

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRÁULIO FARNESE DE PAULA LANA



IMPLANTAÇÃO DE SENSOR DE VISÃO COMPUTADORIZADA PARA
MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM EXTRUSÃO DE TUBOS COLORIDOS

CURITIBA

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRÁULIO FARNESE DE PAULA LANA

IMPLANTAÇÃO DE SENSOR DE VISÃO COMPUTADORIZADA PARA
MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM EXTRUSÃO DE TUBOS COLORIDOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Engenharia Química, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Prof^a. Dra. Mônica Beatriz Kolicheski.

Coorientadores: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mathias

Prof. Dr. Carlos Alberto Gontarski

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Lana, Bráulio Farnese de Paula

Implantação de sensor de visão computadorizada para minimização de resíduos em extrusão de tubos coloridos / Bráulio Farnese de Paula Lana. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Mônica Beatriz Kolicheski

Coorientador: Álvaro Luiz Mathias

Coorientador: Carlos Alberto Gontarsk

1. Internet das coisas. 2. Inteligência artificial. 3. Redução de resíduos. 4. Detectores ópticos.. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial. III. Kolicheski, Mônica Beatriz. IV. Mathias, Álvaro Luiz. V. Gontarsk, Carlos Alberto. VI. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **BRÁULIO FARNESE DE PAULA LANA** intitulada: **IMPLANTAÇÃO DE SENSOR DE VISÃO COMPUTADORIZADA PARA MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS EM EXTRUSÃO DE TUBOS COLORIDOS**, sob orientação da Profa. Dra. MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2023.

Assinatura Eletrônica

28/02/2023 14:41:57.0

MÔNICA BEATRIZ KOLICHESKI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

01/03/2023 07:59:44.0

MARCELO RUDEK

Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

28/02/2023 15:58:11.0

ARNO PAULO SCHMITZ

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Uma boa pesquisa não se concretiza sem bons mentores e, por essa razão, agradeço primeiramente a minha orientadora Mônica pela leitura atenta, olhar crítico e direcionamentos precisos de uma pesquisadora experiente e comprometida com a educação. Também agradeço aos meus coorientadores, Álvaro e Carlos Gontarski, pelas contribuições oportunas que trouxeram clareza nos momentos de maior dúvida.

Um muito obrigado à gestão e equipe da fábrica: Jeancarlo Dotto, Sônia Natume, Antônio Ploposki, Fernando Baccon, Diego Tominaga, Wesley Perbiche, Leonardo Pordeus, Cristofer Surek, Natália Nandi, Beatriz Silva, Lediane Oliveira, Claunei Laurindo, Zanderlei Justus, Victor Daroit, Roberto Kemper e Robson Bornancin. Desenvolver uma pesquisa em um ambiente tão dinâmico e complexo quanto uma planta fabril requer uma rede multidisciplinar que colabore em sinergia. Agradeço o empenho de vocês em tornar possível um projeto que me trouxe tanto aprendizado.

Por fim, agradeço aos meus pais, Anaudo e Eliana, e a meus irmãos, Luiza, Júlia e Victor, por terem formado comigo um lar de mentes inquietas e ávidas por conhecimento. É gratificante ser mais um membro da família concluindo uma pesquisa de mestrado e ter vocês como referência só me motiva a acreditar ainda mais no poder transformador da ciência.

“A consciência infeliz é o destino
trágico da certeza de si mesmo”
(Hegel, 1807)

RESUMO

A produção mundial de plástico segue em tendência de crescimento, embora cresça também a preocupação em buscar substitutos menos impactantes ambientalmente e maneiras de minimizar seu uso, tanto na ponta final da cadeia de suprimentos quanto nos processos produtivos. Na produção, eliminar a poluição na fonte continua sendo um desafio premente para as indústrias dos mais diversos segmentos e o advento da Indústria 4.0 ampliou as alternativas para desenhar processos mais autônomos, inteligentes e consequentemente mais sustentáveis. Dentre a miríade de inovações desta nova fase industrial, situa-se a tecnologia de IoT (*Internet of Things*) que permite integrar uma rede de dispositivos e máquinas no chão de fábrica que geram dados que são armazenados em volumes gigantescos (*big data*) em servidores em nuvem, permitindo a coordenação dos próprios nós desta rede de forma autônoma por algoritmos de Inteligência Artificial (IA). *Smart Factories* são capazes de regular os próprios processos de maneira iterativa, aprendendo com os próprios dados gerados e desenvolvendo padrões ótimos de operação que minimizem defeitos e resíduos do processo produtivo. Fazendo uso de IoT e inteligência artificial, este estudo se propôs a promover a redução de resíduos plásticos de polibutileno em uma linha de extrusão de tubos ópticos coloridos, na qual a maior parte do resíduo é gerada durante a operação de troca de cor dos tubos. Para tal, foi instalada um sensor de visão capaz de capturar a cor dos tubos em tempo real e enviar para um servidor em nuvem no qual é possível estabelecer faixas numéricas de aceitação para as cores-padrão dos tubos a partir da elicitación do conhecimento dos operadores. Estas faixas permitiram a configuração de um sistema especialista que avisa o operador por meio de um sinal luminoso o momento ideal de iniciar a produção para minimizar o resíduo gerado durante as transições. A solução não obteve a minimização desejada, porém permitiu identificar os elementos que devem preceder a implantação do sensor de visão e do sistema especialista para que estes promovam a redução do resíduo, o que envolve a aplicação de melhorias a nível de operação, padronização e treinamento.

Palavras-chave: Produção mais Limpa. Indústria 4.0. IoT. Sensor de Visão. Sistema Especialista. Resíduos.

ABSTRACT

World plastic production continues to grow, although there is also a growing concern to seek substitutes with minor environmental impact and ways to minimise its consumption, both at the end of the supply chain and in the production processes. In the production, eliminating pollution at source remains an urgent challenge for industries from the most diverse segments and the advent of Industry 4.0 has expanded the alternatives to design more autonomous, intelligent, and consequently more sustainable processes. Among the myriad of innovations of this new industrial phase, there is the IoT (Internet of Things) technology that allows the integration of a network of devices and machines on the shopfloor that generate data to be stored in gigantic volumes (big data) on cloud servers, allowing autonomous coordination of the nodes of this network by Artificial Intelligence (AI) algorithms. Smart Factories can regulate their own processes in an iterative manner, learning from their own generated data and developing optimal operating standards that minimise defects and waste in the production process. By means of IoT and AI application, this study aimed to promote the reduction of polybutylene plastic waste in an extrusion line of coloured optical tubes, in which most of the waste is generated during the operation of changing the colour of the tubes. For that, a vision sensor capable of capturing the colour of the tubes in real time and sending it to a cloud server was installed, in which it is possible to establish numerical acceptance ranges for the standard colours of the tubes based on the elicitation of the operators' knowledge. These ranges allowed the configuration of an expert system that warns the operator with a light signal the ideal time to start production to minimise the waste generated during colour transitions. The solution did not obtain the desired minimisation; however, it allowed the identification of the requirements that must be met before the implementation of the vision sensor and expert system so they can promote de waste reduction, which involves improvements on operation, standardisation and training.

Key-words: Cleaner Production. Industry 4.0. IoT. Vision Sensor. Expert System. Waste.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LINHA DO TEMPO GESTÃO AMBIENTAL NO MUNDO	13
FIGURA 2 – DIAGRAMA BÁSICO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO	14
FIGURA 3 - ALIMENTAÇÃO POR DOSAGEM (<i>STARVE FEED</i>)	16
FIGURA 4 - ESQUEMA DO DERRETIMENTO DISSIPATIVO	17
FIGURA 5 - DILATAÇÃO DO MATERIAL E TRACIONAMENTO	17
FIGURA 6 - VISTA FRONTAL DE UMA LINHA DE EXTRUSÃO	18
FIGURA 7 - CROQUI EXTRUSORA DE ROSCA ÚNICA.....	19
FIGURA 8 - ESQUEMA DE UMA ARQUITETURA IOT DECENTRALIZADA...22	
FIGURA 9 - ESQUEMA DO SISTEMA DE VISÃO COMPUTADORIZADA	25
FIGURA 10 - DIAGRAMA DE CROMATICIDADE CIE 1931	26
FIGURA 11 - ESPAÇO CROMÁTICO CIELAB.....	27
FIGURA 12 - CUBO CROMÁTICO RGB	28
FIGURA 13 - PLANIFICAÇÃO DO HEXÁGONO VISTO DA DIAGONAL	29
FIGURA 14 - A PIRÂMIDE E TRIÂNGULO DO MODELO HSV	30
FIGURA 15 - A PIRÂMIDE DUPLA DO MODELO HSL	30
FIGURA 16 - COMPONENTES DE UM SISTEMA ESPECIALISTA.....	33
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DA OPERAÇÃO DE TROCA DE COR.....	37
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DA TROCA DE COR DOS TUBOS.....	40
FIGURA 19 - DILATAÇÃO DO TUBO PÓS-MOLDAGEM NO CABEÇOTE	41
FIGURA 20 - LUMINÁRIA MÓVEL PARA INSPEÇÃO DE COR NO “CONE” .42	
FIGURA 21 - SENSOR DE VISÃO COM DOMO PARA REFLEXÃO	57
FIGURA 22 - SENSOR DE VISÃO COM O DOMO PARA TESTES.....	57
FIGURA 23 – TELA DO SOFTWARE DO SENSOR DE VISÃO.....	57
FIGURA 24 - SUPORTE FABRICADO PARA SENSOR E DOMO.....	58
FIGURA 25 - SENSOR COM REFERÊNCIA PARA RECUPERAÇÃO FOCO .59	
FIGURA 26 - LUMINÁRIA FIXA INSTALADA SOBRE TUBO.....	61
FIGURA 27 – MANCHA DE NÉVOA ADERIDA NA FACE DO SENSOR.....	62
FIGURA 28 - IMAGEM AZULADA SOFTWARE DO SENSOR.....	62
FIGURA 29 - ENCLAUSURAMENTO CÂMARA PRESSÃO POSITIVA	62
FIGURA 30 - SENSOR DESLOCADO RADIALMENTE	62
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO PERÍODO DO OBTURADOR.....	63

FIGURA 32 – CAPTURAS HSV ANTES E DEPOIS DO AJUSTE	64
FIGURA 33 - CAPTURA TUBO BRANCO	64
FIGURA 34 - CAPTURA TUBO ROSA	64
FIGURA 35 - CAPTURA TUBO AQUA	64
FIGURA 36 - SENSOR DE VISÃO COM FILTRO POLARIZADOR.....	65
FIGURA 37 - <i>DASHBOARD</i> TRANSIÇÃO DE AMARELO LARANJA	66
FIGURA 38 - GABARITO DE TUBOS NA COR PADRÃO.....	68
FIGURA 39 - FAIXA DE MATIZ PARA VERMELHO, MARROM E ROSA.....	68
FIGURA 40 - ANDON MOMENTO CERTO DE LARGAR A FIBRA.....	69
FIGURA 41 - CAPTURA DA IMAGEM DO “CONE” DO TUBO	70

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - VELOCIDADE DE LINHA E COMPRIMENTO TUBO (m)	38
GRÁFICO 2 - COMPRIMENTO PRODUZIDO CLP COMPARAÇÃO	50
GRÁFICO 3 - RESÍDUO DE TUBO AGO SET 2021 JAN FEV MAR 2022	51
GRÁFICO 4 - MÉDIA CICLO PRODUÇÃO E PREPARAÇÃO	52
GRÁFICO 5 - PREPARAÇÃO ESTRATIFICADA MODO OPERAÇÃO	53
GRÁFICO 6 - CICLO MÉDIO ANTES APÓS IMPLANTAÇÃO	71
GRÁFICO 7 - EVOLUÇÃO PRODUÇÃO E RESÍDUO DE TUBOS	72
GRÁFICO 8 - COMPARAÇÃO RESÍDUO TUBO MEDIDO TEÓRICO	73

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CORES IDENTIFICAÇÃO TUBOS ABNT NBR 14160:2020.....	36
QUADRO 2 - QUADRO HIPOTÉTICO METODOLOGIA DE CÁLCULO	45
QUADRO 3 - PERGUNTAS CLASSIFICAÇÃO RESÍDUO NBR 10004:2004...	49
QUADRO 5 - COMPARAÇÃO SENSORES IV2 G500CA E OPT2022.....	55
QUADRO 6 - AVALIAÇÃO CRITÉRIOS SELEÇÃO SENSOR DE VISÃO.....	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROPORÇÃO RESÍDUO EM RELAÇÃO AO PRODUZIDO.....	51
TABELA 2 - FAIXA HSV VERDE, AZUL, MARROM E LARANJA	66
TABELA 3 - MÁXIMOS E MÍNIMOS HSV 12 CORES NBR 14160:2020.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CLP	- Controladores Lógicos Programáveis
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i>
ESCAP	- <i>Economic and Social Commission for Asia and the Pacific</i>
IA	- Inteligência Artificial
IoT	- <i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
MB	- <i>Masterbatches</i>
ML	- <i>Machine Learning</i>
ODS	- Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	- Organização das Nações Unidas
OPC UA	- <i>Open Platform Communication Unified Architecture</i>
P+L	- Produção mais Limpa
PBT	- Politereftalato de butileno
PE	- Produção Enxuta
PET	- Politereftalato de etileno
REACH	- <i>Registration, Evaluation, Authorization and Restrictions of Chemicals</i>
ROHS	- <i>Restriction of Hazardous Substances</i>
RPM	- Rotação por Minuto
TI	- Tecnologia da Informação
UNEP	- <i>United Nations Environmental Program</i>
WBCSD	- <i>World Business Council for Sustainable Development</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L) E OS ODS	12
2.2	EXTRUSÃO PLÁSTICA.....	13
2.3	GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA INDÚSTRIA 4.0	20
2.4	SISTEMAS DE INSPEÇÃO EM VISÃO COMPUTADORIZADA	23
2.5	COLORIMETRIA E ESCALAS DE COR.....	24
2.6	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: SISTEMAS ESPECIALISTAS.....	32
3	ESTUDO DE CASO: A TROCA DE COR DE TUBOS ÓPTICOS	35
3.1	DETALHAMENTO DA OPERAÇÃO DE TROCA DE COR.....	38
4	METODOLOGIA	43
4.1	AVALIAÇÃO DOS RESÍDUOS DE TUBO GERADOS	43
4.2	SELEÇÃO DO SENSOR DE VISÃO	45
4.3	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA.....	46
4.4	ESTIMATIVA DA MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUO	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	AVALIAÇÃO DOS RESÍDUOS DE TUBO GERADOS	48
5.2	SELEÇÃO DO SENSOR DE VISÃO	53
5.3	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA.....	60
5.4	ESTIMATIVA DA MINIMIZAÇÃO DO RESÍDUO GERADO	71
5.5	DISCUSSÕES	73
6	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77
	ANEXO A – CONVERTENDO RGB PARA HSV	84
	ANEXO B – CONVERTENDO HSV PARA RGB	85
	ANEXO C – CONVERTENDO RGB PARA HSL	86
	ANEXO D – CONVERTENDO HSL PARA RGB	87
	ANEXO E – COMPARADOR DE CORES HSV (LINGUAGEM C)	88
	ANEXO F – FOLHA DE ACOMPANHAMENTO DO ANDON	89

1 INTRODUÇÃO

A eliminação da poluição na fonte é uma estratégia que vem sendo tratada desde 1989 sob o nome de Produção mais Limpa (P+L), conceito cunhado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP). A aderência desta abordagem aos preceitos da Produção Enxuta (PE) reforça os benefícios econômicos e ambientais da eliminação dos desperdícios na operação, sendo facilmente absorvida por indústrias afeitas aos métodos e técnicas preconizados pela Toyota no período pós-guerras.

Em complemento à essência da P+L, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU trazem nuances importantes para a temática da prevenção da poluição, convocando as indústrias de todo o mundo pelo ODS 9 a modernizarem suas operações a fim de consumirem os recursos de maneira inteligente e gerarem um menor impacto ambiental pelos seus subprodutos e resíduos, desenhando processos mais limpos e eficientes.

Sob a luz da P+L e o ODS 9 no contexto da Indústria 4.0 descrita por Stock e Seliger (2016), identifica-se uma miríade de tecnologias para tornar as operações mais eficientes e limpas, explorando a inteligência artificial e os protocolos de Internet das Coisas (IoT) a fim de desenvolver fábricas inteligentes (*Smart Factory*¹), mais autônomas e responsivas. Neste universo, os sistemas de visão computadorizada surgem como ferramentas para mimetizar a visão humana e transmitir dados em tempo real para repositórios em nuvem que permitem cruzar dados das mais diversas fontes graças a arquiteturas IoT que integram máquinas, sensores e computadores. Estas arquiteturas disponibilizam para a gestão uma grande quantidade de dados que permitem elevar o nível de controle e automação das fábricas.

O avanço das tecnologias de visão computadorizada eleva a colorimetria a um patamar de aplicação industrial para produções em série, se utilizando de modelos de cor para comunicar em dados numéricos os padrões aceitáveis das cores. A partir destes dados, máquinas e computadores permitem que a fábrica

¹ O termo *Smart Factory* (ou *Smart Plant*) foi cunhado em 2006 no workshop de Cyberinfraestrutura da *National Science Foundation*, agência governamental estadunidense (DAVIS, 2006), e significa uma fábrica com alto grau de automação que permite uma produção autônoma e descentralizada.

tome decisões autônomas e a regulem o próprio processo. Aliada aos sensores de visão computacional, a colorimetria pode ser aplicada na inspeção em tempo real da conformidade de produtos com relação à sua cor, permitindo a identificação de aprimoramentos de processo que reduzam a taxa de defeitos, rejeitos e retrabalhos.

A inteligência artificial permite que máquinas se tornem autônomas ao reconhecer gatilhos para modos de operação que minimizarão a geração de resíduos. A ação humana de percepção e julgamento é então substituída por meio da aplicação de sistemas especialistas. Munidos de bases de conhecimento que explicitam e objetivam as regras que regem as ações de seres humanos experientes em determinado domínio do saber, os sistemas especialistas são capazes de inferir constatações de conformidade de produtos. Estas inferências darão autonomia para as máquinas tomarem decisões que promoverão um uso mais eficiente dos recursos em produção.

Unindo o princípio norteador da P+L de se eliminar a poluição na fonte, as premissas do ODS 9 e as inovações tecnológicas da Indústria 4.0 tais como *IoT* e a inteligência artificial aplicada em sistemas especialistas, o potencial de eliminação de resíduos nas operações e aumento da qualidade dos produtos excede os limites tradicionais de manufaturas altamente dependentes da atividade humana. Se exploradas com sabedoria e responsabilidade, as novas tecnologias podem ser forte aliadas na construção de fábricas mais inteligentes e sustentáveis.

O segmento de telecomunicações não se opõe à forte tendência tecnológica da indústria mundial, sendo inclusive responsável por oferecer a infraestrutura necessária para operacionalizar tais sistemas inteligentes. A planta do presente estudo fabrica cabos de fibra óptica que compõem redes de telecomunicação industriais, tendo a própria fábrica como um celeiro para testar as inovações e possibilidades da Indústria 4.0.

Em consonância com a proposta de uma Produção mais Limpa (P+L) que promove uma gestão ambiental preventiva por meio de redesenho dos processos industriais em detrimento de controles “fim-de-tubo” (PEREIRA e SANT’ANNA, 2012), este trabalho busca aplicar as tecnologias de sensores de visão computadorizada, IoT e inteligência artificial. O objetivo desta aplicação foi implantar melhorias que reduzam os resíduos gerados por uma linha de extrusão plástica para a fabricação de tubos coloridos de fibra óptica.

A operação objeto desta intervenção apresenta altos volumes de resíduo plástico e de fibra óptica, resíduos que não são reaproveitados e são gerados pelo uso de matérias-primas importadas em sua grande maioria, representando um custo extra para a empresa além de aumentar o impacto ambiental do produto. Formou-se então um grupo de trabalho de operadores para discutir soluções que reduzissem este resíduo focando principalmente nas trocas de cor dos tubos. As análises do grupo evoluíram para as ações das quais esta pesquisa trata.

A produção de plástico no mundo atingiu a marca de 460 milhões de toneladas em 2019 e os resíduos plásticos chegaram a 353 milhões de toneladas no mesmo ano, dobrando seu volume desde o ano 2000 (OECD, 2022). Quando descartado sem a preocupação de reutilização, reaproveitamento energético ou depósito em aterros sanitários controlados, este resíduo pode obstruir bueiros, provocando inundações e contaminando fluxos d'água subterrâneos ou em regiões costeiras (LEBRETON e ANDRADY, 2019). Os microplásticos gerados principalmente pelo intemperismo dos resíduos plásticos expostos a condições ambientais como chuva e vento (ANDRADY, 2017) se infiltram facilmente no solo e podem liberar substâncias nocivas aos organismos que são parte deste ecossistema (CHAE e AN, 2018).

A proposta de reduzir a geração de resíduos plásticos na fonte na linha de produção em estudo se justifica então pelo propósito de reduzir os impactos ambientais dos resíduos sólidos plásticos gerados, especialmente o polímero polibutileno que é a principal matéria-prima plástica dos tubos ópticos. Combinado com o uso de sensor de visão computadorizada², IoT e inteligência artificial, o presente projeto se propôs a pesquisar e aplicar tecnologias da Indústria 4.0 a fim de prover análises e meios para aprimorar a operação de troca de cor na extrusão de tubos ópticos coloridos para acontecer de forma mais inteligente, eficiente e sustentável.

² O equipamento utilizado nesta intervenção também pode ser nomeado “câmera RGB”, porém será adotado o nome “sensor de visão” para se manter a coesão com a nomenclatura adotada pelo fornecedor bem como a encontrada na literatura que faz parte do referencial bibliográfico deste estudo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a efetividade da implantação da combinação de sensor de visão computadorizada e sistema especialista na minimização do resíduo de tubos ópticos na operação de troca de cor em extrusão plástica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Quantificar o resíduo gerado na operação de troca de cor em linha de extrusão plástica de tubos ópticos;
2. Selecionar sensor de visão computadorizada para coletar em tempo real dados de cor dos tubos ópticos durante sua produção;
3. Configurar inteligência artificial para reconhecer a cor dos tubos em conformidade com as especificações do produto;
4. Estimar a minimização de resíduo de polibutileno gerado no processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L) E OS OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

A Produção mais Limpa (P+L) foi abordada pela primeira vez no contexto do Programa de Produção mais Limpa estabelecido pela UNEP (*United Nations Environment Programme*) em 1989, no qual o conceito é definido como a aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva e integrada para aumentar a eficiência de processos, produtos e serviços a fim de reduzir os riscos para o ser humano e meio ambiente. A discussão sobre o tema evoluiu muito nas décadas subsequentes, sendo incluída na Agenda 21 como uma estratégia para reconciliar as necessidades de proteção ambiental com o desenvolvimento econômico (UNEP, 2002).

Recentemente, os Estados Membros da Organização da Nações Unidas (ONU) adotaram em setembro de 2015 a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, resultante de um processo global participativo de mais de dois anos. Dentre os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODSs) apresentados na agenda, o ODS 9 “Indústria, Inovação e Infraestrutura”, especificamente o tópico 9.4, chama a atenção por trazer novos nuances à essência da P+L:

9.4 Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades. (Agenda 2030 - ODS 9, ONU).

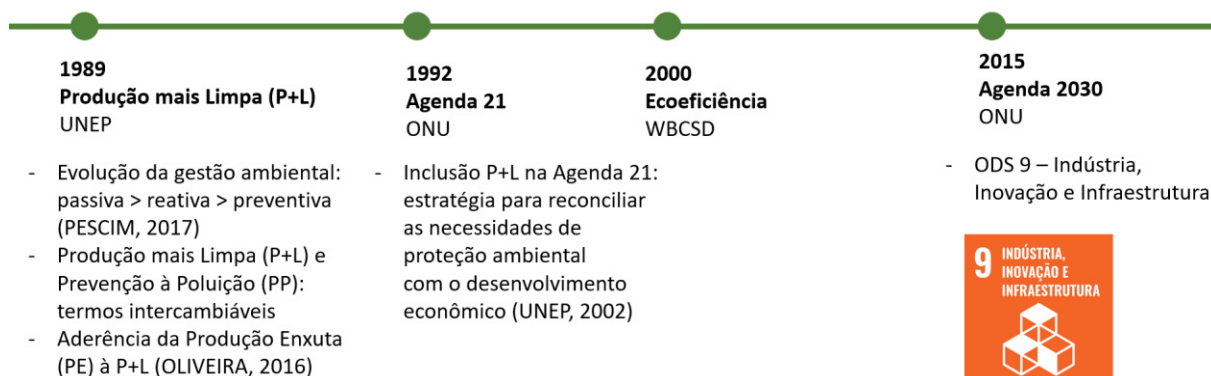
Oliveira (2016) discute a semelhança entre os conceitos de P+L e Prevenção à Poluição (P2) e os considera termos intercambiáveis em sua pesquisa, indicando a maior popularidade do último na América do Norte haja vista sua criação pela Environmental Protection Agency (EPA) estadunidense. Trata também do conceito de Ecoeficiência segundo WBCSD (2000) e ESCAP (2009), salientando seus objetivos econômicos pautados no melhor aproveitamento dos recursos que resulta conseqüentemente em benefícios ambientais. Apesar das ligeiras diferenças,

os três termos convergem para abordagens de produção que visam minimizar a poluição na fonte.

