



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia

Desenvolvimento e Gestão de um posto de trabalho com um sistema Pick-to-Light

Yanick Emanuel Badila

20220112

Orientador

Doutor Paulo Jorge Siqueira Gonçalves

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco em colaboração com a empresa Aptiv para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Professor Coordenador, Doutor Paulo Jorge Siqueira Gonçalves, do Instituto Politécnico de Castelo Branco e Coorientação do Eng.º Samuel Santos (Aptiv).

Agosto de 2025

Composição do júri

Presidente do júri

Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Doutor, Luís Miguel Pedroso De Moura Correia

Professor Adjunto, Instituto politécnico de Castelo Branco

Doutor Paulo Jorge Siqueira Gonçalves

Professor Coordenador Instituto Politécnico De castelo Branco

Dedicatória

Cláudia

Agradecimentos

Ao concluir este relatório, marco o fim da licenciatura em Engenharia e Gestão Industrial e ao mesmo tempo, encerro uma fase muito significativa da minha vida, fruto de um percurso de dedicação, persistência e esforço. Esta conquista é, sem dúvida, resultado de uma jornada que não percorri sozinho, foi um caminho percorrido com o apoio, incentivo e os valiosos conselhos de pessoas especiais que guardarei para sempre no meu coração.

Em primeiro lugar, quero expressar a minha profunda gratidão à minha família. Aos meus pais e irmãos, que com tanto carinho, compreensão me acompanharam não apenas nesta última etapa, mas ao longo de toda a minha vida.

À Valdimira, dedico um agradecimento muito especial. A sua presença constante, o seu carinho e incentivo fazem-me acreditar sempre na possibilidade de alcançar os meus objetivos. A sua força e companhia foram fundamentais, e a sua confiança deu-me coragem nos momentos em que mais precisei.

Ao meu orientador académico, professor Paulo Jorge Siqueira Gonçalves, expresso a mais sincera gratidão pelo acompanhamento, pela partilha de conhecimentos e pelas orientações que foram determinantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Deixo ainda um profundo agradecimento à empresa Aptiv pela oportunidade de desenvolver este projeto e ao meu orientador na empresa, Engenheiro Samuel Santos, por toda a ajuda e orientação.

Agradeço também ao Edivaldo Da Costa e ao António Alves pelos inúmeros debates de ideias e conhecimentos que partilharam comigo. O apoio obtido por eles foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte deste percurso, fica o meu mais sincero obrigado. Esta conquista é também vossa.

Resumo

Este relatório descreve o desenvolvimento e a implementação de um sistema Pick-to-Light (PtL) inovador, integrado com um sensor LiDAR, para otimizar um posto de trabalho de retração de componentes na APTIV. O objetivo principal foi mitigar os desafios de ergonomia, produtividade e qualidade inerentes aos processos manuais, que resultavam em erros de seleção, retrabalhos e ineficiências.

A solução proposta utiliza LEDs para guiar visualmente o operador e um sensor LiDAR para validar a presença da mão na localização correta, garantindo a precisão da recolha em tempo real. A comunicação entre os componentes (computador, microcontrolador, LEDs, LiDAR) é estabelecida através de comunicação serial. Foi ainda implementada uma base de dados para rastreabilidade e análise de desempenho. Foi desenvolvida uma interface de utilizador intuitiva em Streamlit, permitindo a monitorização e gestão do sistema.

Os resultados demonstram uma redução significativa nos erros cometidos pelo operador ao selecionar componentes nas caixas da bancada de trabalho, assim como um aumento na produtividade, validando a eficácia da integração de tecnologias da Indústria 4.0 em ambientes de produção manual. O projeto não só alcançou os seus objetivos, como também abriu caminho para futuras investigações em otimização de processos industriais.

O sistema Pick-to-Light com validação por LiDAR foi desenvolvido e já se encontra operacional no posto de trabalho da APTIV, onde apoia o processo de retração térmica de cabos. A solução foi implementada com sucesso, testada e integrada ao fluxo real de produção, permitindo uma orientação luminosa precisa para os operadores e garantindo rastreabilidade por meio do registo de eventos.

Palavras chave

Pick-to-Light, LiDAR, Otimização de recolha, Indústria 4.0, Ergonomia, Produtividade, Rastreabilidade.

Abstract

This report describes the development and implementation of an innovative Pick-to-Light (PtL) system, integrated with a LiDAR sensor, to optimize a workstation for component shrinkage at APTIV. The main objective was to mitigate the challenges of ergonomics, productivity, and quality inherent in manual processes, which resulted in selection errors, rework, and inefficiencies.

