

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* BETIM

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

ALLAN RAMALHO DE CAMPOS

**USO DE SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL INDUSTRIAL EM
PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE RSU**

BETIM
2026

ALLAN RAMALHO DE CAMPOS

**USO DE SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL INDUSTRIAL EM
PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE RSU**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Virgil Del Duca Almeida

Coorientador: Prof. Me. Maurício Monteiro da Silva

BETIM
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

C198u Campos, Allan Ramalho de

Uso de sistema de visão computacional industrial em plantas de processamento de RSU / Allan Ramalho de Campos. – 2026.

83 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Virgil del Duca Almeida

1. Visão computacional. 2. Resíduos sólidos. 3. Redes neurais. 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Campos, Allan Ramalho de. II. Título.

CDU: 519.6



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 23 dias do mês de Julho do ano de 2026, às dezessete horas, nas dependências do IFMG – *Campus* Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Virgil Del Duca Almeida e demais membros, Deliene Costa Guimarães Barros e Marcus Paulo Silva de Abreu. Nesta ocasião o discente **Allan Ramalho de Campos** do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, com registro acadêmico de número **0071303** do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**USO DE SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL INDUSTRIAL EM PLANTAS DE PROCESSAMENTO DE RSU**” e foi **APROVADO**, com **88** (oitenta e oito) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 20 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezoito horas. Para constar, eu, Virgil Del Duca Almeida, redigi a presente ata.

Betim, 23 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Virgil Del Duca Almeida, Professor**, em 23/07/2026, às 10:08, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Paulo Silva de Abreu, Testemunha**, em 23/07/2026, às 16:46, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Deliene Costa Guimaraes Barros, Professora Substituta**, em 24/07/2026, às 08:11, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2817730** e o código CRC **3F78D075**.

23792.000900/2026-21

2817730v1

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, Dilma e William Redd, que foram essenciais ao longo de todo o meu curso, me incentivando diariamente a trilhar minha jornada acadêmica e, com respeito e paciência, compreendendo os momentos em que não pude estar presente. Sem vocês nada disso seria possível.

Aos meus amigos, em especial à minha esposa, Nulhia Silva, e a todos os amigos que fiz durante essa trajetória, agradeço todo o apoio e a motivação que me deram. Sem o incentivo e a compreensão de vocês, não seria possível vencer essa caminhada, mas, com a amizade, o respeito e o apoio juntos, pudemos alcançar mais uma etapa em nossas vidas.

Sou grato ao professor orientador, Virgil Del Duca, e ao professor coorientador, Mauricio Monteiro, por todo o apoio, motivação e cuidado. Sua dedicação, seu zelo e seu comprometimento durante essa etapa foram essenciais para percorrer essa jornada e vencê-la com êxito. Meu muito obrigado por todo o apoio e aproveitamento para parabenizá-los pelo exemplo de paciência, compreensão e amizade e por serem excelentes orientadores.

Meu agradecimento especial a todo o corpo docente do Campus Betim do IFMG, do curso de Engenharia de Controle e Automação. Sou grato pela dedicação, pelo cuidado e pelo amor pela docência que eles tiveram e com tanto esmero lecionaram e transmitiram conhecimento aos alunos. Os guardarei com carinho em meu coração.

Por fim, agradeço também à empresa em que trabalho, aos meus gerentes e a cada funcionário que se dispôs a me ajudar com carinho e paciência, tornando possível a realização deste trabalho. Meu muito obrigado a cada um de vocês.

“Se a educação sozinha
não transforma a
sociedade, sem ela
tampouco a sociedade
muda.” (Paulo Freire)

RESUMO

O gerenciamento adequado de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um desafio logístico e ambiental, e a triagem eficiente é uma etapa crítica para a segurança e a viabilidade das plantas de processamento. A presença, em meio aos resíduos, de objetos rígidos e inflamáveis, como botijões de gás, no fluxo das esteiras de transporte industriais representa um grave risco operacional, podendo causar danos a britadores, perigo aos operadores e paradas na produção. Este trabalho apresenta uma proposta de intervenção tecnológica, baseada em sistemas de visão computacional integrados à automação, para a detecção desses objetos em tempo real. A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, de natureza exploratória e descritiva, em uma planta de RSU, associado a uma revisão da literatura. O levantamento de campo permitiu mapear os requisitos espaciais e temporais do maquinário, enquanto a revisão da literatura consolidou métricas de estado da arte sobre a precisão média (mAP) e a latência de inferência de redes neurais convolucionais em hardware de *edge computing*. Os resultados levam à proposição de uma arquitetura de intertravamento de segurança, acionada por evento, entre o sensor de visão e o Controlador Lógico Programável (CLP), cuja lógica foi verificada por comissionamento virtual em arranjo Software-in-the-Loop, com a planta modelada no Factory I/O e o controle executado em SoftPLC no CODESYS, integrados por Modbus TCP/IP. O trabalho demonstra a viabilidade matemática e cinemática da frenagem da esteira antes que a anomalia ultrapasse a zona de retirada manual segura, aumentando a segurança e a eficiência do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Automação Industrial. Visão Computacional. Resíduos Sólidos Urbanos. Intertravamento de Segurança. YOLO. Comissionamento Virtual.

ABSTRACT

The proper management of Municipal Solid Waste (MSW) remains a significant logistical and environmental challenge, with efficient waste sorting a critical requirement for ensuring the safety and operational reliability of waste-processing facilities. The presence of rigid and flammable objects, such as liquefied petroleum gas (LPG) cylinders, within the waste stream transported by industrial conveyor belts poses a severe operational hazard, potentially damaging shredding equipment, endangering personnel, and causing production downtime. This work proposes a technological intervention that integrates computer vision with industrial automation for the real-time detection of such hazardous objects. The research is conducted as an exploratory, descriptive case study at an MSW processing facility, complemented by a literature review. The field study identified the spatial and temporal constraints of the processing equipment, while the literature review consolidated state-of-the-art performance metrics regarding the mean average precision (mAP) and inference latency of convolutional neural networks deployed on edge computing platforms. Based on these findings, an event-driven safety interlocking architecture between the vision system and a Programmable Logic Controller (PLC) is proposed, and its logic is verified through virtual commissioning in a Software-in-the-Loop arrangement. The proposed architecture demonstrates the mathematical and kinematic feasibility of stopping the conveyor belt before a detected object leaves the safe manual-removal zone, thereby improving operational safety while minimizing process interruptions.

KEYWORDS: Industrial Automation. Computer Vision. Municipal Solid Waste. Safety Interlock. YOLO. Virtual Commissioning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Triagem, reciclagem e valorização de resíduos	29
Figura 2 - Modelo de triagem, processamento e reciclagem de RSU	30
Figura 3 - Esquema de uma <i>Convolutional Neural Network</i> (CNN)	33
Figura 4 - Visão computacional em planta industrial	36
Figura 5 - Inspeção de corpos estranhos em esteira.....	41
Figura 6 - Descarregamento de RSU no galpão de recepção	48
Figura 7 - Separação seletiva de resíduos de grande porte	49
Figura 8 - Revolvimento da massa de resíduos	50
Figura 9 - Esquema da estrutura modelada no Factory I/O	51
Figura 10 - Conjunto de esteiras	53
Figura 11 - Botijões de gás após atingirem a zona de trituração na planta	58
Figura 12 - Operador em posto de inspeção visual, portando haste mecânica de remoção ao lado da caçamba de contenção	59
Figura 13 - Configuração do servidor Modbus no Factory I/O	62
Figura 14 - Mapeamento dos pontos de I/O da cena simulada	63
Figura 15 - Configuração IP Codesys.....	63
Figura 16 - Declaração de variáveis Codesys	64
Figura 17 - Programação de entrada e saída Codesys	65
Figura 18 - Lógica de falha segura Codesys	66
Figura 19 - Comportamento da borda de subida do Codesys durante a detecção do <i>Metal Raw Material</i>	67
Figura 20 - Esteiras intertravadas durante a detecção do <i>Metal Raw Material</i>	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros da estrutura modelada	55
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de desempenho de arquiteturas YOLO em dispositivos de Edge Computing para triagem de resíduos	60
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREMA - Associação Brasileira de Empresas de Resíduos Sólidos e Ambientais

CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem

CLP - Controlador Lógico Programável

CNN - *Convolutional Neural Network* (Rede Neural Convolucional)

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

IA - Inteligência Artificial

IoT - *Internet of Things* (Internet das Coisas)

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

ISO - *International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)

KPI - *Key Performance Indicator* (Indicador-Chave de Desempenho)

LED - *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

mAP - *mean Average Precision* (Precisão Média)

NR - Norma Regulamentadora

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OPC-UA – *Open Platform Communications – Unified Architecture*

OPEX - *Operational Expenditure* (Despesas Operacionais)

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RGB - *Red, Green and Blue* (Vermelho, Verde e Azul)

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition* (Supervisão, Controle e Aquisição de Dados)

ST - *Structured Text* (Texto Estruturado)

TCP/IP - *Transmission Control Protocol / Internet Protocol*

UNEP - *United Nations Environment Programme* (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)

YOLO - *You Only Look Once* (Você só olha uma vez)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Contexto.....	17
1.2.	Problema de pesquisa	18
1.3.	Objetivos	20
1.3.1.	<i>Objetivo geral</i>	<i>20</i>
1.3.2.	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
1.4.	Hipóteses	21
1.5.	Justificativa	21
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1.	Gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU).....	24
2.1.1.	<i>Panorama global e nacional da geração de resíduos sólidos</i>	<i>24</i>
2.1.2.	<i>Políticas públicas e legislação ambiental brasileira (Lei 12.305/2010 e PNRS).....</i>	<i>26</i>
2.1.3.	<i>Caracterização das empresas de triagem, reciclagem e processamento de resíduos sólidos urbanos</i>	<i>28</i>
2.2.	Tecnologias aplicadas à triagem e tratamento de RSU.....	31
2.2.1.	<i>A tecnologia no escopo das empresas que manejam RSU.....</i>	<i>31</i>
2.2.2.	<i>Aplicações da Indústria 4.0 em plantas de processamento de resíduos.....</i>	<i>32</i>
2.2.3.	<i>Contribuições da automação para sustentabilidade e eficiência</i>	<i>34</i>
2.3.	Visão Computacional na Indústria e nas plantas de RSU	36
2.3.1.	<i>Fundamentos da visão computacional</i>	<i>36</i>

2.3.2.	<i>Arquitetura de sistemas de visão computacional.....</i>	38
2.3.3.	<i>Aplicações em esteiras industriais e plantas de processamento....</i>	40
2.3.4.	<i>A evolução da arquitetura YOLO na gestão de resíduos.....</i>	43
3.	METODOLOGIA.....	45
3.1.	Revisão teórica	45
3.2.	Levantamento de campo.....	45
3.3.	Estudo de caso, com sigilo da identidade da empresa	46
3.4.	Proposição da intervenção tecnológica e modelagem da planta em ambiente simulado	46
3.4.1.	<i>Descrição do processo e delimitação da fronteira do modelo</i>	47
3.4.2.	<i>Estrutura modelada e parâmetros adotados</i>	50
3.4.3.	<i>Premissas e limitações do modelo</i>	55
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1.	Diagnóstico operacional e mapeamento do fluxo de resíduos.....	57
4.2.	Análise ergonômica, insalubridade e custos operacionais (OPEX) ...	58
4.3.	Resultados da revisão da literatura.....	59
4.4.	Implementação em ambiente simulado e verificação da arquitetura de intertravamento	61
4.4.1.	<i>Configuração da comunicação via Modbus TCP/IP</i>	61
4.4.2.	<i>Programação da lógica de intertravamento.....</i>	64
4.4.3.	<i>Verificação do comportamento simulado.....</i>	67
4.5.	Cálculos cinemáticos e viabilidade de intertravamento.....	69

4.6.	Redundância de detecção e tratativa de falsos positivos.....	71
5.	CONCLUSÃO.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A – PROGRAMA DE INTERTRAVAMENTO EM LINGUAGEM STRUCTURED TEXT.....	83

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

O cenário do presente trabalho envolve as possibilidades que os recursos computacionais oferecem como solução para os mais variados problemas enfrentados pela sociedade, especialmente no modo de vida urbano, com foco no gerenciamento de resíduos produzidos pelo homem. Para melhor compreensão do alcance dessa realidade, consideram-se os dados observados nos últimos anos, em que o Brasil, assim como diversos outros países, tem enfrentado gargalos significativos na produção e na destinação dos resíduos sólidos urbanos. Entre 2022 e 2023, a população brasileira gerou uma média de 1,05 kg de resíduo por habitante por dia, o que equivale a um volume de cerca de 81 milhões de toneladas de RSU (Resíduos Sólidos Urbanos) no país (aproximadamente 383 kg/hab/ano), conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABREMA, 2024).

Dados divulgados pela Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Ambientais (ABREMA, 2024) destacam que, mesmo com a expressiva geração de RSU, mais de 90% desses resíduos são coletados pelos municípios; porém, apenas 3% correspondem ao que é, de fato, reciclado. Segundo elucidam Bernardo (2023) e Aguiar (2024), as plantas de processamento e reciclagem de RSU, especialmente no Brasil, ainda enfrentam dificuldades operacionais, como a triagem incorreta dos resíduos, a pouca automação e os investimentos inexpressivos em infraestrutura. Ademais, há entraves logísticos na coleta seletiva e na integração entre cooperativas/associações, prefeituras e demais órgãos e empresas, o que compromete a eficiência do sistema.

A referida situação evidencia a gravidade de um cenário de ineficiência na gestão de resíduos urbanos, com intensos reflexos ambientais e sociais. Nesse sentido, tem-se o trabalho realizado pelas empresas de processamento e reciclagem de resíduos urbanos e a busca por sua máxima eficiência em suas plantas de operação.

Sendo assim, o presente trabalho considera a realidade vivenciada por muitas empresas que atuam no processamento e na reciclagem de RSU.

Especificamente em relação à operacionalização de triagem de materiais (lixo) em plantas de processamento, principalmente nas unidades que operam com incineração para geração de energia, nas quais se vivencia um gargalo recorrente nos aspectos operacionais e de segurança. Trata-se da presença de objetos perigosos, como botijões de gás, na esteira da planta, que passam despercebidos ou ocultos entre os demais resíduos e, ao passarem por moedores/britadores, danificam componentes e provocam paralisações e danos ao maquinário, além do próprio risco ao trabalhador.

Parte-se da premissa de que trabalhar na automatização dessa triagem, por meio de tecnologias mais atuais e avançadas de visão computacional, pode despontar como alternativa viável para evitar esses eventos, reduzindo os custos operacionais e elevando a segurança dos processos industriais, como também mencionado por Meneguelli (2022).

1.2. Problema de pesquisa

Na problematização do tema e do contexto apresentados, parte-se do pressuposto de que as plantas industriais que possuem fluxo de resíduos recorrentemente operando sob condições desafiadoras, com comprometimento da iluminação variável e da variedade e heterogeneidade do entulho misturado, fazem com que alguns objetos de material mais rígido, de grandes dimensões e até com resíduos internos, não sejam retirados antes de serem moídos ou triturados, como ocorre com botijões de gás.

Nas últimas duas décadas, técnicas baseadas em redes neurais convolucionais (CNNs), como You Only Look Once (YOLO) e Mask R-CNN, vêm sendo cada vez mais usadas com êxito na identificação de objetos em ambientes industriais, atingindo elevada precisão e baixa latência. Essa situação é a proposta do *dataset SpectralWaste* (CASAO et al., 2024), no qual restou comprovado que a integração de imagens RGB e hiperespectrais em plantas reais de reciclagem potencializa a eficácia da segmentação de objetos, com viabilidade de implementação em tempo real, sem elevada demanda computacional. Olhando também para os modelos quantizados operando sob a lógica de arquiteturas de estágio único, têm alcançado elevadas precisões em

dispositivos de computação de borda (*edge computing*), operando de maneira fluida em plataformas industriais limitadas sem comprometer as exigências de resposta dinâmica (CASAO *et al.*, 2024).

A realidade de recorte do problema a ser solucionado envolve a rotina de uma planta de processamento de uma empresa denominada ABC, mantendo-se o sigilo de sua identidade. Na sua operacionalização atual, a arquitetura de triagem e cominuição é dividida em três estágios principais de transporte. O estágio preliminar consiste em uma esteira de baixa velocidade (operando a no máximo 6 metros por minuto), na qual se realiza a inspeção visual. Na sequência, o material é despejado em uma esteira secundária que, ao final de seu curso, está equipada com um tambor magnético para a segregação de resíduos ferromagnéticos leves e, por fim, é direcionado a uma terceira esteira que alimenta a britadeira.

