapa de processamento, é aplicado o nodo “Joiner”, que agrega à tabela de deposição, a capacidade da viatura, considerando o código da mesma.

Após esta agregação de colunas de dados, é aplicada uma operação matemática com o nodo “Math Formula”, para o cálculo da sobrecarga do transporte de resíduos, respetivamente, “ $(\$Liquidado / \$Capacidade\ máxima\$) * 100 - 100$ ”. Os valores obtidos, são interpretados segundo o critério de inferior a 0 (zero), correspondem a carga adequada para a capacidade máxima do camião, sendo que os valores positivos correspondem ao número de toneladas de resíduos transportados acima da capacidade da viatura.

Aos dados processados, é aplicado o nodo “Excel Writer” que gera a tabela correspondente. Um extrato dos dados é apresentado na **Tabela 21**.

É importante referir, que dado o volume de dados da **Tabela 12**, analisaram-se os dados referentes ao mês de Janeiro/2024.

Tabela 21 - Análise de sobrecarga

Viatura	Data	Líquido	Circuito Viat.	Day of Week (Name)	Capacidade máxima	AnaliseCarga
1	2024/01/02 09:31:29	9560	FLG1	terça-feira	11400	-16
2	2024/01/03 09:18:26	14520	FLG2	quarta-feira	11400	27
3	2024/01/02 23:32:44	16620	FLG4	terça-feira	12600	32
4	2024/01/23 08:47:52	8800	FLG3	terça-feira	11400	-23
7	2024/01/02 08:54:53	2300	FLG AR	terça-feira	4200	-45

Para a obtenção de uma análise gráfica, a etapa de processamento inclui o nodo “Column Expressions” para identificar o dia da semana com excesso de carga, utilizando para tal, a expressão *if (column(“AnaliseCarga”) >= 1) column(“Day of Week (Name)”); else “”*. Deste processamento, e com o objetivo de reduzir a tabela para a representação gráfica, aplicaram-se os nodos “Row Filter” que selecionou somente as linhas com informação em todas as colunas, e “GroupBy” que contabiliza as ocorrências do par, dia do excesso de carga-circuito, e gera a correspondente coluna.

O nodo final de processamento, nodo “String Manipulation”, concatena os campos circuito e dia do transporte em excesso, para melhor visualização do gráfico de barras resultante do nodo “Bar Chart”, conforme **Figura 32**.

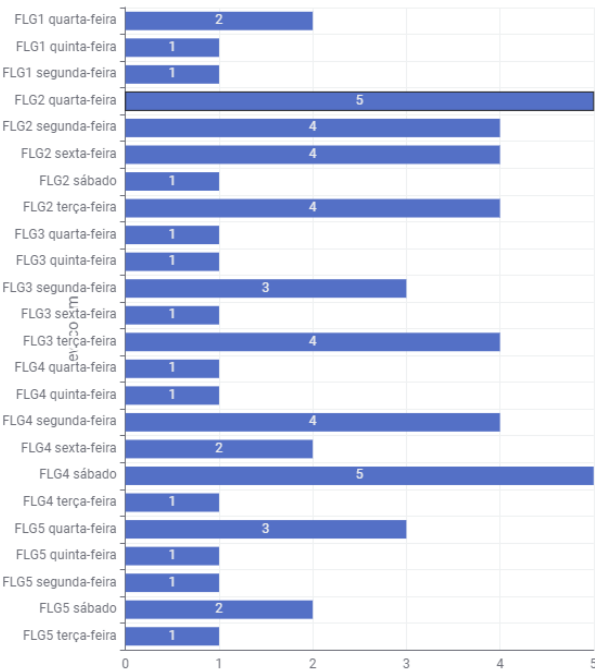


Figura 32 - Número de Ocorrências de Excesso de Carga (Circuito-dia)

Em síntese, as análises efetuadas permitiram, mesmo que numa pequena escala, consolidar fontes de dados distintas, efetuar análises consistentes, e obter uma visualização por gráficos que facilitam a interpretação da informação.

Dada a adaptabilidade dos fluxos, estes podem ajustar-se a outras vertentes, automatizando análises em função da atualização de dados.

Estes procedimentos fornecem dados atualizados para decisões rápidas e informadas, e permitem assim, relatórios de situação para a tomada de decisão.