The proposed solution uses LEDs to visually guide the operator and a LiDAR sensor to validate the presence of the hand at the correct location, ensuring the accuracy of the pick in real-time. Communication between components (computer, microcontroller, LEDs, LiDAR) is established via serial communication. A database was also implemented for traceability and performance analysis. An intuitive Streamlit user interface was developed, allowing system monitoring and management.

The results show a significant reduction in errors made by the operator when selecting components from the workstation's bins, as well as an increase in productivity, validating the effectiveness of integrating Industry 4.0 technologies into manual production environments. The project not only achieved its objectives but also paved the way for future investigations into industrial process optimization.

The Pick-to-Light system with LiDAR-based hand validation was developed and is currently operational at the APTIV workstation, supporting the heat-shrink process. The solution was successfully implemented, tested, and integrated into the real production flow, providing precise light guidance for operators and ensuring traceability through event logging.

Keywords

Pick-to-Light, LiDAR, Picking Optimization, Industry 4.0, Ergonomics, Productivity, Traceability.

Índice geral

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Objetivos do Projeto.....	1
1.3 Estrutura do Relatório	2
2. Enquadramento do Problema e Estado da Arte.....	3
2.1 Caracterização do Posto de Trabalho Atual.....	3
2.2 Desafios de Ergonomia, Produtividade e Qualidade	3
2.3 Tecnologias de Otimização de Recolha.....	4
2.4 Justificação da Escolha do Pick-to-Light	5
2.5 Pesquisas Existentes e o Estado da Arte em Sistemas Pick-to-Light	6
2.5.1 Integração com sistemas de gestão (WMS/MES).....	6
2.5.2 Sensores para validação automática.....	6
2.5.3 Interfaces de operador (HMI): princípios de desenho.....	6
2.5.4 Sistemas adaptativos e analítica de dados.....	7
2.5.5 Síntese crítica e lacunas	7
2.5.6 Implicações para o projeto.....	7
2.6 Diferença do Sistema Pick-to-Light Proposto	7
3. Arquitetura do Sistema	9
3.1 Requisitos Funcionais e Não-Funcionais	9
3.1.1 Requisitos Funcionais	9
3.1.2 Requisitos Não-Funcionais	9
3.2 Visão Geral Da arquitetura	10
3.3 Hardware Principal.....	12
3.3.1 Computador Principal:	12
3.3.2 Sensor LIDAR:	12
3.3.3 Microcontrolador ESP32:	13
3.3.4 LEDs Indicadores:.....	13
3.3.5 Leitor de Código de Barras.....	14
3.3.6 Botão Físico de Confirmação	14
3.4 Software e Comunicações	15
3.4.1 Fluxo de Comunicação do Ciclo de Retração.....	15
3.4.2 Aplicação Streamlit.....	17

3.4.3 Software Embarcado.....	19
3.4.4 Base de Dados.....	19
3.4.5 Comunicação Serial	20
3.4.6 Integração MES	20
3.5 Estratégia de Validação	20
3.5.1 Testes Unitários.....	20
3.5.2 Testes Integrais.....	20
4. Desenvolvimento, Implementação e Resultados.....	21
4.1 Metodologia de Desenvolvimento.....	21
4.2 Seleção de Tecnologias e Ferramentas	21
4.3 Desenvolvimento do Hardware	21
4.4 Desenvolvimento do Software.....	21
4.5 Testes e Validação	22
4.6 Desafios e Soluções	22
4.7 Resultados	23
4.7.1 Cenário de implementação e observação	23
4.7.2 Benefícios operacionais percebidos.....	23
4.7.3 Impacto na experiência do operador.....	23
4.7.4 Observações e considerações finais.....	24
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	25
5.1 Conclusões.....	25
5.2 Trabalhos Futuros.....	25
Referências	27

Índice de figuras

Figura 1 - Posto de trabalho de retração de componentes.	3
Figura 2 - Diagrama de casos de usos do sistema pick to light	10
Figura 3 - Diagrama em Bloco da Arquitetura do sistema Pick-to-Light.	12
Figura 4 - Exemplo de Sensor LiDAR modelo RPLiDAR A2M12	12
Figura 5 - Exemplo de Microcontrolador ESP32.....	13
Figura 6 - Fitas de LEDs 2815d	14
Figura 7 - Leitor de código de barra Honeywell.....	14
Figura 8 - Botão de pressão normalmente aberto.....	15
Figura 9 - Diagrama de sequência do ciclo de retração.....	17
Figura 10 - Interface do sistema pick-to-Light etapa da autenticação.....	19
Figura 11 - Captura de ecrã da interface principal do operador.....	22
Figura 12 - Captura de ecrã da interface de administrador.....	22