O gargalo operacional e de segurança reside na inspeção preliminar da esteira. Atualmente, a detecção de objetos de alto risco, como botijões de gás, é realizada exclusivamente por humanos. Um posto de inspeção permanece continuamente ocupado em frente à esteira e, ao identificar visualmente a ameaça em um trecho de aproximadamente 6 metros de visibilidade, aciona um botão de emergência para intertravar o motor. Com a esteira inoperante, o funcionário utiliza uma haste mecânica para retirar o cilindro. Esta abordagem manual e dependente da atenção humana é suscetível a falhas, fadiga ergonômica e atrasos na tomada de decisão. Caso um botijão passe despercebido e alcance a britadeira, ocorrem quebras de componentes e paradas corretivas decorrentes da explosão.

Observando essa configuração mecânica, a adoção de um projeto conceitual baseado em visão computacional mostra-se não apenas viável, mas também essencial do ponto de vista de segurança. Considerando estritamente a queda de transbordo em queda livre de 1,5 metros da esteira primária para a secundária, o objeto anômalo permanecerá no campo de visão, em pleno ar, por aproximadamente 553 milissegundos. Embora seja uma janela pequena para a reação humana, esse intervalo é substancialmente superior à latência exigida para inferência em redes neurais de arquitetura *single-stage*, como o YOLO.

Assim, propõe-se o planejamento de um sistema automatizado capaz de capturar a zona de queda, reconhecer a geometria do cilindro e comunicar-se com o Controlador Lógico Programável (CLP) para desenergizar a esteira secundária antes mesmo da acomodação do objeto sobre a lona, eliminando a dependência humana e prevenindo falhas catastróficas.

Diante do exposto, buscou-se responder: de que modo aplicar técnicas de visão computacional industrial para a detecção precisa de objetos cilíndricos, como botijões de gás, em tempo real nas linhas de esteiras de plantas de processamento de resíduos urbanos, a fim de evitar interrupções operacionais e os custos associados.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Apresentar uma proposta de intervenção envolvendo um sistema de visão computacional industrial para detecção, em tempo real, da presença de botijões de gás em fluxo de resíduos nas esteiras de plantas de processamento de RSU, com integração a um sistema de controle automatizado de modo a evitar paradas operacionais e reduzir custos estruturais e de manutenção, com base em um estudo de caso.

1.3.2. Objetivos específicos

- Conhecer o layout de uma planta de processamento, considerando uma empresa tomada como referência, mapeando o fluxo de resíduos e realizando um diagnóstico dos impactos operacionais, das condições ergonômicas de trabalho como a insalubridade e fadiga visual, dos riscos de segurança e dos passivos financeiros (OPEX) inerentes à dependência exclusiva de mão de obra humana envolvendo a presença de botijões de gás no maquinário;
- Conduzir uma revisão da literatura para levantar e consolidar as métricas de latência, precisão média (mAP) e tempo de resposta das arquiteturas de redes neurais (como a família YOLO) aplicadas em esteiras de triagem no atual estado da arte;

- Propor uma arquitetura de integração tecnológica e de intertravamento de segurança (hardware, software e CLP) viável para o ambiente estudado, verificada teoricamente pelas métricas cinemáticas do maquinário e de processamento de dados obtidas na literatura.
- Verificar a lógica de intertravamento proposta por meio de comissionamento virtual em arranjo Software-in-the-Loop, com a planta modelada em ambiente de simulação de eventos discretos e o controle executado em SoftPLC, integrados por protocolo industrial.

1.4. Hipóteses

A primeira hipótese considerada é a de que a elaboração de uma arquitetura baseada em sistemas modernos de visão computacional industrial, como as arquiteturas YOLO ou Mask R-CNN, atende, em teoria, aos rígidos requisitos de latência e precisão exigidos pela dinâmica de uma planta real de processamento de RSU. Já a segunda hipótese considera que a elaboração de uma arquitetura de integração desse sistema ao controle lógico da esteira (CLP) é tecnicamente viável para garantir a frenagem total do maquinário enquanto o objeto ainda se encontra dentro da zona de retirada manual segura da esteira secundária, delimitada em aproximadamente 3 metros de percurso, viabilizando sua remoção pelo operador antes que prossiga para a etapa de cominuição, reduzindo eventos de paradas operacionais corretivas e mitigando riscos de explosões.

1.5. Justificativa

A realização deste estudo considera a importante contribuição que é preciso ter com a eficiência de iniciativas que estejam ligadas à correta gestão de RSU, uma vez que o Brasil ainda se vê diante de gargalos recorrentes, conformando um cenário de clara ineficiência operacional e ambiental, reforçando a demanda por alternativas tecnológicas que fazem com que a triagem e destinação final dos resíduos urbanos ocorram de modo mais eficiente nas plantas industriais das empresas de reciclagem.

A presença de botijões de gás entre os resíduos urbanos descartados constitui um dos maiores riscos à segurança operacional das plantas de

processamento, conforme apontam Barboza et al. (2015), Seredkin et al. (2019) e WEG (2023). Esses invólucros, mesmo após o descarte, podem conter gases residuais inflamáveis e pressurizados. Ao passarem sem serem percebidos pelos sistemas tradicionais de triagem, seguem para processos de compressão, perfuração e moagem, além de eventual exposição a fontes de calor, o que acarreta riscos de explosões, incêndios e acidentes graves.

É preciso considerar a rotina de plantas de processamento e reciclagem de lixo, que têm elevada rotatividade de resíduos e uma dinâmica bastante intensa em termos operacionais. Um dos fatores de maior complexidade de trabalho é o tempo da identificação visual dos referidos itens que, na maior parte dos casos, é muito curto, fazendo com que os métodos manuais sejam ineficientes e perigosos. Assim sendo, a elaboração deste estudo pode contribuir com ideias que envolvam a implementação de sistemas computacionais amparados na visão computacional, inteligência artificial e sensores específicos para esta finalidade.

De acordo com Stavrothanasopoulos et al. (2025), cujo dataset CylinDeRS foi desenvolvido especificamente para essa finalidade, sistemas de visão computacional têm a capacidade de identificar, em tempo real, a presença de objetos com características específicas, como o formato cilíndrico e os materiais metálicos comuns dos botijões de gás. Com o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, há a possibilidade de aprimoramento e maior exatidão no reconhecimento, ainda que em ambientes com elevado volume e ampla heterogeneidade de resíduos. A relevância da pesquisa pode ser sentida não só para a empresa tomada como estudo de caso, mas também para diversas outras que vivenciam a demanda de identificar objetos bem delimitados em seus processos de triagem nas plantas industriais, em que os sistemas de visão computacional podem identificar, de forma automática, objetos como botijões na esteira de triagem.

Sob a ótica acadêmica, ambiental e social, o estudo aqui proposto traz o reforço da segurança e da própria consolidação da visão computacional enquanto tecnologia que se relaciona com a proposta de reduzir custos operacionais e atribuir maior segurança à continuidade dos processos

industriais. Existe também uma importante contribuição para a eficiência do processo e para a vida humana, uma vez que, nos cenários das plantas industriais, acidentes provocados por explosões podem resultar em danos aos operadores, além de comprometer o pleno funcionamento de equipamentos, gerando a paralisação da planta, custos com reparos, processos trabalhistas e, em casos mais graves, perdas humanas.

Acredita-se que a realização de estudos como o que está sendo proposto pode estimular a adoção de sistemas de visão computacional integrados, bem como de outros recursos tecnológicos afins, contribuindo para a profissionalização do setor de gestão de RSU no Brasil. A incorporação de soluções cada vez mais inovadoras de detecção e prevenção faz com que as plantas de reciclagem passem a ser mais resilientes, eficientes e preparadas na tratativa sobre a forma de tratar a geração de RSU. Portanto, pode-se favorecer a conformidade com a legislação ambiental e com as normas de segurança do trabalho, além de estimular a inovação e a modernização do setor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta uma abordagem dos principais termos e conceitos que amparam a pesquisa aqui delineada, oferecendo uma visão do cenário da gestão de resíduos sólidos urbanos nos âmbitos global e nacional. Também são abordados os aspectos relacionados às políticas públicas e à legislação ambiental brasileira (Lei nº 12.305/2010 e PNRS), que têm reflexos nas empresas que atuam no processamento e na reciclagem de RSU. Em seguida, são descritos os principais pontos de uma planta industrial que atua nesse segmento, bem como sua relação com as tecnologias aplicadas à triagem e ao tratamento de RSU, com maior ênfase na visão computacional.

2.1. Gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU)

2.1.1. *Panorama global e nacional da geração de resíduos sólidos*

Antes de compreender as especificidades de uma planta industrial que atua tanto na triagem quanto no processamento e na reciclagem dos resíduos urbanos, é preciso entender o cenário mundial e nacional em relação à problemática de geração de RSU. Conforme apontado pela United Nations Environment Programme (UNEP, 2024) e pela ABREMA (2024), esse desafio configura-se como um dos maiores gargalos na dimensão ambiental, envolvendo a sociedade atual e atingindo diretamente a plena sustentabilidade das cidades.

Com base no relatório Global Waste Management Outlook 2024, elaborado pelo United Nations Environment Programme em parceria com a International Solid Waste Association (UNEP, 2024), destaca-se que o mundo já gera um volume superior a 2,3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos anualmente, com projeção de crescimento para 3,8 bilhões de toneladas até 2050, caso não sejam adotadas medidas urgentes. O relatório aponta ainda que apenas cerca de 60% dos resíduos gerados no mundo são geridos em instalações controladas, revelando um contexto propício para empresas que desejam atuar nesse segmento, especialmente porque há aumento populacional, intensificação do processo de urbanização e dos padrões de consumo, sobretudo nas economias emergentes.

Considerando o cenário nacional, o Brasil apresenta um panorama também preocupante, em razão da própria realidade descrita nos dados da Associação Brasileira de Empresas de Resíduos Sólidos e Ambientais (ABREMA, 2024), que ressalta a geração de cerca de 81 milhões de toneladas de RSU por ano, das quais cerca de 41% têm destinação inadequada, como lixões e aterros irregulares.

Vivencia-se um momento alarmante em relação à geração de RSU sob as perspectivas global e nacional, reforçando a necessidade de fomento e estímulo às demandas de empresas que atuam na triagem, reciclagem e processamento de resíduos. Essas organizações desempenham uma função imprescindível na logística reversa e na economia circular, contribuindo para a redução do volume de resíduos destinados a lixões e aterros, o reaproveitamento de materiais recicláveis e a mitigação dos desdobramentos ambientais e socioeconômicos, ao gerar postos de trabalho e promover sustentabilidade urbana.

Dados da ABREMA (2024) e CEMPRE (2023) demonstram que o setor de reciclagem no Brasil ainda tem vivenciado dificuldades estruturais, a saber: a baixa cobertura da coleta seletiva (cerca de 21,7% dos municípios avaliados oferecem coleta seletiva a mais de 50% da população, segundo o critério de “oferta” adotado na Ciclosoft 2023), a informalidade de uma parcela da cadeia de triagem e a dificuldade de integração tecnológica nas plantas de processamento. Não obstante, há uma tendência de crescimento do setor, impulsionada por pressões regulatórias, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), e por demandas de sustentabilidade corporativa, o que motiva investimentos em tecnologias de automação e no potencial econômico da economia circular, de modo a transformar resíduos em insumos produtivos.

Como discutido por Gundupalli et al. (2017), no âmbito industrial, plantas de triagem mecanizadas e semiautomatizadas têm sido cada vez mais frequentes, e as suas unidades são projetadas para o recebimento e a classificação do RSU em esteiras de processamento; a separação dos materiais recicláveis de rejeitos por meio de etapas manuais ou automáticas; e a

alimentação de processos de prensagem, trituração ou transformação dos resíduos em novos produtos.

Reflete-se que a referida realidade estimula a criação de inovações tecnológicas, como sistemas de visão computacional, para a detecção rápida e precisa de objetos considerados perigosos ou inadequados no fluxo de resíduos, como botijões de gás, baterias ou metais volumosos, além de reduzir riscos operacionais, evitando prejuízos, o comprometimento de equipamentos e paradas de produção. É importante também considerar a possibilidade de otimizar os custos de manutenção e aumentar a eficiência das plantas de triagem.

2.1.2. Políticas públicas e legislação ambiental brasileira (Lei 12.305/2010 e PNRS)

Ainda considerando um cenário de atuação das empresas com atuação no processamento e reciclagem de RSU, no alcance nacional existem algumas regras e leis que tratam do assunto. Vale aqui citar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), na forma da Lei nº 12.305/2010, que constitui o mais importante eixo regulatório da gestão de resíduos no Brasil. A referida lei traz a definição das diretrizes para o manejo integrado e sustentável dos resíduos sólidos, dando prioridade à não geração, à redução, à reutilização, à reciclagem e ao tratamento dos resíduos, e, logo depois, à disposição final considerada ótima sob a perspectiva ambiental. Trata-se de uma questão que muitas vezes norteia a própria essência de funcionamento de empresas atuantes na reciclagem e no processamento de RSU (BRASIL, 2010).

Observa-se que uma das inovações propostas pela PNRS diz respeito à implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, de modo a contemplar os diversos agentes dessa cadeia, como fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana. O referido dispositivo visa ao fomento da logística reversa e à ampliação da reutilização e da reciclagem de materiais. Mesmo com os seus avanços, a PNRS ainda enfrenta diversas dificuldades na sua implementação. Segundo a ABREMA (2024), mais da metade dos

municípios brasileiros ainda não elaborou seus planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos, o que inviabiliza o acesso a recursos federais e compromete a efetividade das ações previstas na política.

A atuação mais efetiva, estimulada e fomentada em todos os seus aspectos, de empresas que atuam na coleta, triagem, processamento e reciclagem de RSU, pode promover o alcance de metas de erradicação dos lixões, originalmente previstas para 2014, mas adiadas e sem alcance até os dias atuais. De acordo com Meneguelli (2022), isso se deve à falta de integração e diálogo entre os entes federativos, à escassez de financiamento e à carência de capacitação técnica.

Para além da PNRS, demais normativas complementam o escopo legal, como a Lei de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007), que estabelece diretrizes nacionais para os serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (BRASIL, 2007), e resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a exemplo da Resolução CONAMA nº 307/2002, que dispõe sobre diretrizes, critérios e procedimentos para a destinação de resíduos da construção civil (CONAMA, 2002), e do Decreto nº 10.240/2020, que regulamenta o sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico (BRASIL, 2020).

Ou seja, mesmo a legislação brasileira apresentando diretrizes claras e alinhadas às melhores práticas internacionais, sua aplicação, de fato, ainda enfrenta obstáculos estruturais, técnicos e institucionais que precisam ser superados para a consolidação de uma gestão de resíduos mais eficiente e sustentável.

As empresas que trabalham com o processamento e a reciclagem de RSU mantêm relação direta com as políticas públicas e a legislação ambiental brasileira, principalmente com a PNRS/Lei nº 12.305/2010 e o Decreto nº 7.404/2010. Isto porque, em diferentes âmbitos, existem obrigações e enquadramentos legais, uma vez que a PNRS determina que a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos são responsabilidades compartilhadas entre poder público, empresas e cidadãos. Há de se considerar que as referidas

empresas de triagem, reciclagem e processamento são também agentes estratégicos na implementação prática da política, quando viabilizam a destinação final ambientalmente adequada de RSU, atendem a critérios legais de logística reversa e contribuem para que os municípios alcancem metas de redução de lixões e aumento da reciclagem.

2.1.3. Caracterização das empresas de triagem, reciclagem e processamento de resíduos sólidos urbanos

Na descrição conceitual e até na de funcionamento, as empresas de triagem, reciclagem e processamento de RSU são organizações configuradas para o gerenciamento e a valorização dos resíduos gerados nas áreas urbanas, cumprindo uma função essencial na logística reversa e na economia circular. Conforme discutido por Gundupalli et al. (2017) e por Sarc et al. (2019), tais empresas funcionam como unidades industriais especializadas (Figura 1), nas quais a atividade-fim é a separação, classificação e destinação de materiais recicláveis, rejeitos e resíduos perigosos de maneira ambientalmente adequada, a fim de reduzir os impactos ambientais e gerar valor econômico por meio da reinserção de materiais no ciclo produtivo.