6 – Conclusões

6.1 Considerações finais

A gestão de resíduos urbanos do caso em estudo apresentava dificuldades em responder a questões simples no âmbito do seu desempenho, não só pela elevada quantidade de dados referentes a sistemas de sensores (elevação), como pela dispersão de dados em *layers* e tabelas nas plataformas de sistemas de informação geográfica.

Apesar da informação visual e existente ser adequada a uma verificação básica do desempenho do sistema, outras análises eram de difícil execução.

Esta dificuldade de análise, associada a um fluxo de contínuo de dados, potenciou a definição dos objetivos do presente trabalho, nomeadamente a aplicação de uma ferramenta de *Machine Learning* (ML), o que se mostrou uma mais-valia.

A aplicação dos fluxos de nodos na plataforma KNIME permitiu obter uma visão agregada da informação visualmente dispersa, evidenciando nas suas aplicações mais simples, uma dispersão de equipamentos de contentorização, com grandes disparidades entre locais/freguesias, assim como distribuição por peso de resíduos recolhidos, no âmbito da primeira proposta de análise do presente trabalho.

Para a segunda proposta de análise, respetivamente, a avaliação de parâmetros da recolha de resíduos nas vertentes de, distribuição de equipamentos para deposição função da densidade populacional atual e, falhas na recolha de contentores por circuito função da frequência definida, verificou-se que a afetação de equipamentos de contentorização por freguesia, assegura, de uma forma global, a deposição da estimativa de produção de resíduos urbanos por habitante.

No âmbito da verificação da execução do serviço prestado, respetivamente se a frequência de recolha contratada era efetivamente executada, e na amostra analisada (circuito da acessibilidade reduzida), é possível identificar a necessidade de um acompanhamento mais próximo à qualidade do serviço que se pretende disponibilizar à população.

Esta análise de dados realça as múltiplas vulnerabilidades da ação de despejo dos contentores, nomeadamente, os potenciais constrangimentos (estacionamentos indevidos que impedem a operação de despejo, os danos nos equipamentos e viaturas que inviabilizam a ação do sensor, a fraca cobertura de rede para as comunicações de dados, e a avaria dos sensores) ou mesmo, eventuais omissões da recolha.

De referir que a visão obtida dos resultados, realçou a importância da monitorização contínua, da necessidade da identificação do motivo do constrangimento e da sua rápida ação corretiva.

A terceira proposta de análise, a avaliação de parâmetros do transporte de resíduos, centrou-se na verificação dos dias em que o camião de resíduos transporta uma carga acima da sua capacidade máxima, ou que efetua mais do que 1 deslocação ao aterro no âmbito do mesmo dia/circuito, com as consequentes ineficiências do trabalho e consequências no consumo de combustível e emissão de CO₂.

Haverá outros conjuntos de dados que não foram apresentados, como dados de natureza financeira, que podem agregar valor à análise do sistema de recolha de resíduos urbanos do caso de estudo e assim acrescentar valor ao processo.

6.2 Trabalho Futuro

A gestão de resíduos como elemento do ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis) torna esta problemática ainda mais importante.

Neste sentido e no âmbito da regulamentação europeia e nacional sobre este tema, crê-se que a evolução da gestão de resíduos estará cada vez mais suportada em soluções tecnológicas de recolha de informação, como sensores de volume/peso em contentores e veículos de recolha, reconhecimento de utentes por tecnologia RFID para registo do peso dos resíduos depositados e correspondente faturação função dessa deposição (PAYT – Pay As You Throw), sensores de humidade, odor e emissão de gases, entre outros, além de outras ferramentas de apoio como aplicações móveis para o registo de incidências (danos em equipamentos, resíduos volumosos abandonados na via pública, ...).

A aplicação de tecnologias de informação adicionais permitirá efetuar novas análises ou mesmo complementar as apresentadas, e permitir considerações como o reforço ou redistribuição de equipamentos de contentorização função do seu nível de enchimento e peso de resíduos recolhidos.

A inovação rápida e contínua em tecnologias digitais potenciou a produção de grandes quantidades de dados. Independentemente de como as pessoas o definem, o impacto do *Big Data* é uma realidade. O termo *Big Data* não se limita assim, apenas ao tamanho dos dados, mas também descreve a complexidade da informação bruta gerada por dispositivos digitais. (Anting, 2022).

A análise deste grande volume de informação, muito dele recolhido em tempo real é uma importante ferramenta para a tomada de decisão dos municípios, como responsáveis pela gestão de resíduos sólidos urbanos.