Lista de tabelas

- Tabela 1:** Tabela Comparativa das tecnologias de otimização de recolha5
- Tabela 2:** Especificações técnica dos principais componentes hardware 15

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

API	Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicações)
ASR	Automatic Speech Recognition (Reconhecimento Automático de Fala)
BLE	Bluetooth Low Energy (Bluetooth de Baixa Energia)
BoM	Bill of Materials (Lista de Materiais)
CMD	Cart-Mounted Display (Display Montado no Carrinho)
ESP32	Microcontrolador ESP32 (Espressif Systems)
GPIO	General Purpose Input/Output (Entrada/Saída de Uso Geral)
HMD	Head-Mounted Display (Display Montado na Cabeça)
HMI	Human Machine Interface (Interface Homem-Máquina)
HUD	Head-Up Display (Visor de Cabeça)
ID	Identifier (Identificador)
KPI	Key Performance Indicator (Indicador-chave de Desempenho)
LED	Light-Emitting Diode (Diodo Emissor de Luz)
LiDAR	Light Detection and Ranging (Deteção e Medição por Luz)
MES	Manufacturing Execution System (Sistema de Execução de Manufatura)
MCU	Microcontroller Unit (Unidade de Microcontrolador)
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (Transporte de Telemetria por Fila de Mensagens)
PC	Personal Computer (Computador Pessoal)
PtL	Pick to Light (Recolha por Luz)
SKU	Stock Keeping Unit (Unidade de Manutenção de Stock)
SQL	Structured Query Language (Linguagem Estruturada de Consulta)
ToF	Time of Flight (Tempo de Voo)
UI	User Interface (Interface de Utilizador)
USB	Universal Serial Bus (Barramento Série Universal)
WMS	Warehouse Management System (Sistema de Gestão de Armazém)

1. Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

A indústria automóvel, caracterizada pela sua complexidade e pela constante procura por eficiência e qualidade, enfrenta desafios significativos nos seus processos de montagem. A Aptiv, enquanto líder global no fornecimento de soluções tecnológicas para o setor automóvel, procura continuamente otimizar as suas operações de produção. Neste contexto, os postos de trabalho de montagem de cablagens elétricas em particular as operações de retração, são cruciais para a qualidade final do produto. Tradicionalmente, estas operações podem ser suscetíveis a erros humanos, resultando em retrabalhos, desperdício de tempo e, conseqüentemente, em custos acrescidos.

O presente projeto surge da necessidade de mitigar estes desafios, propondo a implementação de um sistema de apoio à montagem que visa aumentar a precisão, a produtividade e a ergonomia no posto de trabalho de retração. Através da aplicação de tecnologias de automação e visualização, pretende-se criar um ambiente de trabalho mais eficiente e menos propenso a falhas, contribuindo diretamente para os objetivos de excelência operacional da Aptiv e alinhando-se com os princípios da Indústria 4.0.

1.2 Objetivos do Projeto

O principal objetivo deste projeto é desenvolver e implementar um sistema Pick-to-Light (PtL) adaptado às especificidades das operações de retração na Aptiv, com foco na otimização do processo. Para tal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Implementar um Sistema de Orientação Visual Precisa: Fornecer ao operador uma orientação visual clara e inequívoca para as operações de montagem, através da exibição de imagens específicas para cada combinação de manga e terminal, tanto antes como depois da retração.
- Garantir o Controlo e a Validação da Operação: Assegurar que a finalização de cada ciclo de retração é confirmada pelo operador através de um botão físico, garantindo a validação manual da conclusão da tarefa.
- Assegurar a Modularidade do Sistema: Conceber uma solução flexível que permita a sua operação em diferentes configurações, incluindo a possibilidade de funcionar sem a dependência de sensores de deteção de mão numa fase inicial, facilitando a sua implementação faseada.
- Estabelecer Comunicação Robusta com Hardware: Desenvolver um sistema de comunicação fiável entre a aplicação de controlo e os componentes de hardware (ESP32, LEDs, leitor de código de barras, botão físico), garantindo a troca de informações em tempo real.
- Criar uma Base de Dados para Rastreabilidade: Desenvolver uma base de dados para registar todas as operações, permitindo a rastreabilidade e a análise de dados para futuras otimizações.

