

Triagem de resíduos de embalagens plásticas: Um modelo de gestão industrial para o ecoponto amarelo

Trabalho de Projeto

Sónia Patrícia Medeiros Aguiar

Mestrado em

Gestão de Empresas (MBA)



Triagem de resíduos de embalagens plásticas: Um modelo de gestão industrial para o ecoponto amarelo

Trabalho de Projeto

Sónia Patrícia Medeiros Aguiar

Orientadora

Prof.^a Doutora Maria Teresa Pinheiro de Melo Borges Tiago

Trabalho de projeto submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Gestão de Empresas (MBA)



RESUMO

Este trabalho incide sobre a implementação da solução tecnológica da start-up “Lixo”, que tem como objetivo desenvolver um algoritmo de inteligência artificial que permita identificar as diferentes tipologias de resíduos provenientes da produção automatizada da central do ecoponto de amarelo com dados, em tempo real, da quantidade de resíduos valorizáveis/recicláveis que são reencaminhados para destruição/aterro sanitário. Assim pretende-se com a implementação desta solução tecnológica da start-up “Lixo” aumentar o potencial de reciclagem no centro de triagem (aumentar e melhorar as taxas de reciclagem), encontrar os pontos fracos e as perdas existentes ao longo da linha e controlar a qualidade do produto final evitando a contaminação por resíduos que podem atrapalhar ou inviabilizar o reaproveitamento desses materiais. Para tal, foi montado um sistema de reconhecimento visual integrado com o uso da inteligência artificial (IA) com autoaprendizagem programado para identificar padrões de resíduos valorizáveis e não valorizáveis, dando-nos a capacidade de prever e atuar em tempo real, adaptando, no momento, o plano de operação. Para obter a informação necessária a tecnologia da start-up “Lixo”, esta foi implementada em dois pontos distintos da linha de produção, início e fim, em que os sensores óticos fazem a leitura do tipo de resíduo rececionado, com vista a adaptar, adequar e melhorar a operação do centro de triagem. Em suma, este sistema tem como objetivo simplificar o processo de triagem e melhorar a eficiência e eficácia da valorização de resíduos na instalação, ao contribuir a otimização, dinamização e ampliação do alcance das mais diversas operações. Durante este projeto foram efetuadas caracterizações aos resíduos de modo a verificar e validar a veracidade dos dados do software e afinar o algoritmo à realidade e necessidade da região.

Palavras-chave: algoritmo, embalagens de amarelo, economia circular, inteligência artificial, recolha seletiva, resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

This work focuses on the technological solution implementation of the start-up “Lixo”, which aims to develop an artificial intelligence algorithm that makes it possible to identify the different types of waste from the automated production of the yellow recycling centre with real-time data on the amount of recoverable/recyclable waste that is sent for destruction/landfill. The aim of implementing the technological solution of the start-up “Lixo” is: to increase and improve recycling rates, find weak points and losses along the production line and control the quality of the final product. It is planned to set up a visual recognition system integrated with the use of artificial intelligence with self-learning programmed to identify patterns of recoverable and non-recoverable waste, giving us the ability to predict and act in real-time, adapting the operation plan on the spot. To obtain the necessary information, the start-up’s “Lixo” technology will be implemented at 2 different points of the line, at the beginning and at the end of the line, where optical sensors will read the type of waste received, to adapt and improve the sorting centre’s operation. During the process, will be carried waste characterisations, to verify and validate the veracity of the software data and adapt the algorithm to the reality and needs of the region.

Keywords: Algorithm, artificial intelligence, circular economy, municipal solid waste separate collection, yellow packaging

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Prof. doutora Maria Teresa Pinheiro de Melo Borges Tiago, por, apesar de já ter imensos projetos em mãos, aceitar mais este desafio como minha orientadora.

Gostaria, também, de agradecer à Musami, nomeadamente, ao Diretor Geral, Dr. Carlos Botelho, por permitir a utilização e divulgação dos dados do projeto piloto desenvolvido em parceria com a start-up “Lixo”.

Por fim, a todos os que contribuíram para o meu crescimento, tanto profissional como pessoal ao longo destes dois anos de percurso académico.

ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMENTOS	iii
ÍNDICE.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	viii
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....	10
CAPÍTULO II- REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1. Modelos de IA para a reciclagem	12
2.2. Benefícios versus cuidados da IA.....	13
2.3. Conceito e objetivos do projeto	15
2.4. Contextualização do projeto	16
2.5. Projetos semelhantes.....	17
CAPÍTULO III – METODOLOGIA.....	18
CAPÍTULO IV- ENSAIOS	21
4.1. Desenvolvimento “Lixo”.....	21
4.2. Ensaio – método	27
4.2.1. Análise do primeiro ensaio	28
4.2.2 Análise do segundo ensaio	29
4.2.3 Análise de resultados	33
CAPÍTULO V- CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características dos equipamentos	8
Tabela 2. Tipologia de resíduos.....	9
Tabela 3. Software e caracterização manual (1º ensaio)	17
Tabela 4. Software e caracterização manual (2º ensaio)	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Montagem do equipamento “Lixo”	11
Figura 2. Imagens do software (exemplos – 1ºensaio)	12
Figura 3. Adaptação do equipamento “Lixo”	15
Figura 4. Caracterização manual	17
Figura 5. Produção.....	18
Figura 6. Output.....	19
Figura 7. Registo fotográfico.....	20
Figura 8. Composição.....	21
Figura 9. Software e caracterização manual (1º e 2º ensaio).....	22
Figura 10. Detecção de tipologia de resíduo (alumínio).....	23
Figura 11. Leitura errónea	23
Figura 12. Identificação do tapete como tipologia de resíduos.....	24
Figura 13. Leitura em duplicado.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS

IA: Inteligência Artificial

RSU: Resíduos Sólidos Urbanos

EG – Entidade Gestora

SPV – Sociedade Ponto Verde

I&D – Investigação e Desenvolvimento

SGRU – Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos

KPIs – Índices de produção industrial

ECAL – Embalagens compósitas para alimentos líquidos

OEP – Outras embalagens de plástico

PET – Plástico de tereftalato de polietileno

PEAD – Polietileno de alta densidade

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

A inteligência artificial (IA) teve origem nos anos 50, com progressistas como Allen Newell e Herbert Simon, que fundaram, na Universidade Carnegie Mellon, o primeiro laboratório de IA (Jong, 2008). Em 1956, por John McCarthy, surgiu o termo IA no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), com o intuito de desenvolver “máquinas inteligentes” para auxílio da indústria fabril (Ihsanullah et al., 2022). A Inteligência Artificial (IA) evoluiu significativamente nos últimos 50 anos, passando de conceitos teóricos iniciais para aplicações práticas em diversos setores, incluindo a gestão de resíduos. Inicialmente explorada através de modelos computacionais e algoritmos simples, a IA passou a englobar redes neurais complexas, aprendizagem de máquina e técnicas de aprendizagem profunda que imitam as capacidades cognitivas humanas, acompanhando a própria evolução dos computadores e da sua capacidade de processamento (Ihsanullah et al., 2022; Jong, 2008).

Os primeiros pioneiros da IA focaram-se na resolução de tarefas específicas, mas o verdadeiro avanço deu-se com a introdução da aprendizagem automática e das redes neurais, permitindo que os sistemas "aprendessem" com os dados e melhorassem ao longo do tempo, sem a necessidade de programação explícita (Jong, 2008). A inteligência artificial, dos nossos dias, visa a análise de dados e posterior tomada de decisão com base na aprendizagem, raciocínio e repetição (Sarker, 2022). A grande vantagem da utilização da IA é o rápido processamento na combinação de grandes quantidades de dados, através da criação de algoritmos que possibilita ao software aprender padrões e desenvolver relações complexas entre diferentes variáveis por forma a produzir uma resposta automática ao menos tempo possível (Ihsanullah et al., 2022; Olawade et al., 2024; Wu et al., 2023).