Pescim (2017) descreve a evolução da gestão ambiental das organizações como partindo de uma postura passiva para reativa e, por fim, preventiva, no qual a P+L surge como uma estratégia produtiva aderente à necessidade de se prevenir a poluição. Em sua proposta de modelo de maturidade, apresenta a coleta e análise de dados como práticas de gestão reconhecidas para planejar a P+L nas organizações. Oliveira (2016), por sua vez, elucida a compatibilidade entre as práticas de P+L e de Produção Enxuta (PE) ou Lean Manufacturing, modelo introduzido pela Toyota no Japão no final da década de 1940 que preconiza a eliminação de desperdícios na produção.

Em resumo à discussão, a linha do tempo (FIGURA 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) sumariza os principais marcos citados nesta seção.

FIGURA 1 - LINHA DO TEMPO MARCOS DA GESTÃO AMBIENTAL NO MUNDO



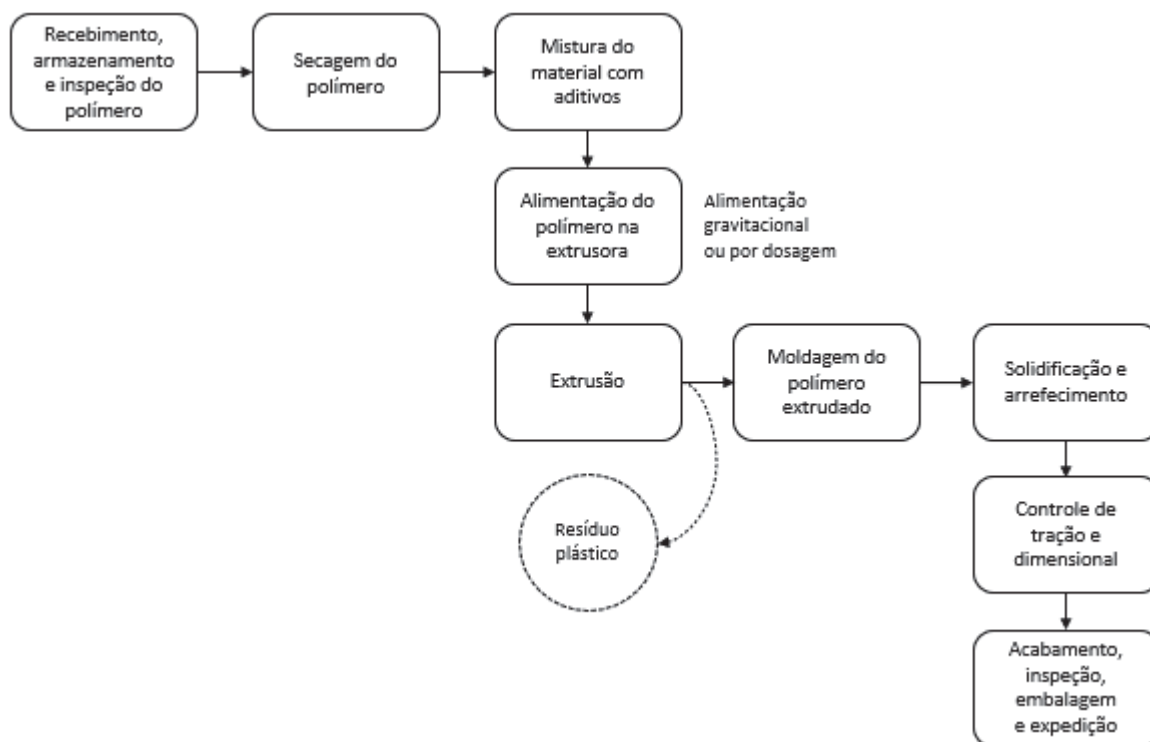
Fonte: o autor (2022).

2.2 EXTRUSÃO PLÁSTICA

O contexto de intervenção deste projeto é uma linha de extrusão plástica de tubos ópticos para a fabricação de cabos de fibra óptica que transmitem sinal de internet a longas distâncias. O processo de extrusão de polímeros consiste em fabricar produtos acabados ou componentes a partir de um perfil que se estende por toda a linha de produção. Em seu guia definitivo da extrusão plástica, Wagner et al. (2014) elencam uma sequência de operações e cuidados a serem seguidos desde o tratamento da matéria-prima a ser utilizada até a inspeção e expedição do produto

acabado a fim de garantir o atendimento de requisitos mínimos de qualidade, processo que pode ser resumido pela FIGURA 2.

FIGURA 2 – DIAGRAMA BÁSICO DO PROCESSO DE EXTRUSÃO



Fonte: adaptado de WAGNER et al. (2014).

Por se tratar de um fluxograma genérico, haverá especificidades de cada processo que podem mudar a ordem ou mesmo eliminar algumas das operações representadas na FIGURA 2. No entanto, este fluxo proposto será utilizado como referência para explicar o processo tal como acontece na linha de extrusão de tubos ópticos que é objeto deste estudo.

Os cuidados relacionados ao recebimento e armazenamento do polímero condizem principalmente à manutenção da pureza do material bem como a prevenção de contaminação cruzada devido ao compartilhamento dos recipientes de armazenamento. Caso haja variações da temperatura de armazenamento do polímero devido às estações do ano, é necessário haver o cuidado de retorná-lo à temperatura ambiente (20 a 25 °C) antes do processo de extrusão a fim de padronizar o fluxo de viscosidade do material derretido dentro do cilindro da extrusora.

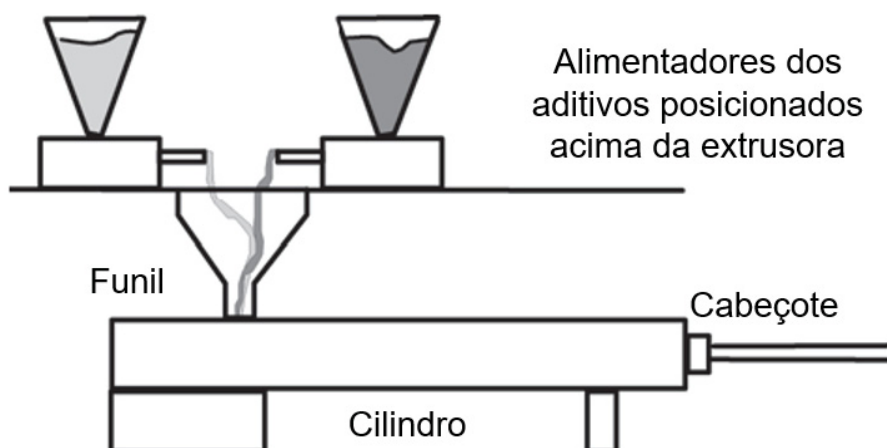
Alguns polímeros como o politereftalato de etileno (PET) e o politereftalato de butileno (PBT ou simplesmente polibutileno) possuem características químicas altamente higroscópicas, o que significa que esses materiais absorvem facilmente a umidade do ambiente. Dentro do cilindro da extrusora a altas temperaturas, a umidade é convertida em vapor e, dependendo da quantidade presente, pode provocar imperfeições na superfície do perfil extrudado como alargamento, rasgos ou aspecto de espuma. Por essas razões, o processo de secagem do material é crucial para garantir a qualidade do produto final.

Dependendo dos requisitos do produto (cor por exemplo), se faz necessária a mistura dos componentes antes da alimentação no cilindro da extrusora. Wagner et al. (2014) citam alguns fatores críticos para esta mistura, tais como a uniformidade da distribuição dos aditivos introduzidos em baixas concentrações bem como a separação do pó e dos grânulos poliméricos. Uma maneira de dosar os materiais e garantir uma distribuição uniforme dos componentes é uma alimentação gravitacional onde os diferentes funis alimentadores são posicionados diretamente acima do pescoço de alimentação do cilindro da extrusora.

Wagner et al. (2014) descrevem quatro maneiras de alimentar o cilindro de uma extrusora com rosca única, da qual uma única maneira será detalhada neste trabalho devido à aplicabilidade ao contexto de intervenção. A maneira consiste na alimentação por dosagem (FIGURA 3), onde os funis alimentadores depositam a formulação da mistura da resina-base (polibutileno) e aditivos (no caso, *masterbatches* – ou simplesmente MBs – para a coloração dos tubos) diretamente no pescoço que a conduz ao cilindro da extrusora. O rendimento da extrusora é determinado pela taxa de dosagem e alimentação ao invés da rotação da rosca. A vantagem dessa maneira está principalmente em alimentar a formulação dos ingredientes na proporção correta diretamente na rosca da extrusora.

Após a alimentação do funil e pescoço, acontece efetivamente o processo de extrusão no qual os polímeros e aditivos são derretidos, comprimidos, misturados e moldados em uma forma pré-definida. Neste processo, o derretimento acontece pela condução da energia térmica gerada pelas resistências na superfície do cilindro e por um fenômeno chamado derretimento dissipativo (CHUNG, 2019), no qual a energia mecânica da rosca em movimento é convertida em energia térmica.

FIGURA 3 - ALIMENTAÇÃO POR DOSAGEM (STARVE FEED)



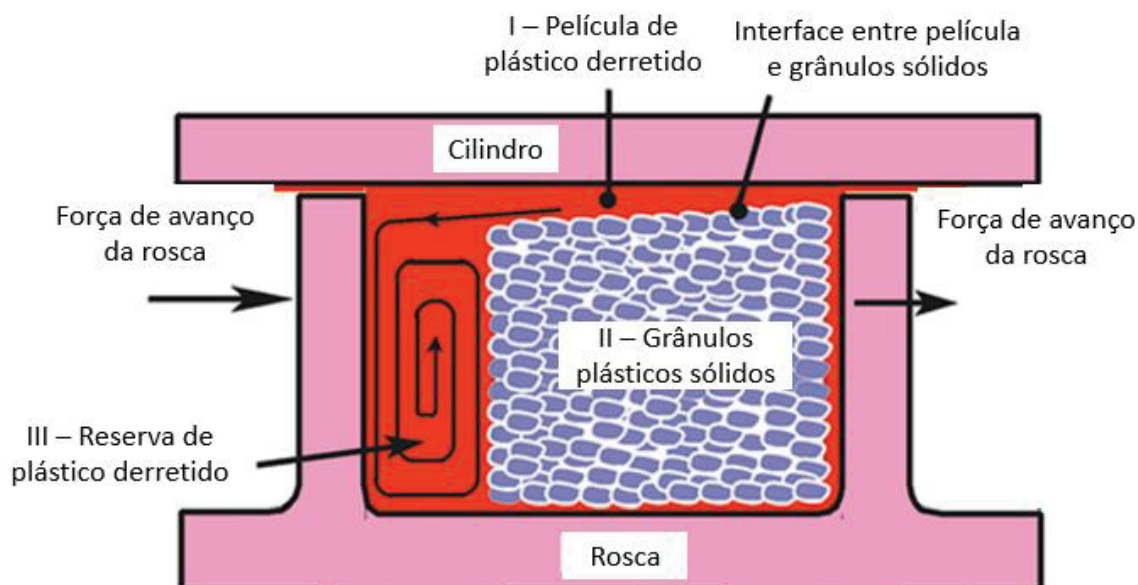
Fonte: adaptado de WAGNER et al. (2014).

Chung (2019) salienta a baixa condutividade térmica dos polímeros atestada pela sua aplicação como isolantes. Dessa forma, ao menos que haja um método de geração de calor por aquecimento dielétrico ou por micro-ondas, o calor será transferido da superfície do cilindro até o centro da massa de polímeros sólidos por condução. Como consequência, a massa de grânulos plásticos sólidos dentro do cilindro derrete muito lentamente, sendo a capacidade de derretimento da rosca não proporcional ao aumento da velocidade de rotação, visto que este material requer um tempo maior de permanência dentro do cilindro para o derretimento completo.

A massa de grânulos plásticos começa a derreter instantaneamente em contato com a superfície quente do cilindro, formando uma película de plástico derretido (elemento I da FIGURA 4). Por sua vez, o mecanismo de derretimento da superfície da rosca é ineficiente dado que a massa de grânulos plásticos (elemento II da FIGURA 4) não é raspada desta superfície, mantendo no estado sólido os grânulos localizados no centro da massa.

A película de plástico derretido é então escorrida por inércia em uma reserva de plástico derretido (elemento III da FIGURA 4) devido ao movimento de avanço da rosca em rotação. Devido à alta viscosidade do plástico derretido, a energia mecânica da rosca dissipada pelo plástico líquido é também convertida em energia térmica, somando-se à condução térmica do calor da superfície do cilindro na composição da capacidade de derretimento do conjunto cilindro-rosca (FIGURA 4).

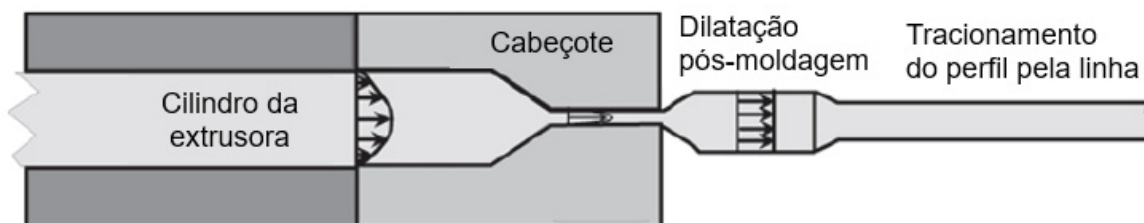
FIGURA 4 - ESQUEMA DO DERRETIMENTO DISSIPATIVO EM CONJUNTO CILINDRO-ROSCA



Fonte: adaptado de CHUNG (2019).

A última etapa no cilindro da extrusora corresponde à moldagem do polímero extrudado em um perfil com a secção transversal desejada. Ao sair pelo cabeçote, onde estão introduzidos o guia e a matriz que moldam o polímero líquido em altas temperaturas, o material se dilata e incha, sendo rapidamente comprimido novamente à medida que o perfil é tracionado ao longo da linha conforme ilustra o desenho esquemático da FIGURA 5.

FIGURA 5 - DILATAÇÃO DO MATERIAL E TRACIONAMENTO PELA LINHA



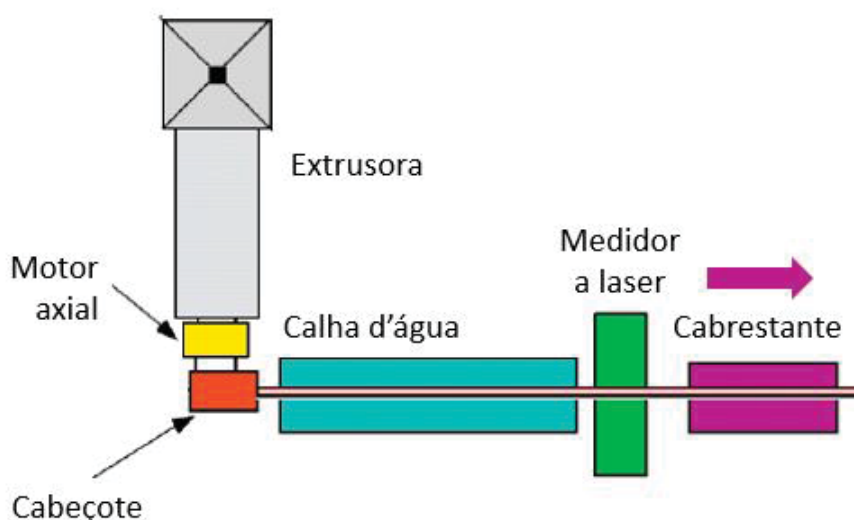
Fonte: adaptado de WAGNER et al. (2014).

O arrefecimento após a saída do cabeçote acontece em calhas com água na linha de extrusão de tubos do presente estudo. Polímeros semicristalinos como é o caso do polibutileno apresentam pontos de fusão e solidificação relativamente altos

(223 °C) e começam a solidificação e subsequente encolhimento logo ao sair do cabeçote. A garantia de uma boa etapa de arrefecimento é a uniformidade, de forma a minimizar as diferenças de encolhimento no entorno do perfil extrudado.

Por fim, o controle de tracionamento e dimensional é desempenhado pela ação dos cabrestantes que tensionam o perfil e a velocidade de rotação da rosca da extrusora. A combinação destes dois parâmetros garante que o tubo obterá o diâmetro e uniformidade desejados. Na FIGURA 6, representa-se esquematicamente a localização do cabrestante e o sentido de sua força de tração que direciona o perfil extrudado em direção à bobina de produto acabado.

FIGURA 6 - VISTA FRONTAL DE UMA LINHA DE EXTRUSÃO ESQUEMÁTICA



Fonte: adaptado de RAUWENDAAL (2019).

A etapa de acabamento, inspeção, embalagem e expedição explicitada na FIGURA 2 não será detalhada neste trabalho por não ser aplicável ao recorte de intervenção deste projeto.

2.2.1 Resíduo plástico no processo de extrusão

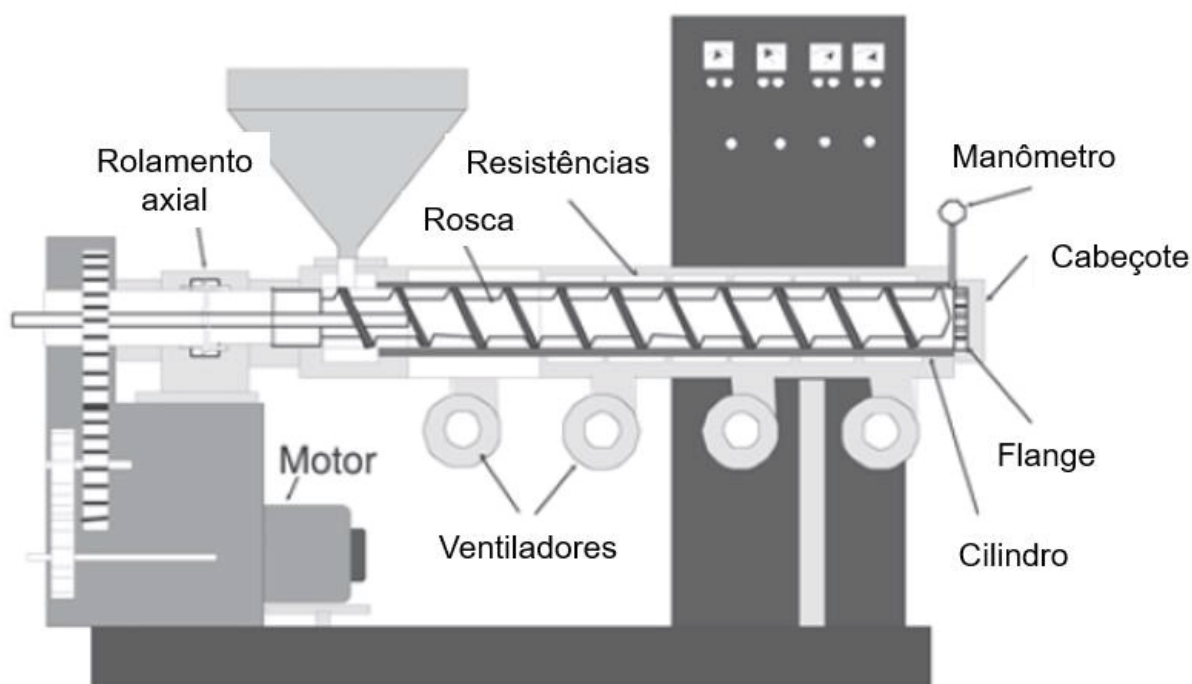
Rauwendaal (2019) comenta o caráter inevitável do resíduo plástico gerado no processo de extrusão durante a largada de máquina, troca de produto e desligamento. Conforme pode ser observado na FIGURA 2, o resíduo gerado acontece justamente após o processo de extrusão, ou seja, após a passagem pelo cilindro com rotação da rosca a altas temperaturas. Quando há trocas de produto e a

resina-base precisa ser trocada, é necessário então esvaziar todo o material contido no cilindro até se iniciar a moldagem do perfil extrudado do produto subsequente. O mesmo acontece nas largadas e desligamento da máquina, onde há um período de transição para se atingir a homogeneidade desejada da mistura da resina e aditivos assim como um resíduo gerado para se esvaziar o cilindro e deixá-lo pronto para um novo turno de trabalho.

2.2.2 Extrusora: croqui do equipamento

Wagner et al. (2014) descrevem os principais componentes da extrusora de rosca única no croqui representado na FIGURA 7.

FIGURA 7 - CROQUI EXTRUSORA DE ROSCA ÚNICA



Fonte: adaptado de WAGNER et al. (2014).

- a) **Motor e rolamento axial:** sistema que permite rotacionar a rosca na velocidade de rotação (RPM) desejada;

- b) **Rosca:** principal componente da extrusora – responsável por misturar e empurrar o material ao longo do cilindro para ser expelido em alta pressão pelo cabeçote;
- c) **Resistências:** resistências elétricas responsáveis por regular a temperatura dentro do cilindro;
- d) **Ventiladores:** dispositivos para arrefecimento da parte externa do cilindro e demais partes da máquina;
- e) **Manômetro:** medidor da pressão dentro do cilindro – parâmetro de controle crucial para uma operação segura da extrusora (pressões acima dos limites toleráveis podem gerar rachaduras no cilindro e provocar graves acidentes);
- f) **Cabeçote:** peça da extrusora pela qual o perfil extrudado sairá para as calhas de arrefecimento com a secção transversal desejada (devido ao posicionamento do guia e matriz internamente);
- g) **Flange:** superfície que separa o cilindro do cabeçote, onde podem ser inseridas telas para limpar eventuais impurezas do material;
- h) **Cilindro:** espaço interno para rotação da rosca onde o material em alta temperatura e pressão é derretido e conduzido ao cabeçote.

2.3 ERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA INDÚSTRIA 4.0

Stock e Seliger (2016) discutem o progresso da geração de valor nas indústrias em direção ao quarto estágio da industrialização, a chamada Indústria 4.0, onde os avanços em eletrônica e tecnologia da informação permitem a realização de um alto nível de automação na produção. Em resumo, as inovações da Indústria 4.0 podem ser descritas da seguinte forma:

Um conjunto de tecnologias, dispositivos e processos [...] capazes de operar de forma integrada ao longo das várias fases do processo produtivo e dos vários níveis da cadeia de suprimentos [...], o que permite uma produção autossuficiente, operações integradas, decisões descentralizadas e mínima interação humana (CASTELO-BRANCO et al., 2019, p. 23)

Neste contexto, tais inovações podem ser aplicadas a fim de dar suporte à otimização de processos, contribuindo positivamente para um uso mais eficiente dos recursos e para a redução de resíduos na produção (Kiel et al., 2017). Por outro lado, a obsolescência dos aparelhos instalados nas fábricas inteligentes pode

acarretar um aumento no lixo eletrônico e no consumo dos recursos utilizados para sua produção (Ford e Despeisse, 2016).

Imergindo nos adventos da Indústria 4.0, Ardanza et al. (2019) salientam o importante papel que os protocolos de *Internet of Things* (IoT) (ou “Internet das Coisas” em português) exercem para capturar e transmitir grande quantidade de dados para os servidores a fim de embasar tomadas de decisão que promovam melhorias nos processos. Dogan e Birant (2021) descrevem fábricas modernas onde sensores enviam dados em tempo real, viabilizando gatilhos nas máquinas que aprenderão por *Machine Learning* a responder autonomamente a condições que podem comprometer a qualidade do produto ou gerar resíduos excessivos.

2.3.1 Arquitetura IoT

Mocnej et al. (2021) descrevem o IoT como um paradigma que se baseia na interconexão de um grande número de dispositivos heterogêneos que fornecem dados adquiridos para uma miríade de serviços digitais. Em um contexto de fábricas inteligentes, Muniraj e Xu (2021) descrevem a aplicação de arquiteturas como a Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA) que permitem que as máquinas enviem e recebam dados entre si, promovendo ações autônomas de maneira descentralizada.