1.3 Estrutura do Relatório

Este relatório está organizado em cinco capítulos, que descrevem o desenvolvimento e os resultados do projeto:

- **Capítulo 1: Introdução:** Apresenta o enquadramento do projeto, a sua motivação, os objetivos e a estrutura do relatório.
- **Capítulo 2: Enquadramento do Problema e Estado da Arte:** Caracteriza o posto de trabalho atual, identifica os desafios de ergonomia, produtividade e qualidade, e analisa as tecnologias de otimização de recolha existentes, justificando a escolha do sistema Pick-to-Light.
- **Capítulo 3: Arquitetura do Sistema:** Detalha os requisitos funcionais e não-funcionais, a visão geral da arquitetura do sistema e os componentes de hardware e software utilizados.
- **Capítulo 4: Desenvolvimento e Implementação:** Descreve a metodologia de desenvolvimento, a implementação do hardware e software, os testes realizados, os desafios encontrados e os resultados qualitativos obtidos com a aplicação do sistema..
- **Capítulo 5: Conclusões e Trabalhos Futuros:** Sumariza as conclusões do projeto, avalia o cumprimento dos objetivos, propõe recomendações de melhoria e sugere linhas de investigação futura.

2. Enquadramento do Problema e Estado da Arte

2.1 Caracterização do Posto de Trabalho Atual

O posto de trabalho em questão, localizado nas instalações da Aptiv, é dedicado à operação de retração de componentes, nomeadamente mangas retráteis. Este processo é crucial na linha de montagem, sendo fundamental para assegurar a qualidade do produto final

O operador posiciona-se na zona A, onde permanece junto à bancada de trabalho e realiza igualmente a leitura do código de barras das ordens de produção. Na zona B encontram-se as caixas de armazenamento, cada uma contendo diferentes tipos de mangas retráteis e outros componentes necessários à operação. Após a seleção da manga correta, o operador desloca-se para a zona C, onde é realizada a operação de retração através da aplicação de calor.

Esta disposição evidencia a necessidade de um sistema de orientação visual, uma vez que a variedade de componentes disponíveis nas caixas pode induzir erros de seleção manual.



Figura 1 - Posto de trabalho de retração de componentes com indicação das zonas principais (A – posição do operador, onde também realiza a leitura do código de barras; B – bancada de caixas de componentes; C – zona de retração).

2.2 Desafios de Ergonomia, Produtividade e Qualidade

A operação de retração, quando realizada manualmente e sem apoio tecnológico adequado, apresenta desafios que impactam a ergonomia do operador, a produtividade da linha e a qualidade do produto. Do ponto de vista ergonómico, a necessidade de procura visual frequente, a movimentação repetitiva e a atenção contínua podem conduzir a fadiga e a erros, aumentando o risco de lesões por esforços repetitivos (LER). A carga mental acrescida resultante da alternância de

referências e da variabilidade de componentes, tende a degradar o conforto e a aumentar a propensão a falhas humanas [1].

Em termos de produtividade, erros de recolha e o tempo despendido na identificação ou localização dos componentes introduzem atrasos no ciclo e variabilidade do desempenho. Cada erro exige correção e pode desviar recursos de outras tarefas, reduzindo a cadência global. A variabilidade entre operadores, inerente a processos manuais, dificulta a padronização e a otimização dos tempos de ciclo [2].

Quanto à qualidade, mispicks (seleção incorreta) ou omissão de componentes afetam a conformidade do produto, originando retrabalho, inspeções adicionais ou, em último caso, rejeições. Além do custo direto, estes desvios podem afetar a reputação e a satisfação do cliente [3]. Neste contexto, a adoção de sistemas de assistência ao operador como Pick-to-Light (PtL) com confirmação explícita (botão) e validação por proximidade (LiDAR) visa reduzir tempos de procura, diminuir a taxa de erro de seleção e estabilizar o tempo de ciclo, alinhando ergonomia, produtividade e qualidade [4].

2.3 Tecnologias de Otimização de Recolha

Para mitigar os desafios inerentes à recolha manual, a indústria tem adotado tecnologias de assistência ao operador que guiam a seleção, automatizam a identificação/validação e reduzem a probabilidade de erro. Entre as mais comuns, destacam-se:

- Pick-to-Light (PtL): LEDs indicam a posição exata do componente. A confirmação é feita por botão físico e pode ser complementada por validação por proximidade (ex.: LiDAR) antes de avançar o passo [4].
- Pick-by-Voice: instruções por voz; o operador confirma por comando vocal ou botão, útil quando as mãos devem permanecer livres [2].
- Pick-by-Vision (HUD/HMD/AR): informação no campo de visão (óculos/displays), com possibilidade de imagens/instruções ricas; confirmação por gesto, botão ou leitura [5].
- Cart-Mounted Display (CMD): ecrã no carrinho/estação com instruções detalhadas (quantidade, localização, imagem). Confirmação típica por botão ou scanner [2].
- Kitting (pré-montagem/abastecimento por kits): estratégia logística em que os componentes necessários a uma operação são pré-agrupados e entregues como um único kit (SKU). Não é uma tecnologia de orientação, mas simplifica a recolha ao reduzir o número de recolhas por ciclo e a confusão entre referências [9].