No âmbito da gestão de resíduos, a IA tornou-se um fator decisivo, ao abordar os desafios dos sistemas de gestão de resíduos sólidos (Fang et al., 2023). As práticas tradicionais de gestão de resíduos, como a triagem manual e os processos mecânicos rudimentares, frequentemente têm dificuldades em lidar com o aumento do volume de resíduos gerados pelas sociedades modernas (Mounadel et al., 2023). A IA oferece soluções inovadoras para várias etapas do ciclo de gestão de resíduos, desde a previsão da geração de resíduos até à sua recolha, triagem e reciclagem (Wu et al., 2023). Mais concretamente, na indústria da reciclagem a aplicação da IA permite melhorias ao nível

do processo e aumento do desempenho, dos standards estabelecidos bem como no alcance das metas ambientais (Yu et al., 2021), pelo que é sugerido que o futuro da reciclagem contenha muita AI, através da implementação de algoritmos capazes de identificar os diferentes tipos de resíduos sejam eles plástico, cartão, metal, vidro e até resíduos perigosos (Wu et al., 2023).

Até ao momento, no sector do ambiente, a IA está já a ser implementada para resolver problemas relacionados à poluição do ar, de tratamento de água, contaminação de águas subterrâneas, bem como no planeamento e desenvolvimento de estratégias de recolha de resíduos sólidos urbanos (RSU)(Mounadel et al., 2023; Olawade et al., 2024). Mais recentemente, surge associada a processos mais específicos de recolha e classificação de resíduos (Dodampegama et al., 2024), deixando espaço a que se equacione o seu potencial no domínio da separação e classificação da reciclagem.

Tal como sugerem Ihsanullah et al. (2022) as aplicações de AI são inúmeras e multifacetadas quanto aos modelos e algoritmos que adotam que podem passar pela utilização de redes neurais artificiais (ANN) e de máquina vetorial de suporte (SVM), como também pela exploração de árvores de decisão (DT) ou até mesmo algoritmos genéticos (GA) e o algoritmo de K. Nearest Neighbor (KNN). O desafio que coloca às empresas de gestão de resíduos é compreender qual aquele que melhor se adequa à sua realidade (Mounadel et al., 2023; Olawade et al., 2024), sabendo que uma previsão precisa dos RSU é importante para o desenvolvimento de um plano de gestão de resíduos eficaz (Abdallah et al., 2020).

Ao longo deste projeto delinea-se o estado da arte e as principais linhas de decisão e ensaios que decorreram no projeto real que está a ser desenvolvido pela start-up “Lixo”, que procura explorar a utilização da inteligência artificial na classificação dos resíduos relacionados com as “embalagens amarelas”.

CAPÍTULO II – REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo pretende-se aprofundar o conceito e utilização da inteligência artificial na área dos resíduos. A IA tem-se demonstrado uma ferramenta robusta para enfrentar os desafios na gestão de resíduos sólidos urbanos (GRSU)(Ghahramani et al., 2022). Revisões bibliográficas recentes destacam a utilização de ferramentas de IA na GRSU sob prisma distintos que vão desde a previsão da geração de resíduos, à recolha e transporte e, mais recentemente, ao tratamento diferenciado do lixo (Abdallah et al., 2020; Fang et al., 2023; Ihsanullah et al., 2022; Mounadel et al., 2023). Técnicas de IA demonstraram possuir uma elevada precisão (72,8-99,95%) na identificação e triagem de resíduos (Fang et al., 2023). No entanto, persistem desafios, como a disponibilidade e confiabilidade dos dados, que limitam o avanço da IA nesta área (Ihsanullah et al., 2022; Mounadel et al., 2023). Apesar desses desafios, a IA continua a oferecer soluções potenciais para melhorar a eficiência e a sustentabilidade da GRS (Fang et al., 2023), pelo que ao longo deste trabalho se explora como podem ser usadas numa das áreas específicas da GRS – a reciclagem.

2.1 Modelos de IA para a reciclagem

A IA tem sido amplamente aplicada na reciclagem em diversas áreas-chave. Primeiramente, no reconhecimento de diferentes tipos de resíduos, uma vez que a IA consegue processar e analisar dados ao longo do processo de reciclagem, identificando materiais e detetando ineficiências (Dodampegama et al., 2024; Fang et al., 2023). Além disso, a IA é utilizada no rastreamento de resíduos, com algoritmos que permitem monitorizar os fluxos de resíduos em tempo real (Ghahramani et al., 2022). Na área de educação e consciencialização, o desenvolvimento de aplicações tem desempenhado um papel crucial, ao educar o público sobre a reciclagem através de chatbots, que respondem a perguntas sobre reciclagem correta e oferecem recomendações personalizadas com base nos hábitos de consumo dos utilizadores (Ng et al., 2024). A previsão de tendências é outra aplicação importante, onde a IA analisa dados históricos e em tempo real para antecipar padrões e tendências na reciclagem (Reza & Hassan, 2023). Por fim, a IA contribui para o ecodesign e desenvolvimento de novos tipos de resíduos, com modelos que auxiliam na pesquisa e criação de materiais mais fáceis de reciclar ou que tenham um menor impacto ambiental (Yu et al., 2021).

Estes modelos de IA têm por base a otimização e eficiência das operações de reciclagem, a redução de custos, aumento das taxas de reciclagem, a preparação para mudanças de paradigmas e de comportamentos de modo a tornar o sector da gestão de resíduos numa economia circular, eficaz e sustentável (Ghahramani et al., 2022; Sarker, 2022; Wu et al., 2023; Yu et al., 2021).

2.2 Benefícios versus cuidados da IA

Apesar dos progressos notáveis, ainda existem desafios na integração da IA na gestão de resíduos (Olawade et al., 2024). A disponibilidade, precisão dos dados e a integração dos sistemas continuam a ser obstáculos para a adoção generalizada da IA neste campo. No entanto, a investigação em curso e os avanços tecnológicos indicam que a IA terá um papel cada vez mais vital na transformação da gestão de resíduos, contribuindo para práticas mais sustentáveis e eficientes, sendo necessário compreender os seus reais benefícios e desvantagens.

Tal como já foi destacado a Inteligência Artificial (IA) é uma ferramenta poderosa e aporta um conjunto de benefícios quando aplicada de forma adequada (Fang et al., 2023; Ihsanullah et al., 2022; Reza & Hassan, 2023), mas também exige alguns cuidados importantes (Olawade et al., 2024). Um dos principais benefícios reside na automação de tarefas, onde a IA pode realizar tarefas repetitivas e rotineiras de forma eficiente, liberando tempo para atividades mais complexas (Olawade et al., 2024; Rukmani et al., 2018). Além disso, a IA tem uma enorme capacidade de analisar grandes volumes de dados rapidamente, permitindo identificar padrões e obter insights que seriam difíceis ou impossíveis de perceber manualmente (Ihsanullah et al., 2022; Mounadel et al., 2023). Um outro benefício é a personalização (Mounadel et al., 2023), muitas vezes equacionado como a possibilidade de oferecer experiências adaptadas a cada utilizador, como recomendações de produtos em plataformas de e-commerce, melhorando a satisfação do cliente e aumentando as vendas. No domínio da gestão de resíduos esses sistemas são desenvolvidos para se adaptarem a diferentes necessidades, oferecendo soluções personalizadas para as autoridades de gestão de resíduos, de forma a melhorar a tomada de decisões e o planeamento operacional (Mounadel et al., 2023). Isto é mais evidente em áreas como a previsão de procura e o agendamento dinâmico, onde a IA personaliza os horários de recolha e ajusta as rotas em tempo real, de acordo com os dados obtidos em tempo real (Ihsanullah et al., 2022; Reza & Hassan, 2023).

No domínio da eficiência operacional, a IA ajuda as empresas a otimizar processos, reduzindo custos e melhorando a gestão de stocks e logística (Fang et al., 2023). A IA também impulsiona a inovação em produtos e serviços, facilitando o desenvolvimento de tecnologias avançadas, como veículos autónomos (Olawade et al., 2024). Na educação no geral e em particular no domínio da gestão de resíduos pode ser personalizada com recurso ao uso da AI, adaptando o conteúdo às necessidades específicas de cada aluno (Ng et al., 2024). E, no que se refere à sustentabilidade, a IA contribui de forma significativa, otimizando o uso de recursos naturais, melhorando a eficiência energética e auxiliando na gestão de resíduos (Abdallah et al., 2020; Yu et al., 2021).

No entanto, com a aplicação da IA, é essencial ter em conta certos cuidados. A privacidade e a segurança dos dados são fundamentais, exigindo que as informações pessoais recolhidas pela IA sejam protegidas e tratadas de forma segura, com os utilizadores devidamente informados sobre o uso dos seus dados. A transparência também é crucial: as decisões tomadas por sistemas de IA devem ser compreensíveis e justificáveis, especialmente em áreas críticas como a saúde, finanças e justiça.