Segundo Mocnej et al. (2021), a estruturação de uma arquitetura IoT capaz de proporcionar agilidade e qualidade na transferência dos dados enfrenta geralmente os seguintes desafios:

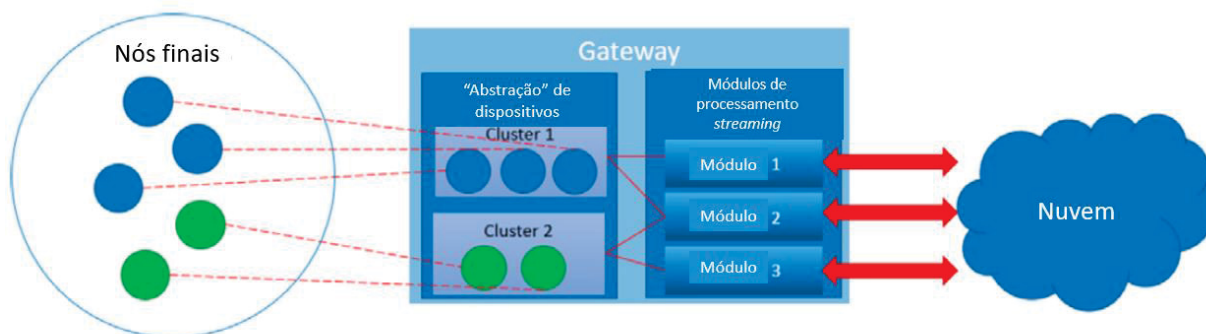
- a) **Dispositivos heterogêneos:** dispositivos dos mais diversos fins como sensores, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), lâmpadas inteligentes gerando dados diversos que devem se comunicar;
- b) **Diversas fontes de energia:** os dispositivos podem apresentar alimentação de energia por uma rede elétrica ou baterias por exemplo;
- c) **Combinação de nós estáticos e móveis:** os nós de comunicação (ou dispositivos) podem estar posicionados em um único local ou estarem acoplados a objetos móveis;

- d) **Condições variantes do ambiente:** a arquitetura IoT deve ser dinâmica para contornar variações de temperatura e iluminação comuns em qualquer fábrica;
- e) **Diversos requisitos para as saídas geradas:** diferentes aplicações podem se alimentar dos dados transmitidos em uma arquitetura IoT, exigindo um tratamento próprio para cada caso.

Oks et al. (2021) acrescentam ainda os desafios de atualizar tecnologias de informação (TI) e infraestrutura de produção ultrapassadas, contextualizando o dado gerado e gerenciando a complexidade do projeto enquanto se considera os cálculos de custo-benefício da arquitetura.

A FIGURA 8 adaptada de Mocnej et al. (2021) mostra os principais componentes de uma arquitetura IoT descentralizada.

FIGURA 8 - ESQUEMA GENÉRICO DE UMA ARQUITETURA IOT DECENTRALIZADA



Fonte: adaptado de MOCNEJ et al. (2021).

Segundo Mocnej et al. (2021), os principais componentes de uma arquitetura IoT descentralizada são:

- a) **Nós finais:** fontes geradoras de dados (sensores, CLPs, câmeras, sistemas gerenciais etc.);
- b) **Gateway:** ponto de interconexão entre a rede local e a Internet;
 - i. **“Abstração” de dispositivos:** camada responsável por conectar os dispositivos (nós finais) à rede, padronizando os protocolos de comunicação;

- ii. **Módulos de processamento *streaming*:** camada de processamento e gerenciamento dos dados em tempo real (*streaming*), realizando os devidos tratamentos para envio para a nuvem;
- c) **Nuvem:** repositório virtual para um grande volume de dados (*big data*), permitindo a leitura e manipulação para viabilizar a tomada de ação pelos dispositivos ou mesmo análises gerenciais.

2.4 SISTEMAS DE INSPEÇÃO BASEADOS EM VISÃO COMPUTADORIZADA

Zhao et al. (2021) introduz a inspeção dos produtos quanto à aparência como atividade crucial na determinação de sua qualidade final na manufatura industrial, visto que sua aparência pode estar relacionada ao status da instalação das peças ou dimensões geométricas que afetam sua funcionalidade. Reconhece, no entanto, o desafio em padronizar esta inspeção dada que ela ainda é muito dependente de olhos humanos e de julgamentos subjetivos.

As inspeções podem acontecer das mais diversas formas, desde métodos mais sofisticados em indústrias de ponta que aplicam máquinas para tomografia computadorizada por raio X como cita Ullah et al. (2021) até inspeções manuais com paquímetros simplificados que retornam uma avaliação qualitativa em respostas Go/No-go para os produtos inspecionados (Xiang et al., 2018).

Neste contexto, Zhao et al. (2021) indicam a expansão da adoção de métodos de detecção que não envolvem contato com as peças/produtos inspecionados, sendo amplamente aplicado no campo da automação industrial devido à possibilidade de substituir pessoas no cumprimento de uma série de tarefas, aumentando a eficiência e reduzindo custos.

Os sistemas de visão computadorizados já são aplicados pela indústria para a inspeção de produtos desde a década de 1980 (Ullah et al., 2021), quando já se estudava o uso da fotogrametria, que consiste em uma técnica de extrair de fotografias a forma, dimensões e posição dos objetos nela contidos. Com o avanço tecnológico do reconhecimento de imagens digitais, os dispositivos de fotogrametria se tornaram mais acessíveis, sendo aplicados na medição da rosca de parafusos

(Gadelmawla, 2017); medição de pinos em conectores eletrônicos (Zhao et al., 2021) e pastilhas de freios automotivos (Xiang et al., 2018).

Desde a aplicação bem-sucedida de redes neurais convolucionais (Krizhevsky et al., 2012) para o desenvolvimento de inteligência artificial capaz de discernir com precisão a conformidade de produtos a partir de imagens digitais, o campo tem obtido grande avanço ainda na atividade de reconhecimento de padrões, exibindo ainda mais o grande potencial de expansão das tecnologias de visão (Zhao et al., 2021). De acordo com Ullah et al. (2021), sistemas de inspeção baseados em visão computadorizada são capazes de reportar informações em tempo real sobre a não-conformidade ou conformidade de produtos manufaturados, o que pode ser usado para ajustar parâmetros de processo a fim de minimizar a ocorrência de defeitos.

Li et al. (2018) apresentam em seu estudo a aplicação de um sistema inspeção de defeitos em linha de montagem, instalando câmeras na produção em conjunção com redes neurais capazes de identificar os produtos defeituosos. A fim de desenvolver um sistema capaz de tratar um grande volume de dados em tempo real, a arquitetura proposta inclui “nós em névoa” (*fog nodes*) que permitem o processamento dos dados de maneira descentralizada, sem sobrecarregar um servidor central.

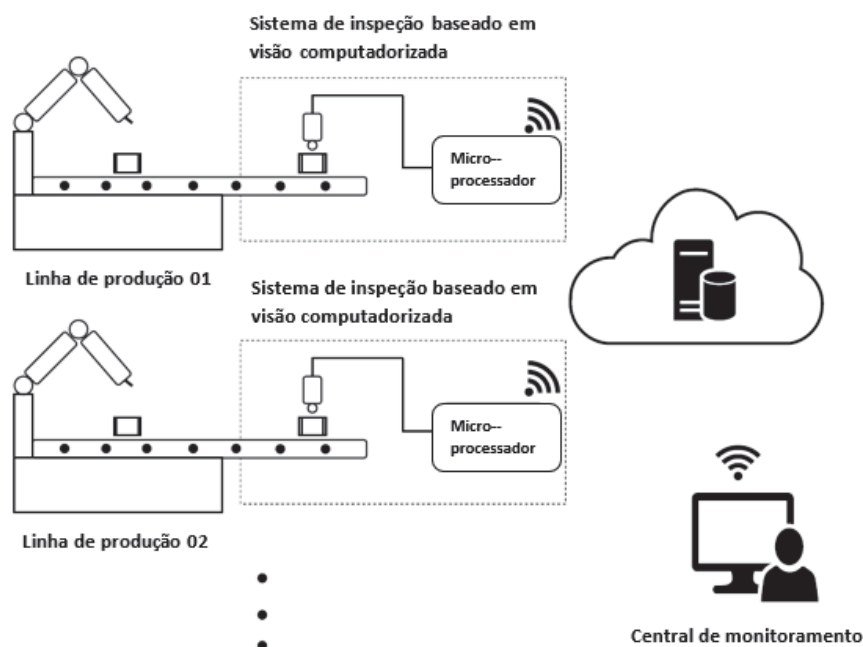
Ullah et al. (2021) propõe, por sua vez, um sistema com custo suficientemente acessível para ser aplicado em pequenos e médios empreendimentos em países emergentes, viabilizando o uso de protocolos de comunicação *IoT* que transmitem as imagens coletadas a servidores que podem ser acessados por centrais de monitoramento para avaliar em tempo real se o produto atende ou não os requisitos de qualidade, conforme esquema apresentado na FIGURA 9.

2.5 COLORIMETRIA E ESCALAS DE COR

A colorimetria consiste na “ciência e tecnologia usada para quantificar e descrever fisicamente a percepção humana da cor” (Ohno, 2000, p. 1). Os primeiros estudos envolvendo a percepção humana da cor datam do início do século XIX, quando Young propôs sua teoria tricromática para inferir o espectro de percepção dos cones do olho humano, sendo as cores primárias o vermelho (R, *red*), o verde

(G, *green*) e o azul (B, *blue*). Maxwell em 1860 comprova então que qualquer cor pode ser obtida a partir da combinação das três cores primárias supracitadas.

FIGURA 9 - ESQUEMA DO SISTEMA DE INSPEÇÃO BASEADO EM VISÃO COMPUTADORIZADA

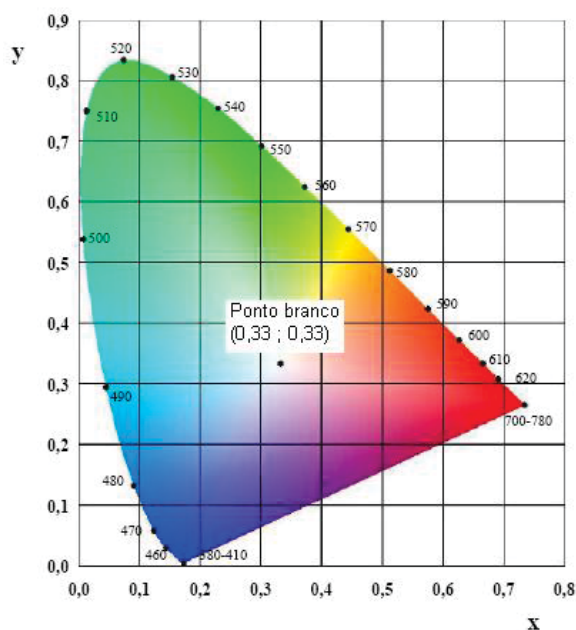


Fonte: adaptado de ULLAH et al. (2021).

Smith e Guild (1931) fizeram experimentos visuais independentes para derivar funções de correspondência de cor se apoiando na teoria tricromática a partir das cores primárias RGB, resultando no que se tornou as bases do sistema de colorimetria CIE (*Comission International d'Éclairage* em francês). Convertendo os valores obtidos a partir das três funções de cor (X, Y e Z) em uma coordenada de cromaticidade, descrita por Ohno (2000) conforme a EQUAÇÃO 1, uma cor poderia ser expressa em um plano bidimensional, também conhecido diagrama de cromaticidade (FIGURA 10 - DIAGRAMA DE CROMATICIDADE CIE 1931).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (1)$$

FIGURA 10 - DIAGRAMA DE CROMATICIDADE CIE 1931



Fonte: FERREIRA (2008).

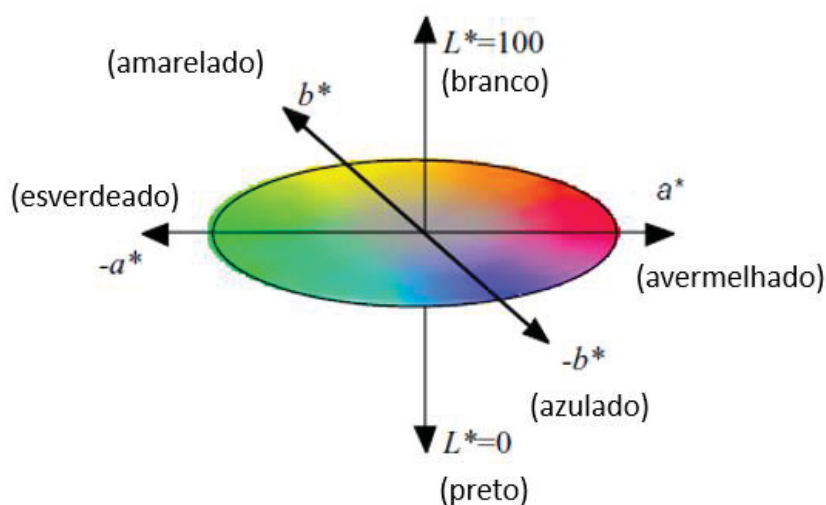
Na FIGURA 10 - DIAGRAMA DE CROMATICIDADE CIE 1931 a combinação das variáveis x e y resultam em uma cor do espectro visível plotado na forma de uma semi-elipse em um plano bidimensional. Os valores na borda da semi-elipse correspondem ao comprimento de onda em nanômetros da cor representada.

Ohno (2000) cita três atributos da cor que são expressos em um espaço tridimensional: tonalidade (H , *hue*), saturação (S) e luminosidade (L , *lightness*).

- Tonalidade ou matiz (H):** a cor propriamente dita, variando no espectro correspondente às frequências de onda de cada tonalidade;
- Saturação (S):** define a intensidade da cor, sendo mais nítida e intensa a cor à medida que aumenta sua saturação e mais cinzenta à medida que a diminui;
- Luminosidade (L):** representa o quanto de branco ou preto é misturado na cor. Quanto maior a luminosidade, mais brilhante a cor (até atingir seu máximo que seria a cor branca) e quanto menor, mais escura (até atingir o mínimo que seria a cor preta).

No diagrama de cromaticidade CIE 1931, as variações de brilho não são contempladas e a tonalidade e saturação são definidas de maneira não-linear. A fim de permitir uma especificação precisa das cores e de suas diferenças, a CIE propõe em 1976 os espaços de cores tridimensionais CIELAB e CIELUV. A diferença entre as cores no espaço CIELAB é calculada pela distância euclidiana entre dois pontos neste espaço tridimensional (FIGURA 11).

FIGURA 11 - ESPAÇO CROMÁTICO CIELAB



Fonte: adaptado de OHNO (2000).

2.5.1 Escalas ou modelos de cor

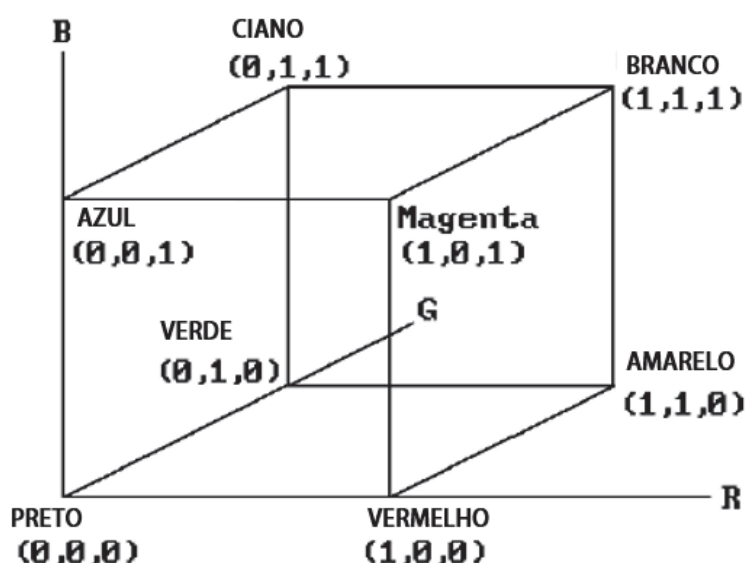
É sabido que o olho humano é capaz de perceber milhões de cores diferentes que seriam impossíveis de serem nomeadas distintamente, então os sistemas de cores surgem para atribuir valores numéricos às incontáveis variações. Estes sistemas são chamados modelos de cores e proporcionam várias maneiras de nomear e reproduzir cores com exatidão (PANTONE, 2022).

Em sua literatura de computação gráfica e modelagem geométrica, Agoston (2005) descreve a lógica algébrica de uma série de modelos de cor, dos quais:

- a) RGB (*Red* – vermelho, *Green* – verde, *Blue* – azul)
- b) CMY (Ciano, Magenta, *Yellow* – amarelo)
- c) HSL (*Hue* – matiz, Saturação, Luminosidade)
- d) HSV (*Hue* – matiz, Saturação, Valor)

RGB e CMY se baseiam na variação dos parâmetros de três cores para obter todas as demais cores do espectro visível. Enquanto RGB se utiliza de variações de vermelho, verde e azul, o modelo CMY se estrutura a partir da variação das cores ciano, magenta e amarelo (as cores primárias “subtrativas”). O cubo cromático RGB (FIGURA 12) ajuda a compreender a lógica por trás da escolha destas cores canônicas.

FIGURA 12 - CUBO CROMÁTICO RGB



Fonte: adaptado de AGOSTON (2005).

Como é possível perceber a partir da observação da

FIGURA 12, os vértices do cubo correspondem a cada uma das cores canônicas dos modelos RGB e CMY a partir das quais se obtém a combinação de três parâmetros que derivam todas as demais cores. Importante observar que as cores ciano, magenta e amarelo são resultado da subtração matricial de cor branca (1, 1, 1) pelas cores canônicas vermelho, verde e azul, como demonstrado por Agoston (2005) na EQUAÇÃO 2.

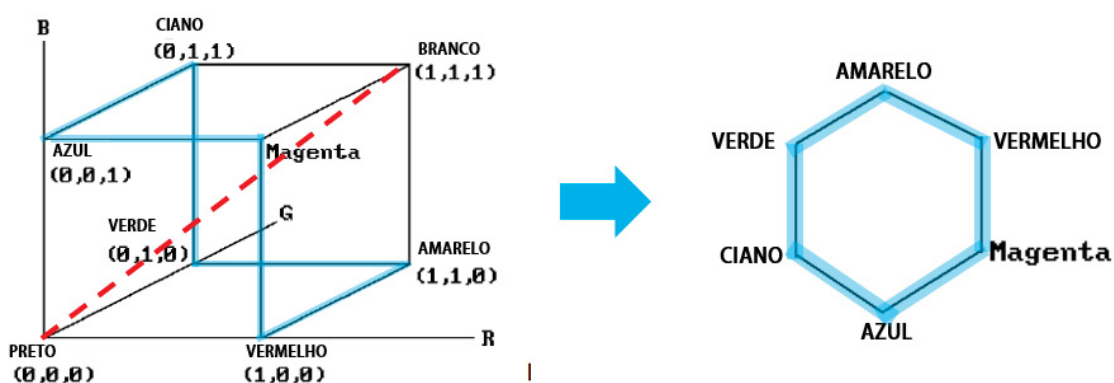
$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

(2)

Agoston (2005) pontua que apesar da simplicidade matemática do modelo RGB, obter a cor desejada a partir da variação dos parâmetros R, G e B em um monitor gráfico não é tão simples – artistas em especial julgam o modelo RGB muito pouco intuitivo, o que deu origem a outros modelos de cor tais como HSL e HSV.

O modelo HSV parte da visualização do cubo cromático RGB do ponto de vista da diagonal principal (preto-branco), formando um hexágono no qual cada uma das 6 cores primárias (e primárias “subtrativas”) corresponde a um vértice conforme fica evidente na FIGURA 13.

FIGURA 13 - PLANIFICAÇÃO DO HEXÁGONO VISTO AO LONGO DA DIAGONAL



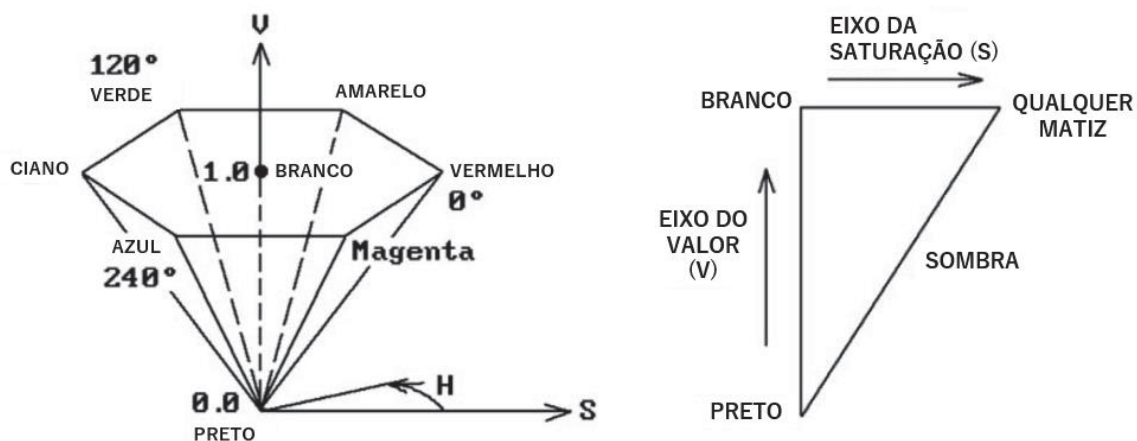
Fonte: adaptado de AGOSTON (2005).

No modelo HSV, a cor é especificada variando três parâmetros: matiz (hue – h), saturação (s) e valor (v). O matiz (H) corresponde a um ângulo de 0 a 360 graus onde vermelho é 0 e verde é 120 graus por exemplo. A saturação (S) varia em uma escala de 0 a 1, partindo de 0 que corresponde ao branco puro a 1 que seria a saturação máxima do matiz (H). O valor (V), por sua vez, também varia de 0 a 1, sendo 0 a ausência de cor (preto) e 1 a sombra mínima para o matiz (H) escolhido. A FIGURA 14 ilustra a lógica por trás do modelo HSV.

O modelo HSL se assemelha muito ao HSV e é mais apropriado para gradações de cores encontradas na natureza. Os valores de H (matiz) variam da mesma forma: um ângulo entre 0 e 360 graus ao redor do eixo vertical. Os parâmetros S (saturação) e L (luminosidade) também variam de 0 a 1, no entanto o

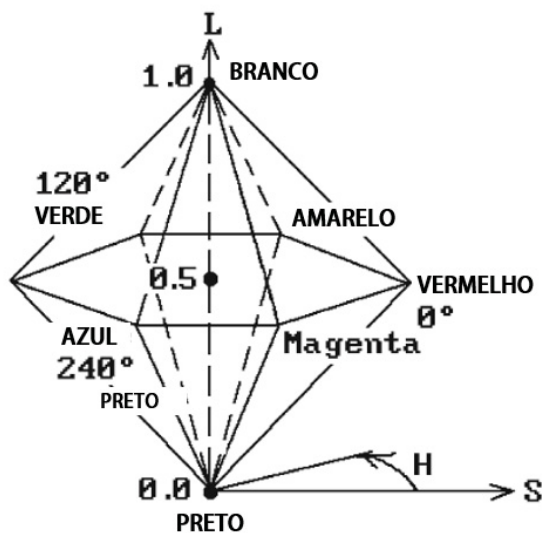
S parte do cinza (0) e o L varia do preto (0) ao branco (1), como mostra a FIGURA 15.

FIGURA 14 - A PIRÂMIDE DE BASE HEXAGONAL E TRIÂNGULO DO MODELO HSV



Fonte: adaptado de AGOSTON (2005).

FIGURA 15 - A PIRÂMIDE DUPLA DE BASE HEXAGONAL DO MODELO HSL



Fonte: adaptado de AGOSTON (2005).

Agoston (2005) descreve os modelos HSV e HSL como uma tentativa de mimetizar a forma como os artistas trabalham:

Artistas escolhem um matiz puro, ou pigmento, e o iluminam a tal coloração deste matiz adicionando branco ou o escurecem a um certo sombreamento daquele matiz adicionando preto, ou geralmente obtêm uma tonalidade

daquele matiz adicionando uma mistura de preto e branco, ou seja, cinza. (AGOSTON, 2005, p. 301).

Para converter entre si os modelos de cor³ descritos na seção anterior, Agoston (2005) propõe 4 algoritmos genéricos que constam nos anexos deste documento:

- a) ANEXO A – CONVERTENDO RGB PARA HSV
- b) ANEXO B – CONVERTENDO HSV PARA RGB
- c) ANEXO C – CONVERTENDO RGB PARA HSL
- d) ANEXO D – CONVERTENDO HSL PARA RGB

2.5.2 Colorimetria em aplicações industriais

A colorimetria é amplamente aplicada no ramo alimentício dada a relevância que a cor tem na avaliação da qualidade dos alimentos, havendo estudos com arroz torrado (Nguyen et al., 2022), coloração de tomates em vinha (Roy et al., 2017) e até mesmo a cor de salsichas pré-cozidas de acordo com seus dias de armazenamento (Feng et al., 2017).

Nos dois últimos casos, a alternativa para medida de cor utilizada foi imagens hiperespectrais, que consistem em processos de coleta de informação baseadas no espectro eletromagnético com o objetivo de encontrar objetos, identificar materiais ou detectar padrões (Chang, 2003). Nguyen et al. (2022) ponderam que as imagens hiperespectrais apresentam grande potencial para aplicações de medição de cor, porém não possuem bom custo-benefício e requerem processos complicados de calibração. Chlebda et al. (2017) pontuam em sua avaliação das imagens hiperespectrais como técnica para medição de cor que os sistemas de visão computadorizada são mais atrativos para a medição de cor, visto que apresentam relativamente menor custo, simplicidade e versatilidade.