Cada opção tem vantagens e compromissos; a seleção depende da tarefa, layout, ambiente (ruído/iluminação), perfil do operador e objetivos (velocidade vs. redução de erros). No presente projeto, privilegia-se PtL pela intuitividade e custo-eficácia, com confirmação explícita (botão) e validação por proximidade (LiDAR) para

reforçar o Poka-Yoke, ou seja, mecanismos de prevenção e deteção imediata de erros no processo [3] e estabilizar o tempo de ciclo.

Tabela 1: Tabela Comparativa das tecnologias de otimização de recolha, (adaptado de [1],[4],[5])

Tecnologia	Descrição / Confirmação	Vantagens	Limitações / Riscos	Adequação típica
Pick-to-Light (PtL)	LEDs indicam a posição exata; confirmação por botão e/ou proximidade (LiDAR) .	Muito intuitivo; aprendizagem rápida; feedback local.	Instalação; brilho/reflexos.	Picking e pré-montagem repetitiva com variabilidade moderada.
Pick-by-Voice	Instruções por voz; confirmação por comando vocal ou botão .	Mãos livres; boa mobilidade.	Ruído; carga cognitiva; precisão do ASR.	Armazéns extensos e rotas dinâmicas.
Pick-by-Vision (HUD/HMD/AR)	Informação no campo de visão ; confirmação por gesto/botão/leitura .	Instrução rica e contextual.	Custo; conforto; iluminação.	Tarefas complexas e contextos dinâmicos.
Cart-Mounted Display (CMD)	Ecrã no carinho/estação; confirmação por botão ou scanner .	Instrução rica; integração simples.	“Olhar alternado” (ecrã↔posto); posicionamento do ecrã.	Linhas com carinhos/estações fixas.
Pick-by-Point (laser)	Indicação direta do alvo; confirmação por botão/scanner .	Muito bom na redução de erros em áreas densas.	Oclusões; luminosidade; segurança laser.	Estações semi-fixas e células compactas.
Kitting (kits)	Estratégia logística: pré-agrupa componentes num kit (SKU); não é tecnologia de orientação.	Menos picks; menos procura local.	Controlo de qualidade do kit; espaço para staging; balanceamento de mão-de-obra.	Postos com alta variedade de componentes por ciclo.

2.4 Justificação da Escolha do Pick-to-Light

A escolha do Pick-to-Light (PtL) para otimização do posto de retração na Aptiv justifica-se por combinar intuitividade, curva de aprendizagem reduzida e integração simples com os sistemas existentes. Em tarefas repetitivas com variabilidade moderada, a indicação luminosa direta e inequívoca reduz procura visual e ajuda a estabilizar o tempo de ciclo. Em linha com a literatura, soluções PtL em montagem tendem a diminuir erros de seleção e a encurtar tempos face a métodos tradicionais, dependendo do contexto da tarefa e do método de confirmação adotado [4], [2], [3].

Confirmação e rastreabilidade. No presente projeto, o PtL é complementado por botão físico e validação por proximidade (LiDAR). Esta redundância “suave” reduz confirmações indevidas e reforça a rastreabilidade do processo [4], [3].

Escalabilidade e integração. A arquitetura adotada (PC/HMI + ESP32 + LEDs endereçáveis) integra-se com leitores e a base de dados e pode interoperar com WMS/MES num cenário Indústria 4.0, preservando custo-eficácia e facilidade de manutenção [6].

2.5 Pesquisas Existentes e o Estado da Arte em Sistemas Pick-to-Light

A literatura científica em logística e montagem identifica o Pick-to-Light (PtL) como uma abordagem de orientação visual direta que, em múltiplos estudos, evidencia reduções de erros de seleção e tempos de execução inferiores face a métodos convencionais (papel, instruções genéricas) — sobretudo quando articulado com princípios Poka-Yoke e confirmação explícita [2], [3], [4]. Estes resultados são dependentes do contexto (tipo de tarefa, layout, perfil do operador, método de confirmação), pelo que a sua adoção deve ser acompanhada por validação local com indicadores objetivos.

2.5.1 Integração com sistemas de gestão (WMS/MES)

Em arquiteturas de Indústria 4.0, o PtL atua como nó de execução na célula, recebendo do WMS/MES as ordens/BoMs (referências, quantidades, sequências) e devolvendo eventos de execução (início, confirmação, exceções). A integração pode ocorrer por API REST, mensageria (p. ex., MQTT) ou ficheiros programados.