Figura 1 - Triagem, reciclagem e valorização de resíduos

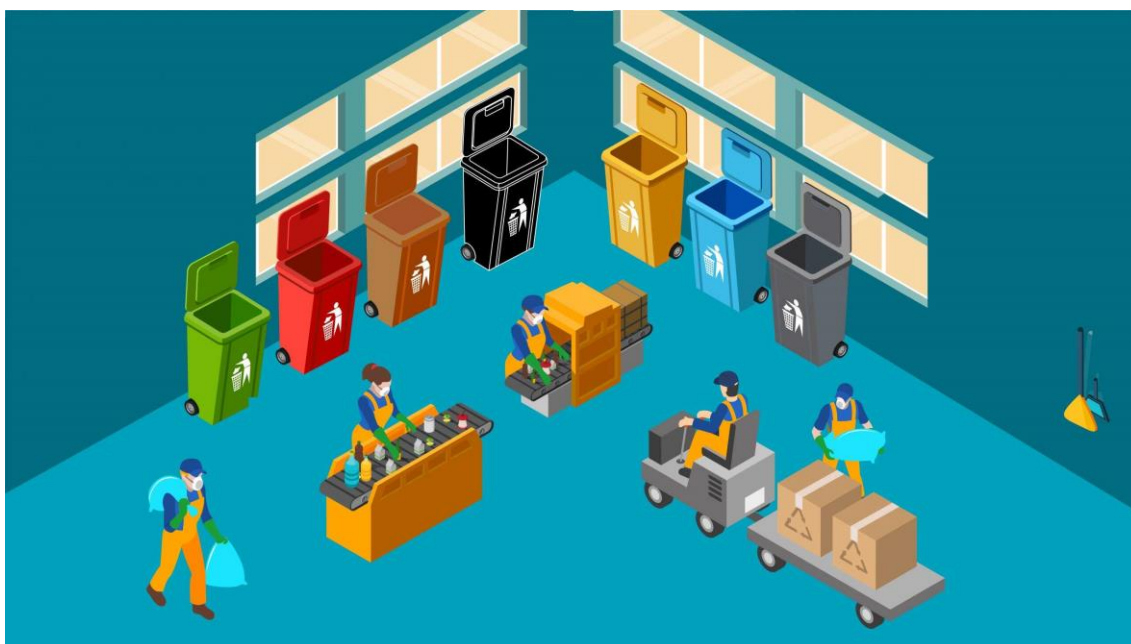


Fonte: AMBIENTE PLASTICO (2022).

Dados do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) afirmam que as referidas empresas seguem uma classificação dada em três tipologias: podem ser consideradas “Centros de Triagem”, realizando a separação inicial dos resíduos coletados, manual ou mecanicamente, de modo a direcionar recicláveis, rejeitos e resíduos perigosos; podem ser “Unidades de Reciclagem”, que realizam processos físicos, mecânicos ou químicos para a transformação de resíduos em matérias-primas secundárias, como pellets de plástico, sucata metálica beneficiada e papel reciclado; e podem ser classificadas como “Plantas de Processamento Integradas”, isto é, estruturas industriais mais completas, com capacidade de triar, reciclar e preparar resíduos para coprocessamento, reduzindo, de modo expressivo, o volume de resíduos enviados a aterros sanitários.

Cunha (2023) explica que, em relação ao fluxo operacional e à própria estruturação das plantas industriais, as empresas que trabalham com triagem, processamento e reciclagem de RSU envolvem uma organização interna com uma lógica de linhas de produção industriais, otimizadas para separar e valorizar resíduos como apresenta a Figura 2:

Figura 2 - Modelo de triagem, processamento e reciclagem de RSU



Fonte: Figueiredo e Bermudez (2019).

Em uma visão geral, o *layout* comum de uma planta de triagem e processamento contempla os seguintes setores: a área de recepção e balança rodoviária, que responde pelo recebimento dos resíduos vindos da coleta urbana ou de empresas privadas; o registro do peso bruto e líquido para o controle de produtividade e emissão de relatórios ambientais; e a pré-triagem, que é a etapa de retirada manual ou mecanizada de resíduos volumosos, perigosos ou incompatíveis com o processo. Tem-se preocupado com a segurança operacional, buscando evitar paradas não programadas na linha de produção.

Conforme discutido por Gundupalli et al. (2017), a triagem primária e secundária pode ser manual, realizada por trabalhadores em esteiras, ou automatizada, com o uso de separadores magnéticos para metais ferrosos; sopradores e peneiras rotativas para fracionamento por densidade e granulometria; e sensores ópticos e infravermelhos para identificação de polímeros e cores de plásticos. Essa etapa segmenta os fluxos em recicláveis, rejeitos e resíduos de valor energético para coprocessamento. Na prensagem e no armazenamento, os recicláveis segregados passam por enfardamento e são armazenados para venda a indústrias recicladoras. Os rejeitos podem seguir para aterros licenciados ou para coprocessamento energético.

Tem-se ainda o setor administrativo e de monitoramento, que controla a rastreabilidade dos resíduos, os custos operacionais e os indicadores-chave de desempenho (KPIs). As empresas mais avançadas já integram softwares de gestão, sensores IoT e sistemas de visão computacional para reduzir erros e otimizar fluxos de trabalho.

2.2. Tecnologias aplicadas à triagem e tratamento de RSU

2.2.1. A tecnologia no escopo das empresas que manejam RSU

Ao relacionar a introdução de tecnologias no contexto de manejo de RSU, Barboza et al. (2015) argumentam que se trata de uma questão em constante evolução, com maior destaque para soluções que aumentam a eficiência da triagem, da recuperação de materiais e da redução de rejeitos. **Os autores avaliam** que a automação e o uso de sensores em esteiras de triagem têm aumentado a produtividade das centrais de reciclagem e reduzido o contato humano com resíduos perigosos.

De acordo com Adedeji e Wang (2019), a utilização de tecnologias amparadas pela inteligência artificial (IA), visão computacional e aprendizado de máquina vem se destacando nos processos de identificação e separação de materiais recicláveis. Os referidos sistemas possibilitam o reconhecimento de formas, cores e materiais por meio de algoritmos treinados, o que potencializa a precisão e a velocidade da triagem.

No caso do Brasil, observam-se iniciativas que utilizam sistemas automatizados para triagem de resíduos, principalmente em plantas industriais privadas. Contudo, a aplicação em unidades públicas de reciclagem ainda é incipiente, especialmente devido à ausência de investimentos e de capacitação tecnológica. O avanço dessa aplicação relaciona-se diretamente à articulação entre governos, setor privado e centros de pesquisa.

Mais do que a triagem, tecnologias como biodigestão anaeróbica, compostagem acelerada e incineração com recuperação energética (*waste-to-energy*) vêm sendo utilizadas como estratégias para o tratamento de resíduos orgânicos e de rejeitos. Pesquisas evidenciam que as tecnologias, quando bem

implementadas, reduzem o volume de resíduos destinados a aterros sanitários e geram subprodutos úteis, como biogás e adubo orgânico (NIZAMI *et al.*, 2017).

De acordo com Aguiar (2024), a escolha da tecnologia adequada está atrelada a diferentes fatores, como a composição dos resíduos, a escala da operação, a viabilidade econômica e o impacto ambiental. O autor argumenta que a adoção de tecnologias precisa ser contextualizada à realidade local, respeitando os reflexos sociais, geográficos e logísticos. Ou seja, a utilização estratégica de tecnologias pode transformar de forma expressiva a gestão de RSU, viabilizando caminhos mais eficientes, seguros e ambientalmente corretos. E o investimento em inovação, aliado ao planejamento integrado e à capacitação de pessoal, é crucial para o alcance desses objetivos.

Com base nas explicações de Meneguelli (2022), o aspecto de eficiência operacional de empresas que trabalham com plantas industriais para triagem, processamento e reciclagem de RSU depende diretamente do nível de mecanização e automação. O autor assinala que adotar tecnologias digitais, a citar a visão computacional e a inteligência artificial, pode reforçar a detecção em tempo real de materiais e objetos perigosos em esteiras de resíduos; diminuir as paradas operacionais por obstruções ou incidentes; reduzir custos estruturais e de manutenção e aumentar a produtividade por tonelada processada.

2.2.2. Aplicações da Indústria 4.0 em plantas de processamento de resíduos

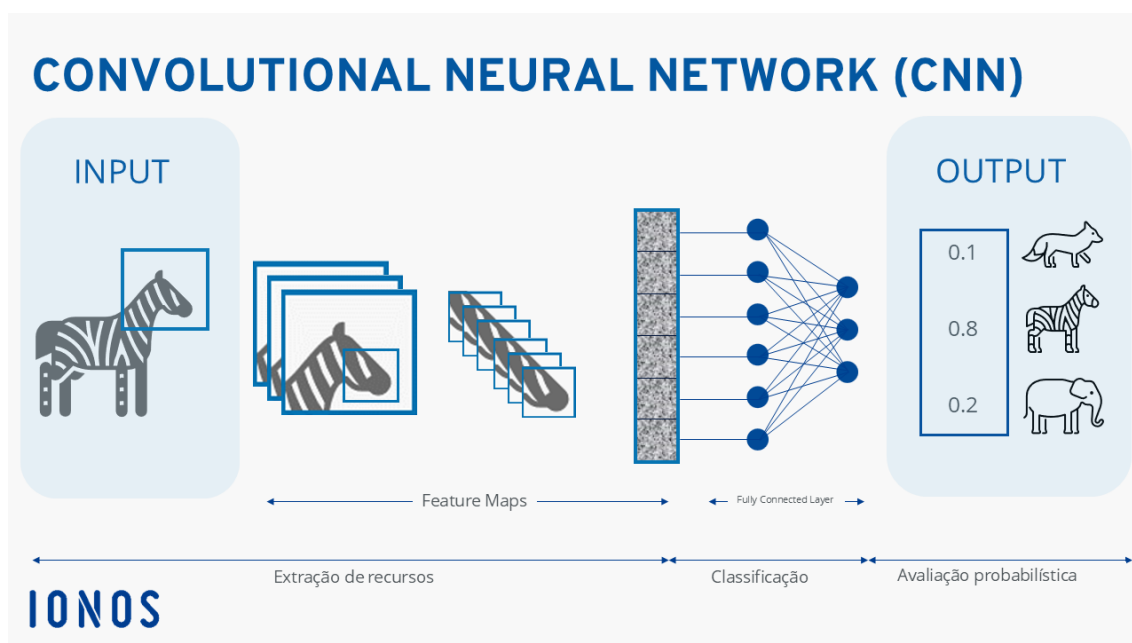
Considerando as tecnologias da Indústria 4.0 que vêm sendo paulatinamente incorporadas às plantas de processamento de resíduos, de modo a promover avanços expressivos para o controle, monitoramento e automação dos processos de triagem, compactação, incineração e recuperação energética, Sarc *et al.* (2019) esclarecem que a digitalização dos processos em instalações de tratamento de resíduos também fomenta o aumento da rastreabilidade dos materiais e redução das perdas operacionais, aumentando a eficiência e a sustentabilidade das unidades.

Sensores inteligentes integrados a sistemas físicos possibilitam acompanhar, em tempo real, a composição dos resíduos e a condição

operacional dos equipamentos. Esses sensores possibilitam a geração de dados para processamento por meio de plataformas baseadas em IoT, emitindo alertas, otimizando o uso de recursos e evitando falhas mecânicas. Sendo assim, plantas equipadas com esses sistemas apresentam redução expressiva no consumo de energia e aumento na vida útil dos maquinários.

Yudin et al. (2024) explicam que, em contextos com esteiras transportadoras de resíduos urbanos, o uso de visão computacional, aliado ao aprendizado profundo, tem aumentado a identificação precisa e ágil de objetos perigosos ou de valor agregado. Os autores demonstram, a partir do dataset WaRP, composto por mais de 10.000 imagens reais coletadas em esteiras de plantas de reciclagem, que algoritmos baseados em redes neurais convolucionais (CNN), exemplificados na Figura 3, apresentam alta capacidade de reconhecimento de objetos específicos, mesmo sob condições adversas, como iluminação deficiente ou sobreposição de resíduos.

Figura 3 - Esquema de uma *Convolutional Neural Network* (CNN)



Fonte: IONOS (2024).

Em relação ao Brasil, observa-se que são poucos os estudos que abordam plantas específicas de tratamento de resíduos equipadas com recursos avançados de automação. Ainda assim, o cenário nacional vem mostrando sinais de avanço nessa direção, sobretudo por meio de iniciativas conduzidas por

consórcios intermunicipais de gestão de resíduos e de projetos-piloto desenvolvidos em parceria com universidades e centros de pesquisa, os quais têm buscado testar soluções de automação e rastreabilidade aplicadas ao manejo de resíduos sólidos urbanos. Essa escassez de estudos brasileiros documentados especificamente sobre automação industrial em plantas de RSU reforça a relevância do presente trabalho como contribuição original para a literatura nacional sobre o tema.

É possível compreender que o aspecto da automação industrial desponta como estratégia que também se reflete no maior controle ambiental das plantas, por meio do uso de sensores de emissão atmosférica, do controle de temperatura e de umidade, além da rastreabilidade de materiais recicláveis. Seredkin et al. (2019) consideram tratar-se de uma lógica de inteligência operacional que evita acidentes, como explosões decorrentes da presença de gases ou de resíduos incompatíveis com os equipamentos. Os autores também evidenciam que, ao aplicar recurso de visão computacional para detecção de cilindros ou materiais pressurizados, pode-se evitar falhas críticas em moedores e fornos de incineração. Ou seja, compreende-se que a Indústria 4.0 tem potencial para reestruturar a infraestrutura das plantas de processamento de resíduos, tornando-as mais inteligentes, seguras e integradas. Sua aplicação assertiva está associada ao planejamento estratégico, ao suporte financeiro e à formação de profissionais capacitados para atuar em ambientes digitais.

2.2.3. Contribuições da automação para sustentabilidade e eficiência

Em relação à automação industrial, principalmente quando associada à Indústria 4.0, Santos et al. (2024) explicam tratar-se de um aspecto determinante para a obtenção de processos produtivos mais sustentáveis e eficientes. Os autores afirmam que a integração entre automação, digitalização e tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e robótica avançada não só reduz custos operacionais e otimiza a eficiência energética, como também contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados à produção e ao descarte de resíduos, favorecendo a transição para modelos de economia circular.

Em termos de gestão de RSU, a automação possibilita um controle mais preciso das entradas e saídas de materiais, assegurando maior assertividade na quantificação em tempo real dos fluxos de resíduos e no rastreamento da origem dos materiais recicláveis. Tal condição facilita a formulação de políticas públicas mais eficazes e o alcance de metas de sustentabilidade urbana definidas por organismos internacionais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Ademais, Aguiar (2024) destaca que a automação reduz a exposição humana a materiais perigosos e condições insalubres de trabalho, contribuindo para a segurança ocupacional dos trabalhadores de unidades de triagem. Quando ocorre a substituição de tarefas repetitivas e insalubres por sistemas automáticos, os resultados incluem ganhos na valorização do trabalho técnico e na redução da informalidade no setor de RSU.

Há também a diminuição do consumo de recursos naturais, comentada por Machado, Winroth e Ribeiro da Silva (2020), visto que sistemas inteligentes otimizam o uso de energia e água nos processos industriais, ao mesmo tempo em que reduzem o desperdício de materiais. Como demonstrado por Pinto et al. (2025) em uma planta de mineração brasileira, a substituição do controle manual por um sistema automático baseado em CLP reduziu o consumo específico de energia em 5,84%, evidenciando o potencial de ganho de eficiência energética também aplicável a estratégias de gestão e intertravamento em plantas industriais.

Sob a ótica econômica, Machado, Winroth e Ribeiro da Silva (2020) argumentam que os investimentos em automação geram retornos expressivos ao longo do tempo, especialmente nos processos que envolvem elevado volume de repetição e controle de qualidade. Nas plantas de tratamento de resíduos, o alcance operacional pode ser aferido pela redução do tempo de parada de máquinas, pela economia em manutenção e pela melhoria dos índices de recuperação de materiais. Ou seja, conforme apontam os autores, a automação industrial é um instrumento essencial para promover a transição para um modelo de economia circular mais eficiente e menos poluente. Sua prática na realidade

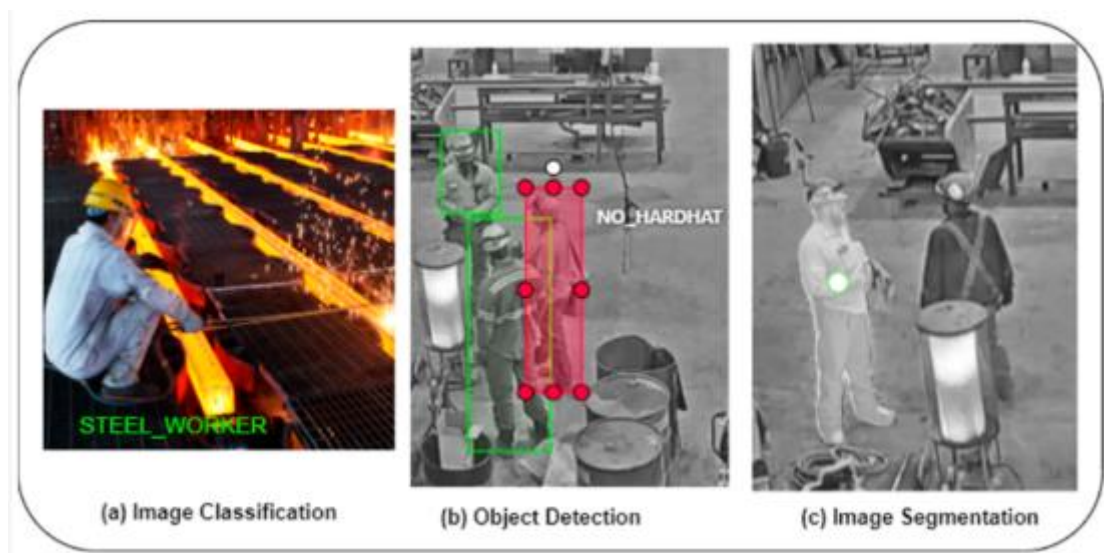
de plantas de RSU possibilita o alinhamento das operações industriais aos princípios da sustentabilidade ambiental, econômica e social.