Em seu estudo de caso de medição da coloração do arroz torrado, Nguyen et al. (2022) salientam aspectos importantes da aplicação da colorimetria em sistemas de visão computadorizados, tais como:

³ Dispositivos que classificam cores realizam as conversões para o modelo RGB para fins de processamento computacional.

- a) O tamanho das amostras de cor para treinar o algoritmo a reconhecer os padrões aceitáveis do objeto de análise;
- b) O modelo matemático que realiza as transformações do modelo de cor captado pela câmera para uma representação de cor mais adequada para o reconhecimento dos padrões;
- c) A inclusão de amostras de cor representativas do objeto-alvo da aplicação;
- d) e a montagem da câmera que captará as imagens para reconhecimento o mais próximo possível do objeto de análise, de forma a minimizar a influência da luz ambiente e garantir uma iluminação homogênea.

Nguyen et al. (2022) também mencionam a aplicação de lentes polarizadoras a fim de filtrar a reflectância especular da luz em seu sistema de captura de imagem.

2.6 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: SISTEMAS ESPECIALISTAS

O termo Inteligência Artificial (IA) foi originalmente cunhado em 1956 e, enquanto campo teórico, busca não só compreender as entidades inteligentes como também as construir (Russel e Norvig, 1995). Dentre estas entidades, os sistemas especialistas têm provado sua aplicabilidade e capacidade como um sistema computadorizado baseado em conhecimento que emula a habilidade de tomada de decisão de um ser humano especialista (Leondes, 2002).

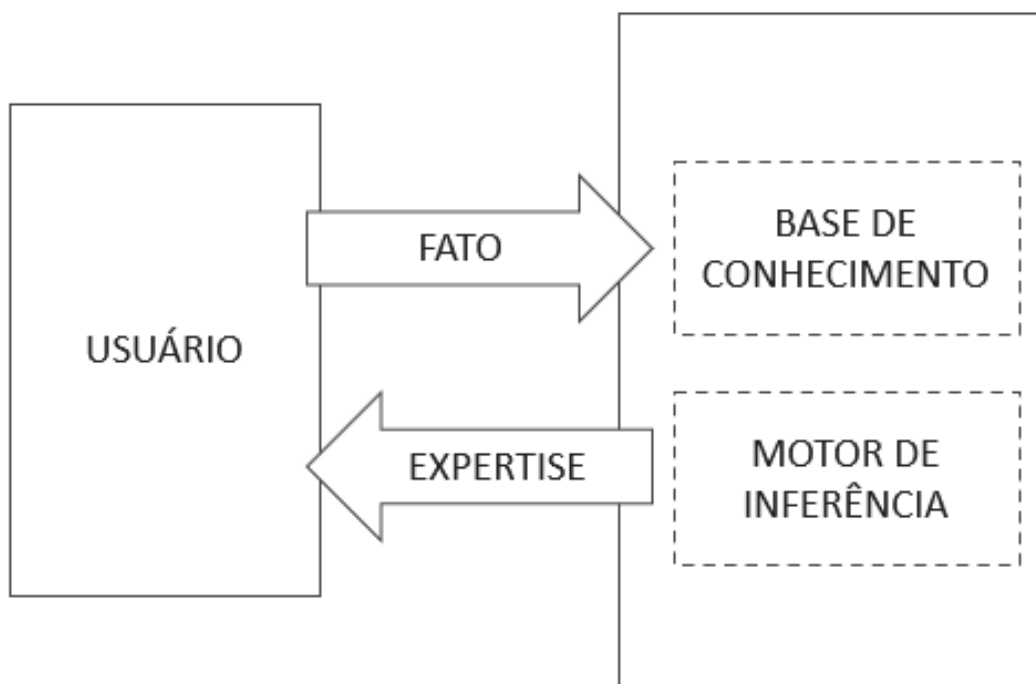
Kaur (2018) descreve os sistemas especialistas como estruturas lógicas capazes de tomar decisões complexas baseadas principalmente em regras condicionais, apresentando componentes conforme ilustrado na

FIGURA 16.

Segundo Kaur (2018), os sistemas especialistas são compostos pelos componentes:

1. **Base de conhecimento:** em contraponto a uma base de dados convencional, a base de conhecimento requer necessariamente dados estruturados com ponteiros para outros objetos a fim de definir relações e regras relacionadas a certo domínio de conhecimento. Uma base de conhecimento pode incluir tanto conhecimento factual quanto heurístico, tendo como objetivo explicitar o conhecimento de um especialista sobre o tema.

FIGURA 16 - COMPONENTES DE UM SISTEMA ESPECIALISTA



Fonte: adaptado de KAUR (2018).

- 2. Motor de inferência:** aplica regras lógicas a uma dada base de conhecimento para deduzir novas informações. De forma iterativa, o motor de inferência atua de dois modos possíveis: encadeamento progressivo ou retrospectivo. O primeiro se apoia no conhecimento existente da proposição antecedente (o “se”) para concluir a conseqüente (o “então”); o segundo recebe uma proposição conseqüente e busca confirmá-la retroagindo sobre as proposições antecedentes existentes.

Segundo Tolun e Oztoprak (2016), os primeiros sistemas especialistas foram criados a partir de entrevistas com especialistas na tentativa de capturar seu conhecimento. O sistema seria então construído usando a experiência de um especialista em certo domínio de conhecimento, performando funções como fazer perguntas e explicar o raciocínio por trás das respostas.

A primeira etapa para se construir um sistema especialista envolve a obtenção do conhecimento especialista, processo conhecido como elicitación do conhecimento (Tolun e Oztoprak, 2016). Este processo pode acontecer por meio das seguintes técnicas de elicitación:

- a) **Entrevistas;**
- b) **Análises protocolares:** o especialista é orientado a verbalizar cada pensamento e ação gerada para resolver um problema. A verbalização é então registrada para servir de entrada para a base de conhecimento;
- c) **Ponderação multidimensional:** representação visual da similaridade entre objetos e experiências que carecem de vocabulário especializado para expressar distinções e relações sutis;
- d) **Tiragem de cartas:** permite a obtenção de um entendimento mais focado e sistemático sobre as classificações e relações do campo de conhecimento do especialista. Consiste basicamente em classificar as ações tomadas pelo especialista em cartas com significado único.

3 ESTUDO DE CASO: A TROCA DE COR NA EXTRUSÃO DE TUBOS ÓPTICOS

A fábrica do presente estudo segue a normativa da ABNT para a codificação de cor dos tubos de seus cabos de fibra óptica. Não existe uma norma única da ABNT para descrever exclusivamente a codificação da cor dos tubos e fibras, mas estas especificações sempre constam nas normativas de fabricação de cada cabo óptico de acordo com sua aplicação.

No caso dos cabos multitubos, este padrão auxilia na identificação da posição de cada uma das fibras em cada um dos diferentes tubos, sendo de grande serventia para os integradores que precisam fazer a emenda dessas fibras na instalação da infraestrutura de redes locais de fibra óptica e para rastrear eventuais rompimentos ou falhas na rede. Dessa forma, o cumprimento desta normativa é um requisito essencial da qualidade do produto, assegurando que ele seja aceito por qualquer cliente por seguir um padrão reconhecido para a codificação de cor dos cabos de fibra óptica.

A normativa ABNT NBR 14160:2020 específica para a fabricação do cabo óptico aéreo dielétrico autossustentado propõe 12 cores para a diferenciação dos tubos e fibras, sendo permitido o uso de marcadores para diferenciar as fibras em tubos com mais de 12 fibras. As cores prescritas na normativa estão listadas no QUADRO 1 - CORES PARA IDENTIFICAÇÃO DE TUBOS E FIBRAS ÓPTICAS PADRÃO ABNT NBR 14160:2020.

Em decorrência da exigência normativa de cores para os tubos, a linha de extrusão de tubos ópticos está sujeita a trocas de cor, o que requer a alternância da cor do MB que está sendo misturado com a resina-base a cada troca. Como a fabricação de um único lote de cabo multitubos necessita da confecção de todos os tubos para seguir para o processo de encapamento, torna-se inviável o agrupamento da produção dos tubos de uma mesma cor sob o risco de atrasar a entrega dos lotes. Dessa forma, a troca de cor é uma operação constante no processo, chegando a acontecer em média 13 vezes por dia.

QUADRO 1 - CORES PARA IDENTIFICAÇÃO DE TUBOS E FIBRAS ÓPTICAS PADRÃO
ABNT NBR 14160:2020

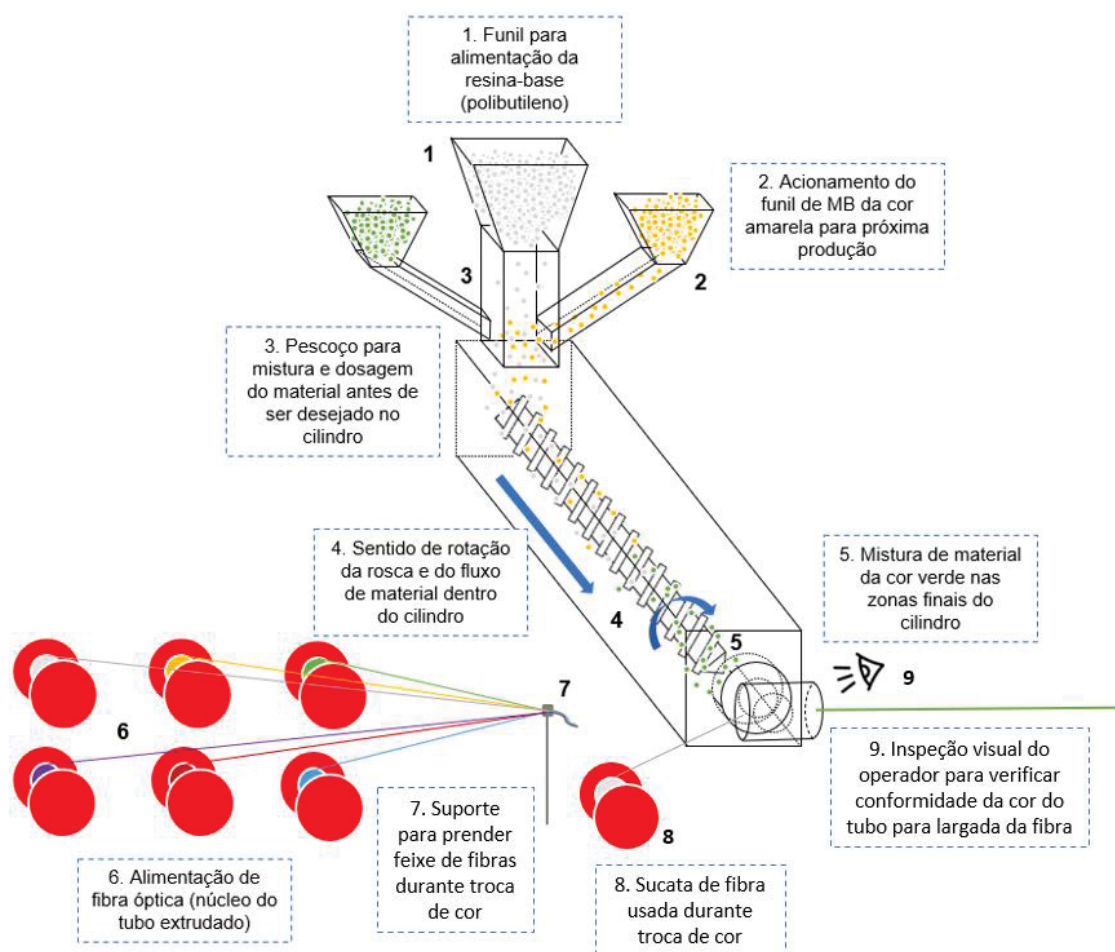
POSIÇÃO	COR
1	VERDE
2	AMARELA
3	BRANCA OU NATURAL
4	AZUL
5	VERMELHA
6	VIOLETA
7	MARROM
8	ROSA
9	PRETA
10	CINZA
11	LARANJA
12	ÁGUA MARINHA (AQUA)

Fonte: adaptado de ABNT NBR 14160:2020.

A cada troca de cor, o operador deve aguardar que o tubo atinja a cor padrão para a fabricação do próximo tubo da sequência. Exemplo: se um tubo verde está sendo produzido e o próximo na sequência é amarelo, o MB da cor amarela será acionado e levará alguns minutos para que o MB percorra todo o cilindro até o novo tubo começar a sair 100% na cor verde (sem traços de cor amarela). Enquanto a cor conforme a especificação do produto não é atingida, é gerado um resíduo de cores intermediárias que é descartado. Assim que o operador identifica visualmente que o tubo já está na cor desejada, ele então dá início à próxima produção. A FIGURA 17 apresenta uma representação esquemática da operação de troca de cor dos tubos.

A inspeção visual acontece unicamente pela percepção do operador e pode variar por inúmeros fatores como, por exemplo, a sua experiência no processo ou sua atenção no dia da produção. Um operador mais experiente tende a ter um olhar mais apurado para identificar a cor padrão, largando a fibra com maior antecedência que um novato que prefere gerar um maior comprimento de tubo como resíduo para se ter certeza de que a cor certa foi atingida.

FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA OPERAÇÃO DE TROCA DE COR



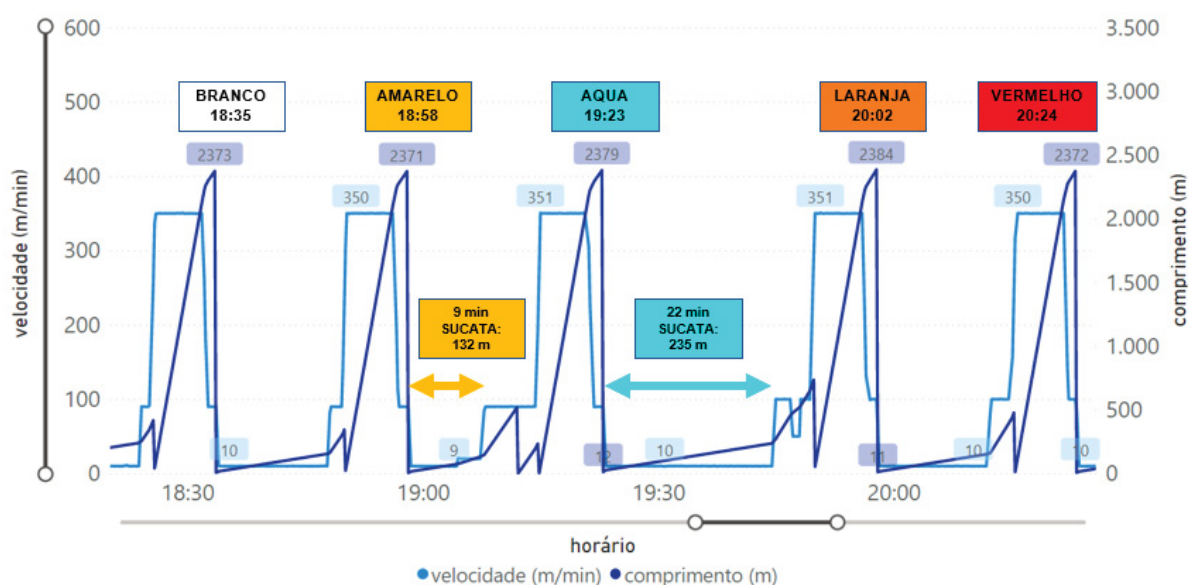
Fonte: o autor (2022).

O acionamento do MB da cor da próxima produção é um gatilho da própria extrusora e acontece a partir de uma tabela de **antecipação**. A antecipação consiste em um comprimento pré-definido calculado a partir de parâmetros como o RPM da extrusora e o comprimento do cilindro e do pescoço. Uma vez que o metrador da extrusora atinge o comprimento de antecipação de uma determinada produção, o MB da cor do próximo tubo começa a ser despejado no pescoço de forma que a próxima cor só começará a “manchar” o tubo quando já se tiver encerrado a produção em curso. Este cálculo antecipa a mistura do MB da cor seguinte, evitando um resíduo ainda maior durante as trocas de cor.

3.1 DETALHAMENTO DA OPERAÇÃO DE TROCA DE COR

Identificou-se nas análises do grupo de operadores que deu origem a este trabalho que o tempo para troca de cor poderia variar muito dependendo da cor e do operador que estava conduzindo a produção. O GRÁFICO 1 evidenciou uma sequência de trocas de cor de um mesmo operador na produção de um lote do dia 08 de maio de 2020, na qual estas variações ficam claras.

GRÁFICO 1 - VELOCIDADE DE LINHA (m/min) E COMPRIMENTO REAL DO TUBO (m) POR HORÁRIO - PRODUÇÃO EM 08/05/2020



Fonte: o autor (2022).

Dados de um único dia são insuficientes para se assumir a predominância destas variações em todas as trocas de cor, porém esta análise foi refinada com maior amostra de dados em uma das etapas prescritas na metodologia desta dissertação.

Para compreender o GRÁFICO 1, foi importante considerar as seguintes informações do processo:

- Comprimento da bobina:** o comprimento das bobinas (ou lances) varia de lote para lote, sendo neste caso um comprimento de 2.380 metros. Quanto menor o lance, maior o número de preparações entre as produções;

- b) Velocidade de largada e produção:** para largar as fibras no tubo e iniciar a produção efetivamente, o operador precisa elevar a rotação da extrusora para uma velocidade de linha de aproximadamente 100 m/min. Por essa razão, é possível observar pequenos “degraus” antes de se atingir a velocidade de produção (350 m/min);
- c) Zeragem do metrador:** para se calcular o comprimento real do lance produzido, o operador precisa zerar a contagem de comprimento da extrusora logo ao atingir a velocidade de produção. É por isso que a linha de comprimento passa por pequenos vales antes de retomar à crescente de produção do lance.

Dadas as explicações citadas, foi possível compreender que os intervalos entre os picos de produção (2.380 m) e os degraus de velocidade de largada (100 m/min) correspondem ao período em que houve geração de resíduo pela troca de cor. Parte deste resíduo é inevitável (inerente ao processo de troca de cor) e para esta parte existe o cálculo da **antecipação**, o que permite que o operador tenha tempo suficiente para realizar a preparação do próximo tubo antes que a cor certa chegue no cabeçote. A outra parte corresponde ao tempo em que o operador teve que aguardar a cor certa ser atingida mesmo já tendo terminado suas atividades de preparação.

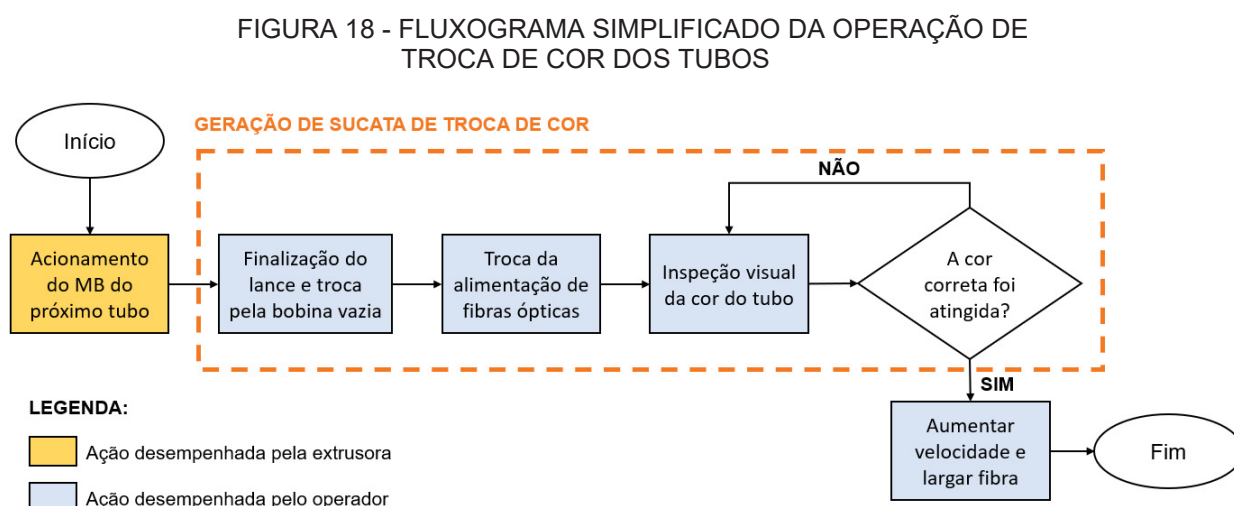
Como foi possível observar no GRÁFICO 1, o tempo que se passa até o atingimento da cor correta da próxima produção pode variar em até 11 minutos, gerando uma variação de 103 metros de resíduo de tubo. Estas variações apontam para três causas prováveis:

1. As trocas de cor são tão maiores quanto for o período de transição de uma dada cor a outra. Exemplo: trocar da cor AZUL para AQUA leva menos tempo que trocar de PRETO para AMARELO;
2. Há alguma variação na operação que provoca uma pequena defasagem no comprimento de antecipação, de forma que o operador deve ainda esperar a cor certa ser atingida mesmo depois de ter concluído a preparação para a próxima produção;
3. Os operadores percebem as cores de forma diferente a depender de inúmeros fatores como experiência, luminosidade do dia, atenção, dentre outros. Não há um padrão para o reconhecimento da cor correta do tubo.

A primeira causa já é tratada pelo departamento de programação da produção, usando um gradiente-referência para sequenciar as trocas de cor. Eventualmente a sequência ideal pode acabar não sendo respeitada por não haver um controle e comunicação bem estruturados para o seguimento deste padrão, porém esta problemática foi tratada em paralelo ao desenvolvimento deste projeto em específico.

A segunda e terceira causas foram de encontro com a proposta de implantação de um sensor de visão computadorizada, atribuindo a incumbência de verificar a conformidade da cor do tubo à máquina ao invés de deixá-la a cargo do operador e obtendo dados reais da mudança da cor durante as trocas para serem confrontados com os atuais comprimentos de antecipação.

Em resumo, a operação de troca de cor pode ser representada pelo fluxograma (FIGURA 18).



Fonte: o autor (2022).

Como descrito no início desta seção, o acionamento do MB do próximo tubo acontece a partir de um gatilho da máquina quando se atinge um comprimento de produção obtido pelo cálculo de antecipação. A antecipação prevê o tempo que o MB leva para sair do pescoço e atingir o cabeçote, “manchando” o tubo da próxima produção. Este intervalo é calculado de forma que o operador tenha tempo suficiente para finalizar o lance e trocar a carga de fibras para a próxima produção antes da cor do próximo tubo chegar no cabeçote.

A inspeção visual da cor do tubo pelo operador acontece justamente quando o material dilata pós-moldagem no cabeçote (FIGURA 19), aumentando sua área de visualização e facilitando a identificação da cor pelo operador.

FIGURA 19 - DILATAÇÃO DO TUBO PÓS-MOLDAGEM NO CABEÇOTE



Fonte: o autor (2022).

Nesta zona fica também localizada uma luminária móvel (FIGURA 20) que o operador utiliza para deixar mais nítida a área de inspeção. Também é importante que a inspeção seja feita nesta parte da linha porque é o momento em que o tubo acaba de sair do cabeçote, sendo o primeiro contato com o ambiente externo que permite a visualização mais antecipada possível da cor do material dentro do cilindro.

Também foram analisadas as rotinas de limpeza e manutenção do cabeçote para prever eventuais perturbações que poderiam afetar a captura das imagens pelo sensor de visão. Periodicamente, os operadores trocam a tela localizada entre a flange do cilindro e o cabeçote para substituir por uma unidade nova sem impurezas. Nestas situações, verificou-se que somente o afastamento da luminária era suficiente para realizar a operação em segurança e sem maiores interferências.

FIGURA 20 - LUMINÁRIA MÓVEL PARA FACILITAR INSPEÇÃO DE COR NO “CONE”⁴ DO TUBO



Fonte: o autor (2022).

⁴ Jargão comumente adotado pela engenharia de processos para se referir ao cone formado pela dilatação do tubo ao sair do cabeçote.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi dividido em quatro etapas que serão descritas em detalhe na sequência:

1. Avaliação dos resíduos de tubos gerados;
2. Seleção do sensor de visão para coleta dos dados de cor;
3. Configuração do sistema especialista para reconhecer a cor dos tubos;
4. Estimativa da minimização de resíduo gerado no processo.

4.1 AVALIAÇÃO DOS RESÍDUOS DE TUBO GERADOS

Esta etapa consistiu em uma avaliação **qualitativa** e **quantitativa** dos resíduos de tubo óptico gerados no processo em questão.

Para a **avaliação qualitativa**, foi utilizada a NBR 10004:2004 para classificação de resíduos sólidos quanto a seus constituintes e fonte geradora. Para tal, os constituintes do resíduo em estudo foram comparados com as listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

A **avaliação quantitativa** se deu por meio de uma análise estatística do histórico de dados gerados pelo CLP da extrusora. Os dados analisados para esta avaliação corresponderam ao período de 01 de agosto de 2021 a 30 de junho de 2022 (11 meses). As variáveis geradas pelo CLP que foram usadas para calcular o volume de resíduo gerado no período são:

1. V_i : speedCURRENT – velocidade linear em metros por minuto registrada no instante i ;
2. L_i : lengthCURRENT – comprimento de tubo em metros registrado pelo medidor no instante i ;
3. t_i : *timestamp* - marca temporal de uma leitura no instante i .