Dados mínimos trocados: ID de ordem, SKU/lote, localização (slot), quantidade, operador, *timestamp*; eventos típicos: PickStarted, PickConfirmed, Exception (StockOut/Timeout/ScanFail).

Benefícios e limitações. Beneficia a rastreabilidade fim-a-fim, a sincronização de inventário e o cálculo de KPI em tempo real; exige desenho para latência, tolerância a falhas (modo *offline* com reconciliação) e idempotência de mensagens [6].

2.5.2 Sensores para validação automática

Para além do botão físico (confirmação inequívoca), o estado da arte recorre a sensores que validam a ação e reduzem confirmações indevidas:

- Peso/balança: comprova quantidade por variação de massa (com tara e tolerâncias).
- Visão por computador: confirma identidade ou posição do componente e presença de mão, útil quando há itens visualmente semelhantes [4].
- Proximidade (LiDAR/ToF): confirma que a mão entrou na zona ativa do contentor correto; é robusto a variações de iluminação e rápido para validação *near-field* [8]. Benefícios e limitações. A validação sensorial reforça o Poka-Yoke e enriquece a *trazabilidade*; exige calibração (peso), atenção a oclusões/iluminação (visão) e mitigação de zonas mortas/reflexos (LiDAR). A fusão sensorial (p. ex., botão + LiDAR) aumenta a fiabilidade [4], [8].

2.5.3 Interfaces de operador (HMI): princípios de desenho

Evidência em fatores humanos recomenda interfaces minimalistas que salientem a próxima ação e o estado do passo, com feedback inequívoco (cor/ícone/texto) e redundância moderada (visual/sonora). A clareza informacional reduz carga mental e ajuda a preservar a consciência situacional; por contraste, interfaces densas induzem erros e fadiga [1]. Personalização. Ajustes de brilho/ritmo de LED, língua,

tamanho de fonte, e modo de formação com passos explicados. Aplicação prática. Um ecrã único com instruções curtas, sinalização luminosa apenas no contentor alvo e a sequência confirmar avançar tendem a estabilizar o desempenho [1].

2.5.4 Sistemas adaptativos e analítica de dados

Definição e funcionamento. Com *logs* estruturados, é possível aplicar analítica (não necessariamente *IA pesada*) para: (i) otimizar sequências de recolha (minimizando deslocamentos/oclusões), (ii) ajustar parâmetros de UI (brilho/temporização) por turno/operador, (iii) detetar anomalias (picos de erro/tempo) e (iv) recomendar reorganização de itens frequentes. Benefícios e limitações. Favorece melhoria contínua e adaptação a mix variável; depende da qualidade dos dados, *logging* consistente e controlo humano das decisões [6]. Caminho incremental. Iniciar com painéis de KPI (tempo de ciclo, taxa de erro, retrabalho) e alertas simples; evoluir para recomendações quando existir histórico suficiente.

2.5.5 Síntese crítica e lacunas

A maioria dos estudos que suportam PtL apresenta ganhos consistentes em cenários de recolha/montagem [2], [3], [4], mas muitos resultados derivam de amostras pequenas ou ambientes laboratoriais, o que limita a generalização externa. Permanecem lacunas quanto a: (i) efeitos de aprendizagem prolongada (vários turnos), (ii) impacto de layout denso com itens visualmente semelhantes (onde a visão pode ser crítica) e (iii) custo total de propriedade em escalas maiores. Por isso, recomenda-se ensaio local com desenho antes/depois e KPI objetivos, reportando médias, dispersões e efeito percentual, e quando aplicável testes simples de hipóteses.

2.5.6 Implicações para o projeto

Para o posto de retração na Aptiv, recomenda-se PtL como tecnologia base, com confirmação por botão e validação por proximidade (LiDAR), assegurando rastreabilidade e redução de confirmações indevidas [4], [8]. A HMI deve seguir princípios minimalistas [1], e a arquitetura deve prever integração futura com WMS/MES [6]. A eficácia será avaliada localmente por tempo de ciclo, taxa de erro de seleção e retrabalho, em desenho antes/depois [2], [3].

2.6 Diferença do Sistema Pick-to-Light Proposto

O sistema Pick-to-Light desenvolvido neste projeto, embora assente nos princípios fundamentais da tecnologia PtL, incorpora inovações e funcionalidades específicas que o distinguem das soluções genéricas e o tornam particularmente adaptado às necessidades da Aptiv. As principais características diferenciadoras incluem:

- **Integração com Sensor LIDAR:** A utilização de um sensor LIDAR para a deteção de mão do operador na área de recolha oferece uma camada adicional de validação e segurança. Esta funcionalidade permite confirmar a recolha do componente de forma automática e precisa, minimizando a possibilidade de erros e garantindo que a ação correta foi executada na localização esperada.