Na revisão de literatura efetuada são apresentados diversos riscos, sendo a dependência excessiva da IA um dos principais, que pode desumanizar processos e decisões, afastando o componente humano essencial em muitas situações (Novelli et al., 2023). Os mesmos autores apontam que no mercado de trabalho, a automação pode ter impactos, com a substituição de funções por tecnologia, o que torna necessário desenvolver estratégias de apoio aos trabalhadores afetados. Regulamentação adequada também é imprescindível, garantindo o uso responsável e seguro da IA, com supervisão rigorosa do desenvolvimento e implementação dessas tecnologias. A ética e a responsabilidade devem orientar todo o desenvolvimento e uso da IA, com organizações sendo responsabilizadas pelos impactos que as suas tecnologias podem provocar na sociedade. Por fim, sugerem ser essencial promover a educação e a consciencialização sobre IA, para que o público compreenda os seus benefícios e riscos, e garantir que os sistemas críticos que utilizam IA sejam robustos e seguros, evitando falhas que possam comprometer a segurança das pessoas.

2.3 Conceito e objetivos do projeto

Ao longo dos últimos anos, com o avanço tecnológico, as centrais de triagem são autênticas fábricas de produção industrial, com foco na qualidade do produto e na redução do desperdício (refugo) (Wu et al., 2023). A estratégia das empresas de gestão de resíduos da Região Autónoma dos Açores tem e deve estar alinhada com a estratégia nacional e europeia e optar sempre pelas melhores soluções, as mais eficientes, mais eficazes, economicamente viáveis e que permitam a implementação de boas práticas ambientais, recorrendo a operacionais formados e dedicados e instalações dotadas com as melhores tecnologias disponíveis para a escala da região.

Sendo por isso que a empresa de gestão de resíduos que “trata” todo o ecoponto amarelo da ilha de São Miguel optou por implementar na sua linha de triagem automatizada IA por forma a melhorar a sua performance diária de produção.

Tendo como objetivos o aumento do potencial de reciclagem do centro de triagem, aumentar e melhorar as taxas de reciclagem; encontrar os pontos fracos e as perdas existentes ao longo da linha de produção; controlar a qualidade do produto final evitando a contaminação por resíduos que podem atrapalhar ou inviabilizar o reaproveitamento desses materiais e aumentar a capacidade de prever e atuar em tempo real no que diz respeito ao planeamento e organização do processamento de resíduos provenientes do ecoponto de amarelo. Como indicadores de análise do projeto foram definidos dois: diminuição da taxa de refugo e aumento da taxa de valorizáveis (ecoponto amarelo).

2.4 Contextualização do projeto

Este projeto teve origem numa iniciativa de uma das entidades gestoras pela gestão de resíduos de embalagens em Portugal, a SPV, Sociedade Ponto Verde, que no âmbito da sua atividade promove apoios financeiros para estudos e projetos de investigação, desenvolvimento e inovação (I&D) orientados para a melhoria de processos relevantes no âmbito do funcionamento de gestão de resíduos de embalagens, nomeadamente para a prevenção ao nível dos processos produtivos e melhoria dos processos de ecodesign de produção e de valorização de resíduos (reciclagem ou outros tipos), com especial ênfase em novas aplicações dos materiais reciclados, com vista a promover a sua reincorporação nas cadeias de valor, e na valorização de materiais atualmente enviados para eliminação.

O plano I&D promove o crescimento sustentável por meio de uma economia circular e de uma sociedade informada e, portanto, a SPV criou o projeto intitulado Resource - Programa de Aceleração da Inovação que consiste num programa de inovação aberto e colaborativo que visa trazer inovação e soluções disruptivas, centrado na economia circular e na transição digital dos resíduos de embalagens, dando resposta a desafios concretos que retomadores, SGRU, empresas de recolha... têm no seu dia a dia para facilitar e melhorar a eficácia e eficiência do seu trabalho.

A Musami, empresa de gestão de resíduos urbanos da ilha de São Miguel, em parceria com a start-up francesa “Lixo” concorreu com o projeto piloto de implementação no centro de triagem, no tratamento das embalagens provenientes do ecoponto de amarelo, um sistema de reconhecimento visual integrado com uso de IA, tendo por base a otimização, dinamização e ampliação do alcance das mais diversas operações. Este é um projeto piloto e novo que será implementado pela primeira vez na Europa num centro de tratamento de resíduos uma vez que, já existem, sistemas semelhantes e que já são alvo de estudo há vários anos, nas viaturas de recolha de resíduos.

O projeto tem duração de um ano. Sendo da responsabilidade da start-up a implementação dos equipamentos para captura das imagens dos resíduos, criação de algoritmos de análise de imagem que são executados diretamente nos dispositivos e plataforma de monitorização de KPIs (rendimento, taxa de pureza, composição

detalhada do fluxo, percentagem de qualidade de alimentação da linha) em tempo real. Enquanto que a parceira regional, Musami, terá de analisar os dados diários, reportes diários da eficiência do sistema, monitorização dos resultados, potenciar/disponibilizar meios humanos para os ensaios e caracterizações, elaboração de relatórios e apoio in loco.

2.5 Projetos semelhantes

Este, como já foi referenciado anteriormente, é um projeto piloto e único na Europa. Uma vez que os projetos que utilizam sistemas semelhantes estão a ser testados nas viaturas de recolha de resíduos de embalagens, com vista à implementação do pagamento do “poluidor pagador” em que a IA identifica as embalagens contaminantes da recolha, ou seja, numa recolha de amarelo a IA faz o reconhecimento de embalagens que não sejam de plástico ou de metal, sendo identificado a quantidade e emitido uma fatura ao munícipe.

Relativamente às centrais de triagem existem algumas empresas no mercado que começam a pensar/utilizar a IA para dinamizar os seus sistemas de infravermelhos, sensores óticos, como é o caso da Picvisa, com a criação do ecoflow que consiste num sistema semelhante ao da start-up “Lixo” com a diferença de que a Picvisa já se encontra no mercado da gestão de resíduos há várias décadas possuindo por isso uma base de dados alargada e que vai de encontro ao mercado português, no entanto só agora começa a dar os primeiros passos para a implementação nas centrais como controlo e planeamento da produção.

CAPÍTULO III- METODOLOGIA

Para implementação do projeto na central de triagem com visa a diminuir o refugo e aumentar a eficácia da linha de produção através de um sistema de reconhecimento visual integrado com uso de inteligência artificial com autoaprendizagem (correção da iluminação e sombras) são necessárias duas câmaras, dois computadores, quatro tubos de iluminação e a respetiva estrutura de suporte bem como o respetivo software de caraterização de resíduos.

Os dois equipamentos, dispositivos de captura de imagens, cujas características se encontram descritas na Tabela1 foram colocados a montante e jusante da linha de produção, ou seja, início e fim da linha de produção.

Tabela 1- Características dos equipamentos

Performance	ACURÁCIA	>95%
	VELOCIDADE DO TAPETE	0.1 a 4m/seg
	LARGURA DO TAPETE	0,3 a 2 m

2 unidades	Câmera	ENTRADA	USB
		DIMENSÃO	100mm x 100mm x 250mm
		ANÁLISE DE OBJETOS POR FRAME	Ilimitado

2 unidades	Computador	DIMENSÃO	318mm x 134mm x 280mm
		ALIMENTAÇÃO	230 VAC – 60W
		LIGAÇÃO À INTERNET	1 para cima 1 para baixo (Mb/s)

4 unidades	Tubos de iluminação	DIMENSÃO	600 mm x \varnothing 75 mm
		SELAGEM	IP69
		Potência Elétrica	20W

Fonte: Protocolo do projeto “Lixo”

A seguir passou-se ao desenvolvimento, pela start-up, de algoritmos de IA por forma a identificar e reconhecer resíduos valorizáveis e não valorizáveis e a criação da plataforma de monitorização com os KPIs (rendimento, taxa de pureza, composição do fluxo e percentagem de qualidade da alimentação da linha) em tempo real. Os equipamentos devem identificar os diversos tipos de resíduos, apresentados na Tabela 2, e considerar os restantes como contaminantes, impróprios ou refugo.

O último passo consiste na caracterização manual e pesagem dos resíduos valorizáveis e não valorizáveis consequentes dos ensaios, por forma a comparar os resultados do software com os reais permitindo assim a afinação do algoritmo, tendo em conta a tipologia de resíduos apresentada na tabela 2.