Neste contexto, e do estudo efetuado, a plataforma KNIME oferece os meios necessários para análises mais complexas e estudos previsionais não abordados neste trabalho.

Referências

- Abbasi, M., Abdoli, M., Omidvar, B., & Baghvand, A. (2013). Forecasting municipal solid waste generation by hybrid support vector machine and partial least square model. *International Journal of Environmental Research*.
- Abbasi M. & Hanandeh, A. (2016). Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence modelling approaches. *Waste Management*, 56, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.018>.
- Abdoli, M.A., Nezhad, M., Sede, R., & Behboudian, S. (2012). Longterm forecasting of solid waste generation by the artificial neural networks. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(4), 628–636.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2018). *Roteiro para a Neutralidade Carbónica*. RNC2050. <https://descarbonizar2050.apambiente.pt/>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2021a). *Planeamento*. <https://apambiente.pt/residuos/planeamento>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2021b). *Sistemas de Gestão e Infraestruturas*. <https://apambiente.pt/residuos/sistemas-de-gestao-e-infraestruturas>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2022). *Relatório Anual Resíduos Urbanos 2021 (RARU 2021)*. <https://apambiente.pt/destaque2/relatorio-anual-de-residuos-urbanos-2021>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2023). *Energia e Clima: Emissões de Gases com Efeito de Estufa*. REA Portal do Estado do Ambiente. <https://rea.apambiente.pt/content/emiss%C3%B5es-de-gases-com-efeito-de-estufa>
- Ambisousa. (2022). *Relatório Anual da Reciclagem*. https://www.ambisousa.pt/fotos/editor2/relatorio/2022/relatorio_anual_da_reciclagem_2022.pdf
- Antanasijević, D., Pocaĳt, V., Popović, I., Redžić, N. & Ristić, M. (2013). The forecasting of municipal waste generation using artificial neural networks and sustainability indicators. *Sustainability Science*, 8, 37–46. <https://doi.org/10.1007/s11625-012-0161-9>
- Anting, N. (2022). Data science with KNIME. NASPSOFT Intelligence Academy.
- Bernard, E. (2021). Introduction to Machine Learning. Champaign. Wolfram Media. <https://www.wolfram.com/language/introduction-machine-learning/>
- Berthold, M.R., Cebron, N., Dill, F., Gabriel, T.R., Kötter, T., Meinl, T., Ohl, P., Thiel, K., & Wiswedel, B. (2009). KNIME - the Konstanz information miner: version 2.0 and beyond. *SIGKDD Explor.*, 11, 26–31. <https://doi.org/10.1145/1656274.1656280>
- Carvalho, E. (2005). *Metodologias para a quantificação e caracterização física dos resíduos sólidos urbanos*. [Dissertação de mestrado. Universidade Nova de Lisboa].
- Comissão Europeia. (2019). *O reexame da aplicação da política ambiental 2019. Relatório Sobre Portugal*. https://environment.ec.europa.eu/law-and-governance/environmental-implementation-review_en#country-reports

Decreto-Lei n.º 11/1987 da Assembleia da República. (1987). Diário da República: I série, n.º 81. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/1987/04/08100/13861397.pdf>

Decreto-Lei n.º 178/2006 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. (2006). Diário da República: I série, n.º 171. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2006/09/17100/65266545.pdf>

Decreto-Lei n.º 183/2009 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. (2009). Diário da República: I série, n.º 153. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2009/08/15300/0517005198.pdf>

Decreto-Lei n.º 73/2011 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2011). Diário da República: I série, n.º 116. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2011/06/11600/0325103300.pdf>

Decreto-Lei n.º 75/2013 da Assembleia da República. (2013). Diário da República: I série, n.º 176. <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2013/09/17600/0568805724.pdf>

Decreto-Lei n.º 102-D/2020 da Presidência do Conselho de Ministros. (2020). Diário da República: I série, n.º 239. <https://files.dre.pt/1s/2020/12/23901/0000200269.pdf>

Decreto-Lei n.º 98/2021 da Assembleia da República. (2021). Diário da República: I Série, n.º 253/2021, 5-32. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/98-2021-176907481>.