- **Interface de Operador Otimizada:** A interface de utilizador foi concebida com um foco primordial na usabilidade e na minimização da interação manual. O design elimina a necessidade de o operador interagir manualmente na interface, apresentando todas as informações críticas no ecrã. Esta otimização visa reduzir a carga cognitiva do operador e agilizar o fluxo de trabalho, proporcionando uma experiência mais fluida e eficiente.
- **Gestão de Imagens de Componentes:** O sistema integra a capacidade de exibir imagens específicas para cada combinação de componente e terminal. Esta orientação visual detalhada, com imagens de pré e pós-montagem, é crucial para a precisão da recolha e montagem, especialmente em operações complexas com componentes visualmente semelhantes. As imagens servem como um guia visual inequívoco, reduzindo a ambiguidade e os erros.
- **Controlo Final via Botão Físico:** Para garantir a máxima fiabilidade e controlo de qualidade, o sistema exige a confirmação final da operação através de um botão físico. Independentemente da deteção automática pelo LIDAR, a conclusão de um ciclo de retração só é validada após a pressão deste botão, assegurando a intenção do operador e adicionando uma camada de segurança ao processo.
- **Modularidade e Flexibilidade Operacional:** O sistema foi concebido com uma arquitetura modular que permite a sua operação em diferentes configurações. Nomeadamente, possui a capacidade de funcionar mesmo na ausência do sensor LIDAR, através de um modo de simulação. Esta flexibilidade é crucial para a adaptabilidade do sistema a diferentes cenários de produção e para facilitar a sua implementação faseada.

Estas inovações, em conjunto, posicionam o sistema Pick-to-Light proposto como uma solução avançada e altamente eficaz para a otimização de processos de recolha, superando as capacidades de sistemas PtL convencionais e contribuindo significativamente para a melhoria da produtividade, qualidade e ergonomia no posto de trabalho.

3. Arquitetura do Sistema

3.1 Requisitos Funcionais e Não-Funcionais

A definição clara dos requisitos funcionais e não-funcionais é fundamental para o desenvolvimento de um sistema Pick-to-Light eficaz e adequado às necessidades específicas do posto de trabalho de retração na Aptiv. Estes requisitos orientam o design da arquitetura, a seleção de tecnologias e a implementação das funcionalidades, garantindo que o sistema final atenda aos objetivos estabelecidos.

3.1.1 Requisitos Funcionais

O sistema deve ser capaz de ler códigos de barras de ordens de produção de forma automática e precisa, utilizando um leitor de código de barras integrado. Esta funcionalidade é essencial para identificar a ordem específica e recuperar as informações associadas dos componentes a serem recolhidos. A leitura deve ser rápida e confiável, minimizando atrasos no início do processo.

A recuperação de informações de componentes a partir de uma base de dados é outro requisito fundamental. O sistema deve consultar a base de dados utilizando o código lido e obter detalhes como a localização dos componentes, as quantidades necessárias, as descrições e as imagens associadas. Esta consulta deve ser eficiente e fornecer dados atualizados em tempo real.

O controlo de LEDs indicadores é uma funcionalidade central do sistema Pick-to-Light. O sistema deve ser capaz de acender LEDs específicos para indicar a localização exata dos componentes a serem recolhidos. Os LEDs devem ser controláveis individualmente, permitindo a indicação precisa de múltiplas localizações conforme necessário.

A deteção de presença de mão na área de recolha, através do sensor LIDAR, é um requisito inovador que adiciona uma camada de validação automática ao processo. O sistema deve monitorizar continuamente a área de recolha e detetar quando o operador coloca a mão na localização indicada, confirmando a ação de recolha.

A exibição de imagens de orientação para cada combinação específica de componente e terminal é crucial para a precisão da operação. O sistema deve apresentar imagens de pré e pós-montagem que orientem o operador sobre o estado correto do componente antes e depois da retração.

O registo de operações na base de dados é essencial para a rastreabilidade e análise posterior. Cada ação de recolha deve ser registada com informações como o utilizador, o componente, a localização, o tempo e o resultado da operação.

A gestão de utilizadores e autenticação garante que apenas operadores autorizados possam aceder ao sistema. Deve incluir funcionalidades de login, gestão de perfis e controlo de acesso baseado em funções.