Tabela 2- Tipologia de resíduos

TIPO DE RESÍDUO - DESIGNAÇÃO		SÍMBOLO	REGISTO FOTOGRÁFICO		
PORTUGUÊS	INGLÊS				
PAPEL EXTRAURBANO	PAPER				
CARTÃO	CARDBOARD				
ECAL Embalagens Compositas para Alimentos Líquidos	ECAL Composite packaging for liquid foods				
EPS Poliestileno	EPS Polystyrene				
PEAD Poliétileno de Alta Densidade	HDPE High Density Polyethylene				
Filme Poliétileno de baixa Densidade	PEBD Low Density Polyethylene				
PET Poliétileno Tereftalato	PET Polyethylene Terephthalate				
PET - ÓLEO PET - GORDUROSO	PET - OIL				
TERMOFORMADOS DE PET	PET THERMOFORMING				
METAL FERROSO	STEEL				
METAL NÃO FERROSO	ALUMINIUM				
PLÁSTICO MISTO 3 - Polidreno de Vinila 7 - Outros	MIXED PLASTIC 3 - Polyvinyl chloride 7 - Other				
EMBALAGENS DE PP Polipropileno	Polypropylene PACKAGING				
VIDRO	GLASS				

Fonte: Especificações Técnica

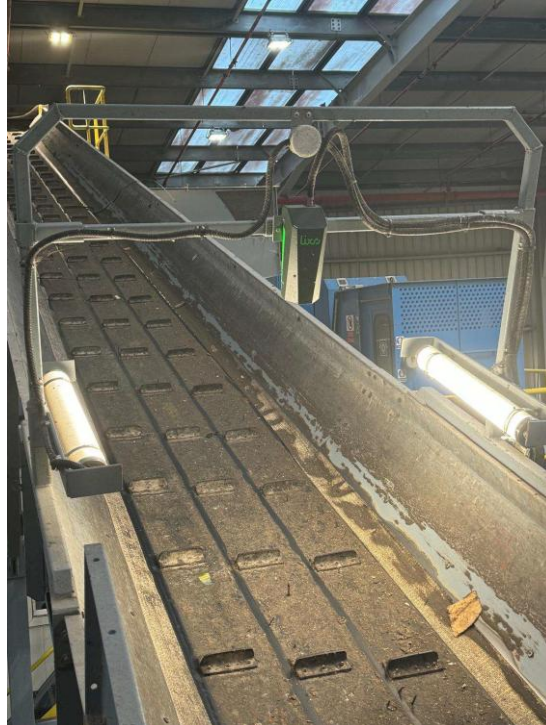
CAPÍTULO IV- ENSAIOS

4.1 Desenvolvimento “Lixo”

Após a implementação in loco dos dois equipamentos, a montante e a jusante da linha de produção, Figura 1, procedeu-se à verificação das imagens no software para avaliar a qualidade, a iluminação, a velocidade a que passavam e a sobreposição dos resíduos.

Tendo em consideração a dificuldade do projeto e as afinações necessárias para o tornar viável, optou-se por, numa primeira fase trabalhar e avaliar apenas o sensor a jusante. Esta opção deveu-se ao facto de que a jusante, após a triagem efetuada por máquinas e mão de obra, a quantidade de resíduos que a “Lixo” teria de ler seria em muito inferior à quantidade existente no início da linha.

Figura 1 – Montagem do equipamento “Lixo”



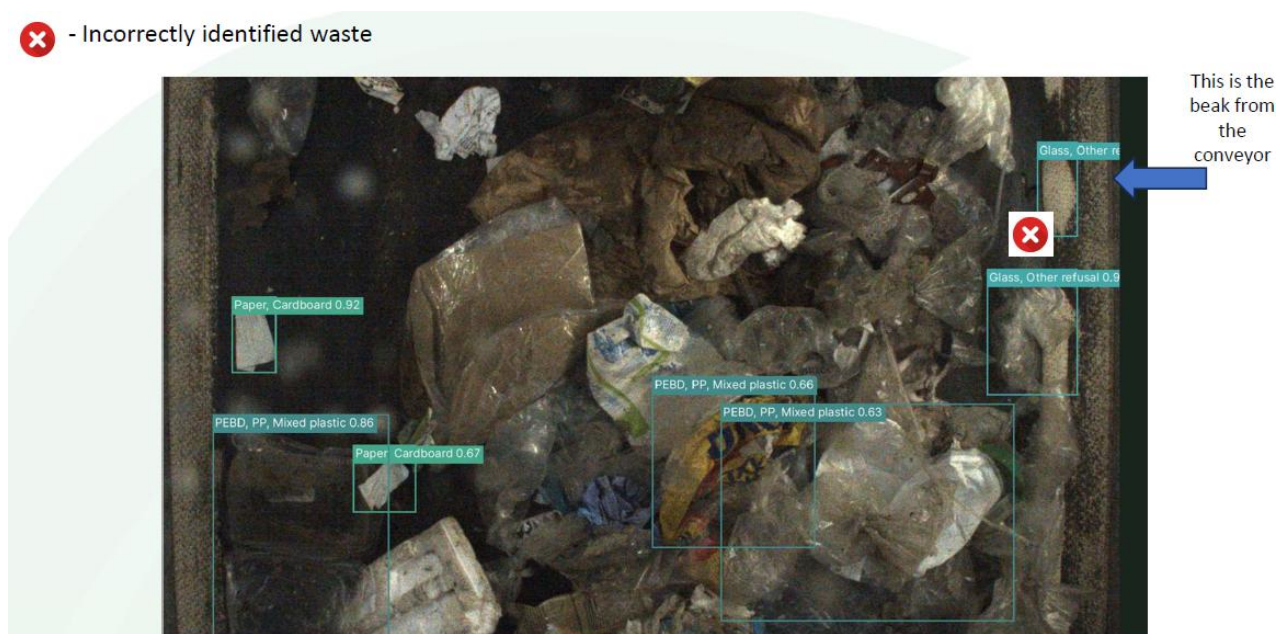
Fonte: Centro de triagem

O passo seguinte consistiu na instrução da start-up “lixo”, nomeadamente no que diz respeito às nomenclaturas (tipos de resíduos), sendo uma start-up francesa habituada com designações e regras de reciclagem diferentes das praticadas em Portugal.

Foi depois necessário adaptar a interface do software, que se encontrava em inglês, melhoria efetuada do primeiro ensaio para o segundo, para português de modo a efetuar uma monitorização diária da informação fotográfica dada pelo programa, Figura 2, identificando falhas, reportando problemas e apresentando soluções de modo a ir de encontro com os objetivos delineados para o projeto. Foram realizados dois ensaios/testes, o primeiro, três meses após o início do projeto e o segundo, seis meses após o primeiro ensaio.

No primeiro exemplo da Figura 2, detetou-se que o software não consegue identificar, a maioria, dos resíduos que se encontram na passadeira, quando esta está com aglomerado de material.

Figura 2 – Imagens do software (exemplos – 1º ensaio)



Fonte: Software “Lixo”. Exemplo 1

No exemplo abaixo, Figura 2ª, mesmo com pouco material e espaçado, o software não identifica cerca de 50% dos resíduos corretamente.