Para que esses dados se convertessem em informações úteis para análise, os cálculos foram divididos em duas unidades principais de avaliação (EQUAÇÃO 3 e EQUAÇÃO 4).

$$\text{para } L_i \geq L_{i-1} : \Delta L = L_i - L_{i-1} \quad \text{para } L_i < L_{i-1} : \Delta L = L_i \quad (3)$$

$$\text{para } L_i \leq L_{i+1} : C_i = 0 \quad \text{para } L_i > L_{i+1} : C_i = L_i \quad (4)$$

O ΔL (EQUAÇÃO 3) corresponde à variação do comprimento entre duas leituras subsequentes do CLP, representando o comprimento produzido (produção ou resíduo) neste intervalo. O C_i (EQUAÇÃO 4), por sua vez, corresponde ao comprimento de resíduo ou de tubo produzido durante um intervalo entre o início e a zeragem do medidor.

As duas métricas acima permitiram avaliar o comprimento de tubo gerado em cada **modo de operação** da extrusora que, por sua vez, foi descrito seguindo a sequência de condicionais:

1. Se $V \leq 40$ m/min, modo de operação = PREPARAÇÃO;
2. Se $V \leq 110$ m/min, modo de operação = PRÉ-PRODUÇÃO ou LARGADA (terminologia de fábrica);
3. Se $V \geq 230^5$ m/min, modo de operação = PRODUÇÃO;
4. Senão, modo de operação = ALTERAÇÃO VEL ou RAMPA⁶ (terminologia de fábrica).

De posse das classificações acima, foi possível determinar se o ciclo de comprimento (C_i) calculado é de um comprimento de resíduo (preparação e pré-produção) ou de tubo produzido (rampa e produção). Para tal, foi criada também a classificação OPERAÇÃO-BINÁRIA conforme fica evidente no QUADRO 2.

No exemplo acima, o ciclo C_3 corresponde ao comprimento de tubo produzido, enquanto o ciclo C_9 será o comprimento de tubo descartado durante a preparação (incluindo ou não troca de cor).

⁵ As velocidades de produção podem variar a depender do produto, porém o mínimo global foi 230 m/min.

⁶ No jargão da manufatura, a rampa corresponde à etapa da operação na qual a máquina está em transição de velocidade, ou seja, rampa de aceleração ou rampa de desaceleração.

QUADRO 2 - QUADRO COM VALORES HIPOTÉTICOS PARA FINS DIDÁTICOS DA METODOLOGIA DE CÁLCULO

i	t	V (m/min)	L (m)	ΔL (m)	C (m)	OPERAÇÃO	TERMINOLOGIA FÁBRICA	OPERAÇÃO BINÁRIA
1	29/07/2021 15:00:30	350	7825	175	-	PRODUÇÃO	PRODUÇÃO	-
2	29/07/2021 15:01:00	350	8000	175	-	PRODUÇÃO	PRODUÇÃO	-
3	29/07/2021 15:01:30	330	8170	170	8170	PRODUÇÃO	PRODUÇÃO	PRODUÇÃO
4	29/07/2021 15:02:00	300	155	155	-	PRODUÇÃO	PRODUÇÃO	-
5	29/07/2021 15:02:30	220	285	130	-	ALTERAÇÃO VEL	RAMPA	-
6	29/07/2021 15:03:00	120	370	85	-	ALTERAÇÃO VEL	RAMPA	-
7	29/07/2021 15:03:30	100	425	55	-	PRÉ-PRODUÇÃO	LARGADA	-
8	29/07/2021 15:04:00	100	475	50	-	PRÉ-PRODUÇÃO	LARGADA	-
9	29/07/2021 15:04:30	110	580	105	580	PRÉ-PRODUÇÃO	LARGADA	PREPARAÇÃO
10	29/07/2021 15:05:00	220	85	85	-	ALTERAÇÃO VEL	RAMPA	-
11	29/07/2021 15:05:30	300	215	130	-	ALTERAÇÃO VEL	RAMPA	-
12	29/07/2021 15:06:00	320	370	155	-	PRODUÇÃO	PRODUÇÃO	-

Fonte: o autor (2022).

Ao final do cálculo, os valores obtidos foram confrontados com os dados de resíduo de tubo medido na própria fábrica, identificando a correlação da operação da extrusora com o volume de resíduo gerado.

4.2 SELEÇÃO DO SENSOR DE VISÃO PARA COLETA DOS DADOS DE COR

A seleção do sensor aconteceu seguindo os seguintes critérios e respectivos pesos abaixo:

1. **Aplicabilidade (peso 2):** o sensor deve atender as exigências de aplicação que serão listadas com base no ESTUDO DE CASO deste trabalho;
2. **Comunicabilidade (peso 2):** o sensor deve ser capaz de se comunicar com a atual arquitetura IoT da planta do estudo;
3. **Escalabilidade (peso 1):** o sensor deve poder ser replicado para outras linhas de extrusão de tubos plásticos da planta do estudo;
4. **Custo (peso 1);**
5. **Durabilidade (peso 2);**
6. **Suporte e assistência (peso 2).**

Os pesos foram atribuídos aos critérios de forma a priorizar aqueles que impactam diretamente no bom funcionamento do sensor por um longo período de tempo (aplicabilidade; comunicabilidade; durabilidade; e suporte e assistência).

O sensor selecionado foi o Keyence IV2 G500CA, o que obteve a maior pontuação considerando a soma das notas de 0 a 5 de cada critério multiplicadas pelo seu respectivo peso.

4.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA PARA RECONHECER A COR DOS TUBOS

A inteligência artificial para reconhecimento da cor dos tubos foi estabelecida por um **sistema especialista**⁷ que classifica as leituras HSV do sensor como cores aceitáveis ou não de acordo com faixas predeterminadas. A partir da identificação da cor padrão, o sistema especialista ativava um sinal luminoso (*andon*) para avisar o operador sobre o momento certo de iniciar a produção.

As 12 cores em conformidade com as especificações NBR 14160:2020 foram tabuladas em seu valor HSV correspondente para compor a **base de conhecimento** do sistema. A construção desta tabela foi feita pela coleta e tratamento de dados de captura do sensor nos momentos em que a máquina estivesse em modo de produção (velocidade acima de 230 m/min), ou seja, quando o operador da extrusora já tivesse identificado a cor capturada como padrão.

Para elicitar o conhecimento do especialista, foi criado um grupo de mensagens com os operadores da extrusora em estudo e distribuída uma folha de acompanhamento do sinal luminoso (ANEXO F – folha de acompanhamento do *andon*). A partir das observações dos operadores registradas na folha, as faixas com máximos e mínimos dos valores HSV para cada cor foram atualizadas mediante confronto com os dados captados em tempo real em *dashboard* hospedado na nuvem. O envio de dados em tempo real se deu por intermédio da arquitetura IoT da planta que conecta à nuvem a base de dados do CLP da extrusora, onde foram direcionadas as leituras HSV do sensor de visão por protocolo Ethernet.

De posse dos valores HSV tabulados e suas respectivas margens de tolerância para as 12 cores da NBR 14160:2020, o CLP da extrusora foi programado com um algoritmo condicional que opera como **motor de inferência**, o qual aciona o

⁷ O sistema especialista foi escolhido em detrimento de modelos de IA mais sofisticados como redes neurais por ser de aplicação mais simples e ainda assim permitir a validação da efetividade da inteligência artificial para reduzir o resíduo neste estudo de caso.

sinal luminoso quando o sensor identifica a cor-padrão do tubo que está em produção, avisando o operador que a fibra óptica pode ser largada para se iniciar a contagem oficial do comprimento do produto final (tubo preenchido por fibras ópticas).

4.4 ESTIMATIVA DA MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUO GERADO NO PROCESSO

A conclusão da etapa anterior habilitou o sensor como ferramenta para substituir a percepção sensorial do operador sobre a conformidade da cor dos tubos. A partir da coleta de dados do primeiro mês de pleno funcionamento do *andon*, foi obtida uma nova média de comprimento de resíduo (km) de tubo por ciclo de preparação da máquina.

Com esta informação foi possível avaliar se a combinação sensor de visão e sistema especialista reduziu efetivamente os resíduos de polibutileno gerados na extrusora em estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO DOS RESÍDUOS DE TUBO GERADOS

5.1.1 Avaliação qualitativa dos resíduos

O resíduo de um tubo óptico é composto por dois elementos principais: um revestimento de PBT colorido por um MB específico (12 cores possíveis) e o núcleo de uma única fibra óptica usada para evitar que o tubo se rompa durante as preparações. A fibra óptica usada para dividir o tensionamento mecânico do tubo em extrusão é um rejeito reaproveitado, então seu ciclo de vida é prolongado ao ser usada para aplicações de suporte às preparações da fábrica. Dessa forma, os únicos descartes que podem ser evitados no escopo desta pesquisa foram o revestimento de PBT colorido por MB.

O material-base de polibutileno tereftalato (PBT) é uma resina sintética produzida pela polimerização do butanodiol e ácido tereftálico, resultando em uma estrutura semelhante ao polietileno tereftalato (PET). As propriedades mecânicas dos dois materiais são também similares, salvo a diferença de que o PBT apresenta um ponto de fusão (223 °C) menor que o PET (255 °C), permitindo que seja processado em temperaturas mais baixas.

O *masterbatch* (MB) para PBT consiste em uma resina-base de PBT acrescida de plastificantes DOTP ou ESBO⁸, concedendo maior maciez e flexibilidade para o material ao reduzir sua viscosidade. O MB é misturado com o PBT nos funis dosadores da extrusora em uma proporção pré-definida para gerar o tubo com a coloração e propriedades desejadas.

Ambos os materiais que compõe o resíduo da troca de cor são certificados ROHS (*Restriction of Hazardous Substances* – Restrição de Substâncias Perigosas) e REACH (*Registration, Evaluation, Authorization and Restrictions of Chemicals* – Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Químicos), diretrizes surgidas na União Europeia para estabelecer padrões de restrição de substâncias químicas nocivas nos produtos comercializáveis.

⁸ Plastificantes comumente utilizados para os colorantes de PVC do fornecedor analisado. Devido à confidencialidade dos componentes do *masterbatch* de PBT e a recusa do fornecedor em compartilhar essa informação, a classificação deste estudo se baseou apenas nos dois componentes citados.

As diretrizes definem limites máximos para 10 substâncias em equipamentos eletrônicos e elétricos (ROHS) e as condições de aplicação de 71 substâncias em produtos manufaturados (REACH). Isso resulta no banimento e controle das quantidades de substâncias tais como cádmio, chumbo, mercúrio e cromo hexavalente, metais pesados reconhecidamente nocivos para o meio ambiente e para a saúde humana.

De posse da norma ABNT NBR 10004:2004, foi possível responder à sequência de perguntas para classificação de um resíduo sólido quanto à sua nocividade ao meio ambiente e à saúde humana. Seguindo essa metodologia, o QUADRO 3 apresenta as respostas e conclusões dessa análise qualitativa.

QUADRO 3 - SEQUÊNCIA DE PERGUNTAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUO SÓLIDO PELA ABNT NBR 10004:2004

RESÍDUO	Polibutileno Tereftalato (resina-base)	Masterbatch PBT (coloração)
Composição	Polibutileno Tereftalato	Polibutileno Tereftalato (resina-base) Plasticantes DOTP/ESBO
O resíduo tem origem conhecida?	Sim.	Sim.
Consta nos anexos A ou B da NBR 10004:2004?	Não.	Não.
Tem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade?	Não.	Não.
Possui constituintes que são solubilizados em concentrações superiores ao anexo G da NBR 10004:2004?	Não.	Não.
CLASSIFICAÇÃO	Resíduo inerte classe II B	Resíduo inerte classe II B

Fonte: o autor (2022).

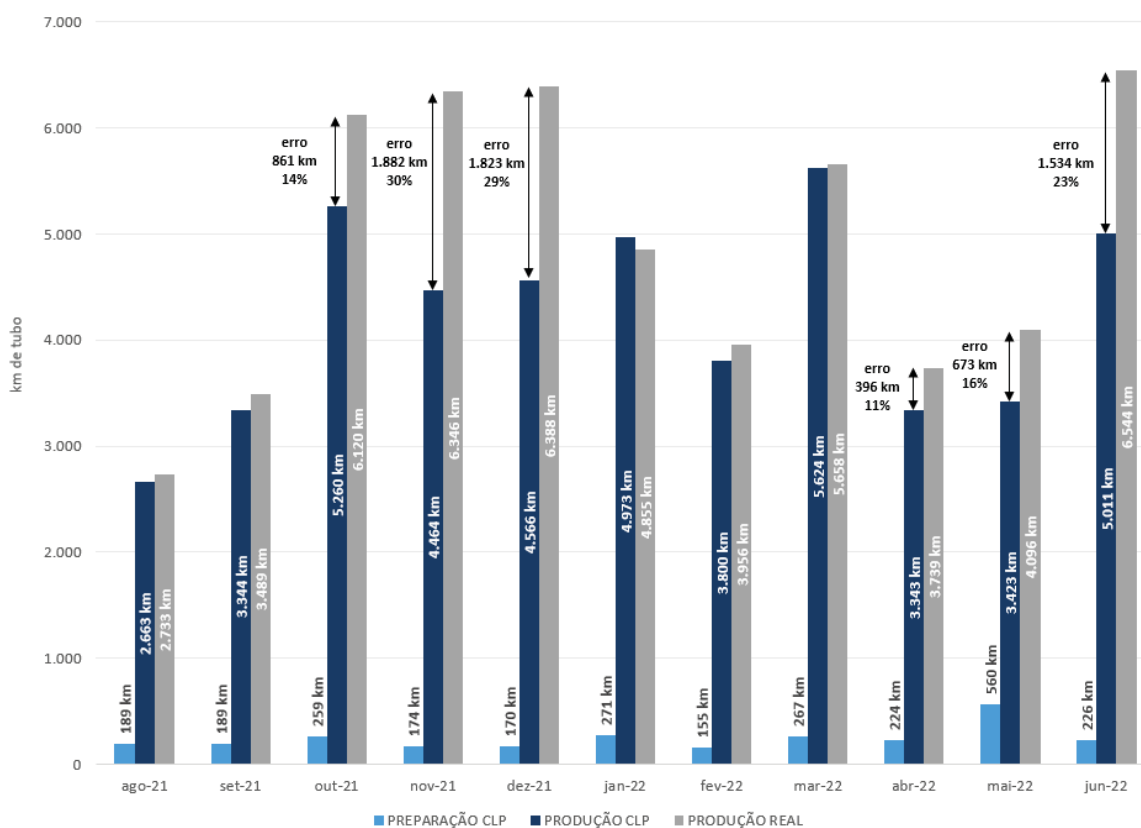
Sendo classificados como Resíduo inerte classe II B, os resíduos de tubo da troca de cor promovem impacto ambiental por serem compostos de plástico derivado do petróleo, recurso natural do qual a extração em plataformas desequilibra

ecossistemas aquáticos, além de aumentar o risco de vazamentos que podem contaminar mares e oceanos.

5.1.2 Avaliação quantitativa dos resíduos

Os dados para a avaliação quantitativa estavam vulneráveis a eventuais instabilidades da rede e dos *links* que os transferiam para o repositório em nuvem de onde foram coletados. Isso resultou em várias leituras falhas, onde havia o valor de L, porém não havia o V, e vice-versa. Nessas situações, a fim de manipulação de dados para permitir visualizações relevantes para a avaliação quantitativa do resíduo, essas leituras foram descartadas, o que empobreceu consideravelmente a base de dados principalmente nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2021, e abril, maio e junho de 2022 conforme evidenciado no GRÁFICO 2. Estes meses foram marcados pelos problemas de rede e sistema citados e serão desconsiderados para fins de análise deste estudo.

GRÁFICO 2 - COMPRIMENTO PRODUZIDO CALCULADO POR VARIÁVEIS DO CLP EM COMPARAÇÃO COM COMPRIMENTO PRODUZIDO APONTADO PELA OPERAÇÃO



Fonte: dados CLP extrusora e relatórios de produção (2022).

Tirando por referência o mês de março, no qual a maior parte dos dados foi mantida, observa-se que 5.624 km foram produzidos e 267 km de resíduo foram gerados durante a preparação (4,7%). Essa proporção de resíduo gerado em relação à produção total do mês varia de 4,1% a 7,1% no decorrer dos meses considerados conforme representado na TABELA 1.

TABELA 1 - PROPORÇÃO DE RESÍDUO EM RELAÇÃO AO PRODUZIDO

VARIÁVEL	AGO/21	SET/21	JAN/22	FEV/22	MAR/22
PRODUZIDO CLP	2.663 km	3.344 km	4.973 km	3.800 km	5.624 km
RESÍDUO	189 km	189 km	271 km	155 km	267 km
%	7,1%	5,7%	5,4%	4,1%	4,7%

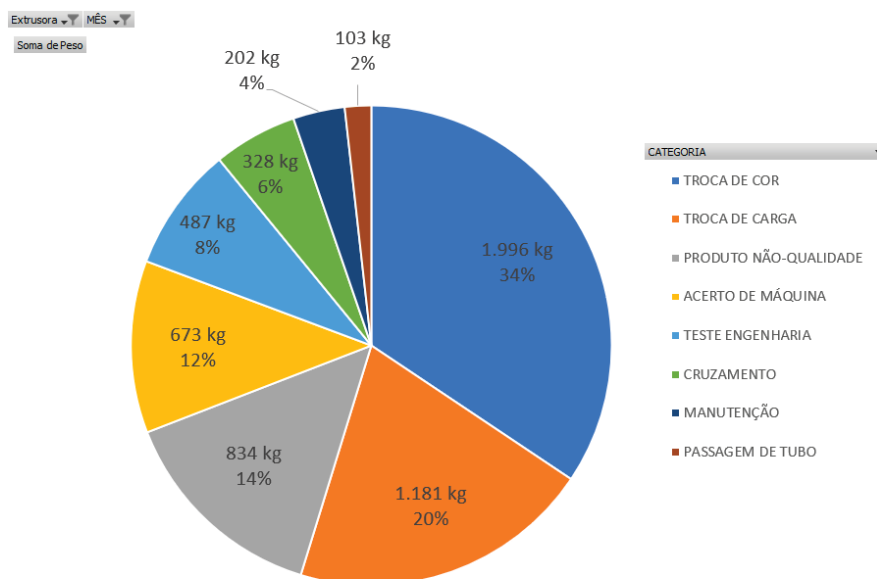
Fonte: dados CLP extrusora (2022).

Considerando o empenho de consumo de 2,70 kg de PBT e preenchimentos por comprimento em km de tubo produzido (baseado na média ponderada do empenho dos produtos que correspondem a 80% da produção da extrusora nestes meses), temos um total de 2.676 kg de resíduo de preparação gerado nos 5 meses analisados (991 km de resíduo).

O GRÁFICO 3 estratifica a massa de resíduo de tubo no mesmo período e evidencia que a maior parte foi gerada durante a troca de cor (34%; 1.996 kg), preparação na qual o presente trabalho atuou.

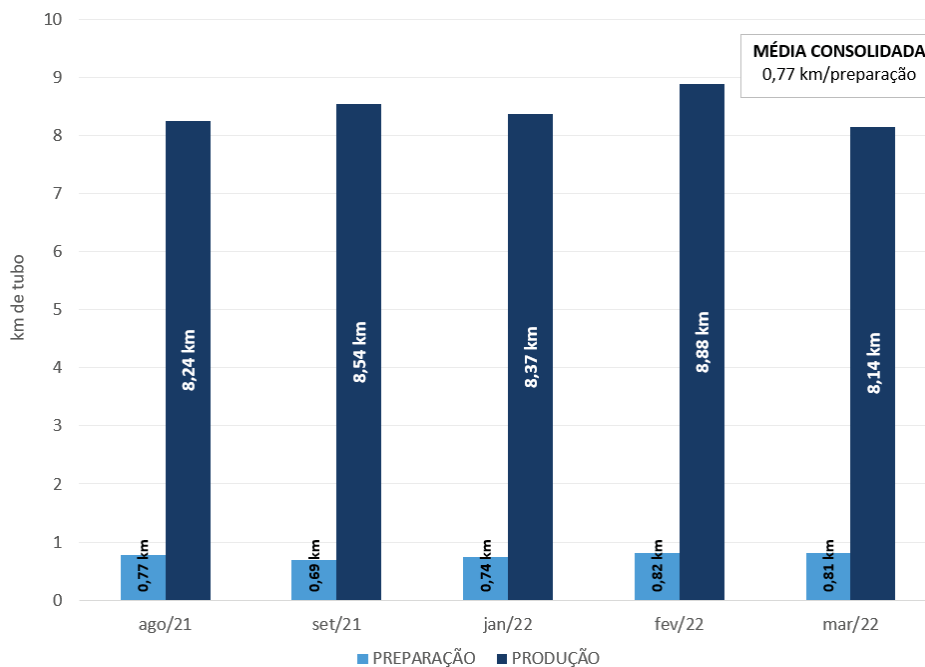
O GRÁFICO 4 apresenta a média de ciclo em comprimento por mês do período analisado e demonstra que o ciclo médio de produção está na faixa de 8,25 a 8,88 km (condizente com o padrão de bobinas de 8 km mais sobras programadas) e o ciclo médio de resíduo oscila entre 0,69 e 0,82 km. Consolidando os valores, tem-se que, a cada preparação, perde-se em média 0,77 km de tubo. Esta média foi adotada como ponto de partida deste trabalho, de forma a se medir a efetividade da implantação do sensor de visão e sistema especialista com o objetivo de minimizar o resíduo plástico gerado durante as trocas de cor.

GRÁFICO 3 - RESÍDUO DE TUBO MEDIDO⁹ EM AGOSTO E SETEMBRO 2021 E JANEIRO, FEVEREIRO E MARÇO 2022



Fonte: Relatório de resíduos de tubo (2022).

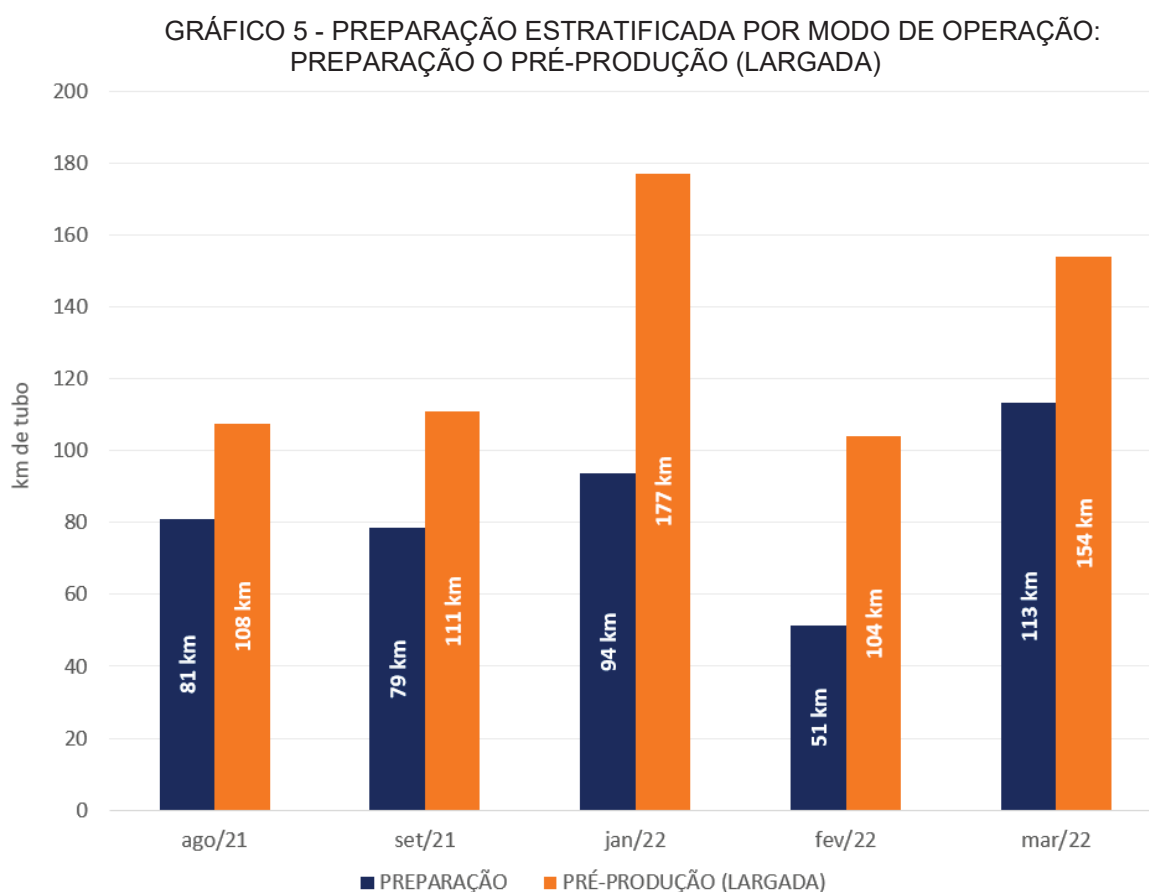
GRÁFICO 4 - MÉDIA DE CICLO DE PRODUÇÃO E PREPARAÇÃO NOS MESES DE AGOSTO, SETEMBRO 2021 E JANEIRO, FEVEREIRO E MARÇO 2022



Fonte: Dados CLP extrusora (2022).