2.3. Visão Computacional na Indústria e nas plantas de RSU

2.3.1. Fundamentos da visão computacional

Almeida et al. (2021) descrevem a visão computacional referindo-se a uma área da inteligência artificial que permite que computadores e sistemas automatizados “enxerguem” e interpretem imagens e vídeos para a extração de dados e informações considerados importantes acerca do ambiente, como mostra a Figura 4:

Figura 4 - Visão computacional em planta industrial



Fonte: Lan, Awolusi e Cai (2024).

Nessa mesma linha de pensamento, Gonzalez e Woods (2010) consolidam os fundamentos do processamento digital de imagens e da modelagem matemática para a extração de características e identificação de padrões em dados visuais. Aliada ao aprendizado de máquina no cenário industrial, a visão computacional desempenha um papel fundamental de inspeção de produtos, no monitoramento de processos e na garantia da qualidade, de forma automatizada e em tempo real.

Os sistemas modernos fazem uso de redes neurais convolucionais (CNNs), citadas por Bochkovskiy, Wang e Liao (2020), de modo a possibilitar o

reconhecimento de objetos, dado que tais redes são potencialmente eficazes na detecção e na classificação visual, ainda que em ambientes complexos e com elevada variação de iluminação e de ruído. Os referidos modelos são treinados com grandes conjuntos de dados que abrangem as variações esperadas na aplicação, assegurando robustez e adaptabilidade.

Entre as ferramentas disponíveis para a implementação prática de sistemas de visão computacional, destacam-se bibliotecas e *frameworks* como BoofCV, YOLO e TensorFlow, que permitem o reconhecimento de objetos em tempo real e a classificação de imagens de forma eficiente (MACHADO; SILVA; CARNEIRO, 2025). Essas ferramentas aceleram o processamento de dados visuais e otimizam sistemas de automação, sendo essenciais tanto na etapa de prototipagem quanto na implantação de soluções de visão computacional em ambientes industriais.

No Brasil, estudos envolvendo visão computacional têm avançado de forma notória, principalmente nos centros de pesquisa vinculados a universidades e institutos tecnológicos, com foco no desenvolvimento de algoritmos específicos para a inspeção automatizada em diversos setores industriais, como demonstram os trabalhos de Aguiar (2024) e Meneguelli (2022). Em que pese a inovação nacional também contemplar a integração com sistemas de automação e controle para a otimização de processos produtivos.

A visão computacional industrial contempla etapas essenciais, incluindo a captura de imagens, o pré-processamento para melhorar a qualidade, a segmentação para isolar os objetos de interesse, a extração de características e a classificação ou decisão. Cada etapa precisa ser calibrada conforme a aplicação e as condições ambientais da planta industrial (BERNARDO, 2023).

Não obstante, implementar sistemas de visão computacional precisa abranger a integração com o hardware e o software da planta, para garantir comunicação eficiente e resposta em tempo real. A utilização de câmeras industriais especializadas, iluminação controlada e processamento em *edge computing* são aspectos imprescindíveis para um desempenho satisfatório.

Ou seja, a visão computacional na indústria apresenta-se como uma tecnologia determinante para automação avançada, possibilitando o monitoramento mais preciso e a intervenção rápida, questões essenciais para plantas que demandam alta confiabilidade e segurança, como as de processamento de RSU, foco deste estudo.

2.3.2. Arquitetura de sistemas de visão computacional

Em relação à arquitetura comum de um sistema de visão computacional industrial, esta envolve componentes integrados que garantem a aquisição, o processamento, a análise e a resposta automática às informações visuais captadas. Farias (2023) assinala que a citada arquitetura é estruturada em três camadas principais: captura de imagem, processamento e interpretação dos dados e interface de controle.

Descrevendo cada uma delas, a camada de captura utiliza dispositivos de aquisição, como câmeras RGB, câmeras hiperespectrais ou sensores 3D, que coletam imagens em alta resolução, com características típicas e adequadas ao tipo de objeto a ser detectado (BERNARDO, 2023). A escolha do sensor está relacionada às condições de iluminação, à distância e à velocidade do objeto, aspectos críticos em ambientes industriais.

Em relação ao processamento das imagens, este inclui a aplicação de algoritmos de pré-processamento para redução de ruído e melhoria do contraste, além de técnicas avançadas de segmentação e extração de características (BERNARDO, 2023). Os modelos baseados em *deep learning*, como CNNs, realizam a classificação final dos objetos, com adaptação às oscilações do contexto operacional (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

Sobre a camada de interpretação, esta conecta o sistema de visão ao software de controle industrial, de modo a subsidiar a tomada de decisões automatizadas com base nos dados capturados (LEE; BAGHERI; JIN, 2016). No sistema proposto, essa camada é responsável por decisões como parar as esteiras, emitir alertas sonoros e visuais, e sinalizar a necessidade de intervenção manual do operador para remoção do objeto identificado. A referida

comunicação é viabilizada por protocolos industriais padronizados, como OPC-UA e Modbus, o que assegura a interoperabilidade.

No contexto da realidade brasileira, observa-se que a integração de sistemas de visão computacional com controladores lógicos programáveis (CLP) e sistemas SCADA ainda se encontra em fase inicial; contudo, conforme discutido por Bernardo (2023), projetos de pesquisa vêm avaliando a viabilidade técnica e econômica dessa integração em plantas de médio porte no país. Os referidos avanços apontam para a possibilidade de adequação ao cenário de processamento de RSU.

Outra observação relevante refere-se à arquitetura de processamento em borda (edge computing), que permite que parte do processamento de dados visuais ocorra localmente, reduzindo a latência e a demanda de banda de comunicação (BERNARDO, 2023). A referida estratégia é fundamental para aplicações em tempo real e para ambientes industriais com restrições de conectividade.

Sendo assim, a arquitetura dos sistemas de visão computacional precisa ser cuidadosamente projetada para atender às especificidades da aplicação industrial, assegurando eficiência, robustez e ampla integração com os sistemas operacionais da planta.

Um aspecto arquitetural relevante quando o sistema de visão exerce função de segurança é a redundância de sensoramento. Em arranjos de câmera única, a decisão de classificação depende integralmente de uma única perspectiva e de uma única cadeia de inferência, de modo que qualquer condição adversa, como oclusão parcial, pose desfavorável do objeto, reflexo especular ou variação abrupta de iluminação, se propaga diretamente à saída do sistema, sem qualquer mecanismo de contestação. A literatura de visão computacional aplicada à triagem de resíduos tem respondido a essa limitação por duas vias complementares. A primeira é a redundância geométrica, na qual duas ou mais câmeras observam a mesma cena a partir de eixos distintos: além de suprimir poses cegas, a disposição de duas vistas calibradas permite recuperar a profundidade e, por consequência, a dimensão métrica absoluta do

objeto, e não apenas sua dimensão aparente em pixels (GONZALEZ; WOODS, 2010). A segunda é a redundância multimodal, na qual sensores de naturezas espectrais diferentes são combinados por meio de fusão de dados; é o caminho adotado por Casao et al. (2024) no conjunto *Spectral/Waste*, que associa imagens RGB e **hiperespectrais** em planta real de reciclagem, e por Yudin et al. (2024), cuja detecção hierárquica com supervisão fraca explora níveis distintos de granularidade sobre a mesma entrada. Cabe destacar, contudo, uma condição frequentemente negligenciada: o ganho de confiabilidade decorrente da redundância pressupõe independência estatística entre os canais. Dois sensores idênticos, executando o mesmo modelo treinado sobre o mesmo conjunto de dados e submetidos às mesmas condições de iluminação, tendem a falhar de forma correlacionada, de modo que a redução esperada na taxa de erro não se materializa. É precisamente por essa razão que as abordagens mais robustas introduzem diversidade deliberada, seja de banda espectral, seja de arquitetura de rede, princípio que a normalização de segurança de máquinas formaliza sob o conceito de diversidade em canais redundantes (ISO, 2023).

2.3.3. Aplicações em esteiras industriais e plantas de processamento

As esteiras industriais de processamento de resíduos são consideradas ambientes críticos, nos quais a presença de objetos anômalos exige sistemas de detecção rápida para evitar danos severos aos equipamentos e paradas inesperadas na produção (GUNDUPALLI et al., 2017). Para que ações corretivas imediatas e intertravamentos de segurança sejam viáveis, a identificação automatizada deve operar com baixa latência. Nesse sentido, Bochkovskiy, Wang e Liao (2020) demonstram que arquiteturas modernas de visão computacional, especificamente detectores de estágio único (*single-stage detectors*), atingiram o estado da arte ao viabilizar o equilíbrio ótimo entre precisão de reconhecimento e alta velocidade de processamento de quadros em tempo real, atendendo aos rigorosos requisitos de sistemas dinâmicos.

No manejo de resíduos sólidos urbanos, a identificação visual de objetos perigosos, como botijões de gás, metais pesados ou materiais contaminantes, conforme ilustrado na Figura 5, é fundamental para evitar acidentes e paradas no processamento. Sendo assim, os sistemas baseados em aprendizado

profundo revelam capacidade de reconhecer essas ameaças, ainda que em fluxos de lixo heterogêneos e com sobreposição de materiais (CASAO et al., 2024).

Figura 5 - Inspeção de corpos estranhos em esteira



Fonte: WEG (2023).

Nos ambientes industriais, a utilização de câmeras de alta resolução, iluminadores LED e algoritmos treinados com base em bases de dados específicas tem sido empregada no monitoramento de esteiras em tempo real, permitindo a parada automática de máquinas ou o direcionamento do operador para intervenção manual (WEG, 2023). Os referidos sistemas implicam redução do tempo de parada e dos custos de manutenção.

Quando se tem a viabilidade de softwares locais com interface simples, que utilizam hardware acessível e algoritmos de visão computacional amparados em frameworks abertos, como TensorFlow ou PyTorch (BERNARDO, 2023), refere-se a uma abordagem que simplifica a adoção em plantas de processamento de RSU, nas quais os recursos financeiros são, geralmente, limitados.

Mais do que a segurança e a eficiência operacionais, o uso de recursos de visão computacional em plantas de RSU parece implicar diretamente na qualidade dos processos, na geração de dados para análise subsequente, no

apoio ao processo decisório e na melhoria contínua. A referida capacidade de análise integrada é uma das bases da Indústria 4.0, e a combinação da visão computacional com as demais tecnologias de automação, como a robótica e os sistemas inteligentes, pode representar uma verdadeira transformação no paradigma do processamento de RSU, de modo que as plantas se tornem mais seguras, eficientes e ambientalmente responsáveis.

No contexto brasileiro, a proteção de transportadores contínuos está sujeita a arcabouço normativo específico. A Norma Regulamentadora nº 12, que estabelece os requisitos de segurança para o trabalho em máquinas e equipamentos, dedica seção própria aos transportadores de materiais, determinando que seus movimentos perigosos sejam protegidos, sobretudo nos pontos de esmagamento, agarramento e aprisionamento formados por esteiras, correias, roletes e tambores acessíveis durante a operação normal (BRASIL, 2024). Cabe observar que tais dispositivos tratam da proteção física do trabalhador contra as partes móveis do equipamento, e não da detecção de objetos estranhos no fluxo transportado, hipótese que a norma não disciplina de modo específico. A convergência entre a proposta deste trabalho e o preceito normativo reside em outro ponto: a hierarquia das medidas de proteção adotada pela NR-12, que estabelece a precedência das medidas de proteção coletiva sobre as medidas administrativas ou de organização do trabalho e, em último lugar, sobre os equipamentos de proteção individual. Sob essa hierarquia, o arranjo atualmente praticado na planta estudada, no qual a contenção do risco depende de um operador que observa a esteira e aciona manualmente a botoeira de emergência, configura medida de natureza administrativa, situada em nível inferior de precedência. A substituição desse arranjo por um sistema de detecção automatizada com intertravamento do acionamento desloca a proteção para o nível de medida técnica de caráter coletivo, alinhando-se à ordem de prioridade prevista na norma. Registre-se, ainda, que a própria NR-12 recepciona as normas técnicas nacionais e internacionais vigentes, o que remete aos critérios de categoria e de nível de desempenho para funções de segurança estabelecidos pela ISO 13849-1 (ISO, 2023), referida na seção 2.3.2.

2.3.4. A evolução da arquitetura YOLO na gestão de resíduos

No contexto das soluções baseadas em inteligência artificial para o manejo de RSU, a família de algoritmos *You Only Look Once* (YOLO) consolidou-se como o padrão ouro para a detecção de objetos em tempo real. Aguiar (2024), ao mapear a aplicação de visão computacional especificamente no cenário de triagem de resíduos sólidos urbanos no Brasil, demonstra como a evolução cronológica dessas redes (desde a versão v1 até as mais recentes) foi determinante para viabilizar operações industriais. A transição metodológica de processamentos em duas etapas para a detecção em estágio único (single-stage detector) reduziu drasticamente o custo computacional, permitindo que a identificação de materiais heterogêneos na esteira ocorresse com fluidez, de forma compatível com a realidade tecnológica e de infraestrutura das plantas de reciclagem nacionais.

A distinção entre as duas famílias arquiteturais merece registro, uma vez que ambas foram mencionadas na formulação do problema. Os detectores de duas etapas, dos quais a Mask R-CNN (HE et al., 2017) é o representante mais difundido, executam primeiro a proposição de regiões candidatas e, em seguida, a classificação e o refinamento de cada uma delas, o que lhes confere precisão de localização superior e, no caso específico da Mask R-CNN, segmentação em nível de instância, capacidade útil quando o objeto de interesse se encontra parcialmente encoberto por outros resíduos. Esse ganho, contudo, é obtido às custas do custo computacional: a serialização das duas etapas eleva o tempo de inferência a patamares pouco compatíveis com o orçamento temporal de 553 milissegundos disponível na zona de transbordo, sobretudo em hardware de borda. Os detectores de estágio único da família YOLO, ao regredirem diretamente coordenadas e classes em uma única passagem pela rede, sacrificam parte dessa precisão de contorno em favor da latência. Como a arquitetura proposta neste trabalho não requer a máscara do objeto, mas apenas a decisão binária de presença dentro de um orçamento temporal rígido, a família YOLO é a escolha adequada, ficando a Mask R-CNN como alternativa pertinente em aplicações de triagem que priorizem a delimitação precisa do contorno em detrimento do tempo de resposta.

Merece registro específico, no escopo deste trabalho, o conjunto CylinDeRS (STAVROTHANASOPOULOS et al., 2025), construído justamente para a detecção de botijões de gás em cenas reais. Reunindo 7.060 imagens RGB e mais de 25.250 instâncias anotadas, o conjunto propõe duas tarefas: a detecção do cilindro como objeto de interesse e a classificação de seus atributos de material, dimensão e orientação. Os autores reportam mAP máximo de 91% para a detecção e acurácia máxima de 71,6% para a classificação de atributos, valores obtidos com modelos de estado da arte ajustados ao conjunto de dados. Dois aspectos são diretamente pertinentes à proposta aqui apresentada. O primeiro é a diferença de patamar em relação às métricas consolidadas durante o estudo: quando o alvo é o próprio botijão em cena real, e não classes genéricas de resíduos, o problema mostra-se sensivelmente mais difícil, o que recomenda cautela na transposição direta de métricas obtidas em conjuntos de triagem geral. O segundo é a presença de orientação entre os atributos anotados, incluindo a distinção entre cilindro em pé e tombado, o que confirma empiricamente que a pose do objeto constitui um fator relevante de variação da evidência visual.

3. METODOLOGIA

A pesquisa adotou um caminho metodológico alinhado ao objetivo de avaliar a viabilidade de um programa computacional industrial para detectar objetos cilíndricos, como botijões de gás, em uma planta de processamento de RSU. E, para esse propósito, adotou-se uma abordagem organizada em quatro fases, a saber: revisão teórica, levantamento de campo, estudo de caso, com sigilo da identidade da empresa e proposição da intervenção tecnológica.