Figura 2a – Imagens do software (exemplos – 1º ensaio)



Fonte: Software “Lixo”. Exemplo 2

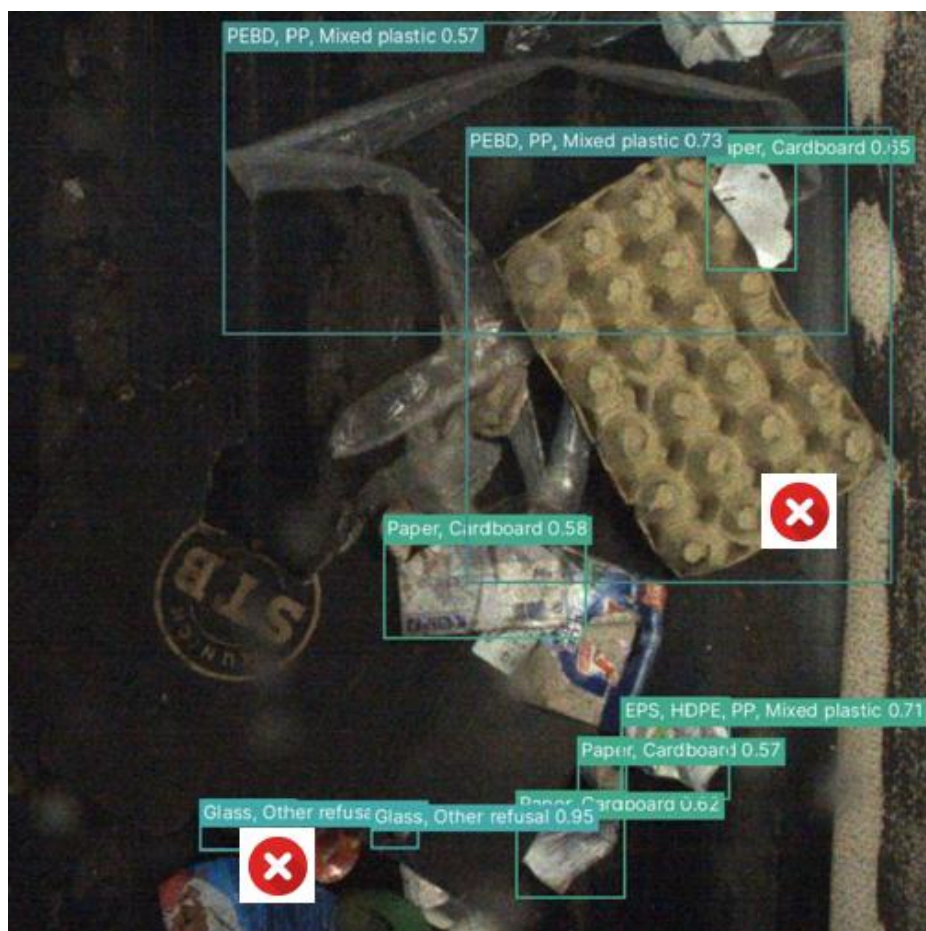
No exemplo 3, 4, 5 e 6 o software apresenta muita dificuldade em identificar: papel/cartão, ecal, OEP contabilizando estes tipos de refugo como vidro/refugo.

Figura 2b – Imagens do software (exemplos – 1º ensaio)



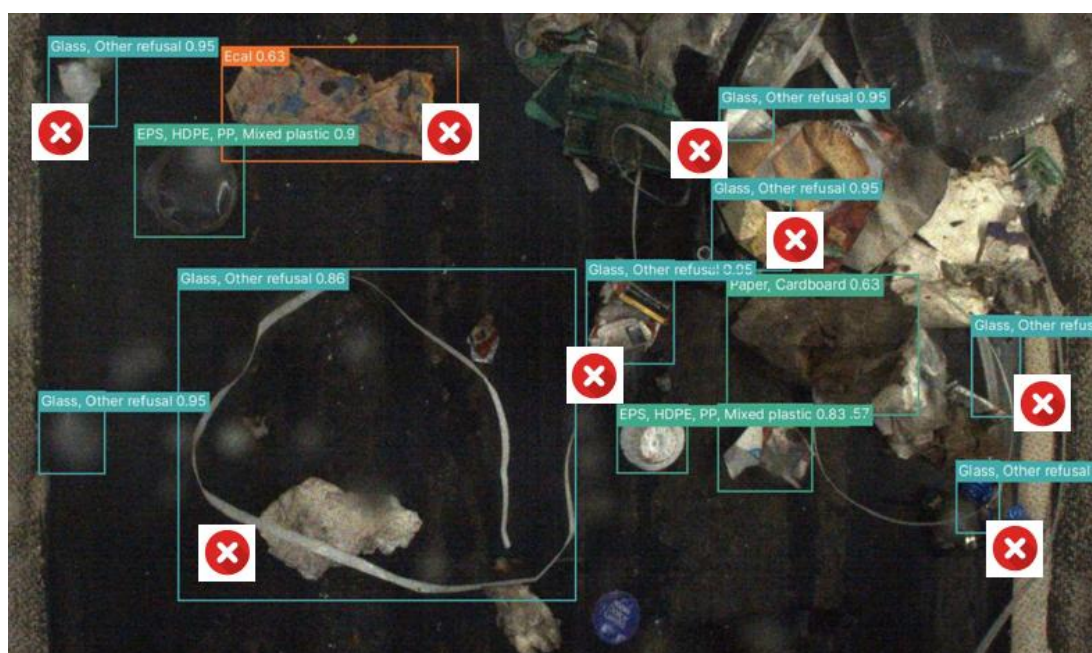
Fonte: Software “Lixo”. Exemplo 3

Figura 2c – Imagens do software (exemplos – 1º ensaio)



Fonte: Software “Lixo”. Exemplo 4

Figura 2d – Imagens do software (exemplos – 1º ensaio)



Fonte: Software “Lixo”. Exemplo 5

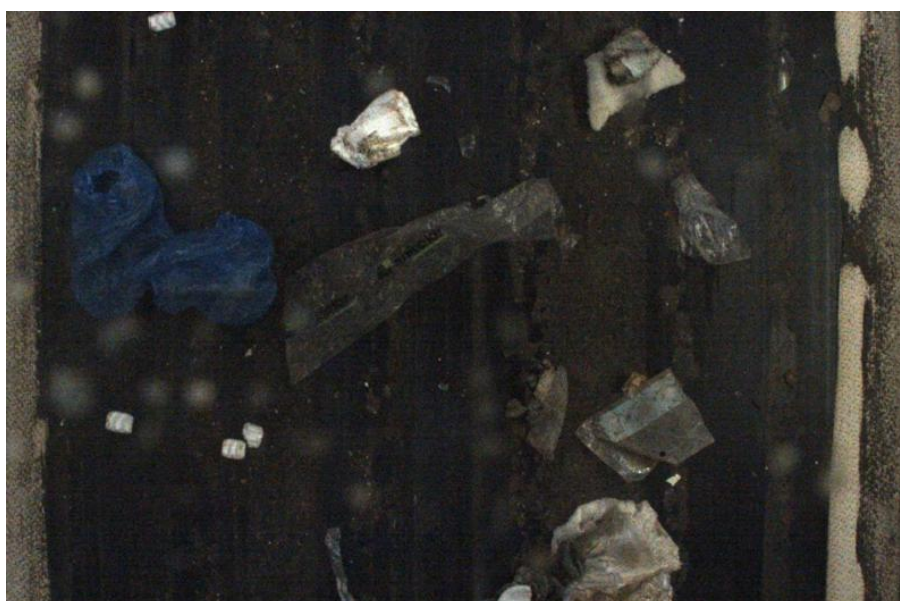
Figura 2e – Imagens do software (exemplos – 1º ensaio)



Fonte: Software “Lixo”. Exemplo 6

No último exemplo da Figura 2, (Figura 2f) detetou-se que, muitas das vezes, quando o volume de resíduos era baixo, não existia qualquer tipo de leitura por parte do sensor ótico (correta ou incorreta).

Figura 2f – Imagens do software (exemplos – 1º ensaio)



Fonte: Software “Lixo”. Exemplo 7

Após análise dos registos fotográficos, resultados dos dados, foi necessário proceder a

diversas afinações tanto do software como da correção da iluminação, aplicação de barreiras, Figura 3, introdução de procedimentos de verificação/limpeza diária das câmaras e sensores.

Figura 3 – Adaptação do equipamento “Lixo”



Fonte: Centro de triagem

Os testes/ensaios consistiam na caracterização da produção de uma hora, todos os resíduos valorizáveis e não valorizáveis, com análise dos valores/percentagem apresentados pelo programa e das fotografias facultadas pelo software, mais de cinco mil fotografias, comparando depois com os dados provenientes da caracterização manual.

4.2 Ensaio - método

Para a verificação da percentagem de resíduos de embalagens de papel/cartão, filme/plástico e metal ferroso/não, ferroso foi utilizada a metodologia descrita abaixo, esta é de acordo com as especificações técnicas de cada tipologia de resíduo:

1. Preparação da instalação, para que os dados fossem fidedignos, a instalação foi limpa e organizada e preparada para receber uma hora de produção, ou seja, todas as caixas, baias e compactadores vazios.
2. Triagem manual e automática dos resíduos processados.
3. Pesagem de todos os resíduos valorizáveis e não valorizáveis.
4. Análise e verificação das percentagens e fotografias dos dados apresentados pelo software.
5. Análise e verificação das percentagens e fotografias dos dados resultantes da caracterização manual.
6. Comparação dos resultados.
7. Identificação de problemas.
8. Correção/afinação das situações anómalas.
9. Período de análise diário, dos reportes fotográficos e percentagens provenientes do software.
10. Realização de novo ensaio com vista à averiguação da eficácia da “Lixo”, dando-se por concluído o projeto quando a margem de erro for considerada aceitável (-1%).