⁹ Os valores apresentados no GRÁFICO 3 correspondem à determinação da massa do resíduo real feita pelos próprios operadores e podem divergir do cálculo que se baseia nos dados do CLP da extrusora, visto que nem todo o resíduo foi gerado durante as preparações (PRODUTO NÃO-QUALIDADE e MANUTENÇÃO por exemplo) e devido à pequena variação esperada do cálculo teórico do CLP em relação aos tubos e resíduos produzidos.

Dentre o resíduo gerado durante as preparações, o GRÁFICO 5 estratifica aqueles que foram gerados a velocidade abaixo de 40 m/min (PREPARAÇÃO) e os que foram gerados em velocidade abaixo de 110 m/min (PRÉ-PRODUÇÃO ou LARGADA). Observa-se que o resíduo mais significativo foi gerado durante a PRÉ-PRODUÇÃO, o que direciona a atenção para os momentos nos quais o operador aumenta a velocidade para permitir a largada da fibra da próxima produção sem que o tubo se rompa. Os resíduos gerados durante a PREPARAÇÃO, por sua vez, estão relacionados principalmente aos momentos em que o operador estava trocando as cargas de fibra óptica para próxima produção e/ou aguardando o tubo chegar na cor padrão.



Fonte: Dados CLP extrusora (2022).

5.2 SELEÇÃO DO SENSOR DE VISÃO PARA COLETA DOS DADOS DE COR

De posse das análises apresentadas na seção 3.1, foi elaborada uma lista com requisitos para nortear o comissionamento do sensor:

1. **O sensor deve começar a captar a cor dos tubos a partir do acionamento do MB da cor da produção seguinte**, assim os dados acompanharão a variação da cor desde o momento que o primeiro MB da cor seguinte for despejado na rosca;
2. O melhor local para posicionamento do sensor é logo após o cabeçote. Para tal, o **sensor adquirido deve tolerar altas temperaturas e contornar perturbações como vapores e poeiras** que emergem da calha e do cabeçote;
3. Caso seja posicionado próximo ao cabeçote, **a instalação do sensor deve permitir seu deslocamento** durante as rotinas de limpeza e manutenção;
4. **O sensor deve ser resiliente a eventuais esbarrões** ou mudanças de foco, visto que a área próxima ao cabeçote é uma zona de movimentação constante dos operadores;
5. A iluminação do ambiente da linha de extrusão de tubos ópticos oscila no decorrer do dia. Dessa forma, **o sensor deve prover iluminação própria** para não ser afetado por essas oscilações.



A busca por fornecedores começou de maneira difusa e pouco direcionada, sendo então afunilada para fornecedores de confiança da empresa na qual se realiza este estudo. Estes últimos dispunham de um histórico de intervenções na fábrica onde está localizada a linha de extrusão de tubos, estando familiarizados com os procedimentos de segurança e normativas próprias da empresa. Também era conhecida a confiabilidade de seus equipamentos, o que facilitaria a seleção e direcionamento do processo comercial.

Os sensores avaliados foram o IV2 G500CA e o OPT2022, ambos capazes de reconhecer 12 cores diferentes e tolerar condições adversas como altas temperaturas e umidade. O QUADRO 4 sumariza as características de cada equipamento.

Em uma análise preliminar das características dos sensores, foi possível identificar uma tendência favorável ao IV2 G500CA devido ao seu design mais compacto (suficientemente compacto para caber no vão entre a calha e o cabeçote da extrusora), maior diversidade de protocolos para compatibilidade com os CLPs das extrusoras e módulo de inteligência artificial que permitiria testar o aprendizado de máquina supervisionado. Além disso, dentre os dois fabricantes, a Keyence já

possuía outros produtos na fábrica e sua assistência era bem avaliada pela equipe de manutenção da empresa do estudo.

QUADRO 4 - COMPARAÇÃO CARACTERÍSTICAS SENSORES IV2 G500CA E OPT2022

MODELO	IV2 G500CA	OPT2022
FOTO		
FABRICANTE	Keyence (tecnologia japonesa)	Automation Direct (tecnologia estadunidense)
DIMENSÕES	31 mm (altura) x 24 mm (largura) x 44,3 mm (comprimento)	53 mm (altura) x 50 mm (largura) x 90 mm (comprimento)
TOLERÂNCIA TEMPERATURA	0 °C a +50 °C	-25 °C a 60 °C
ILUMINAÇÃO	Possui luz própria – possibilidade de inclusão de domo para reflexão difusa.	Possui luz própria.
COMPATIBILIDADE	Ethernet, PROFINET, TCP/IP.	Ethernet.
MÓDULO IA	Incluso – permite o aprendizado das cores aceitáveis a partir de imagens-mestre.	Não incluso.
PREÇO (SENSOR + ACESSÓRIOS)	R\$ 18.343,23	R\$ 3.990,58 + impostos (US\$ 751 convertidos em 25/05/2021)

Fonte: o autor (2022).

De forma a tornar objetiva a seleção conforme proposto na metodologia, o QUADRO 5 apresenta as avaliações obtidas pelos equipamentos em cada um dos

critérios propostos bem como a pontuação final considerando a multiplicação das notas pelos respectivos pesos.

QUADRO 5 - AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DO SENSOR DE VISÃO

CRITÉRIOS	IV2 G500CA	OPT2022
APLICABILIDADE (PESO 2)	5	5
COMUNICABILIDADE (PESO 2)	5	3
ESCALABILIDADE (PESO 1)	5	4
CUSTO (PESO 1)	3	5
DURABILIDADE (PESO 2)	5	3
SUPORTE E ASSISTÊNCIA (PESO 2)	5	3
RESULTADO	48	37

Fonte: o autor (2022).

Pelo resultado da avaliação dos critérios objetivos no QUADRO 5, o sensor de visão IV2 G500CA foi o escolhido para a aplicação do presente projeto. Concluída esta avaliação, o fornecedor Keyence foi convidado à fábrica para teste do sensor na linha.

O sensor tolera temperaturas acima de 50 °C e possui iluminação própria, atendendo os requisitos descritos no início da presente seção. Foi também incluído no orçamento um domo que gera luz indireta em várias direções (FIGURA 21), promovendo a reflexão difusa e uniformizando a iluminação do alvo que se deseja capturar as imagens.

Nos testes realizados na própria linha de extrusão, o sensor foi instalado com o domo em suporte provisório ao lado do cabeçote (FIGURA 22) e apresentou bom desempenho no reconhecimento da cor dos tubos, exibindo em tempo real os dados de cor no modelo de cor HSV (FIGURA 23).

FIGURA 21 - SENSOR DE VISÃO MONTADO COM DOMO PARA REFLEXÃO DIFUSA E DOMO AVULSO



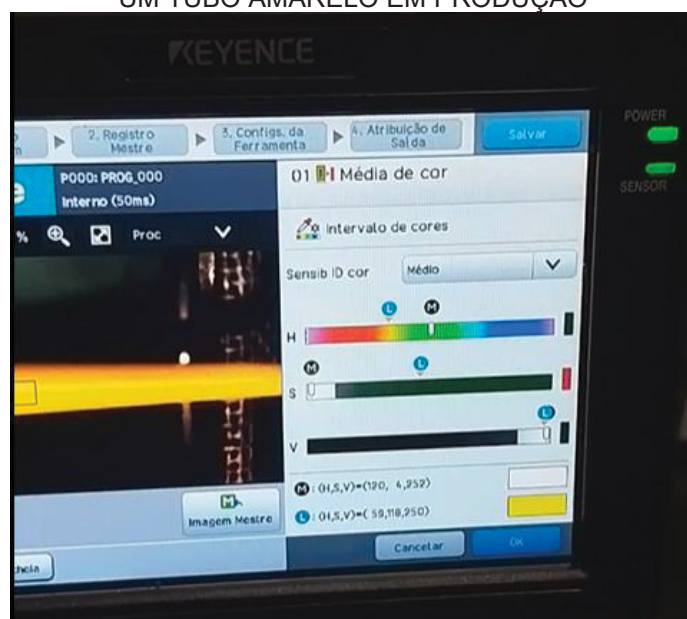
Fonte: KEYENCE CORPORATION (2020).

FIGURA 22 - SENSOR DE VISÃO COM O DOMO INSTALADO PARA TESTES EM LINHA DE EXTRUSÃO DE TUBOS



Fonte: o autor (2022).

FIGURA 23 – TELA DO SOFTWARE DO SENSOR DE VISÃO COM CAPTURA DOS DADOS DE COR HSV DE UM TUBO AMARELO EM PRODUÇÃO



Fonte: o autor (2022).

O sensor permitia a integração com outros dispositivos por Ethernet ou Profinet, protocolos compatíveis com o CLP da extrusora da linha de estudo. Dessa forma, os dados de cor poderiam ser enviados ao CLP para então serem disponibilizados pelo *software* Kepware para o *gateway* que gerencia e intermedia o envio de todos os dados da fábrica para o repositório em nuvem.

5.2.1 Instalação e programação do sensor de visão

Após a aquisição do sensor de visão, foi dada sequência à fabricação de suporte que posicionasse o sensor sobre o cabeçote. Nesta ocasião, também foi avaliada a possibilidade de posicionar o sensor em outra parte da linha: depois do

cabrestante¹⁰ e mais para o fim das calhas para evitar as perturbações do entorno do cabeçote. No entanto, além dos tubos apresentarem uma área de captura bem menor nessa altura da linha (o tubo já havia encolhido após passagem pelas calhas d'água¹¹), apresentavam oscilação constante que dificultaria a captura de foco pelo sensor. Além disso, também haveria uma defasagem muito grande em relação à cor reconhecida diretamente na saída do cabeçote, que ficava a mais de 10 metros atrás na linha de extrusão.

O suporte foi então projetado de forma a suspender o sensor a uma distância de 500 mm do “cone” do tubo de onde seriam coletados os dados de cor, respeitando as distâncias validadas no dia do teste com o fornecedor. O suporte permite o travamento em duas únicas posições possíveis (vide FIGURA 24): abaixado para capturar a cor dos tubos; ou levantado para permitir a limpeza e manutenção do cabeçote. A fixação do sensor e do domo na ponta do suporte foi feita com firmeza suficiente para evitar o deslocamento por esbarrões acidentais.

FIGURA 24 - SUPORTE FABRICADO PARA SENSOR E DOMO COM DUAS ÚNICAS POSIÇÕES POSSÍVEIS



Fonte: o autor (2022).

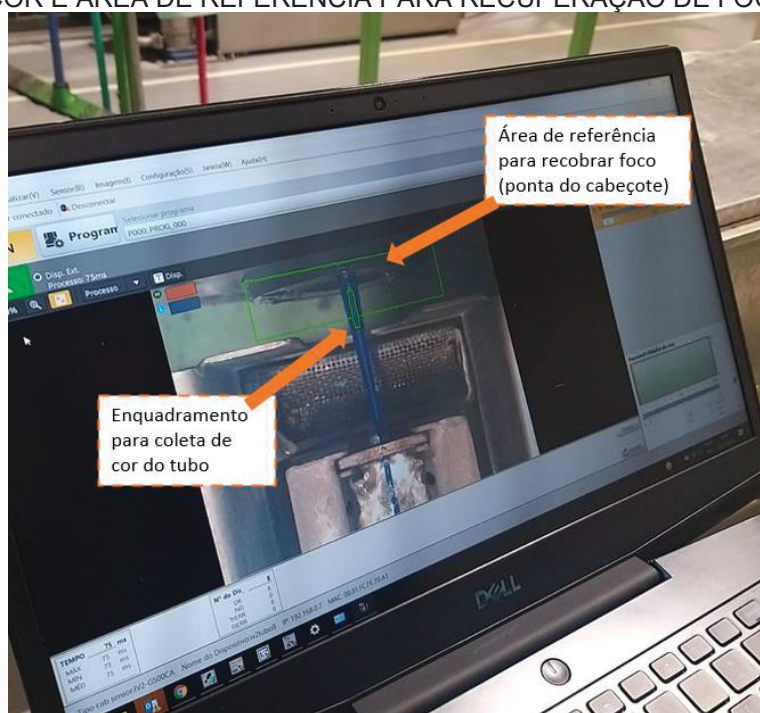
¹⁰ Conforme descrito na seção 2.1 da Revisão Bibliográfica desta dissertação, o cabrestante é o mecanismo responsável por tracionar o tubo em produção em direção à bobina onde coleta-se o produto acabado.

¹¹ Conforme ilustrado na FIGURA 5, o tubo sofre uma redução brusca no diâmetro logo após a passagem pelo cabeçote que molda seu perfil, reduzindo ainda mais de tamanho à medida que passa pelas calhas de arrefecimento.

A programação do microcontrolador do sensor foi feita com o auxílio da equipe interna de eletricitistas da fábrica. O sensor foi programado de forma a enviar os dados de cor HSV para o CLP da extrusora, que seriam então acessados e disponibilizados pelo *software* Kepware para envio ao *gateway* que trata e armazena os dados do CLP da extrusora no repositório em nuvem. Os dados ficaram então disponíveis para análise juntamente com todos os outros dados gerados pelo próprio CLP da máquina tais como comprimento medido, velocidade linear e diâmetro externo do tubo em produção.

O sensor foi programado para capturar uma imagem a cada segundo e foi configurada uma referência para que o foco fosse recuperado no caso de deslocamentos acidentais na câmera. O *software* de configuração permitiu selecionar um objeto de referência que faz com que o enquadramento de coleta das cores seja reposicionado para o lugar certo se a câmera foi deslocada, conforme fica evidente na FIGURA 25.

FIGURA 25 - IMAGENS CAPTURADAS PELO SENSOR COM ENQUADRAMENTO DE COLETA DE COR E ÁREA DE REFERÊNCIA PARA RECUPERAÇÃO DE FOCO



Fonte: o autor (2022).

5.3 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA PARA RECONHECER A COR DOS TUBOS

Para a construção do sistema especialista foi necessário começar pela criação da base de conhecimento com as regras que nortearam a tomada de decisão do operador que conclui se o tubo está ou não na cor certa. Esta decisão pode ser explicitada em um simples axioma condicional:

SE cor do tubo = cor padrão, ENTÃO dar início à largada da fibra.

Com a instalação do sensor de visão, a cor do tubo foi traduzida em três valores do modelo HSV: o matiz (H), a saturação (S) e o valor ou brilho (V). Com o objetivo de obter os valores de HSV correspondentes a cada uma das 12 cores dos tubos prescritas pela NBR 14160:2020, algumas adaptações que serão apresentadas nas próximas seções foram feitas para garantir uma captura constante, estável e homogênea.

5.3.1 Preparação da base de conhecimento

5.3.1.1 Iluminação direta e fixa e remoção do domo refletor

A proposta inicial de instalação do domo refletor juntamente com o sensor era garantir uma iluminação homogênea para as capturas, gerando uma reflexão difusa da iluminação própria do sensor e permitindo a manutenção de um mesmo padrão de iluminação para referenciar as leituras de cor.

Após poucas semanas desde a instalação do sensor, o domo começou a acumular impurezas advindas dos vapores e partículas emanadas do cabeçote, o que o tornava opaco e alterava o padrão da iluminação. Como medida corretiva, o domo foi substituído por uma luminária fixa de 120 Hz que foi posicionada diretamente sobre o tubo a fim de garantir a iluminação homogênea (FIGURA 26).

5.3.1.2 Câmara de pressão positiva e reposicionamento do sensor

A área escolhida para posicionamento do sensor apresentou condições que poderiam afetar a durabilidade do sensor como as altas temperaturas do cabeçote e os vapores e impurezas que emanavam do “cone” do tubo.

FIGURA 26 - LUMINÁRIA FIXA INSTALADA DIRETAMENTE SOBRE TUBO



Fonte: o autor (2022).

Após os primeiros meses de uso, o sensor já vinha apresentando pequenas variações nas capturas, porém uma rotina de limpeza da lente se mostrava suficiente para retornar ao estado original. Ao fim de 9 meses de uso, no entanto, identificou-se um dano irreparável no sensor (FIGURA 27 e FIGURA 28) devido à exposição a umidade relativa acima do especificado (35% a 85% sem condensação), sendo necessária a substituição do dispositivo danificado e recomendada pelo fabricante a instalação de sistema de enclausuramento com pressão positiva para minimizar os efeitos do vapor.

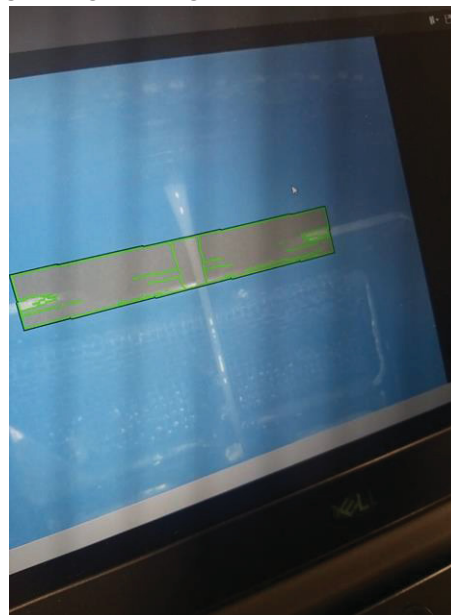
Seguindo as recomendações do fabricante, foi instalada uma câmara de pressão positiva alimentada pela rede de ar comprimido da fábrica (FIGURA 29), de forma a exercer uma pressão que expulsasse o vapor da lente do sensor. Além disso, o sensor foi deslocado radialmente para sair da trajetória de incidência direta dos vapores (FIGURA 30), minimizando sua exposição à umidade.

FIGURA 27 – MANCHA DE NÉVOA ADERIDA NA FACE INTERNA DA LENTE DO SENSOR IV2-G500CA



Fonte: laudo técnico KEYENCE DO BRASIL (2022).

FIGURA 28 - IMAGEM AZULADA OBTIDA PELO SOFTWARE DE VISUALIZAÇÃO REMOTA DO SENSOR IV2



Fonte: o autor (2022).

FIGURA 29 - ENCLAUSURAMENTO DO SENSOR COM CÂMARA DE PRESSÃO POSITIVA ALIMENTADA POR REDE DE AR COMPRIDO DA FÁBRICA



Fonte: o autor (2022).

FIGURA 30 - SENSOR DESLOCADO RADIALMENTE PARA DESVIAR DE INCIDÊNCIA DIRETA DE VAPORES DO CABEÇOTE



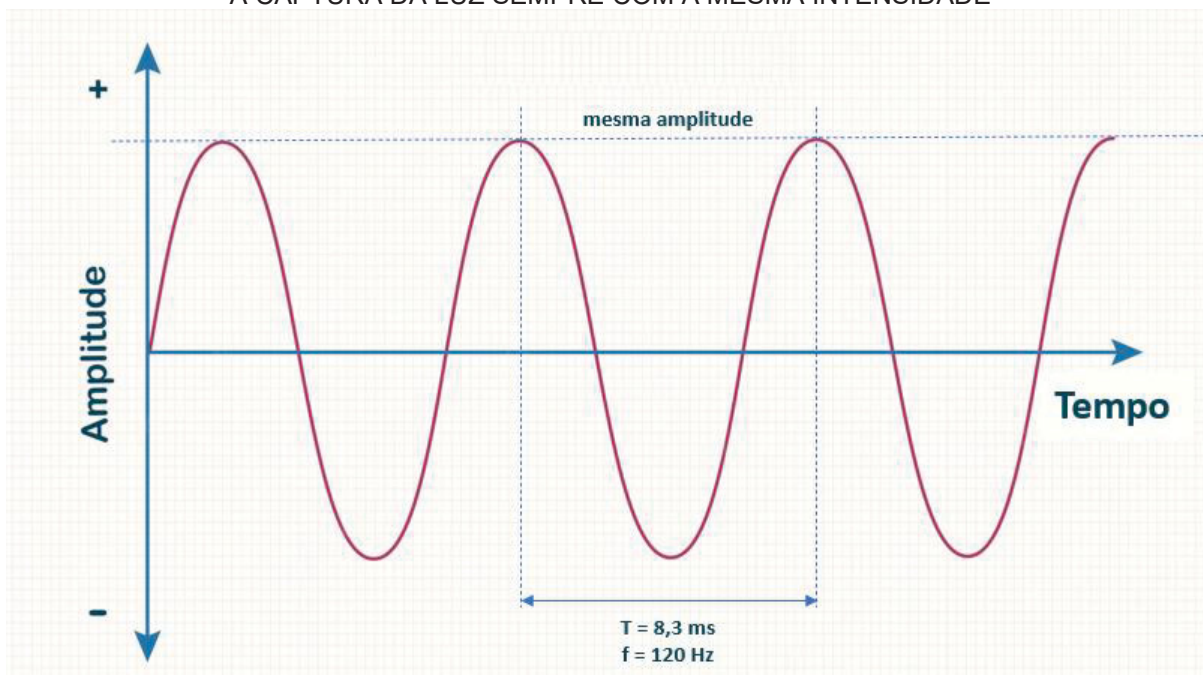
Fonte: o autor (2022).

5.3.1.3 Temporizador do obturador em relação à frequência da iluminação

O obturador é um dispositivo que controla a entrada de luz na lente que captura as imagens do tubo. Sendo a iluminação do tubo uma onda eletromagnética com frequência de 120 Hz, fez-se necessário um ajuste no temporizador do obturador de forma a garantir que a onda sempre fosse capturada na mesma intensidade (FIGURA 31).

O ajuste do temporizador do obturador permitiu uma captura mais estável dos valores de HSV, reduzindo consideravelmente a variação nos parâmetros S (saturação) e V (valor ou brilho).

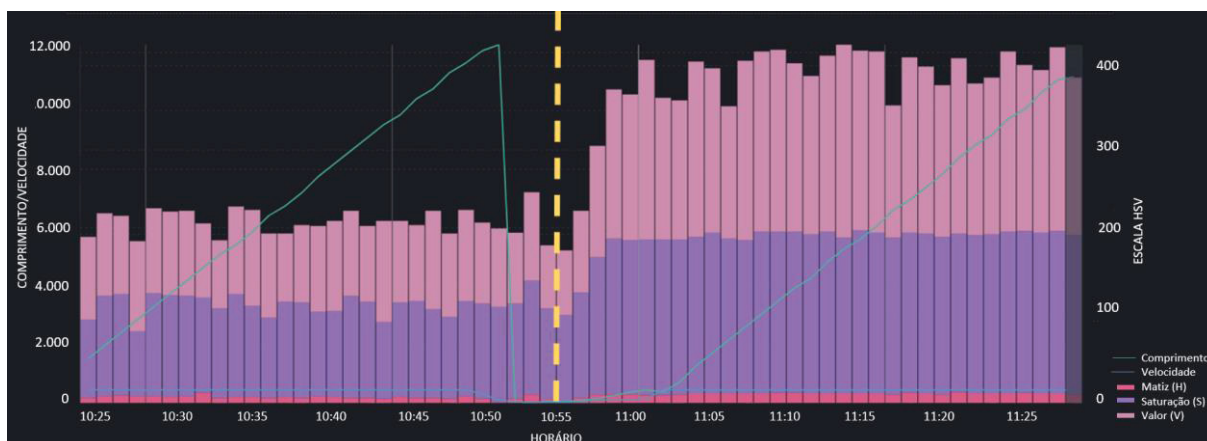
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PERÍODO DO OBTURADOR QUE PERMITE A CAPTURA DA LUZ SEMPRE COM A MESMA INTENSIDADE



Fonte: o autor (2022).

Na FIGURA 32 na qual acontece uma transição de marrom para laranja, as barras em violeta representam as capturas de S e é perceptível sua estabilização após o horário 10h55 quando houve o ajuste do temporizador do obturador para 8,3 ms, tornando a tabulação das faixas de S aceitáveis para a cor laranja muito mais precisa.

FIGURA 32 – CAPTURAS HSV ANTES E DEPOIS DO AJUSTE DO TEMPORIZADOR DO OBTURADOR ÀS 10H55 EM 03/11/22



Fonte: o autor (2022).