Sendo assim, esta pesquisa caracteriza-se, em sua natureza, como aplicada, uma vez que busca gerar conhecimento para aplicação prática, com foco na resolução de entraves específicos no setor industrial de gerenciamento de RSU e na lógica de funcionamento das plantas industriais de empresas que atuam nesse setor.

Em relação à classificação quanto aos fins, o estudo é considerado exploratório e descritivo, dado que se volta à compreensão do funcionamento da planta de processamento de RSU e, ao mesmo tempo, descreve a realidade em que a tecnologia da visão computacional é proposta (VERGARA, 2017).

3.1. Revisão teórica

De início, procedeu-se à revisão teórica, amparada em fontes técnicas e de autores que se dedicaram ao tema em pauta, com publicação em bases científicas reconhecidas como IEEE Xplore, Scopus e Google Acadêmico, de modo que se pudesse ter amparo e conhecimento prévio em relação aos assuntos pertinentes à automação industrial, visão computacional, reconhecimento de formas cilíndricas, tecnologias aplicadas a plantas de resíduos sólidos, bem como se ter as explicações preliminares relacionadas à engenharia ambiental e otimização de processos. A referida etapa buscou elaborar um referencial teórico robusto que fundamentou a proposta de intervenção (GIL, 2019).

3.2. Levantamento de campo

Logo depois, foi realizado um levantamento de campo, com visitas técnicas a uma planta de processamento de RSU, para mapear o fluxo de

resíduos, por meio da observação in loco dos pontos de acúmulo e separação, além de permitir a verificação da estrutura e da tecnologia empregadas na triagem. Foram utilizados instrumentos de coleta, como diário de campo, registros fotográficos sem identificação empresarial, anotações e registros técnicos, bem como a análise de documentos internos da empresa, adotada como referência para o estudo de caso (TRIVIÑOS, 1987). Quanto à abordagem do estudo, foi observacional, pois a análise baseou-se na observação de campo.

3.3. Estudo de caso, com sigilo da identidade da empresa

A fase seguinte consiste em um estudo de caso de caráter estritamente técnico-observacional, realizado em ambiente operacional real, em uma empresa de médio porte especializada na triagem e no processamento de RSU. Vale ressaltar que a identidade da instituição foi preservada por motivos de confidencialidade e sigilo industrial, mediante anuência formal da empresa à utilização restrita dos parâmetros operacionais. A coleta de dados baseou-se exclusivamente no levantamento de documentos internos, fluxogramas, relatórios técnicos e manuais do maquinário, bem como na observação direta in loco das dinâmicas das esteiras. Destaca-se que o levantamento observacional permitiu compreender em profundidade a viabilidade espacial e cinemática de aplicação do sistema computacional no ambiente de produção.

3.4. Proposição da intervenção tecnológica e modelagem da planta em ambiente simulado

A última fase do estudo dedica-se à proposição de uma arquitetura de integração tecnológica. Esta etapa consiste em modelar, de forma teórica e matemática, um sistema de intertravamento de segurança de natureza discreta, acionado por evento, no qual a detecção do objeto anômalo funciona como condição lógica de disparo da parada, e não como sinal de realimentação de uma variável controlada. A proposta integra o hardware de visão computacional ao Controlador Lógico Programável (CLP) da planta, executando as redes neurais indicadas pelo estado da arte (RUSSELL; NORVIG, 2020) e realizando os cálculos cinemáticos necessários para garantir a distância segura de

posicionamento da câmera em relação ao tempo de frenagem do motor da esteira (BOLTON, 2015).

A viabilidade técnica desta proposta foi fundamentada sem a exigência de implementação física no momento atual, adotando-se, para a verificação, a técnica de comissionamento virtual (Software-in-the-Loop). A topologia do processo, incluindo a dinâmica de transbordo e a atuação mecânica dos motores, foi representada por um modelo de simulação de eventos discretos no software Factory I/O. Cabe registrar que o modelo não constitui um gêmeo digital (*digital twin*) da planta, uma vez que não há troca de dados com o ativo físico: trata-se de um ambiente exclusivamente virtual, parametrizado a partir das medições obtidas no levantamento de campo, cuja finalidade é verificar a lógica de intertravamento antes de qualquer implementação em campo.

3.4.1. Descrição do processo e delimitação da fronteira do modelo

A planta estudada organiza-se em duas grandes etapas: uma etapa de separação primária, executada no piso do galpão por maquinário móvel, e uma etapa de transporte e triagem sobre esteiras. A distinção é relevante para a modelagem, pois apenas a segunda etapa foi representada no ambiente simulado.

Na etapa de piso, os caminhões descarregam o RSU diretamente no galpão de recepção, como se observa na Figura 6.

Figura 6 - Descarregamento de RSU no galpão de recepção



Fonte: Acervo do autor (2026).

Uma primeira escavadeira realiza a separação seletiva de resíduos de grande porte, que são desviados para uma trituradora específica antes de retornarem ao fluxo principal, como se observa na Figura 7.

Figura 7 - Separação seletiva de resíduos de grande porte



Fonte: Acervo do autor (2026).

Em seguida, uma segunda escavadeira promove o revolvimento da massa de resíduos: para expor itens pesados e rígidos, como botijões de gás, o maquinário eleva o material a aproximadamente 3 metros e o despeja novamente no solo, como observado na Figura 8, procedimento que constitui a triagem bruta da planta. Somente após essa operação, a própria escavadeira empurra o volume inspecionado até o ponto de alimentação da esteira primária.

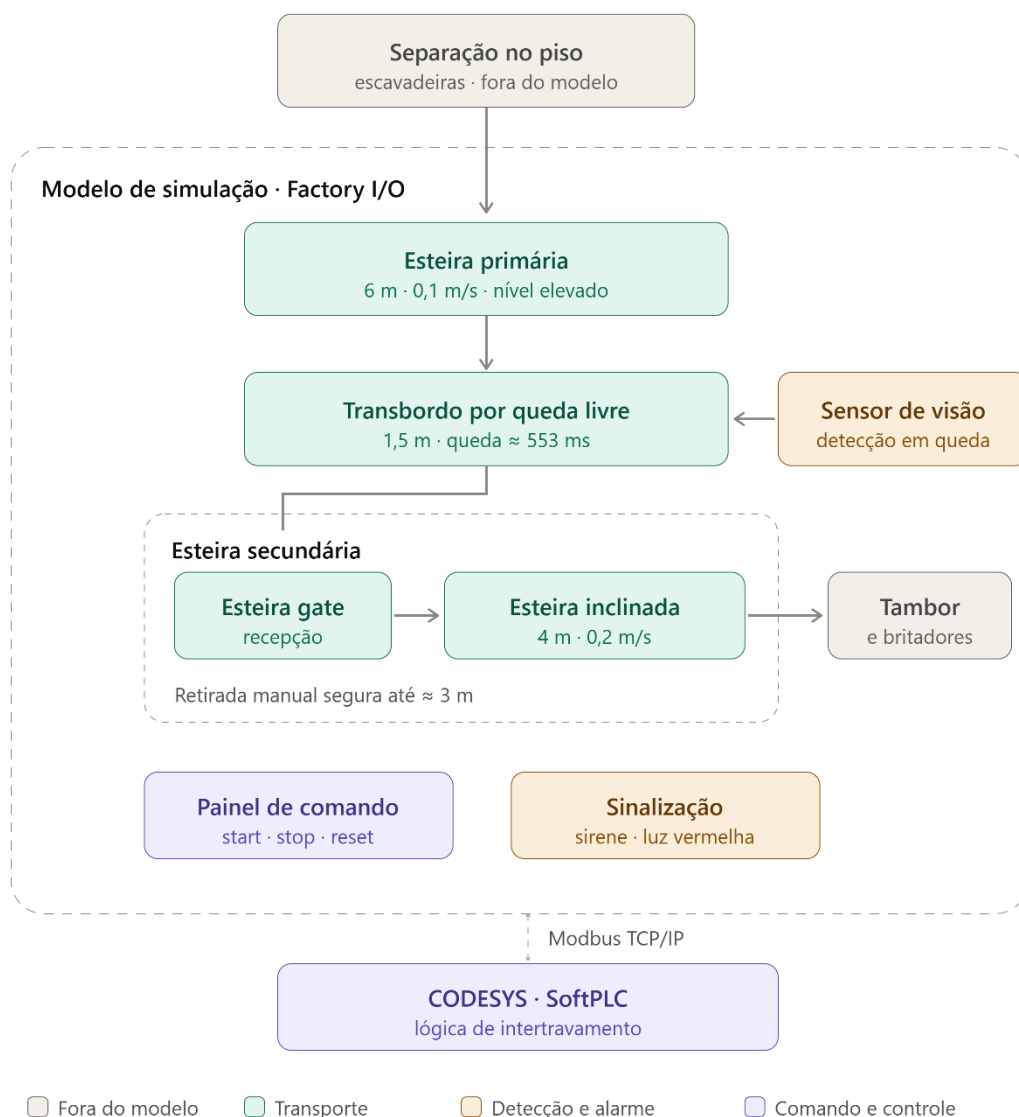
Figura 8 - Revolvimento da massa de resíduos

Fonte: Acervo do autor (2026).

Essa etapa de piso não foi reproduzida no modelo por duas razões metodológicas. Primeiro, porque sua dinâmica depende da condução humana do maquinário, sendo, portanto, estocástica e não determinística. Segundo, porque é justamente sua falibilidade que motiva a intervenção proposta: o modelo assume, como condição de contorno, que o botijão de gás já superou a separação de piso e ingressou na esteira primária. A fronteira do modelo inicia-se, portanto, no ponto de alimentação da esteira primária e encerra-se na descarga da esteira secundária.

3.4.2. Estrutura modelada e parâmetros adotados

A topologia mecânica representada no Factory I/O reproduz o arranjo de três esteiras identificado em campo, conforme o esquema da Figura 9.

Figura 9 - Esquema da estrutura modelada no Factory I/O

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A esteira primária, de 6 metros de comprimento, foi posicionada em nível elevado em relação às demais, de modo a reproduzir o transbordo por queda livre observado na planta real. Adotou-se para ela a velocidade de 0,1 m/s, medida em campo. Trata-se de uma velocidade deliberadamente baixa, compatível com a função da esteira, que é permitir a inspeção visual do material em movimento pelos operadores posicionados ao longo do seu percurso.

O ponto de transbordo corresponde ao desnível de 1,5 metros entre a extremidade da esteira primária e a lona da secundária. Este ponto foi eleito como janela de atuação do sistema de visão computacional porque, durante o trajeto aéreo, ocorre a separação gravitacional do lixo: o objeto encontra-se

isolado da massa de resíduos e sem sobreposição, o que é favorável à inferência. O tempo de residência aérea decorrente desse desnível é de aproximadamente 553 milissegundos e constitui o orçamento temporal disponível para captura, inferência e acionamento.

A esteira secundária foi modelada em dois segmentos que atuam em conjunto: uma esteira do tipo *gate*, responsável por receber o material logo após a queda, e uma esteira inclinada de 4 metros, que dá sequência ao transporte. Adotou-se, para o conjunto, a velocidade de 0,2 m/s, o dobro da primária. O conjunto de esteiras é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Conjunto de esteiras

Fonte: Acervo do autor (2026).

A diferença não é arbitrária; a esteira secundária opera mais rapidamente justamente para espalhar e acelerar o material antes de sua chegada ao tambor magnético, evitando o acúmulo em camadas que comprometeria a separação magnética. Essa velocidade superior também é a condição mais desfavorável do ponto de vista da segurança, pois aumenta o deslocamento residual do objeto durante a frenagem.

O painel de controle foi representado por um *electric switchboard*, equipado com botoeiras de Start, Stop e Reset, permitindo o acionamento manual, a parada geral e o rearme do sistema após intervenção. Como elementos de sinalização, o modelo conta com uma sirene e uma luz vermelha de advertência (*warning light*). A detecção é feita por um *vision sensor*, e o objeto da classe *metal raw material*, disponível na biblioteca do software, foi adotado para simular o botijão de gás em razão de sua geometria cilíndrica e de sua assinatura de material metálico.

O Quadro 1 sintetiza os parâmetros adotados na modelagem e suas respectivas origens.

Quadro 1 - Parâmetros da estrutura modelada

Elemento	Parâmetro Adotado	Origem
Esteira primária	6 m · 0,1 m/s · nível elevado	Levantamento de campo (seção 3.2)
Transbordo	Queda livre de 1,5 m	Levantamento de campo (seção 3.2)
Esteira gate	Recepção pós-queda	Arranjo observado em campo
Esteira inclinada	4 m · 0,2 m/s	Levantamento de campo (seção 3.2)
Zona de retirada manual segura	≈ 3 m de percurso na secundária	Prática operacional da planta
Tempo de parada mecânica	3 a 5 s	Registros técnicos da empresa
Sensor de detecção	<i>Vision Sensor</i>	Abstração do sistema de visão
Objeto-alvo	<i>metal raw material</i>	Análogo geométrico do botijão
Comando manual	Start / Stop / Reset	Painel elétrico da planta
Sinalização	sirene + luz de advertência	Requisito de segurança da proposta

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4.3. Premissas e limitações do modelo

O modelo pressupõe quatro simplificações para delimitar o alcance das conclusões. A primeira é a substituição do algoritmo de visão computacional pelo *vision sensor* nativo do *software*: o modelo não executa inferência por rede

neural, e o desempenho de detecção é tratado como parâmetro externo, obtido da literatura. A segunda é a modelagem do fluxo de resíduos como objetos discretos, e não como uma massa heterogênea, o que impede a representação de fenômenos de sobreposição e de obstrução. A terceira é a representação idealizada da frenagem. O ambiente de simulação trata o desligamento do acionamento como uma transição discreta entre os estados de movimento e repouso, sem reproduzir a desaceleração física do conjunto motor-redutor-correia após a abertura do contator, na qual concorrem a inércia das massas girantes, o atrito nos mancais e a carga de resíduos sobre a lona. Em consequência, o tempo de parada não é um resultado do modelo, e sim um parâmetro externo a ele: adotou-se a faixa de 3 a 5 segundos, registrada nos documentos técnicos da empresa, e é sobre essa faixa, e não sobre o comportamento simulado, que se apoia o cálculo de deslocamento residual. Assume-se, ainda, velocidade constante ao longo de todo o intervalo de frenagem, hipótese deliberadamente conservadora, já que a desaceleração real produz um deslocamento menor, de modo que o valor obtido deve ser lido como um limite superior. A caracterização experimental da curva de desaceleração sob carga permanece, portanto, como verificação necessária para a implementação em campo. A quarta simplificação refere-se à cardinalidade do sensoriamento: o modelo representou um único ponto de detecção na janela de transbordo, correspondente ao *vision sensor* mapeado na Figura 9. A arquitetura de detecção redundante discutida não foi, portanto, reproduzida no ambiente simulado, sendo analisada analiticamente quanto ao impacto no orçamento temporal e à lógica de votação. Essa delimitação decorre da própria natureza da ferramenta empregada: como o *vision sensor* do Factory I/O opera por detecção de presença, e não por inferência de classe, a simulação não é capaz de reproduzir os mecanismos de erro de classificação, falsos positivos e falsos negativos, que constituem justamente a motivação para a redundância. Simular duas instâncias do mesmo sensor determinístico produziria dois sinais idênticos, sem qualquer valor demonstrativo. Tais simplificações não comprometem o objetivo do comissionamento virtual, que é verificar a lógica de intertravamento e o encadeamento de sinais entre sensor, controlador e atuadores, e não predizer o desempenho da rede neural.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Diagnóstico operacional e mapeamento do fluxo de resíduos

O levantamento de campo na planta de processamento permitiu o mapeamento detalhado do fluxo do RSU e da arquitetura de segurança atual. O ciclo de triagem tem início com o descarregamento dos resíduos diretamente no piso do galpão de recepção, realizado pelos caminhões. Neste ponto, uma primeira escavadeira realiza a separação seletiva de resíduos de grande porte, que são desviados para uma trituradora específica antes de retornarem ao fluxo principal.

Na sequência, uma segunda escavadeira atua no revolvimento do lixo. Para facilitar a inspeção visual de itens pesados e rígidos, como botijões de gás, o maquinário eleva os resíduos a aproximadamente 3 metros e os despeja no solo. Após essa triagem bruta, a própria escavadeira empurra o volume inspecionado para a alimentação da esteira primária, que opera a uma velocidade contínua de aproximadamente 0,1 m/s.

O fluxo de resíduos segue pela esteira primária até atingir um ponto de transbordo, onde o material sofre uma queda livre de 1,5 metros de altura em direção à esteira secundária. É neste trajeto aéreo, durante a separação gravitacional do lixo, que se definiu a janela de atuação do sistema de visão computacional. A detecção da anomalia no ar evita que o objeto seja sobreposto por outros resíduos na esteira inferior.