4.2.1 Análise do primeiro ensaio

No mês de setembro de dois mil e vinte e três, após cerca de três meses do início do projeto “Lixo”, foi elaborado o primeiro ensaio.

O ensaio decorreu nas condições expostas acima. Sendo detetadas diversas anomalias na interpretação e reconhecimento dos resíduos, Figura 2, o que por sua vez se traduziu em diferenças muito significativas das percentagens dos dados, fazendo com que a informação disponibilizada pela Lixo estivesse, em muito, desviada da realidade, Tabela 3, e em nada correspondesse à caracterização manual, Figura 4.

Tabela 3- Software e caracterização manual (1º ensaio)

Matrix "Lixo"	SUB-CATEGORIA	PERCENTAGEM "Lixo" (%)	PERCENTAGEM "Musmi" (%)
Fibre	paper and cardboard	6,60%	34,17%
Ela	ela	0,10%	0,97%
Other Rigid Plastic	EPS & HDPE & Mixed Plastic & Polypropylene Packaging	6,40%	7,36%
Other Flexible Plastic	PEBD & Mixed Plastic & Polypropylene Packaging	59,20%	3,13%
PET bottle	PET&Pet oil	10,80%	0,42%
Pet punnet	Pet Thermoforming	0,30%	0,54%
Metal	steel&aluminium	0,70%	0,91%
Glass / Other Refusal	glass, landfill waste, nom-packaging	15,90%	52,51%
		100,00%	100,00%

Fonte: Software “Lixo” e caracterização

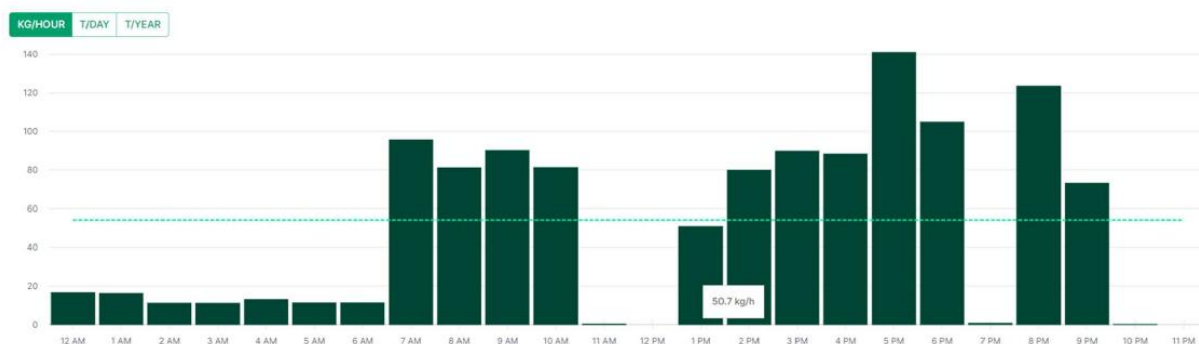
Figura 4 – Caracterização manual



Fonte: Centro de triagem

Outros problemas detetados durante o primeiro ensaio foram: dificuldade na interpretação da informação, devido à diferença no que concerne às nomenclaturas dos resíduos nos dois países; identificação de outras embalagens de plástico e embalagens de filme em simultâneo em duas categorias diferentes de resíduos, contabilizado como plástico rígido e plástico flexível; as horas de produção apresentadas pela start-up não correspondiam à realidade, ou seja, a operação ocorria nos dias uteis durante sete horas, entre a 07h00 e as 15h00, e o software apresentava dados em períodos diferentes e fins de semana, Figura 5.

Figura 5 – Produção



Fonte: Software “Lixo”

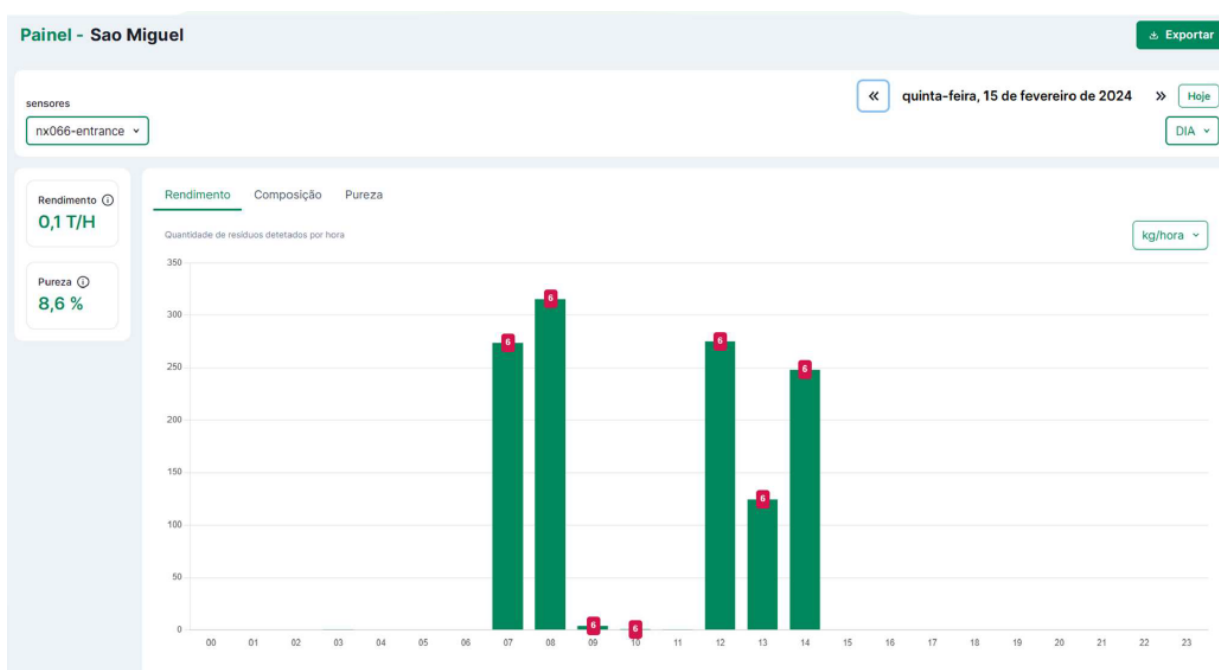
Neste primeiro ensaio foi notório de que a start-up teria de melhorar o seu algoritmo, através de uma base de dados mais alargada e abrangente para ir de encontro à necessidade do projeto, melhorando o sistema de reconhecimento e interpretação dos diferentes tipos de resíduos.

4.2.2 Análise do segundo ensaio

No período decorrido entre o primeiro e segundo ensaio, a start-up foi desenvolvendo, aperfeiçoando e adaptando a base de dados, algoritmo, interface de acordo com o interesse do parceiro regional. Neste período a Musami efetuou a monitorização, verificação diariamente com intuito a melhorar a eficiência do sistema de IA.

Relativamente à interface do programa e atualização do software, este foi traduzido para português bem como as nomenclaturas das tipologias de resíduos, com possibilidade de exportar os dados em ficheiro Excel, opção de escolha do sensor a verificar (montante ou jusante), seleção da data que se pretende analisar os dados, nomeadamente dos KPIs, (rendimento, composição e pureza) durante todas as horas de produção, Figura 6.