5.3.1.4 Instalação do filtro polarizador para controle do brilho

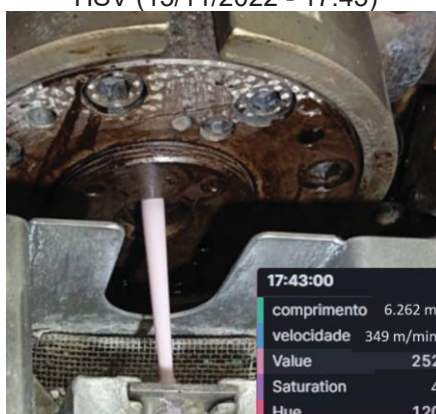
Com a instalação de uma luminária fixa sobre o tubo e aumento do tempo de captura de luz do obturador, o brilho das leituras foi significativamente afetado, de forma que cores mais claras como rosa, aqua e branco não fossem precisamente diferenciadas pelo sensor (FIGURA 33, FIGURA 34 e FIGURA 35¹²).

FIGURA 33 - CAPTURA TUBO BRANCO E RESPECTIVA LEITURA HSV (11/11/2022 - 16:17)



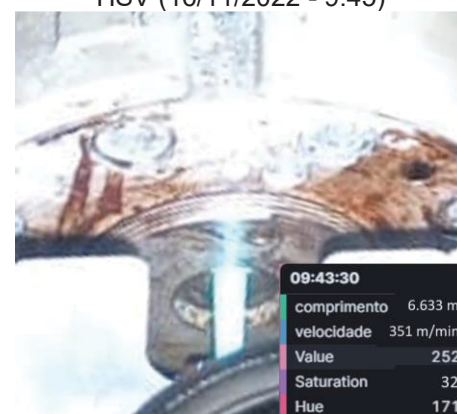
Fonte: o autor (2022).

FIGURA 34 - CAPTURA TUBO ROSA E RESPECTIVA LEITURA HSV (15/11/2022 - 17:43)



Fonte: o autor (2022).

FIGURA 35 - CAPTURA TUBO AQUA E RESPECTIVA LEITURA HSV (16/11/2022 - 9:45)



Fonte: o autor (2022).

¹² As fotos dos tubos foram tiradas por diferentes meios: a captura do tubo branco diretamente do software do sensor e as capturas do tubo rosa e aqua por fotos enviadas pelos próprios operadores, o que justifica a variação na resolução e enquadramento. O objetivo da comparação, no entanto, foi evidenciar o brilho excessivo nas três cores quando iluminadas diretamente pela luminária de LED.

Nestas três situações, o brilho (V) excedeu a marca de 250 e dificultou a precisão das leituras porque, nesta faixa de brilho¹³, os dois outros parâmetros se tornaram praticamente indiferentes, visto que em todos os casos a cor obtida estava muito próxima do branco. Nos casos da FIGURA 33 e FIGURA 34, o matiz (H) e a saturação (S) atingiram o mesmo valor inclusive, sendo impossível que o sistema especialista diferenciasse estas duas cores baseando-se na leitura HSV.

O filtro polarizador funciona absorvendo a luz em somente um único ângulo. Isso significa que o acessório transforma a luz não polarizada (luz natural) em polarizada em uma direção específica, eliminando o excesso de brilho. Considerando as capturas com brilho excessivo conforme evidenciado nas FIGURA 33, FIGURA 34 e FIGURA 35, a aquisição do filtro polarizador do sensor IV2 G500CA (FIGURA 36) se fez necessária para permitir a diferenciação das cores dos tubos a partir de faixas de HSV mais precisas.

FIGURA 36 - SENSOR DE VISÃO IV2 G500CA MONTADO COM FILTRO POLARIZADOR



Fonte: KEYENCE CORPORATION (2020).

5.3.1.5 Tabulação dos valores de HSV

A base de conhecimento para o sistema especialista foi uma tabela onde se atribui a cada uma das 12 cores prescritas pela NBR 14160:2020 valores máximos e mínimos para cada um dos três parâmetros do modelo HSV (TABELA 3). Para dar início à tabulação, foram consideradas as leituras HSV de 03/11/2022 (data em que o temporizador do obturador foi ajustado) a 08/11/2022, a partir das quais foi feita uma primeira estimativa de mínimos e máximos cruzando o horário das leituras com

¹³ O brilho (V) no modelo de cor HSV é um parâmetro que varia de 0 a 255. Dessa forma, valores acima de 250 representam quase que invariavelmente a cor branca.

o horário dos registros de apontamento de produções do período¹⁴. Como resultado, obteve-se a TABELA 2 com as primeiras faixas para as cores verde, azul, marrom e laranja (cores produzidas no período analisado).

TABELA 2 - FAIXA DE HSV PARA AS CORES VERDE, AZUL, MARROM E LARANJA (COLETA DE 03/11/2022 A 08/11/2022)

COR	MÍNIMO DE MATIZ (H)	MÁXIMO DE MATIZ (H)	MÍNIMO DE SATURAÇÃO (S)	MÁXIMO DE SATURAÇÃO (S)	MÍNIMO DE BRILHO (V)	MÁXIMO DE BRILHO (V)	QUANTIDADE DE LEITURAS
VD	139	192	37	163	48	169	20
AZ	221	225	160	211	114	213	18
MR	7	12	105	159	106	160	18
LA	12	33	133	194	187	248	17

Fonte: o autor (2022).

Com suporte do *software IV2 Navigator* e o *dashboard* em nuvem que permitiram acompanhar as imagens e leituras HSV capturadas pelo sensor em tempo real e informações fornecidas pelo grupo de operadores da extrusora do estudo, a construção da TABELA 3 aconteceu de forma empírica, registrando as leituras HSV e seus respectivos máximos e mínimos à medida que as cores foram produzidas (FIGURA 37).

FIGURA 37 - DASHBOARD CAPTURANDO O EXATO MOMENTO DE UMA TRANSIÇÃO DE AMARELO PARA LARANJA E OS RESPECTIVOS MÁXIMOS E MÍNIMOS HSV DO PERÍODO RETRATADO



Fonte: o autor (2022).

¹⁴ Método pouco preciso, visto que o horário do apontamento da produção não coincidiu necessariamente com o horário em que o tubo foi realmente produzido. Foi adotada esta aproximação para a primeira estimativa que foi aperfeiçoada à medida que se obteve mais coletas.

TABELA 3 - MÁXIMOS E MÍNIMOS HSV PARA AS 12 CORES DA NBR 14160:2020

COR	REFERENCIAL	H	H	S	S	V	V
		MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MINÍMO	MÁXIMO
VM	7 tubos produzidos	355	2	132	168	117	133
LA	3 tubos produzidos	7	11	158	183	175	198
MR	4 tubos produzidos	341	4	49	95	90	97
AM	8 tubos produzidos	30	41	135	159	195	230
VD	11 tubos produzidos	149	177	92	144	87	107
AQ	2 tubos produzidos	183	190	109	128	189	202
AZ	12 tubos produzidos	212	222	154	201	104	119
VT	9 tubos produzidos	217	235	67	130	44	89
RS	4 tubos produzidos	356	10	45	64	192	206
CZ	3 tubos produzidos	213	234	22	43	102	124
BR	10 tubos produzidos	344	96	4	56	221	255
PR	4 tubos produzidos	208	232	55	104	61	81

Fonte: o autor (2022).

Os valores foram refinados conforme novas produções da mesma cor aconteceram durante os meses de novembro e dezembro de 2022, atualizando os máximos e mínimos para abarcar as variações naturais da produção (diferentes proporções de MB e preenchimentos do tubo que alteram o padrão de captura). Para assegurar a correlação das leituras obtidas com a cor padrão dos tubos, foi criado um gabarito das cores dos tubos para comparar os valores capturados pelo sensor *inline*¹⁵ com aqueles obtidos pelas leituras em HSV deste gabarito (FIGURA 38).

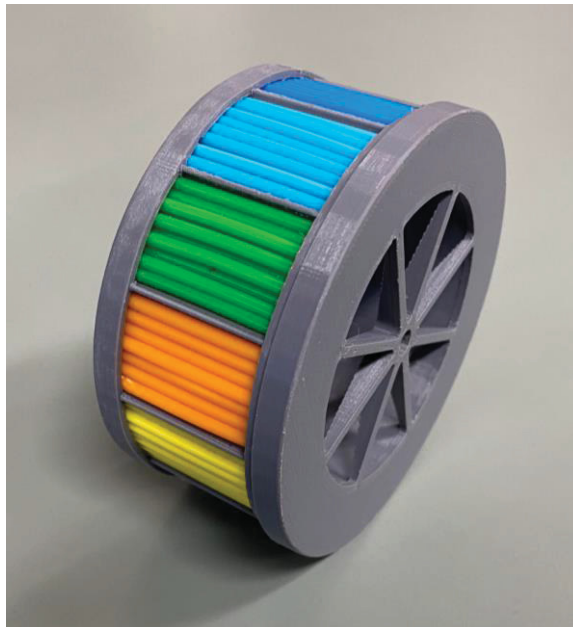
Ainda que as amostras não tivessem tamanho suficiente para conferir validade estatística às faixas, foram suficientes para obter intervalos que permitissem colocar o sistema especialista em operação.

A faixa de aceitação dos valores de matiz (H) oscilaram entre o início e fim do espectro (FIGURA 39) para o vermelho, rosa e marrom. Para estas cores, o

¹⁵ Utiliza-se o termo em inglês *inline* para se referir aos dispositivos que operam conjuntamente com as linhas de produção.

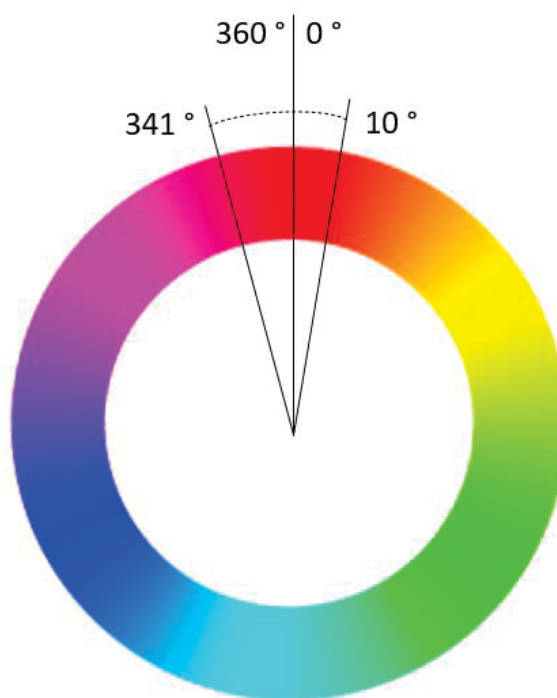
algoritmo comparador de cores que será apresentado na seção 5.3.2 foi adaptado para inverter os máximos e mínimos para a leitura das faixas.

FIGURA 38 - GABARITO DE TUBOS NA COR PADRÃO



Fonte: o autor (2022).

FIGURA 39 - FAIXA DE MATIZ PARA AS CORES VERMELHO, MARROM E ROSA



Fonte: o autor (2022).

5.3.2 Construção do motor de inferência

O motor de inferência foi construído por meio de um algoritmo que comparou as leituras HSV do sensor com os valores da TABELA 3, acionando um sinal luminoso quando as leituras comparadas estivessem dentro das faixas consideradas como aceitáveis para a cor padrão do tubo. O algoritmo foi elaborado na linguagem C pelo técnico Cristofer Surek (ANEXO E – COMPARADOR DE CORES HSV (linguagem c)) para configuração no CLP da extrusora do estudo e foram declarados *setpoints* que puderam ser atualizados via API para representar os máximos e mínimos da TABELA 3.

Foi então instalado um *andon* para anunciar a cor certa para os operadores (FIGURA 40), acendendo uma luz verde toda vez que o sensor identificasse que a cor do tubo já estivesse pronta para o início da produção.

FIGURA 40 - ANDON ANUNCIANDO MOMENTO CERTO DE LARGAR A FIBRA EM PRODUÇÃO DE TUBO AZUL



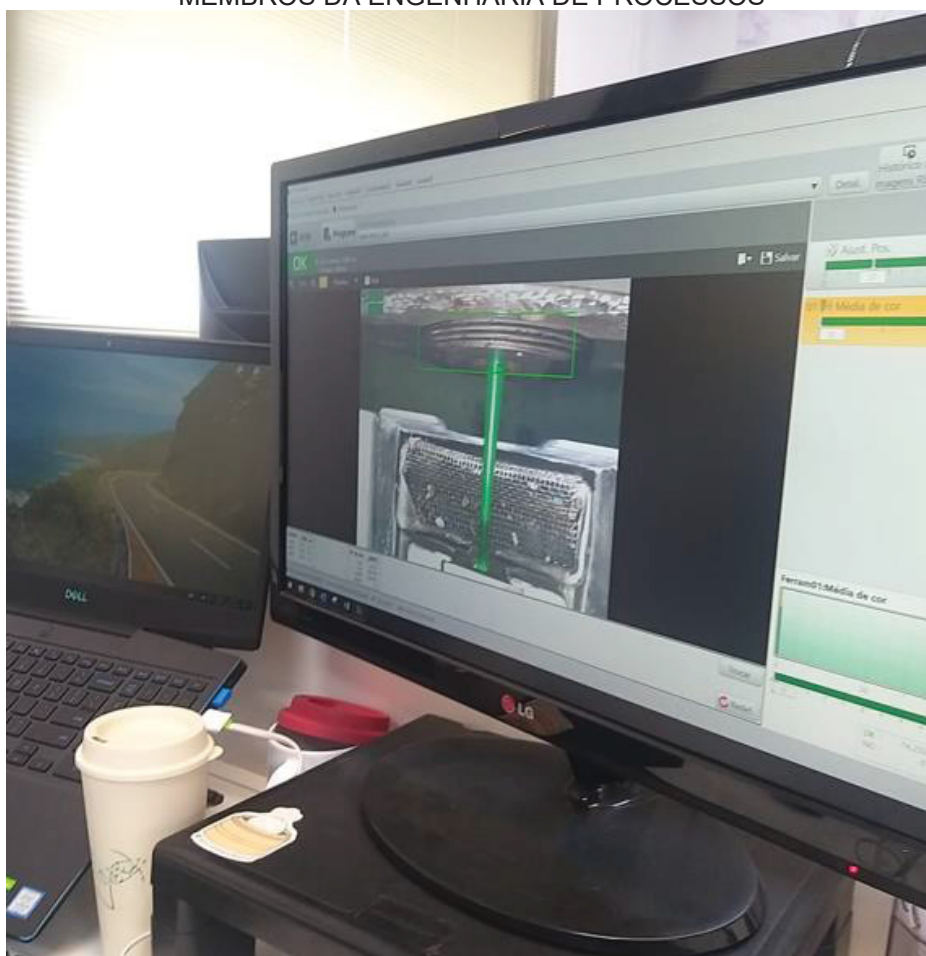
Fonte: o autor (2022).

Mesmo com o filtro polarizador e atualizando as faixas a cada nova leitura HSV divergente, as capturas do sensor estavam vulneráveis a variações que não indicavam efetivamente que a cor do tubo estava fora do padrão. Para contornar a interferência dessas variações no *andon*, foi programada uma tolerância de 10 segundos em que as capturas podiam sair da faixa de aceitação e retornar sem que

o sinal luminoso apagasse. Para permitir a busca pela faixa do matiz das cores vermelho, marrom e rosa que se estendem do fim ao início do espectro conforme evidenciado na FIGURA 39, o algoritmo foi codificado de forma a inverter o sentido da faixa de aceitação mediante o ingresso de máximos menores que mínimos.

Paralelamente ao andon luminoso para os operadores, a instalação do sensor que também permitiu que a Engenharia de Processos pudesse acompanhar o comportamento do “cone” do tubo remotamente pela tela do software *IV2 Navigator*¹⁶ (FIGURA 41). Isso permitiu uma tratativa mais ágil de eventuais problemas de qualidade dos tubos, visto que foi possível prever e contornar comportamentos inesperados do processo por meio de uma observação criteriosa do “cone”.

FIGURA 41 - CAPTURA DA IMAGEM DO “CONE” DO TUBO EM TEMPO REAL EM TELA DE MEMBROS DA ENGENHARIA DE PROCESSOS



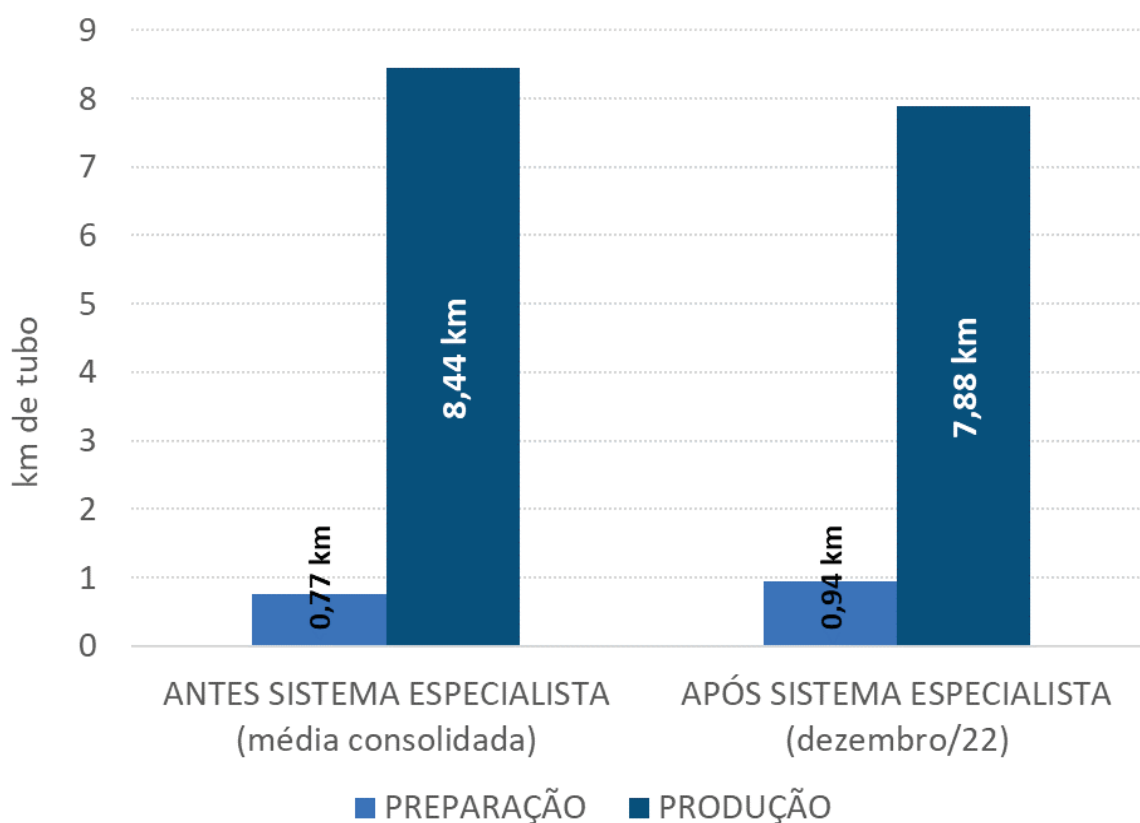
Fonte: o autor (2022).

¹⁶ O acesso ao *IV2 Navigator* foi possível desde que o computador do usuário estivesse conectado na mesma rede do sensor.

5.4 ESTIMATIVA DA MINIMIZAÇÃO DO RESÍDUO GERADO

O *andon* que sinalizava a cor certa para início de produção estava em operação desde 09/11/2022, porém o processo de calibração das faixas HSV aceitáveis se estendeu pelo mês de novembro com ajustes finais em dezembro. Durante este período de definição das faixas, houve a instalação do filtro polarizador em 22/11/2022 que aumentou consideravelmente a precisão das capturas, portanto o resultado demonstrado no GRÁFICO 6 considerou somente os dados coletados no mês de dezembro a título de comparação do processo antes e depois da implantação do sistema especialista.

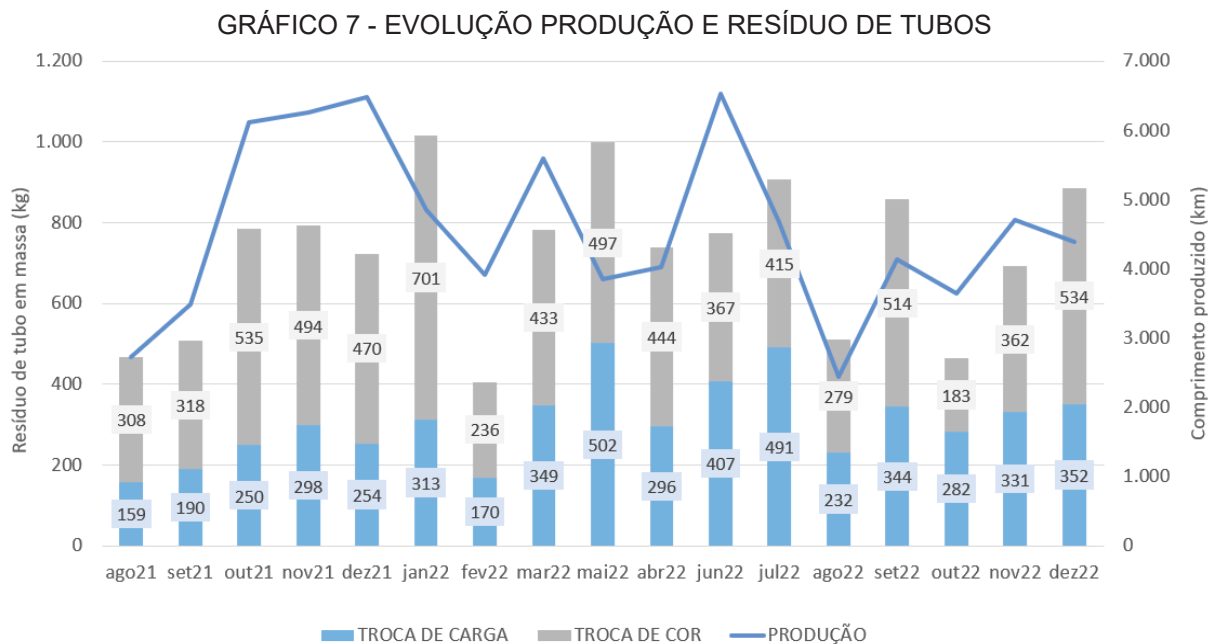
GRÁFICO 6 - CICLO MÉDIO DE PRODUÇÃO E PREPARAÇÃO ANTES E APÓS IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA ESPECIALISTA



Fonte: Dados CLP extrusora (2023).

O ciclo médio de preparação cresceu de 0,77 km para 0,94 km, o que representa um aumento de 22% no comprimento médio de resíduo gerado durante as preparações. Avaliando a evolução mensal do resíduo de tubo medido na balança da fábrica (GRÁFICO 7), foi perceptível que o mês de dezembro apresentou

um dos 5 piores resultados dentre os últimos 16 meses, totalizando 886 kg de resíduo gerado durante as preparações de troca de carga e troca de cor.



Fonte: Relatório de resíduos de tubo (2023).

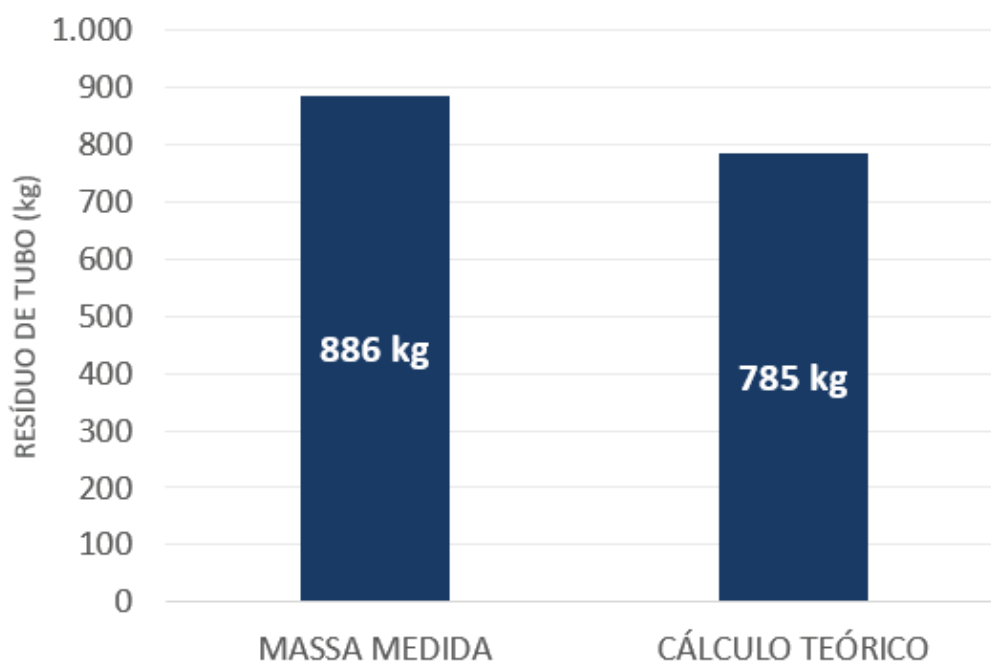
O resíduo real medido se aproximou do cálculo teórico¹⁷ obtido a partir do comprimento total de resíduo gerado durante as preparações em dezembro (245 km) multiplicado pelo empenho ponderado¹⁸ de polibutileno por comprimento de tubo em dezembro (3,21 kg/km.tubo), totalizando 785 kg de resíduo (GRÁFICO 8).