Dietz, C. & Berthold, M.R. (2016). KNIME for Open-Source Bioimage Analysis: A Tutorial. *Advances in Anatomy, Embryology and Cell Biology*, 219:179-97. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28549-8_7

Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. (2008). Jornal Oficial da União Europeia, L 312 de 22.11.2008, 3–30. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098>

Directiva 1999/31/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. (1999). Jornal Oficial da União Europeia, L 182 de 16.7.1999, 1–19. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031>

Directiva 1994/62/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. (1994). Jornal Oficial da União Europeia, L 365 de 31.12.1994, 10–23. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:31994L0062>

Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos. (2022). Avaliação da Qualidade do Serviço. <https://www.ersar.pt/pt/setor/factos-e-numeros/dados-de-base>

Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos. (2022). “*Conferências de Março*”. https://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/Documents/S1_VeraEiro.pdf

Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos. (2024). *Guia de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores – 4ª geração do sistema de avaliação*. https://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/Documents/Guia_Tecnico27.pdf

Faria, R. F. (2019). Os desafios das novas formas de lidar com os resíduos nos territórios inteligentes sob uma perspectiva europeia. *REGAP: Revista galega de administración pública*, 1(58), 201-216.

FEFAL. (2023). PRO2030 Programa Avançado em Valorização dos Recursos e Resíduos. Inovação Social e Gestão de Dados. <https://www.fefal.pt/index.php/formacao/pro2030>

Fernandes, L. (2019). Roteiro para a Descarbonização de Portugal. Uma perspetiva na construção e reabilitação de edifícios. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. III-9.

Ghinea, C., Drăgoi, E. N., Comăniță, E. D., Gavrilescu, M., Câmpian, T., Curteanu, S. & Gavrilescu, M. (2016). Forecasting municipal solid waste generation using prognostic tools and regression analysis. *Journal of Environmental Management*, 182, 80-93.

Graça, V.F. (2015). *Plano de Gestão de resíduos sólidos urbanos - Uma proposta para a cidade de Porto Novo, Ilha de Santo Antão, Cabo Verde* [Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10400.5/11116>

Heidari R., Yazdanparast R., Jabbarzadeh A. (2019). Sustainable design of a municipal solid waste management system considering waste separators: A real-world application. *Sustainable Cities and Society*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101457>.

Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P., & Woerden, F.V. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. <http://hdl.handle.net/10986/30317>

Keller, R. (1973). Computerized optimization and planning in solid waste management. *Jones & Henry Engineers Limited*, 424-427.

Levy, J. & Cabeças, A. J. (2008). *Resíduos Sólidos Urbanos - Princípios e Processos*. Associação das Empresas Portuguesas para o Setor do Ambiente. Lisboa.

Martinho, M.G. & Gonçalves, M.G. (2000). *Gestão de Resíduos*. Universidade Aberta. Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.2/10673>

Moreira, A. R. (2008). *Análise de circuitos de recolha de RSU indiferenciados e avaliação da influência de variáveis operacionais na produtividade dos circuitos* [Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa].

Nações Unidas. (2015). *A Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Pereira, L. (2005). *Avaliação das condições de segurança e saúde dos trabalhadores dos sistemas de gestão de resíduos urbanos* [Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa].

Peruchin, B., Guidoni, L. L. C., Corrêa, L. B., Marques, R. V., Vieira, L. A., Siqueira, T. M., & Corrêa, É. K. (2018). Solid waste generation in a hotel event service. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(2), 237-247. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.05>

Pichtel, J. (2005). *Waste Management Practices: Municipal, Hazardous, and Industrial*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Resolução do Conselho de Ministros n.º 31/2023 de 24 de março. (2023). Diário da República: I Série, n.º 60/2023, pag. 140-276. <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/diario-republica/60-2023-210923310>

Seadon, J. (2010). Sustainable Waste Management Systems. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1639-1651. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.009>

Siddiqui, S. (2024). Gerenciamento de resíduos: reduzindo resíduos industriais com IA. *Sigma Earth*. <https://sigmaearth.com/pt/ai-waste-management-reducing-industrial-waste-with-ai/>

Silva, M., Ferreira, B. & Brás, I. (2015). Indicadores de Qualidade na Prestação de Serviços de Gestão de Resíduos Urbanos – Caso de Estudo. *Millenium*, n.º 48 (jun/dez), 91-109.

Taskin A. & Demir N. (2020). Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*, 61, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102339>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720305606>.

Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. A. (1993). *Integrated solid waste management*. McGraw-Hill International Editions.

Yu, C. C. & Maclaren, V. (1995). A comparison of two waste stream quantification and characterization methodologies. *Waste Management & Research*, 13(4), 343-361.