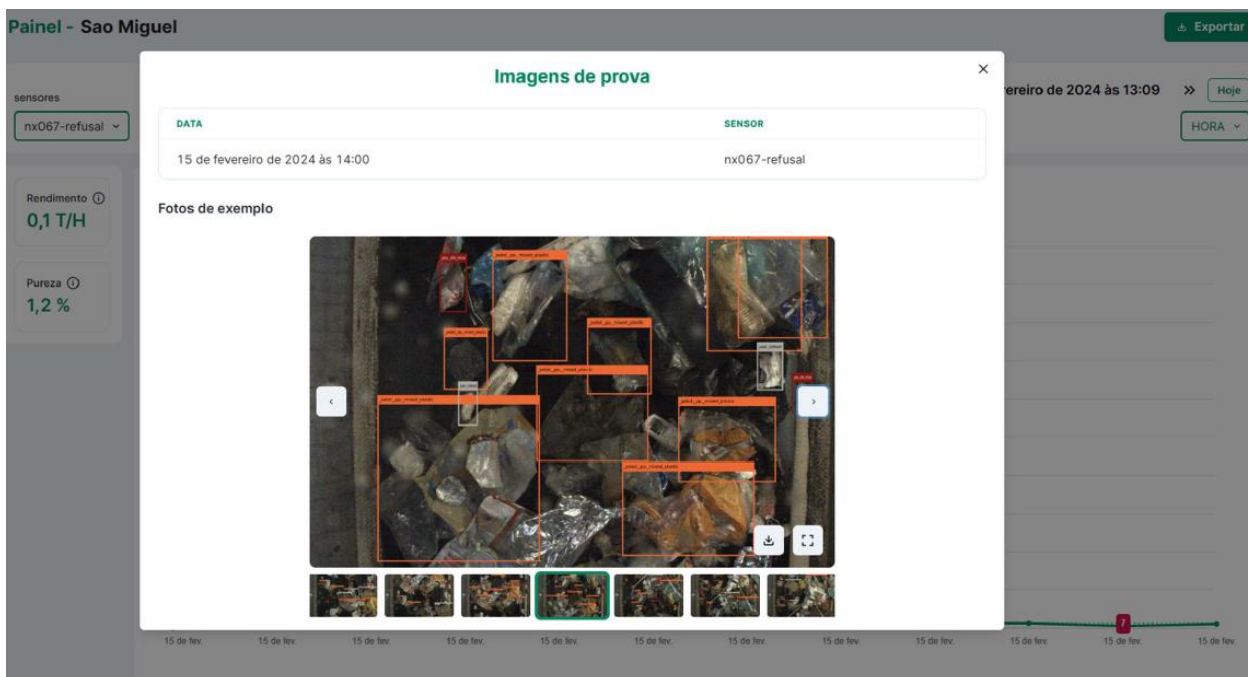
Figura 6 – Output



Fonte: Software “Lixo”

Outro upgrade do sistema foi a visualização das fotografias no próprio software, Figura 7, sem ser necessário o envio posterior pela start-up. No entanto e devido ao volume de registo fotográfico por segundo, apenas ficava disponível para visualizar cinco imagens por dia, o que tornava incomportável com um dos principais objetivos do projeto, que consistia na adaptação/correção do planeamento em tempo real.

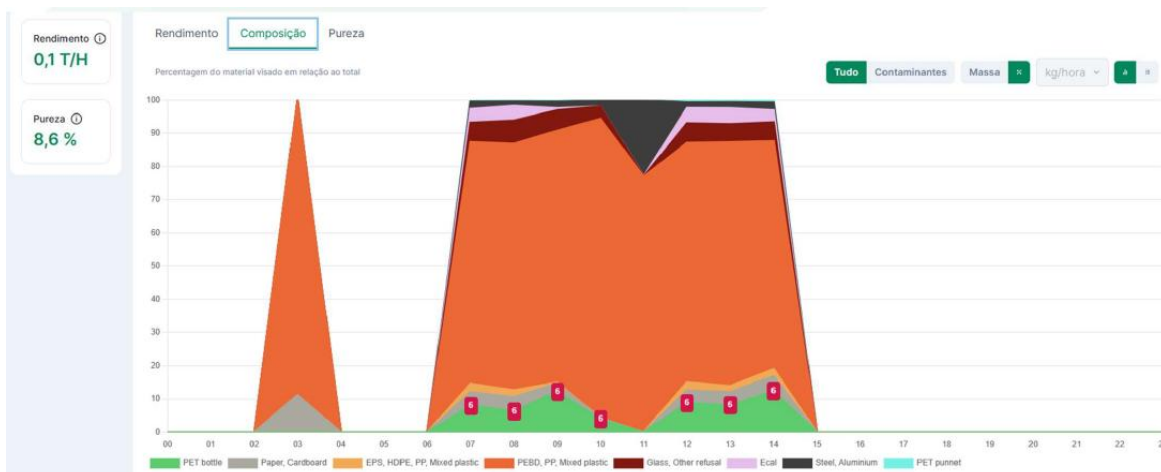
Figura 7 – Registo fotográfico



Fonte: Software “Lixo”

O segundo ensaio ocorreu nos mesmos moldes e metodologia que o primeiro, sendo apresentado na figura 8 os resultados do software e posteriormente a Tabela 4 referente à caracterização realizada in loco, manualmente, onde se pode comparar os resultados deste segundo teste.

Figura 8 – Composição



Fonte: Software “Lixo”

Tabela 4- Software e caracterização manual (2ºensaio)

		2º Test - february 2024	
Matrix "Lixo"	SUB-CATEGORIA	PERCENTAGEM "Lixo" (%)	PERCENTAGEM "Musami" (%)
Fibre	paper and cardboard	6,80%	18,06%
Ela	ela	4,40%	2,77%
Other Rigid Plastic	EPS & HDPE & Mixed Plastic & Polypropylene Packaging	3,80%	10,58%
Other Flexible Plastic	PEBD & Mixed Plastic & Polypropylene Packaging	70,80%	10,15%
PET botle	PET&Pet oil	1,20%	2,73%
Pet punnet	pet punnet	0,80%	0,48%
Metal	steel&aluminium	1,40%	2,89%
Glass / Other Refusal	glass, landfill waste, nom-packaging	10,80%	52,34%

Fonte: Software "Lixo" e caracterização

Apesar de haver uma melhoria significativa na identificação/reconhecimento e posterior contabilização dos dados nas diferentes tipologias do primeiro ensaio para o segundo, pode-se constatar que ainda existe muito trabalho a desenvolver.

O sistema de reconhecimento de IA terá de ser aperfeiçoado, pois o programa ainda apresenta imensos problemas na identificação correta dos diferentes tipos de resíduos, continua a não existir diferenciação entre plástico rígido e flexível, alguns resíduos não são identificados/reconhecidos de todo, outros são confundidos entre si, especialmente as embalagens de propileno com OEP, o HDPE com filme e o EPS como refugo.

4.2.3 Análise de resultados

Após o segundo ensaio, ocorrido em fevereiro 2024, tendo em consideração os resultados de ambos, Figura 9, voltou-se à monitorização e verificação diária da informação facilitada pelo software juntamente com a visualização das imagens, para correção das novas ou antigas anomalias e posterior ensaio com análise de resultados até ser atingido o objetivo do projeto-piloto, sendo certo de que seria um projeto moroso, com avanços e recuos tendo em conta o âmbito do mesmo.

Figura 9 – Software e caracterização manual (1º e 2º ensaio)

Matrix "Lixo"	SUB-CATEGORIA	2º Test - fevereiro 2024		1º Test - setembro 2023	
		PERCENTAGEM "Lixo" (%)	PERCENTAGEM "Musami" (%)	PERCENTAGEM "Lixo" (%)	PERCENTAGEM "Musami" (%)
Fibre	paper and cardboard	6,80%	18,06%	6,60%	34,17%
Ela	ela	4,40%	2,77%	0,10%	0,97%
Other Rigid Plastic	EPS & HDPE & Mixed Plastic & Polypropylene Packaging	3,80%	10,58%	6,40%	7,36%
Other Flexible Plastic	PEBD & Mixed Plastic & Polypropylene Packaging	70,80%	10,15%	59,20%	3,13%
PET bottle	PET&Pet oil	1,20%	2,73%	10,80%	0,42%
Pet punnet	pet punnet	0,80%	0,48%	0,30%	0,54%
Metal	steel&aluminium	1,40%	2,89%	0,70%	0,91%
Glass / Other Refusal	glass, landfill waste, non-packaging	10,80%	52,34%	15,90%	52,51%

Fonte: Software “Lixo” e caracterização

O sistema de reconhecimento de IA terá de ser aperfeiçoado, pois o programa ainda apresenta imensos problemas/anomalias, tais como: identificação correta dos diferentes tipos de resíduos, continua a não existir diferenciação entre plástico rígido e flexível, alguns resíduos não são identificados/reconhecidos de todo, Figura 10; outros são confundidos entre si, especialmente as embalagens de propileno com OEP, o HDPE com filme e o EPS como refugo, Figura 11; identificação de partes do tapete transportador como tipologia de resíduo, Figura 12; duplicação de contagem da mesma tipologia de resíduo, Figura 13; as imagens não são em tempo real, apenas são apresentadas cinco fotos por dia e o software não emite alertas para resíduos perigosos, como por exemplo: armas, granadas e seringas.