O resultado obtido não permitiu estimar a redução do resíduo nem avançar argumentos quantitativos para a expansão do sensor e sistema especialista para as demais extrusoras de tubo da fábrica em estudo.

¹⁷ O cálculo teórico se refere à estimativa de resíduo obtida a partir das equações apresentadas na seção 4.1 da metodologia desta pesquisa, em contraponto ao valor real do resíduo que é medido em balança da fábrica em estudo.

¹⁸ Assim como calculado na seção 5.1.2, o empenho ponderado foi resultado da média da massa de PBT e preenchimentos por comprimento de tubo de cada um dos produtos que representam 80% da produção em dezembro ponderada pelo seu respectivo comprimento produzido.

GRÁFICO 8 - COMPARAÇÃO ENTRE RESÍDUO DE TUBO MEDIDO E CÁLCULO TEÓRICO EM DEZEMBRO DE 2022



Fonte: Relatório de resíduos de tubo e dados CLP da extrusora (2023).

5.5 DISCUSSÕES

Ainda que o resultado obtido não tenha permitido validar a efetividade do par sensor de visão e sistema especialista para a minimização de resíduos plásticos na linha de extrusão de tubos do presente estudo, há espaço para novas ações que permitiriam dar continuidade ao projeto com o objetivo de alcançar a minimização. Além disso, o acesso a novas análises e métricas de desempenho que serão descritas nesta seção viabilizarão uma nova forma de gerenciar o desempenho do processo quanto à geração de resíduos.

O cálculo teórico de resíduo gerado durante os ciclos de preparação em comparação com o valor real medido de resíduo de tubo durante a troca de cor e de carga se mostrou suficientemente preciso para justificar seu uso como métrica gerencial de controle de refugo. Ficou evidente que o comprimento médio de um ciclo de preparação calculado conforme a metodologia desta pesquisa estava diretamente relacionado ao resíduo gerado no processo, podendo ser usado como

indicador *driver*¹⁹ para se reduzir a sucata. É mais fácil estabelecer ações para se reduzir o ciclo de preparação do que o resíduo total, viabilizando um maior controle do tema pela gestão e engenharia da fábrica.

Sobre a continuidade do projeto, o resultado não satisfatório revela que o sensor e sistema especialista sozinhos não são capazes de promover uma redução efetiva no resíduo na configuração proposta, visto que a tomada de ação a partir do sinal luminoso ainda foi inteiramente dependente da ação humana. Isso indica que a implantação do sensor e calibração do sistema especialista devem ser acompanhados da criação de um procedimento sobre como agir a partir da nova informação fornecida pelo *andon*. Durante a operação de uma extrusora, inúmeras intercorrências podem acontecer que vão exigir ações diversas que podem ou não minimizar a geração do resíduo. Essas intercorrências devem ser mapeadas e é necessário criar um padrão de operação para cada situação, indicando como agir por exemplo quando se atingiu a cor correta do tubo, mas uma emergência impedirá o operador de iniciar a produção no momento. Feito isso, os operadores devem ser capacitados e o padrão deve ser ajustado até se reduzir o resíduo. Isto indica que a implantação da combinação sensor de visão e sistema especialista deveria ter sido precedida de um estudo mais detalhado da operação de troca de cor, avaliando se uma medida mais simples como a definição de um procedimento operacional já não teria gerado os resultados esperados.

Outra ação necessária para se atingir a minimização do resíduo é a constante atualização das faixas de tolerância HSV. Os produtos estão sendo continuamente atualizados por motivações tecnológicas e mercadológicas, o que pode impactar nos valores de leitura da cor padrão dos tubos e a defasagem das faixas inutilizará o sistema especialista. Durante os testes de novos materiais ou preenchimentos dos tubos por exemplo, o engenheiro de processo deve também realizar o ajuste das faixas para o novo produto desenvolvido, garantindo que o sistema especialista se manterá operante.

¹⁹ Indicadores *drivers* são aqueles que devem ser controlados para se atingir resultados medidos por indicadores *outcome*. Exemplo: a redução do indicador *driver* “ciclo médio de preparação” é o caminho para se reduzir o indicador *outcome* de “resíduo do processo”.

6 CONCLUSÃO

Para além dos objetivos deste projeto, a pesquisa permitiu avançar na discussão acerca das inovações tecnológicas da Indústria 4.0 aplicadas à sustentabilidade. A temática revelou que o afã em se partir para a plena automação das fábricas pode negligenciar iniciativas mais simples e efetivas para processos que dependem de ações dos operadores que não poderão ser completamente automatizadas.

A solução proposta não obteve redução de resíduos porque somente o sinal luminoso não foi suficiente para assegurar a antecipação do início da produção que evitaria a geração desnecessária de resíduo. Existem muitos outros fatores que impedem o operador de iniciar a produção mesmo com o atingimento da cor padrão anunciado pelo *andon*.

Estes fatores podem estar relacionados a outras prioridades na operação como a segurança do próprio operador ou a qualidade do produto. Pode-se atribuir o gargalo para o sucesso da solução (sensor de visão e sistema especialista) à inexistência de um mapeamento de todas as intercorrências da operação que podem impedir o início da produção quando o tubo já está na cor correta. Este estudo sinalizou que um mapeamento detalhado destas intercorrências deve ser feito antes de se assumir o risco do investimento de recursos financeiros e tempo no sensor de visão e configuração do sistema especialista.

Dentro do espectro de medidas da Produção mais Limpa, situam-se alternativas menos intensivas em tecnologia a serem aplicadas, tais como uma árvore de decisão para os operadores e capacitação, que podem gerar resultados mais efetivos a nível da minimização dos resíduos, visto que a operação do estudo de caso ainda é muito dependente da ação humana e permanecerá dependente no contexto atual devido à complexidade em se automatizar a passagem da fibra óptica pelas polias da extrusora, por exemplo.

Um apelo neoliberal na retórica da Indústria 4.0 é perceptível, no qual a preservação do meio ambiente é colocada como um fator secundário quando comparada com a necessidade primária de tornar os processos mais lucrativos. Neste contexto, este estudo demonstrou a importância de se atentar a requisitos básicos que devem ser atendidos antes de se avançar com um sistema especialista

que busca minimizar a atuação humana na produção industrial e se tornar um processo mais sustentável.

REFERÊNCIAS

9. INDÚSTRIA, INOVAÇÃO E INFRAESTRUTURA. **IPEA**, Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods9.html>. Acesso em: 13 jan. 2022.

900 kg PBT package from Yangzhou Jinsen. Yangzhou JINSEN Optoelectronics Co. Ltd, Yangzhou City, 2022. Disponível em: <http://www.yzjinsen.com/product/17.html>. Acesso em: 21 jun. 2022.

ABDALLAH, M.; TALIB, M. A.; FERROZ, S.; NASIR, Q.; ABDALLA, H.; MAHFOOD, B. *Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review. Waste Management*, v. 109, p. 231-246, 2020.

ABIODUN, O. I.; JANTAN, A.; OMOLARA, A. E.; DADA, K. V.; MOHAMED, N. A.; ARSHAD, H. *State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey. Heliyon*, 2018.

AGOSTON, M. K. **Computer Graphics and Geometric Modeling**. Springer-Verlag London Limited: Londres, 2005.

ANDRADY, A. L. The plastic in microplastics: A review. **Marine Pollution Bulletin**, Raleigh, v. 119, p. 12-22, 2017.

ARDANZA, A.; MORENO, A.; SEGURA, A.; DE LA CRUZ, M.; AGUINAGA, D. *Sustainable and flexible industrial human machine interfaces to support adaptable applications in the Industry 4.0 paradigm. International Journal of Production Research*, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 10.004: resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT. NBR 14160:2020** Cabo óptico aéreo dielétrico autossustentado – Especificação. Rio de Janeiro, 2020.

BROWNLEE, J. **Master Machine Learning Algorithms**. Machine Learning Mastery: São Francisco, 2016.

CASTELO-BRANCO, I.; CRUZ-JESUS, F.; OLIVEIRA, T. *Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union*. **Computers in Industry**, v. 107, p. 22-32, 2019.

CHAE, Y.; YOUN-JOO, A. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. **Environmental Pollution**, Seul, v. 240, p. 387-395, 2018.

CHANG, C. I. **Hyperspectral Imaging**. Springer Science+Business Media: Nova Iorque, 2003.

CHLEBDA, D. K.; ROGULSKA, A.; LOJEWSKI, T. *Assessment of hyperspectral imaging system for colour measurement*. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 185, p. 55-62, 2017.

CHUNG, C. I. **Extrusion of Polymers: Theory and Practice**. Hanser Publishers: Munique, 2019.

COMPARADOR DE CORES HSV. **SUREK, C.**, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://pastebin.com/V5kaTFw2>.

COMPOUNDING: BROAD RANGE OF SOLUTIONS TO INCORPORATE COLOUR IN PVC COMPOUNDS. **DELTA TECNIC**, Barcelona, 2022. Disponível em: <https://deltatecnic.com/deltacolor-pvc/compounding/>. Acesso em: 12 out. 2022.

DAVIS, J. *Workshop on Cyberinfrastructure in Chemical and Biological Process Systems: Impact and Directions*. **National Science Foundation**, 2006.

DELTA CABLES. **DELTA TECNIC**, Barcelona, 2022. Disponível em: <https://deltatecnic.com/deltacolor-cables/telecoms/#ac03-fibre-optic-01>. Acesso em: 21 jun. 2022.

DOGAN, A.; BIRANT, D. *Machine learning and data mining in manufacturing*. **Expert Systems With Applications**, v. 166, 2021.

European Union REACH. **International Trade Administration**, Washington, 2022.
Disponível em: <https://www.trade.gov/eu-reach#:~:text=European%20Union%20REACH,Iceland%2C%20Lichtenstein%2C%20and%20Norway>. Acesso em: 21 jun. 2022.

FERREIRA, J. **DISPOSITIVOS POLIMÉRICOS EMISSORES DE LUZ BRANCA**. Tese, Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Tecnológica do Paraná, p. 40, 2008.

FORD, S.; DESPEISSE, M. *Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges*. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1573-1587, 2016.

GADELMAWLA, E. S. *Computer vision algorithms for measurement and inspection of external screw threads*. **Measurement**, v. 100, p. 36-49, 2017.

GOLDBERG, Y. **Neural Network Methods for Natural Language Processing**. Morgan & Claypool Publishers: Toronto, 2017.

GeSI. **#SMARTer2030 – ICT Solutions for 21st Century Challenges**. Bruxelas: Global e-Sustainability Initiative (GeSI), 2015.

KAUR, S. *Expert Systems: Need, Applications, Components*. **International Journal of Research Culture Society**, v. 2, p. 103-105, 2018.

KIEL, D.; MÜLLER, J.; ARNOLD, C.; VOIGT, K. I. *Sustainable Industrial Value Creation: Benefits and Challenges of Industry 4.0*. **The XXVIII ISPIIM Innovation Conference**: Vienna, 2017.

KRIZHEVSKY, A.; SUTSKEVER, I.; HINTON, G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *In*: **NIPS CONFERENCE**, Lake Tahoe, 2012.

LEBRETON, L.; ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. **Palgrave Communications**, Londres, v. 5, n. 6, p. 1-11, 2019.

LEONDES, C. T. **Expert Systems: The Technology of Knowledge Management and Decision Making for the 21st Century**. Academic Press: Los Angeles, 2002.

LI, L.; OTA, K.; DONG, M. *Deep Learning for Smart Industry: Efficient Manufacture Inspection System with Fog Computing*. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2017.

MOCNEJ, J.; PEKAR, A.; WINSTON, K. G.; PAPCUN, P.; KAJATI, E; CUPKOVA, D.; KOZIOREK, J.; ZOLOTOVA, I. *Quality-enabled decentralized IoT architecture with efficient resources utilization*. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 67, 2021.

MUNIRAJ, S. P.; XU, X. *An Implementation of OPC UA for Machine-to-Machine Communications in a Smart Factory*. **Procedia Manufacturing**, v. 53, p. 52-58, 2021.

NGUYEN, C. N.; VO, V. T.; HA, N. C. *Developing a computer vision system for real-time color measurement – A case study with color characterization of roasted rice*. **Journal of Food Engineering**, v. 316, 2022.

ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. **OECD**, 2022.

OHNO, Y. *CIE Fundamentals for Color Measurements*. In: **IS&T NIP16 Conference**, Vancouver, 2000.

OKS, S. J.; ZÖLLNER, S.; JALOWSKI, M.; FUCHS, J.; MÖSLEIN, K. M. *Embedded vision device integration via OPC UA: Design and evaluation of a neural-network-based monitoring system for Industry 4.0*. **Procedia CIRP**, v. 100, p. 43-48, 2021.

OLIVEIRA, J. A. **Relação entre as práticas de Produção mais Limpa e as de Produção Enxuta: estudos de casos múltiplos e survey sobre os impactos no desempenho ambiental, econômico e operacional da empresa**. Tese, Doutorado em Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, p. 249, 2016.

OPT2022. **Automation Direct**, Atlanta, 2022. Disponível em: https://www.automationdirect.com/adc/shopping/catalog/sensors -z- encoders/photoelectric_sensors/color_sensors/opt2022. Acesso em: 07 mar. 2022.

PARVIN, H.; MIRNABIBABOLI, M.; ALINEJAD-ROKNY, H. *Proposing a classifier ensemble framework based on classifier selection and decision tree*. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 37, p. 34-42, 2015.

PEREIRA, G.; SANT'ANNA, F. Uma análise da produção mais limpa no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 24, 2012.

PESCIM, G. F. **Modelo de Maturidade para Implantação da Produção mais Limpa (P+L) nas Empresas**. Dissertação, Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, p. 231, 2017.

Polybutylene terephthalate. **Encyclopedia Britannica**, Chicago, 2022. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/polybutylene-terephthalate>. Acesso em 21 jun. 2022.

QI, X.; GUOFENG, C.; YONG, L.; XUAN, C.; CHANGPENG, L. Applying Neural-Network-Based Machine Learning to Additive Manufacturing: Current Applications, Challenges, and Future Perspectives. **Engineering**, v. 5, p. 721-729, 2019.

RAUWENDAAL, C. **Understanding Extrusion**. Hanser Publishers: Munique, 2019.

ROY, J.; KERESZTES, J. C.; WOUTERS, N.; DE KETELAERE, B.; SAEYS, W. *Measuring colour of vine tomatoes using hyperspectral imaging*. **Postharvest Biology and Technology**, v. 129, p. 79-89, 2017.

RUSSEL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. Alan Apt: Englewood Cliffs, 1995.

SENSOR DE VISÃO COM IA INTEGRADA SÉRIE IV2. **Keyence Corporations**, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.keyence.com.br/products/vision/vision-sensor/iv2/models/iv2-g500ca/>. Acesso em: 06 fev. 2022.

SMITH, T.; GUILD, J. *The CIE Colorimetric Standards and their Use*. **Transactions of the Optical Society**, v. 23, 1931.

STOCK, T.; SELIGER, G. *Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0*. **Procedia CIRP**, v. 40, p. 536-541, 2016.

Substances restricted under REACH. **ECHA European Chemicals Agency**, Helsinki, 2022. Disponível em: <https://echa.europa.eu/substances-restricted-under-reach>. Acesso em: 22 jun. 2022.

TOLUN, M. R.; OZTOPRAK, K. *Expert Systems*. **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**, 2016.

ULLAH, U.; BHATTI, F. A.; MAUD, A. R.; ASIM, M. I.; KHURSHID, K.; MAQSOOD, M. *IoT-enabled computer vision-based parts inspection system for SME 4.0*. **Microprocessors and Microsystems**, v. 87, 2021.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Changing Production Patterns: Learning from the Experience of National Cleaner Production Centres*. Paris: **United Nations publication**, 2002.

UNITED NATIONS ESCAP. *Eco-efficiency Indicators: Measuring Resource-use Efficiency and the Impact of Economic Activities on the Environment*. **United Nations publication**, 2009.

XIANG, R.; HE, W.; ZHANG, X.; WANG, D.; SHAN, Y. *Size measurement based on a two-camera machine vision system for the bayonets of automobile brake pads*. **Measurement**, v. 122, p. 106-116, 2018.

WAGNER, J. R; MOUNT, E. M; GILES, H. F. ***Extrusion: The Definitive Processing Guide Handbook***. William Andrew publishing: Waltham, 2014.

What Are The Different Color Models? **PANTONE**, 2022. Disponível em: <https://www.pantone.com/articles/color-fundamentals/color-models-explained>. Acesso em: 24 jan. 2022.

Welcome to RoHS Guide. **RoHS Guide**, 2022. Disponível em: <https://www.rohsguide.com/about.htm>. Acesso em: 21 jun. 2022.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *Eco-efficiency: learning module*. **Five Winds International**, 2000.

YETILMEZSOY, K.; OZKAYA, B.; CAKMACKI, M. *Artificial Intelligence-based Predictions Models for Environment Engineering*. **Neural Network World**, v. 3/11, p. 193-218, 2011.

ZHAO, D.; XUE, D.; XIAOYAO, W.; FUZHOU, D. *Adaptive vision inspection for multi-type electronic products based on prior knowledge*. **Journal of Industrial Information Integration**, 2021.

ANEXO A – CONVERTENDO RGB PARA HSV

INDEFINIDO é um número real constante fora do intervalo $[0,360]$.

função RGBparaHSV (**real** r, g, b; **retorna real** h, s, v)

{ entrada: r, g, b $\in [0,1]$

saída: h $\in [0,360]$, s,v $\in [0,1]$ exceto quando s = 0, onde h = INDEFINIDO

início

real max, min, d;

max := Max (r,g,b);

min := Min (r,g,b);

v := max; #define o valor (v)

se max = 0 #define a saturação (s)

então s := 0

senão s := (max – min)/max;

se s = 0

então h := INDEFINIDO

senão #saturação não é igual a zero (caso cromático)

início

d := max – min;

se r = max

então h := (g – b)/d; #cor entre amarelo e magenta

senão se g = max

então h := 2 + (b – r)/d #cor entre ciano e amarelo

senão se b = max

então h := 4 + (r – g)/d; #cor entre magenta e ciano

h := 60*h; #converte para graus

se h < 0 **então** h := h + 360; #elimina valores negativos de h

fim

fim;

Fonte: adaptado de AGOSTON (2005).

ANEXO B – CONVERTENDO HSV PARA RGB

INDEFINIDO é um número real constante fora do intervalo [0,360].

função HSVparaRGB (real h, s, v; **retorna** real r, g, b)

{ entrada: h ∈ [0,360], s,v ∈ [0,1] exceto quando s = 0, onde h = INDEFINIDO

saída: r, g, b ∈ [0,1]

início

inteiro sextante;

real fração, p, q, t;

se s = 0

então

se h = INDEFINIDO

então início r := v; g := v; b := v; **fim**

senão Erro ()

#entrada inválida: h é indefinido quando s = 0

senão

início

se h = 360 **então** h := 0;

senão h := h/60;

sextante := Floor (h);

#Floor (x) retorna o maior inteiro menor que x

fração := h – sextante

#a parte decimal de h

p := v*(1 – s);

q := v*(1 – (s*fração));

t := v*(1 – (s*(1 – fração)));

escolha sextante **de**

0: **início** r := v; g := t; b := p; **fim**;

1: **início** r := q; g := v; b := p; **fim**;

2: **início** r := p; g := v; b := t; **fim**;

3: **início** r := p; g := q; b := v; **fim**;

4: **início** r := t; g := p; b := v; **fim**;

5: **início** r := v; g := p; b := q; **fim**;

fim

fim

fim;

ANEXO C – CONVERTENDO RGB PARA HSL

INDEFINIDO é um número real constante fora do intervalo $[0,360]$.

função RGBparaHSL (real r, g, b; **retorna** real h, s, ℓ)

{ entrada: r, g, b $\in [0,1]$
saída: h $\in [0,360]$, s, ℓ $\in [0,1]$ exceto quando s = 0, onde h = INDEFINIDO

iniciar

real max, min, d;

max := Max (r,g,b);

min := Min (r,g,b);

ℓ := (max + min)/2; #define a luminosidade (ℓ)

se max = min

então

início s := 0; h := INDEFINIDO; **fim**

senão

início

d := max – min;

se ℓ ≤ 0,5 **então** s := d/(max + min)

senão s := d/(2 – max – min); #define a saturação (s)

se r = max

então h := (g – b)/d; #cor entre amarelo e magenta

senão se g = max

então h := 2 + (b – r)/d #cor entre ciano e amarelo

senão se b = max

então h := 4 + (r – g)/d; #cor entre magenta e ciano

h := 60*h; #converte para graus

se h < 0 **então** h := h + 360; #elimina valores negativos de

h

fim

fim;

Fonte: adaptado de AGOSTON (2005).

ANEXO D – CONVERTENDO HSL PARA RGB

INDEFINIDO é um número real constante fora do intervalo $[0,360]$.

função HSLparaRGB (real h, s, ℓ ; retorna real r, g, b)

{ entrada: h $\in [0,360]$, s, $\ell \in [0,1]$ exceto quando s = 0, onde h = INDEFINIDO

saída: r, g, b $\in [0,1]$

início

inteiro sextante;

real v, min, sv, fração, vsf, mid1, mid2;

se s = 0 **então** #caso acromático

início se h = INDEFINIDO

então início r := ℓ ; g := ℓ ; b := ℓ ; **fim**

senão Erro () **fim**; #entrada inválida: h é indefinido quando s = 0

se $\ell \leq 0,5$ **então** v := $\ell * (1 + s)$;

senão v := $\ell + s - \ell * s$;

se v = 0

então início r := 0; g := 0; b := 0; **fim**

senão início

min := $2 * \ell - v$; sv := $(v - \text{min}) / v$;

se h = 360

então h := 0

senão h := h/60;

sextante := Floor (h); #Floor (x) retorna o maior inteiro menor que x

fração := h – sextante #a parte decimal de h

vsf := $v * sv * \text{fração}$; mid1 := min + vsf; mid2 := v – vsf;

escolha sextante **de**

0: **início** r := v; g := mid1; b := min; **fim**;

1: **início** r := mid2; g := v; b := min; **fim**;

2: **início** r := min; g := v; b := mid1; **fim**;

3: **início** r := min; g := mid2; b := v; **fim**;

4: **início** r := mid1; g := min; b := v; **fim**;

5: **início** r := v; g := min; b := mid2; **fim**;

fim

fim;

Fonte: adaptado de AGOSTON (2005).

ANEXO E – COMPARADOR DE CORES HSV (LINGUAGEM C)

Autor: Cristofer Rodrigues Surek
Date: 23/11/2022

```

FUNCTION_BLOCK FB924
TITLE = 'ComparadorCoresHSV'
VERSION : '1.0'
AUTHOR : CSR
NAME : COMPHSV
FAMILY : IV2STD

VAR_INPUT
    Hue :      INT;
    Saturation : INT;
    Brightness : INT;
END_VAR

VAR_OUTPUT
    Match :      BOOL;
    ColorName :  STRING;
END_VAR

VAR_IN_OUT
END_VAR

VAR_TEMP
    tempInt :      INT;
END_VAR

VAR
    spHueMax : ARRAY[0..11] OF INT;
    spHueMin : ARRAY[0..11] OF INT;
    spSaturationMax : ARRAY[0..11] OF INT;
    spSaturationMin : ARRAY[0..11] OF INT;
    spBrightnessMax : ARRAY[0..11] OF INT;
    spBrightnessMin : ARRAY[0..11] OF INT;
    colorsNames : ARRAY[0..11] OF STRING;
    matching : ARRAY[0..11] OF BOOL;
END_VAR

IF (Hue =0) AND (Saturation = 0) AND (Brightness = 0) THEN
    Match := false;
    ColorName := '';
ELSE
    FOR tempInt:= 0 TO 11 BY 1 DO
        IF (Saturation <= spSaturationMax[tempInt]) AND (Saturation >= spSaturationMin[tempInt])
            AND (Brightness <= spBrightnessMax[tempInt])
            AND (Brightness >= spBrightnessMin[tempInt]) THEN
                IF (spHueMax[tempInt] < spHueMin[tempInt]) THEN
                    IF (((Hue <= spHueMax[tempInt])
                        AND (Hue >= 0)) OR ((Hue >= spHueMin[tempInt])
                        AND (Hue <= 360))) THEN
                            matching[tempInt] := TRUE;
                            Match := TRUE;
                            ColorName := colorsNames[tempInt];
                            EXIT;
                        END_IF;
                    ELSIF (Hue <= spHueMax[tempInt]) AND (Hue >= spHueMin[tempInt]) THEN
                            matching[tempInt] := TRUE;
                            Match := TRUE;
                            ColorName := colorsNames[tempInt];
                            EXIT;
                        END_IF;
                    ELSE
                            matching[tempInt] := FALSE;
                            Match := FALSE;
                            ColorName := '';
                        END_IF;
                    END_FOREND_IF;
                END_FUNCTION_BLOCK

```