Observou-se, com base nos históricos de manutenção e registros de ocorrências, que casos de explosão de botijões de gás já ocorreram mesmo quando a inspeção visual realizada pelo operador não identificava anomalias; o volume excessivo de resíduos e a fadiga do operador são as principais causas das falhas na inspeção durante a passagem das esteiras iniciais de triagem. A Figura 11 mostra botijões de gás que superaram a inspeção humana e atingiram os britadores, reforçando a urgência de um sistema de intertravamento automatizado.

Figura 11 - Botijões de gás após atingirem a zona de trituração na planta



Fonte: Acervo do autor (2026).

Diante deste diagnóstico, a substituição da inspeção humana por um sistema de visão computacional não visa eliminar postos de trabalho, mas sim realocar o capital humano para etapas de maior valor agregado na triagem, delegando a tarefa de detecção de anomalias perigosas a um sensor de alta precisão, com processamento contínuo.

4.2. Análise ergonômica, insalubridade e custos operacionais (OPEX)

Atualmente, a mitigação de falhas e a prevenção de danos ao maquinário dependem exclusivamente de inspeção humana contínua. A empresa mantém um quadro de 4 operadores dedicados a essa função, em regime de rodízio, de modo que o posto de inspeção permaneça ocupado por um operador durante toda a jornada, em turnos de 8 horas diárias. É esse quadro completo, e não o posto individual, que compõe a base de cálculo do OPEX apresentado a seguir. Sob a perspectiva financeira, tomando como referência uma faixa salarial de US\$ 17,50 a US\$ 22,00 por hora, valor observado na abertura de vaga para a posição equivalente na planta estudada, a planta apresenta um Custo Operacional (OPEX) diário estimado entre US\$ 560,00 e US\$ 704,00, atrelado exclusivamente à alocação de mão de obra para vigilância das esteiras.

Além do impacto econômico, a análise de engenharia revela graves passivos ocupacionais. O ambiente do galpão apresenta alta insalubridade, caracterizada principalmente pela emissão de odores intensos decorrentes do acúmulo de lixo no piso. Adicionalmente, os operadores estão sujeitos à fadiga visual e a riscos ergonômicos. A rotina estabelece que o operador se levante a cada 30 minutos, mantendo-se em pé por 5 minutos para assegurar o controle visual do transbordo, introduzindo uma variável de incerteza de falha humana, decorrente de exaustão ou distração, no sistema de controle de riscos. Diante deste diagnóstico, a delegação da tarefa de detecção a um sensor que opera na zona de queda não é apenas uma melhoria técnica, mas também uma necessidade econômica e de saúde ocupacional. O posto de inspeção visual, com a haste mecânica de remoção e a caçamba de contenção posicionadas ao lado do operador, é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Operador em posto de inspeção visual, portando haste mecânica de remoção ao lado da caçamba de contenção



Fonte: Acervo do autor (2026).

4.3. Resultados da revisão da literatura

Para fundamentar a escolha do algoritmo de visão computacional capaz de operar sob as severas restrições temporais do maquinário, a revisão da literatura consolidou métricas de desempenho das arquiteturas de redes neurais

de estágio único (*single-stage detectors*) mais recentes, especificamente da família YOLO. A análise focou em três indicadores críticos para o chão de fábrica: Precisão Média (mean Average Precision – mAP), tempo de inferência (latência) e a plataforma de teste empregada em cada estudo. A Tabela 1 sintetiza os resultados extraídos da literatura recente, evidenciando o comportamento desses modelos na detecção de resíduos sólidos.

Tabela 1 - Comparativo de desempenho de arquiteturas YOLO em dispositivos de Edge Computing para triagem de resíduos

Arquitetura (Rede)	mAP@0,5 (%)	Tempo de Inferência (Latência)	Plataforma de teste	Referência na Literatura
YOLOv4 c/ CSPDarknet-tiny	63,0%	≈ 40 ms	NVIDIA Jetson TX2	(IQBAL et al., 2022)
YOLOv8n (Nano)	98,2%	≈ 85 ms	PC + webcam (inferência); + Arduino (atuação)	(MANO et al., 2025)
YOLOv11n	99,2%	≈ 38 ms	CPU	(MISKI, 2025)

Fonte: Elaborada pelo autor (2026) com base em Iqbal et al. (2022), Mano et al. (2025) e Miski (2025).

Nota: o mAP e o tempo de inferência do YOLOv4-tiny referem-se a um estudo de contaminação de resíduos com hardware de *edge computing* (IQBAL et al., 2022) enquanto os mAPs do YOLOv8n e YOLOv11n foram obtidos em *datasets* específicos de classificação de resíduos, não sendo diretamente comparáveis quanto à dificuldade da tarefa.

Como se observa na Tabela 1, a evolução das arquiteturas de estágio único acompanhou uma melhora significativa na precisão média (mAP). O modelo YOLOv11n, que representa o mais recente estudo sobre plantas de

reciclagem, consegue processar quadros em dispositivos de borda com tempos de inferência próximos de 38 milissegundos e mAP de 99,2%. Adicionando eventuais atrasos de protocolo de rede industrial, estimados entre 30 e 50 milissegundos na comunicação OPC-UA ou MODBUS TCP/IP com o CLP, o tempo de resposta total do sistema de visão computacional situa-se na faixa de 68 a 88 milissegundos, configurando um regime de operação de extrema robustez para processos dinâmicos utilizando o YOLOv11n.

4.4. Implementação em ambiente simulado e verificação da arquitetura de intertravamento

Para materializar, em ambiente virtual, a arquitetura de intertravamento proposta na seção 3.4, o modelo de simulação desenvolvido no Factory I/O foi integrado ao CODESYS, que atuou como Controlador Lógico Programável virtual (SoftPLC), responsável pela lógica de intertravamento. A comunicação entre os dois ambientes foi estabelecida por meio do protocolo Modbus TCP/IP, encarregado de trafegar, em tempo real, os sinais de entrada dos sensores e os comandos de saída para os atuadores.

4.4.1. Configuração da comunicação via Modbus TCP/IP

No Factory I/O, foi selecionado o driver de comunicação Modbus TCP/IP (Server), disponível no menu de configuração de I/O do software, conforme a Figura 13. Nessa configuração, o Factory I/O assume o papel de servidor Modbus, disponibilizando os pontos de entrada e saída da cena simulada: sensores, atuadores, botoeiras e sinalizadores organizados em blocos de *coils* (saídas digitais) e de *discrete inputs/registers* (entradas digitais e analógicas).

Figura 13 - Configuração do servidor Modbus no Factory I/O

CONFIGURATION

- Advantech USB 4704 & USB 4750
- Allen-Bradley Logix5000
- Allen-Bradley Micro800
- Allen-Bradley MicroLogix
- Allen-Bradley SLC 5/05
- Automgen Server
- Control I/O
- MHJ
- Modbus TCP/IP Client
- Modbus TCP/IP Server**
- OPC Client DA/UA
- Siemens LOGO!
- Siemens S7-200/300/400
- Siemens S7-1200/1500
- Siemens S7-PLCSIM

Server

☒ Auto start

Host: 192.168.1.121

Port: 502

Slave ID: 1

Network adapter: Realtek Gaming GbE Family Controller

I/O Config

Write Digital: Inputs

Read Digital: Coils

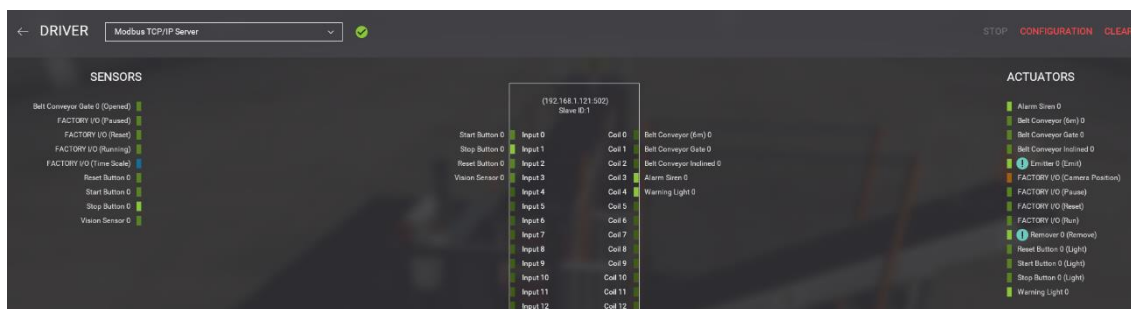
Write Register: Input Registers

Read Register: Holding Registers

Scale: 100

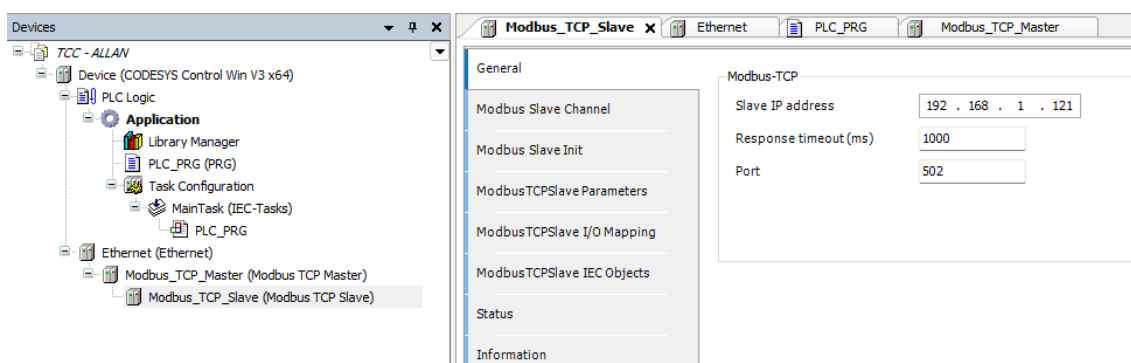
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em seguida, procedeu-se ao mapeamento individual de cada elemento da simulação para um endereço Modbus específico, conforme a Figura 14. Associaram-se às entradas digitais o sinal do sensor de visão (*vision sensor*) e o sinal correspondente à detecção do objeto da classe *metal raw material*; às entradas digitais de comando, as botoeiras *Start*, *Stop* e *Reset* do *electric switchboard*; e às saídas digitais (*coils*), os motores das três esteiras, a sirene e a luz de advertência.

Figura 14 - Mapeamento dos pontos de I/O da cena simulada

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No ambiente CODESYS, foi inserido na árvore de dispositivos do projeto um dispositivo do tipo Modbus TCP Master, ao qual foram atribuídos o endereço IP e a porta TCP padrão 502, correspondentes ao servidor disponibilizado pelo Factory I/O (Figura 15).

Figura 15 - Configuração IP Codesys

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na sequência, adicionou-se um canal de leitura e escrita Modbus TCP Master Channel, no qual foram declaradas as variáveis do programa de controle do tipo BOOL para os sinais digitais, associadas aos respectivos endereços de coils e entradas previamente mapeados (Figura 16).

Figura 16 - Declaração de variáveis Codesys

General		Find	Filter	Show all					
Modbus Slave Channel		Variable	Mapping	Channel	Address	Type	Unit	Description	
Modbus Slave Init				Channel 0	%IB0	ARRAY [0..0] OF BYTE		Read Discrete Inputs	
ModbusTCPSlave Parameters		Application.PLC_PRG.xBit_Start		Channel 0[0]	%IB0	BYTE		Read Discrete Inputs	
ModbusTCPSlave I/O Mapping		Application.PLC_PRG.xBit_Stop		Bit0	%IX0-0	BOOL		0x0000	
ModbusTCPSlave IEC Objects		Application.PLC_PRG.xBit_Reset		Bit1	%IX0-1	BOOL		0x0001	
Status		Application.PLC_PRG.xSensor_MetalDetected		Bit2	%IX0-2	BOOL		0x0002	
Information		Application.PLC_PRG.xSensor_MetalDetected		Bit3	%IX0-3	BOOL		0x0003	
				Channel 1	%QB0	ARRAY [0..0] OF BYTE		Write Multiple Coils	
				Channel 1[0]	%QB0	BYTE		Write Multiple Coils	
		Application.PLC_PRG.xConveyor_Primary		Bit0	%QX0-0	BOOL		0x0000	
		Application.PLC_PRG.xConveyor_Gate		Bit1	%QX0-1	BOOL		0x0001	
		Application.PLC_PRG.xConveyor_Secundaria		Bit2	%QX0-2	BOOL		0x0002	
		Application.PLC_PRG.xSirene		Bit3	%QX0-3	BOOL		0x0003	
		Application.PLC_PRG.xLuzAdvertencia		Bit4	%QX0-4	BOOL		0x0004	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4.2. Programação da lógica de intertravamento

A arquitetura de controle foi programada na linguagem *Structured Text* (ST). A Figura 17 exibe a atribuição das entradas e saídas físicas, e a Figura 18, a lógica de falha segura das esteiras. O programa completo, com os comentários de projeto, é reproduzido no Apêndice A.

Figura 17 - Programação de entrada e saída Codesys

```

1  (* =====
2  PRG_Intertravamento_Esteiras
3  -----
4  Descrição:
5      Programa de controle para o sistema de simulação Factory I/O, responsável
6      pelo intertravamento de segurança da linha de esteiras (esteira primária
7      de 6m, esteira gate e esteira secundária inclinada de 4m), com base na
8      detecção de material metálico ("METAL RAW MATERIAL") pelo sensor de
9      visão. A comunicação com o Factory I/O ocorre via Modbus TCP/IP.
10
11  Autor: Allan Ramalho de Campos
12  TCC  : Sistema de Visão Computacional Industrial em Plantas de RSU
13  ===== *)
14  PROGRAM PLC_PRG
15  VAR
16      (* ----- Entradas físicas (mapeadas via Modbus TCP/IP) ----- *)
17      xBt_Start      : BOOL; // Botão Start
18      xBt_Stop       : BOOL; // Botão Stop
19      xBt_Reset      : BOOL; // Botão Reset
20      xSensor_MetalDetected : BOOL; // Sinal do sensor de visão: classe "METAL RAW MATERIAL"
21      (* ----- Saídas físicas (mapeadas via Modbus TCP/IP) ----- *)
22      xConveyor_Primaria : BOOL; // Motor da esteira primária (6 m, elevada)
23      xConveyor_Gate     : BOOL; // Motor da esteira gate
24      xConveyor_Secundaria : BOOL; // Motor da esteira inclinada (4 m)
25      xSirene            : BOOL; // Sirene de alarme
26      xLuzAdvertencia    : BOOL; // Luz de advertência (warning light) vermelha
27      (* ----- Estados internos ----- *)
28      xSistemaOperando   : BOOL := FALSE; // TRUE = esteiras autorizadas a rodar
29      xAlarmeAtivo       : BOOL := FALSE; // TRUE = alarme travado, aguardando Reset
30      xFalhaSegura       : BOOL := FALSE; // Memória de detecção (SR latch)
31      (* ----- Bordas de subida (detecção de acionamento) ----- *)
32      R_TRIG_Start      : R_TRIG;
33      R_TRIG_Stop       : R_TRIG;
34      R_TRIG_Reset      : R_TRIG;
35  END_VAR

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 18 - Lógica de falha segura Codesys

```

1  (* =====
2  2. LÓGICA DE FALHA SEGURA
3  -----
4  Ao detectar "Metal Raw Material", o sistema trava (SET) o alarme e a parada
5  das esteiras. Esse estado só é desfeito quando o operador aciona
6  a botoeira Reset, após a retirada física do objeto da esteira.
7  ===== *)
8  R_TRIG_Start(CLK := xBt_Start);
9  R_TRIG_Stop(CLK := xBt_Stop);
10 R_TRIG_Reset(CLK := xBt_Reset);
11
12 (* --- Lógica de falha segura por NÍVEL (Solução 2) --- *)
13 IF xSensor_MetalDetected THEN
14     xFalhaSegura := TRUE;
15 END_IF
16
17 IF R_TRIG_Reset.Q AND NOT xSensor_MetalDetected THEN
18     xFalhaSegura := FALSE;
19 END_IF
20
21 (* --- Start / Stop --- *)
22 IF R_TRIG_Stop.Q THEN
23     xSistemaOperando := FALSE;
24 ELSIF R_TRIG_Start.Q AND NOT xFalhaSegura THEN
25     xSistemaOperando := TRUE;
26 END_IF
27
28 IF xFalhaSegura THEN
29     xSistemaOperando := FALSE;
30 END_IF
31
32 (* --- Saídas: esteiras --- *)
33 xConveyor_Primary := xSistemaOperando AND NOT xFalhaSegura;
34 xConveyor_Gate    := xSistemaOperando AND NOT xFalhaSegura;
35 xConveyor_Secundaria := xSistemaOperando AND NOT xFalhaSegura;
36
37 (* --- Saídas: sinalização --- *)
38 xSirene           := xFalhaSegura;
39 xLuzAdvertencia   := xFalhaSegura;
40 xAlarmeAtivo      := xFalhaSegura;

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A leitura do sinal do sensor de visão atua como condição de entrada para o comando de parada das esteiras e para o acionamento da sirene e da luz de advertência, sendo essas saídas escritas de volta, via Modbus, aos atuadores correspondentes na simulação.