O sistema contabiliza as embalagens de alumínio como outras embalagens de plástico, Figura 10.

Figura 10 – Detecção de tipologia de resíduo (alumínio)



Fonte: Software “Lixo”

O software não tem a capacidade de identificar e separar por tipologia os diferentes tipos de resíduos, nomeadamente: EPS, PEAD, OEP enquadrando-os todos na mesma tipologia, Figura 11.

Figura 11 – Leitura errónea



Fonte: Software “Lixo”

Como se pode verificar na figura, Figura 12, abaixo, o bavete que protege o tapete transportador da estrutura de suporte é identificado como se pertencesse a uma tipologia de resíduo, neste caso, está identificado como vidro.

Figura 12 – Identificação do tapete como tipologia de resíduos



Fonte: Software “Lixo”

O mesmo resíduo é contabilizado, pelo software, mais do que uma vez.

Figura 13 – Leitura em duplicado



Fonte: Software “Lixo”

CAPÍTULO V- CONCLUSÃO

A Inteligência Artificial (IA) está a revolucionar os processos de gestão de resíduos e reciclagem nas cidades inteligentes (Fang et al., 2023). Técnicas avançadas de reconhecimento de imagem, utilizando redes neurais, permitem a triagem automática de resíduos com uma certa precisão (Wu et al., 2023). Sistemas de triagem robótica guiados por IA foram implementados com sucesso em instalações de tratamento de resíduos em grande escala, melhorando as taxas de reciclagem e a pureza dos materiais, ao mesmo tempo que aumentam a segurança dos trabalhadores (Reza & Hassan, 2023). As aplicações de IA estendem-se à conversão de resíduos em energia, aos contentores inteligentes, à modelação da geração de resíduos e à deteção de despejos ilegais (Fang et al., 2023). A integração da IA no planeamento ambiental, através de quadros híbridos inteligentes, pode melhorar significativamente a eficiência e a precisão da gestão de resíduos (Yu et al., 2021). Estes avanços contribuem para a economia circular e a sustentabilidade ambiental, ao melhorar a recuperação de recursos e reduzir os resíduos. Porém, apesar dos inúmeros benefícios, ainda não se encontram grandes evidências na literatura da aplicação da IA na triagem do lixo na Europa.

Com este projeto pretende-se não só relatar os progressos alcançados, mas também contribuir para o reforço das evidências europeias neste domínio, contribuindo para o reforço teórico de alguns dos benefícios e evidenciando alguns dos desafios que as empresas enfrentam neste domínio, normalmente não muito evidenciados.

Tal como se constatou a aplicação da ferramenta de IA aporta benefícios, num movimento crescente. De agosto 2023 a agosto 2024, foram notórios os progressos, nomeadamente no que diz respeito: à visualização de imagens, no software mais user-friendly, na identificação mais precisa dos resíduos, principalmente do PET.

Relativamente aos indicadores do projeto, não foi ainda possível chegar a uma conclusão fiável, devido à forma deficitária de leitura/identificação dos materiais, pelo que a taxa de refugo e taxa de valorizáveis verificadas são bastante dispare quando efetuada a caracterização manual e quando efetuada pelo equipamento, sendo que a taxa de refugo apurada manualmente situava-se nos 52% enquanto que pelo software a mesma taxa apresentou valores de 11%-16% , por sua vez a taxa de valorizáveis apurada manualmente rondava os 48% e pelo software a mesma taxa apresentava valores entre os 89%-84%.

A inteligência artificial é, sem dúvida, o futuro das centrais de triagem, embora ainda haja um longo caminho a percorrer. A IA aplicada na gestão de resíduos traduz-se num projeto com potencialidade na busca do aumento de eficiência do sistema e na contribuição efetiva para o alcance de metas de recuperação de resíduos valorizáveis multimaterial existentes atualmente.

Para dar continuidade ao projeto a start-up “Lixo” para além dos sensores de imagem, já existentes, esta necessita do complemento de infravermelhos, adaptados e testados tornando os equipamentos em sistemas complexos, com uma base de dados mais extensa para ir ao encontro dos objetivos de instalações economicamente viáveis, isto só será possível com equipamentos que nos deem fiabilidade de dados/informação e que permitam a tomada de decisão em tempo real.

REFERÊNCIAS

- Abdallah, M., Abu Talib, M., Feroz, S., Nasir, Q., Abdalla, H., & Mahfood, B. (2020). Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review. *Waste Management*, *109*, 231-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.057>
- Dodamegama, S., Hou, L., Asadi, E., Zhang, G., & Setunge, S. (2024). Revolutionizing construction and demolition waste sorting: Insights from artificial intelligence and robotic applications. *Resources, Conservation and Recycling*, *202*, 107375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107375>
- Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(4), 1959-1989. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3>
- Ghahramani, M., Zhou, M., Molter, A., & Pilla, F. (2022). IoT-Based Route Recommendation for an Intelligent Waste Management System. *IEEE Internet of Things Journal*, *9*(14), 11883-11892. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3132126>
- Ihsanullah, I., Alam, G., Jamal, A., & Shaik, F. (2022). Recent advances in applications of artificial intelligence in solid waste management: A review. *Chemosphere*, *309*, 136631. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136631>

- Jong, K. A. D. (2008). Evolving intelligent agents: A 50 year quest. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 3(1), 12-17. <https://doi.org/10.1109/MCI.2007.913370>
- Mounadel, A., Ech-Cheikh, H., Lissane Elhaq, S., Rachid, A., Sadik, M., & Abdellaoui, B. (2023). Application of artificial intelligence techniques in municipal solid waste management: a systematic literature review. *Environmental Technology Reviews*, 12(1), 316-336. <https://doi.org/10.1080/21622515.2023.2205027>
- Ng, D. T. K., Su, J., & Chu, S. K. W. (2024). Fostering secondary school students' AI literacy through making AI-driven recycling bins. *Education and Information Technologies*, 29(8), 9715-9746.
- Novelli, C., Casolari, F., Rotolo, A., Taddeo, M., & Floridi, L. (2023). Taking AI risks seriously: a new assessment model for the AI Act. *AI & SOCIETY*, 1-5.
- Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., & Oladapo, B. I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2(2), 244-263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001>
- Reza, M., & Hassan, M. (2023). AI-Driven solutions for enhanced waste management and recycling in urban areas. *International Journal of Sustainable Infrastructure for Cities and Societies*, 8(2), 1-13.
- Rukmani, P., Teja, G. K., Vinay, M. S., & Reddy K, B. P. (2018). Industrial Monitoring

Using Image Processing, IoT and Analyzing the Sensor Values Using Big Data. *Procedia Computer Science*, 133, 991-997. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.077>

Sarker, I. H. (2022). AI-Based Modeling: Techniques, Applications and Research Issues Towards Automation, Intelligent and Smart Systems. *SN Computer Science*, 3(2), 158. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01043-x>

Wu, T.-W., Zhang, H., Peng, W., Lü, F., & He, P.-J. (2023). Applications of convolutional neural networks for intelligent waste identification and recycling: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 190, 106813. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106813>

Yu, K. H., Zhang, Y., Li, D., Montenegro-Marin, C. E., & Kumar, P. M. (2021). Environmental planning based on reduce, reuse, recycle and recover using artificial intelligence. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106492>

https://pt.wikipedia.org/wiki/Intelig%C3%Aancia_artificial#

<https://pt.linkedin.com/pulse/evolu%>

<https://blog-parceiros.ifood.com.br/vantagens-desvantagens-inteligencia-artificial>

<http://repositons.org/jspui/handle/123456789/3737>

<https://www.advantech.com/en-eu/resources/case-study/a-intelig%C3%Aancia-artificial-aplicada-aind%C3%BAstria-de-reciclagem-de-res%C3%ADuos>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20302269>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522031241>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X21000982>

UNIVERSIDADE DOS AÇORES
Faculdade de Economia e Gestão

Rua da Mãe de Deus
9500-321 Ponta Delgada
Açores, Portugal

2024



TP

Triagem de resíduos Triagem de resíduos de embalagens plásticas: Um modelo de gestão industrial para o ecoponto amarelo
Sónia Patrícia Medeiros Aguiar