O acionamento das botoeiras Start, Stop e Reset foi tratado por meio de blocos de função do tipo *Rising Trigger* (R_TRIG), responsáveis por identificar a borda de subida do sinal booleano correspondente, isto é, a transição do estado lógico de *FALSE* para *TRUE*, gerando um pulso de duração equivalente a um

único ciclo de varredura do CLP. Essa abordagem evita que o comando seja executado repetidamente enquanto o operador mantém a botoeira pressionada, garantindo que cada acionamento físico corresponda exatamente a uma execução da lógica programada. O comportamento da borda de subida durante a detecção é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Comportamento da borda de subida do Codesys durante a detecção do *Metal Raw Material*

Device: Application.PLC_PRG		
Expression	Type	Value
xAlarmaAtivo	BOOL	TRUE
xLuzAdvertencia	BOOL	TRUE
xFalhaSegura	BOOL	TRUE
xBt_Stop	BOOL	TRUE
xBt_Reset	BOOL	FALSE
xBt_Start	BOOL	FALSE
xConveyor_Primary	BOOL	FALSE
xConveyor_Gate	BOOL	FALSE
xConveyor_Secundaria	BOOL	FALSE


```

7  (* ===== *)
8  R_TRIG_Start(CLK:= xBt_Start[FALSE] );
9  R_TRIG_Stop(CLK:= xBt_Stop[TRUE] );
10 R_TRIG_Reset(CLK:= xBt_Reset[FALSE] );
11
12 (* --- Lógica de falha segura por NÍVEL (Solução 2) --- *)
13 IF xSensor_MetalDetected[FALSE] THEN
14   xFalhaSegura[TRUE] := TRUE;
15 END_IF
16
17 IF R_TRIG_Reset.Q[FALSE] AND NOT xSensor_MetalDetected[FALSE] THEN
18   xFalhaSegura[TRUE] := FALSE;
19 END_IF
20
21 (* --- Start / Stop --- *)
22 IF R_TRIG_Stop.Q[FALSE] THEN
23   xSistemaOperando[FALSE] := FALSE;
24 ELSIF R_TRIG_Start.Q[FALSE] AND NOT xFalhaSegura[TRUE] THEN
25   xSistemaOperando[FALSE] := TRUE;
26 END_IF
27
28 IF xFalhaSegura[TRUE] THEN
29   xSistemaOperando[FALSE] := FALSE;
30 END_IF
31
32 (* --- Saídas: esteiras --- *)
33 xConveyor_Primary[FALSE] := xSistemaOperando[FALSE] AND NOT xFalhaSegura[TRUE];
34 xConveyor_Gate[FALSE] := xSistemaOperando[FALSE] AND NOT xFalhaSegura[TRUE];
35 xConveyor_Secundaria[FALSE] := xSistemaOperando[FALSE] AND NOT xFalhaSegura[TRUE];
36
37 (* --- Saídas: sinalização --- *)
38 xSirene[TRUE] := xFalhaSegura[TRUE];
39 xLuzAdvertencia[TRUE] := xFalhaSegura[TRUE];
40 xAlarmaAtivo[TRUE] := xFalhaSegura[TRUE]; RETURN
  
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

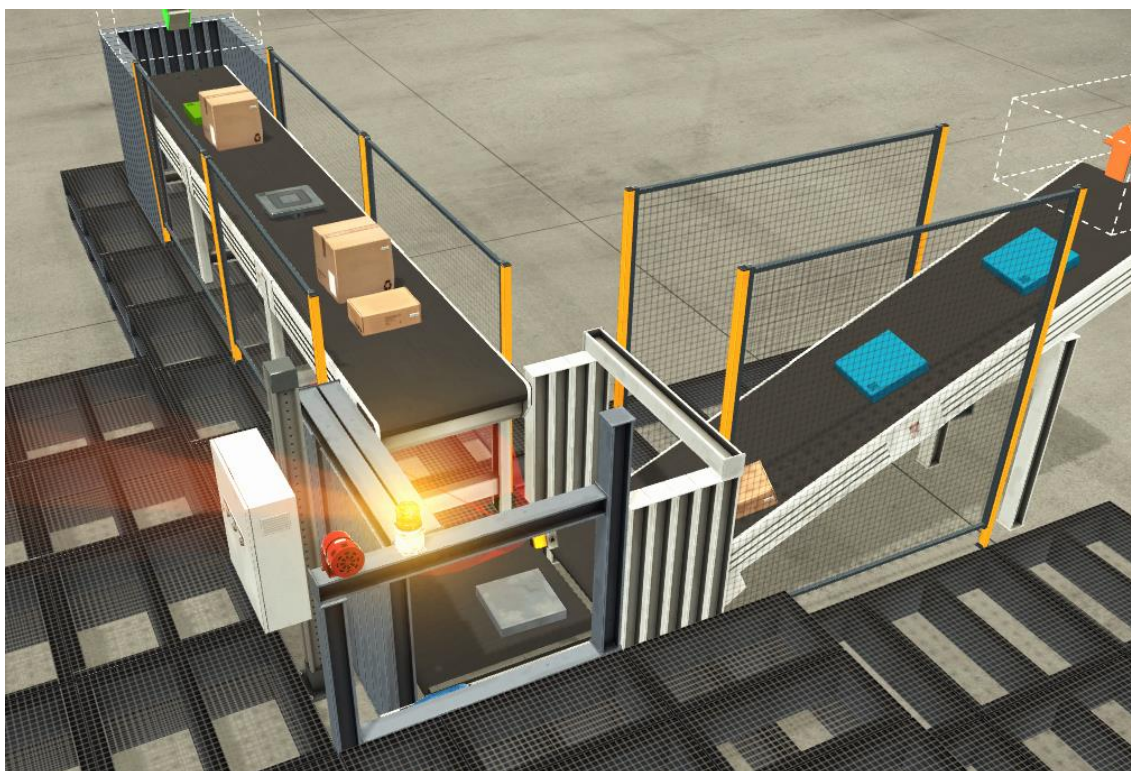
A botoeira de Reset foi programada como condição de rearme, liberando o comando de partida somente após a confirmação manual da retirada do objeto. Cabe destacar que esse rearme manual caracteriza a natureza discreta e não realimentada da arquitetura: o sistema não retorna automaticamente ao estado de operação, dependendo de uma decisão humana explícita.

4.4.3. Verificação do comportamento simulado

A comunicação e a lógica foram **verificadas** pela observação do comportamento sincronizado entre os dois ambientes. Ao simular a passagem do objeto da classe *metal raw material* pelo campo do vision sensor no Factory

I/O, verificou-se o acionamento correto, em tempo real, dos sinais de saída programados no CODESYS, confirmando a integridade do enlace Modbus TCP/IP. A sirene e a luz de advertência foram acionadas automaticamente no mesmo instante da detecção, em conjunto com o comando de parada das esteiras. A Figura 20 registra o estado de esteira travada durante a detecção.

Figura 20 - Esteiras intertravadas durante a detecção do *Metal Raw Material*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A sequência observada confirmou a lógica de falha segura pretendida: detectado o objeto anômalo, o sinal é transmitido via Modbus TCP/IP ao CODESYS, que aciona simultaneamente a sirene, a luz de advertência e o comando de parada das esteiras, impedindo que o material prossiga em direção à etapa de trituração. A retomada da operação não ocorre automaticamente; depende da intervenção do operador que, após retirar fisicamente o objeto da esteira, aciona a botoeira de Reset. Somente a partir desse comando as esteiras retomam o movimento e o ciclo produtivo é reiniciado.

O comissionamento virtual reproduziu, assim, em ambiente controlado, a viabilidade funcional da proposta: a resposta do sistema à detecção ocorre de forma automática e imediata, ao passo que a retirada do objeto e o reinício da

linha permanecem sob responsabilidade humana, preservando a segurança do processo sem exigir atuadores robóticos adicionais. Ressalva-se, contudo, que a verificação aqui apresentada é de natureza lógica e sequencial: atesta o correto encadeamento de sinais entre o sensor, o controlador e os atuadores, e não o desempenho temporal do sistema físico real, cuja aferição depende de implementação em campo. Os tempos observados no ambiente simulado refletem o ciclo de varredura do SoftPLC e a latência da rede local entre as duas aplicações, e não a dinâmica de inferência da rede neural nem a resposta eletromecânica dos acionamentos.

4.5. Cálculos cinemáticos e viabilidade de intertravamento

Para atestar a viabilidade e a segurança do intertravamento, o projeto conceitual restringe a janela de atuação da visão computacional exclusivamente ao período de transbordo gravitacional. A câmera captura e processa a anomalia geométrica enquanto o objeto se encontra em queda livre, percorrendo desnível de $h = 1,5$ m entre a extremidade da esteira primária e a lona da esteira secundária.

O tempo total disponível para o processamento algorítmico, captura do frame e acionamento mecânico do relé corresponde ao tempo de queda (t_{queda}), calculado pela Equação (1), fundamental da cinemática, desprezando o atrito aerodinâmico e a velocidade inicial no eixo Y:

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1)$$

Onde $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ é a aceleração da gravidade. Aplicando os dados estruturais da planta:

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,5}{9,81}} = \sqrt{0,3058} \approx 0,553 \text{ s}$$

O tempo de residência aérea do botijão de gás no campo de visão focal é, portanto, de aproximadamente 553 milissegundos. Conforme consolidado na seção 4.3, a latência de inferência de arquiteturas de estado da arte operando

em hardware de *edge computing*, somada ao atraso de comunicação por protocolos industriais, situa-se na faixa de 68 a 88 milissegundos.

Ao cruzar a métrica cinemática com o tempo de inferência algorítmica, atesta-se a viabilidade da solução. No pior caso considerado, o sistema conclui a detecção e emite o pulso de intertravamento ao CLP em cerca de 16% do tempo total de queda, restando uma folga superior a 460 milissegundos. Dessa forma, no instante em que o botijão impacta a esteira secundária, o comando de desenergização já foi emitido, mitigando o risco de a anomalia avançar em direção à britadeira e preservando a integridade física dos operadores e do maquinário.

É importante ressaltar que o cálculo acima contempla exclusivamente o tempo de queda livre do objeto e a latência do sistema de visão computacional, sem incluir o tempo de parada mecânica da esteira secundária, decorrente da inércia do conjunto motor-redutor-correia após o desligamento do contator. Considerando que essa esteira opera a aproximadamente 0,2 m/s e que o tempo de parada mecânica registrado nos documentos técnicos da empresa situa-se entre 3 e 5 segundos, o deslocamento adicional do objeto durante a frenagem varia de 0,6 a 1,0 metro. Cumpre observar que esse valor decorre da hipótese conservadora de velocidade constante ao longo de todo o intervalo de frenagem; sob desaceleração aproximadamente linear, o deslocamento efetivo seria da ordem de 0,3 a 0,5 metro, de modo que a estimativa adotada representa o limite superior do cenário real.

Essa margem é compatível com a zona de segurança operacional da planta. A partir de aproximadamente 3 metros de percurso na esteira secundária, o operador deixa de reunir condições de realizar a retirada manual do objeto com segurança, seja pela distância física, seja pelo risco de exposição. Como o deslocamento adicional decorrente da inércia mecânica permanece abaixo desse limite mesmo na hipótese mais desfavorável, restam de 2,0 a 2,4 metros de folga dentro da própria zona de atuação segura, o que preserva a viabilidade da intervenção manual ainda que se considere integralmente o tempo de frenagem observado.

Cabe ainda verificar se o orçamento temporal disponível permite uma arquitetura de detecção redundante, na qual duas câmeras observam a janela de transbordo. Duas configurações de implantação foram avaliadas. Na primeira, a inferência das duas imagens é serializada em um único dispositivo de borda, o que duplica o tempo de processamento algorítmico para aproximadamente 76 milissegundos; somado ao atraso de protocolo industrial de 30 a 50 milissegundos, o tempo de resposta total situa-se entre 106 e 126 milissegundos, o que corresponde, no pior caso, a 22,8% do tempo de queda e preserva uma folga de 427 milissegundos. Na segunda configuração, as inferências são executadas em paralelo, em dispositivos de borda independentes, e o custo adicional restringe-se à consolidação dos dois sinais booleanos pela lógica de votação no CLP, operação que consome um único ciclo de varredura, tipicamente entre 1 e 10 milissegundos; o tempo de resposta total permanece na faixa de 69 a 98 milissegundos, praticamente idêntico ao do arranjo de câmera única. Conclui-se que a redundância de detecção é temporalmente viável em ambas as configurações e que mesmo a alternativa mais desfavorável, com processamento serializado em um único hardware, consome menos de um quarto da janela cinemática disponível. A folga temporal identificada na zona de transbordo, portanto, não apenas viabiliza a detecção, como também confere uma camada adicional de confiabilidade, sem prejuízo da função de segurança.

4.6. Redundância de detecção e tratativa de falsos positivos

Embora as arquiteturas da família YOLO apresentem precisão média elevada nos conjuntos de dados consolidados na seção 4.3, a natureza heterogênea e imprevisível do fluxo de Resíduos Sólidos Urbanos introduz dois mecanismos de erro distintos, com consequências assimétricas. O falso positivo ocorre quando objetos inofensivos de geometria e refletância semelhantes, galões metálicos curtos, extintores de pequeno porte ou latas de tinta amassadas, são classificados como botijões de gás; seu custo é operacional, traduzindo-se em paradas desnecessárias da linha. O falso negativo, ao contrário, tem custo potencialmente catastrófico, e o objeto de interesse deste trabalho é particularmente suscetível a um de seus mecanismos: um cilindro que atravessa a janela de transbordo com o eixo longitudinal orientado na direção do sensor projeta uma silhueta aproximadamente circular, suprimindo justamente a

assinatura geométrica alongada que caracteriza a classe. Nessa pose, a evidência visual que sustenta a detecção deixa de estar disponível para o classificador, independentemente da precisão média agregada do modelo.

Para mitigar ambos os mecanismos, propõe-se a adoção de redundância geométrica na janela de transbordo, com duas câmeras dispostas em eixos aproximadamente ortogonais sobre a zona de queda livre. O arranjo atua sobre os dois erros por vias diferentes. Sobre o falso negativo, elimina a pose cega descrita: a orientação que suprime a silhueta alongada em uma das vistas a expõe integralmente na outra. Sobre o falso positivo, habilita a recuperação da dimensão métrica absoluta do objeto por estereoscopia, uma vez conhecida a linha de base entre as câmeras e realizada sua calibração (GONZALEZ; WOODS, 2010). Esse é um discriminante particularmente eficaz para a aplicação em questão, pois as classes que mais frequentemente induzem falso positivo distinguem-se dos botijões domésticos justamente pela escala, e não pela forma: uma lata de tinta e um cilindro de 13 kg podem apresentar silhuetas semelhantes em projeção, mas alturas reais de ordens distintas, informação inacessível a um sistema monocular que dispõe apenas da dimensão aparente em pixels. Ressalta-se, no entanto, que o ganho de confiabilidade depende da introdução de diversidade entre os canais, conforme discutido na seção 2.3.2: duas câmeras idênticas executando o mesmo modelo sob a mesma iluminação apresentam falhas correlacionadas, e a redução da taxa de erro conjunta é substancialmente inferior à que se obteria sob independência estatística. Recomenda-se, por essa razão, a diversificação de banda espectral entre os canais, na linha do que demonstram Casao et al. (2024), ou o emprego de arquiteturas de rede distintas em cada ramo da inferência.

A existência de dois canais de detecção exige a definição explícita de uma lógica de votação, e a escolha não é neutra. Uma lógica de concordância obrigatória, na qual a parada é comandada somente quando ambas as câmeras detectam a anomalia, reduz a incidência de falsos positivos, mas eleva a taxa de falsos negativos, sendo, por isso, inadequada a uma função de segurança: em aplicações dessa natureza, o erro que deve ser minimizado é o que permite a propagação do risco, e não o que interrompe a produção sem necessidade. Adota-se, portanto, a lógica de disjunção, na qual a detecção por qualquer um

dos canais é suficiente para comandar o intertravamento, de modo que nenhuma evidência isolada seja descartada. Reconhece-se que essa escolha implica um número maior de paradas indevidas do que o arranjo monocular, uma vez que os falsos positivos de ambos os canais se somam; é justamente esse o efeito que a diversificação entre os canais, discutida na seção 2.3.2, atua para conter, ao reduzir a probabilidade de que os dois ramos da inferência incorram simultaneamente no mesmo erro de classificação. Registra-se, por fim, que os eventos de discordância entre os canais constituem informação de valor para o refinamento futuro do modelo, por corresponderem precisamente aos casos-limite em que a evidência visual é ambígua, sendo recomendável seu armazenamento para posterior reanotação e retreinamento.

Independentemente da configuração adotada, é fundamental ressaltar que, uma vez paralisado o maquinário, seja por detecção verdadeira ou por falso positivo, a etapa de retirada física da anomalia permanece sob execução manual dos operadores de chão de fábrica, com auxílio de hastes mecânicas. A redundância proposta não desloca essa fronteira; atua exclusivamente sobre a qualidade da decisão de parada. Essa abordagem híbrida preserva as vantagens já identificadas, eliminação da fadiga ergonômica decorrente da inspeção visual ininterrupta e dispensa de atuadores robóticos complexos, e acrescenta a elas a redução simultânea de ambos os mecanismos de erro, mantendo a intervenção humana restrita ao recolhimento seguro do objeto e à validação do reinício da linha.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de uma arquitetura de intertravamento de segurança baseada em visão computacional industrial, voltada à mitigação de riscos mecânicos e operacionais em plantas de processamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Por meio de um estudo de caso descritivo e exploratório em um ambiente real de triagem, foi possível mapear não apenas as limitações cinemáticas do maquinário, mas também os passivos ergonômicos, de insalubridade e financeiros (OPEX) associados à dependência exclusiva da inspeção humana.

O diagnóstico operacional evidenciou que a janela de transbordo entre a esteira primária e secundária é o ponto ideal para a inspeção de objetos cilíndricos, como botijões de gás. A fundamentação teórica, amparada por uma revisão da literatura, confirmou que as redes neurais convolucionais de estágio único, em especial a arquitetura YOLO em suas versões mais recentes, atingem precisão média (mAP) de até 99,2% nos conjuntos de dados analisados, o que as credencia para a aplicação proposta. Cabe ressaltar que esse patamar corresponde às versões mais recentes da família: arquiteturas anteriores, como o YOLOv4-tiny, registram mAP de 63,0% em cenário de triagem de resíduos, de modo que o desempenho reportado não é um atributo da família como um todo, mas sim do estágio evolutivo mais recente.

As hipóteses levantadas na introdução foram validadas matematicamente. A análise cinemática da zona de transbordo demonstrou que o tempo de queda livre do objeto, de aproximadamente 553 milissegundos, é significativamente superior à latência combinada de inferência algorítmica em *edge computing* e do atraso de rede industrial, estimada entre 68 e 88 milissegundos. Essa folga temporal assegura a viabilidade da segunda hipótese: o Controlador Lógico Programável (CLP) possui margem hábil para desligar os contadores e promover a frenagem total da esteira receptora antes que o objeto ultrapasse a zona de retirada manual segura, de aproximadamente 3 metros de percurso na esteira secundária, restando de 2,0 a 2,4 metros de folga mesmo na hipótese mais desfavorável de frenagem. Registre-se que a distância entre esse limite e a entrada do britador não foi medida em campo; a verificação realizada,

portanto, atesta a preservação da janela de intervenção manual, e não uma distância mínima até o equipamento de cominuição.

A materialização do arranjo físico no ambiente de simulação virtual demonstrou a aplicabilidade não intrusiva do projeto à topologia mecânica existente, evidenciando que a modernização tecnológica da planta é viável sem a necessidade de reestruturações do galpão. Ao transferir a responsabilidade pela contenção de riscos do operador humano para um sistema automatizado de intertravamento de segurança, a proposta atende aos preceitos da Indústria 4.0, promovendo a eficiência operacional e resguardando a saúde ocupacional dos trabalhadores.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação física do protótipo em escala reduzida, o treinamento de um modelo YOLO customizado com dados reais coletados na planta estudada e a avaliação empírica do desgaste dos componentes de frenagem do motor sob regime de paradas de emergência. Recomenda-se, adicionalmente, a verificação experimental do ganho efetivo proporcionado pela arquitetura de detecção redundante discutida na seção 4.6, mediante a quantificação das taxas de falso positivo e falso negativo em arranjo monocular e em arranjo de duas câmeras diversificadas, bem como a caracterização do grau de correlação entre as falhas dos canais, parâmetro que, conforme apontado, condiciona diretamente o benefício obtido e não pode ser estimado sem dados de campo. Por fim, sugere-se a avaliação formal da arquitetura proposta quanto ao nível de desempenho requerido para a função de segurança, nos termos da ISO 13849-1, etapa necessária à sua homologação em ambiente produtivo.

REFERÊNCIAS

ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Ambientais, 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2026.

ADEDEJI, O.; WANG, Z. Intelligent waste classification system using deep learning convolutional neural network. **Procedia Manufacturing**, v. 35, p. 607-612, 2019.

AGUIAR, T. S. **Visão computacional para detecção e segmentação de resíduos sólidos urbanos**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia de Computação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/79057>. Acesso em: 30 jul. 2026.

ALMEIDA, C. D. F. de et al. Arquitetura de sistema em nuvem para apoio à implantação de visão computacional em linhas de produção na Indústria 4.0. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 15., 2021, Rio Grande. **Anais** [...]. Rio Grande: SBA, 2021. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbai/article/view/2862. Acesso em: 30 jul. 2026.

AMBIENTE PLASTICO. **El algoritmo de la fábrica inteligente**: la mentefactura del plástico. Ambiente Plastico, 26 abr. 2022. Disponível em: <https://ambienteplastico.com/el-algoritmo-de-la-fabrica-inteligente-la-mentefactura-del-plastico/>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BARBOZA, M. C. N. et al. Manipuladores de lixo reciclável em Pelotas/RS: utilização de equipamentos de proteção individual e riscos ocupacionais. *Revista Gestão & Saúde*, v. 6, n. 3, p. 2553-2565, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rgs/article/view/3129>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BERNARDO, J. C. de A. **Separação de lixo por processamento de imagem**. 2023. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/17780>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BOCHKOVSKIY, A.; WANG, C.-Y.; LIAO, H.-Y. M. **YOLOv4**: optimal speed and accuracy of object detection. arXiv, 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BOLTON, W. **Mecatrônica**: uma abordagem multidisciplinar. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 8 jan. 2007. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445compilado.htm. Acesso em: 30 jul. 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 30 jul. 2026.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. Regulamenta a implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 13 fev. 2020. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2020/decreto-10240-12-fevereiro-2020-789763-norma-actualizada-pe.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 12**: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Brasília, DF: MTE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-12-nr-12>. Acesso em: 30 jul. 2026.

CASAO, S. et al. **SpectralWaste dataset**: multimodal data for waste sorting automation. arXiv, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2403.18033>. Acesso em: 30 jul. 2026.

CEMPRE. **Pesquisa Ciclosoft 2023**: panorama da coleta seletiva no Brasil. São Paulo: Compromisso Empresarial para Reciclagem, 2023. Disponível em: <https://ciclosoft.cempre.org.br/>. Acesso em: 30 jul. 2026.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 17 jul. 2002. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305. Acesso em: 30 jul. 2026.

CUNHA, M. S. M. **Simulação de um sistema automatizado de separação de resíduos recicláveis**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Controle e Automação Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39845>. Acesso em: 30 jul. 2026.

FARIAS, J. J. L. Aplicação de inteligência artificial na classificação de materiais recicláveis: uma abordagem didática com rede neural convolucional. Repositório IFES, 2023. Acesso em: 2 nov. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/server/api/core/bitstreams/6889caf9-a278-4840-bcd0-a16ecd130e77/content>. Acesso em: 30 jul. 2026.

FIGUEIREDO, E.; BERMUDEZ, M. **Triagem de resíduos**: primeiro passo para a reciclagem. Biocomp Resíduos, 18 dez. 2019. Disponível em: <https://biocomp.com.br/triagem-de-residuos-primeiro-passo-para-a-reciclagem/>. Acesso em: 30 jul. 2026.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep learning**. Cambridge: MIT Press, 2016.

GUNDUPALLI, S. P.; HAIT, S.; THAKUR, A. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. **Waste Management**, v. 60, p. 56-74, 2017.

HE, K.; GKIOXARI, G.; DOLLÁR, P.; GIRSHICK, R. **Mask R-CNN**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ICCV), 2017, Veneza. *Proceedings [...]*. Piscataway: IEEE, 2017. p. 2980-2988. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.322>. Acesso em:

IONOS. **Convolutional neural network**: redes neurais convolucionais. Digital Guide IONOS, 3 set. 2024. Disponível em: <https://www.ionos.com/pt-br/digitalguide/sites-de-internet/desenvolvimento-web/convolutional-neural-network/>. Acesso em: 30 jul. 2026.

IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos**: relatório de pesquisa. Brasília, DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7633>. Acesso em: 30 jul. 2026.

IQBAL, U.; BARTHELEMY, J.; PEREZ, P.; DAVIES, T. Edge-computing video analytics solution for automated plastic-bag contamination detection: a case from Remondis. **Sensors**, v. 22, n. 20, art. 7821, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22207821>. Acesso em: 30 jul. 2026.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13849-1: safety of machinery – safety-related parts of control systems – Part 1: general principles for design. 4. ed. Geneva: ISO, 2023.

LAN, R.; AWOLUSI, I.; CAI, J. Computer vision for safety management in the steel industry. **AI**, v. 5, n. 3, p. 1192-1215, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ai5030058>. Acesso em: 30 jul. 2026.

LEE, J.; BAGHERI, B.; JIN, C. Introduction to cyber manufacturing. **Manufacturing Letters**, v. 8, p. 11-15, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2016.05.002>. Acesso em: 30 jul. 2026.

MACHADO, B. C.; SILVA, S. da; CARNEIRO, M. L. Análise de ferramentas de visão computacional. **Revista SODEBRAS**, v. 20, n. 223, p. 1-10, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.29367/7yyrdf16>. Acesso em: 30 jul. 2026.

MACHADO, C. G.; WINROTH, M. P.; RIBEIRO DA SILVA, E. H. D. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 5, p. 1462-1484, 2020.

MANO, B.; GIRI, K. S.; GOKUL, A.; HEMANATH, S.; KUMAR, R. S. An automated waste separator for biodegradable and non-biodegradable materials using YOLOv8 and Arduino. **Journal of Scientific Research and Reports**, v. 31, n. 8, p. 1152-1161, 2025. Disponível em: <https://journalsjsrr.com/index.php/JSRR/article/view/3457>. Acesso em: 30 jul. 2026.

MENEGUELLI, R. **Utilização de visão computacional e robótica colaborativa para a coleta seletiva de lixo**. 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/2442>. Acesso em: 30 jul. 2026.

MISKI, A. Lightweight YOLO object detectors for PET and HDPE classification in recycling facilities. **Scientific Reports**, v.15, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32506-9>. Acesso em: 30 jul. 2026.

NIZAMI, A. S. et al. Waste biorefineries: enabling circular economies in developing countries. **Bioresource Technology**, v. 241, p. 1101-1117, 2017.

PINTO, T.; SILVA, M. T. da; RAFFO, G. V.; EUZÉBIO, T. A. M. Specific energy reduction in a semi-autogenous grinding mill circuit by an automatic control system. **Scientific Reports**, v. 15, art. 21398, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-09263-w>. Acesso em: 30 jul. 2026.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence**: a modern approach. 4. ed. New Jersey: Pearson, 2020.

SANTOS, D.; FERREIRA, G. G.; SILVA, R. B. M. da; SANTOS, L. P. de M. Perspectivas e desafios da sustentabilidade na era da Indústria 4.0. **Revista Científica Sistemática**, v. 14, n. 7, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.56238/rcsv14n7-008>. Acesso em: 30 jul. 2026.

SARC, R.; CURTIS, A.; KANDLBAUER, L.; KHODIER, K.; LORBER, K. E.; POMBERGER, R. Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management: a review. **Waste Management**, v. 95, p. 476-492, 2019.

SEREDKIN, A. V. et al. Development of a method of detection and classification of waste objects on a conveyor for a robotic sorting system. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1359, art. 012127, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012127>. Acesso em: 30 jul. 2026.

STAVROTHANASOPOULOS, K.; GKOUNTAKOS, K.; IOANNIDIS, K.; TSIKRIKA, T.; VROCHIDIS, S.; KOMPATSIARIS, I. CylinDeRS: a benchmark visual dataset for robust gas cylinder detection and attribute classification in real-world scenes. **Sensors**, v. 25, n. 4, art. 1016, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25041016>. Acesso em: 30 jul. 2026.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais**: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global waste management outlook 2024**: beyond an age of waste – turning rubbish into a resource. Nairobi: UNEP; International Solid Waste Association, 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>. Acesso em: 30 jul. 2026.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 17. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

WEG. **Inspeção de corpos estranhos em esteira transportadora com visão computacional.** Blog WEG Digital, 2023. Disponível em: <https://www.weg.net/digital/blog/inspecao-de-corpos-estranhos-em-esteira-transportadora-com-visao-computacional/>. Acesso em: 30 jul. 2026.

YUDIN, D. et al. Hierarchical waste detection with weakly supervised segmentation in images from recycling plants. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 128, art. 107542, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107542>. Acesso em: 30 jul. 2026.

APÊNDICE A – PROGRAMA DE INTERTRAVAMENTO EM LINGUAGEM STRUCTURED TEXT

```
(* =====
Verificação por comissionamento virtual
Factory I/O <-> CODESYS via Modbus TCP/IP
-----
Autor: Allan Ramalho de Campos
TCC   : Sistema de Visão Computacional Industrial em Plantas de RSU
=====*)
PROGRAM PLC_PRG
VAR
(* ----- Entradas físicas (mapeadas via Modbus TCP/IP) -----*)
xBt_Start      : BOOL; // Botoeira Start
xBt_Stop       : BOOL; // Botoeira Stop
xBt_Reset      : BOOL; // Botoeira Reset
xSensor_MetalDetected : BOOL; // Sinal do sensor de visão: classe "METAL RAW MATERIAL"
(* ----- Saídas físicas (mapeadas via Modbus TCP/IP) ----- *)
xConveyor_Primary   : BOOL; // Motor da esteira primária (6 m, elevada)
xConveyor_Gate      : BOOL; // Motor da esteira gate
xConveyor_Secundaria : BOOL; // Motor da esteira inclinada (4 m)
xSirene             : BOOL; // Sirene de alarme
xLuzAdvertencia     : BOOL; // Luz de advertência (warning light) vermelha
(* ----- Estados internos ----- *)
xSistemaOperando    : BOOL := FALSE; // TRUE = esteiras autorizadas a rodar
xAlarmeAtivo        : BOOL := FALSE; // TRUE = alarme travado
xFalhaSegura        : BOOL := FALSE; // Memória de detecção (SR latch)
(* ----- Bordas de subida (detecção de acionamento) ----- *)
R_TRIG_Start       : R_TRIG;
R_TRIG_Stop        : R_TRIG;
R_TRIG_Reset       : R_TRIG;
END_VAR
(* =====
LÓGICA DE FALHA SEGURA
-----
Ao detectar "Metal Raw Material", o sistema trava (SET) o alarme e a parada
das esteiras. Esse estado só é desfeito quando o operador aciona
a botoeira Reset, após a retirada física do objeto da esteira.
===== *)
R_TRIG_Start(CLK := xBt_Start);
R_TRIG_Stop(CLK := xBt_Stop);
R_TRIG_Reset(CLK := xBt_Reset);
(* --- Lógica de falha segura por NÍVEL --- *)
IF xSensor_MetalDetected THEN
xFalhaSegura := TRUE;
END_IF
IF R_TRIG_Reset.Q AND NOT xSensor_MetalDetected THEN
xFalhaSegura := FALSE;
END_IF
(* --- Start / Stop --- *)
IF R_TRIG_Stop.Q THEN
xSistemaOperando := FALSE;
ELSIF R_TRIG_Start.Q AND NOT xFalhaSegura THEN
xSistemaOperando := TRUE;
END_IF
IF xFalhaSegura THEN
xSistemaOperando := FALSE;
```

```
END_IF
(* --- Saídas: esteiras --- *)
xConveyor_Primary   := xSistemaOperando AND NOT xFalhaSegura;
xConveyor_Gate       := xSistemaOperando AND NOT xFalhaSegura;
xConveyor_Secundaria := xSistemaOperando AND NOT xFalhaSegura;
(* --- Saídas: sinalização --- *)
xSirene              := xFalhaSegura;
xLuzAdvertencia      := xFalhaSegura;
xAlarmeAtivo         := xFalhaSegura;
```