3.1.2 Requisitos Não-Funcionais

A usabilidade é um requisito crítico, especialmente no que se refere ao design da interface do operador. A interface deve ser intuitiva, e permitir que todas as

informações essenciais sejam visualizadas num único ecrã. A interação deve ser mínima, com automação máxima do fluxo de trabalho.

A fiabilidade do sistema é fundamental para um ambiente de produção. O sistema deve operar de forma consistente e estável, com mecanismos de recuperação de erros e tolerância a falhas. A comunicação entre componentes deve ser robusta e capaz de lidar com interrupções temporárias.

A modularidade é um requisito importante que permite a adaptabilidade do sistema a diferentes configurações. O sistema deve ser capaz de operar com ou sem o sensor LIDAR, proporcionando flexibilidade na implementação e manutenção.

O desempenho do sistema deve garantir tempos de resposta rápidos para todas as operações, desde a leitura do código de barras até à atualização da interface. Atrasos excessivos podem impactar negativamente a produtividade e a experiência do utilizador.

A escalabilidade permite que o sistema seja expandido para incluir mais postos de trabalho ou funcionalidades adicionais sem comprometer o desempenho ou a estabilidade.

A figura 2 é um diagrama de caso de uso que ilustra as interações entre os atores (Operador e Administrador) e os casos de uso do sistema. Este diagrama fornece uma visão de alto nível das funcionalidades do sistema e como os diferentes utilizadores interagem com ele.

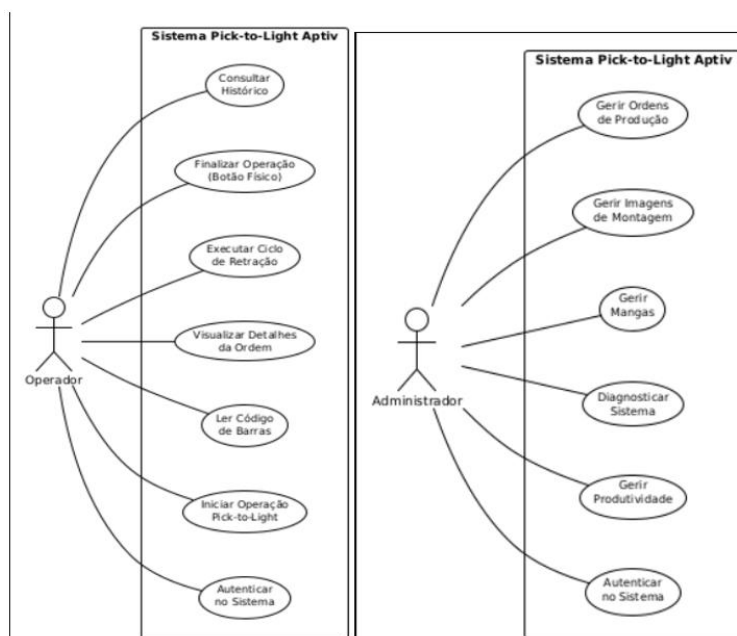


Figura 2 - Diagrama de casos de usos do sistema pick to light

3.2 Visão Geral Da arquitetura

A arquitetura do sistema Pick-to-Light foi concebida seguindo uma abordagem em camadas que promove a modularidade, a manutenibilidade e a escalabilidade. Esta

estrutura hierárquica permite a separação clara de responsabilidades e facilita a integração de novos componentes ou a modificação de funcionalidades existentes sem impactar outras partes do sistema.

A camada de hardware constitui a base física do sistema e inclui todos os componentes eletrónicos e mecânicos necessários para a operação. Esta camada engloba o computador principal, o microcontrolador ESP32, os LEDs indicadores, o sensor LIDAR, o leitor de código de barras, o botão físico de confirmação e os cabos de conexão. A robustez e a fiabilidade desta camada são cruciais para o funcionamento estável de todo o sistema.

A camada de aplicação principal é executada no computador do posto de trabalho e constitui o cérebro e o núcleo da lógica de negócio do sistema. Desenvolvida em Python utilizando o framework Streamlit, esta camada é responsável pela interface de utilizador, pela gestão da base de dados, pela coordenação das operações de recolha e pela comunicação com os periféricos de hardware. A flexibilidade e a facilidade de manutenção desta camada são essenciais para a adaptação às necessidades em evolução do processo produtivo.

A camada de software embarcado reside no microcontrolador ESP32 e atua como uma interface de baixo nível para o controlo direto de alguns componentes de hardware. Esta camada implementa a lógica para o controlo dos LEDs e a monitorização do botão físico, comunicando-se com o computador principal. O software embarcado deve ser eficiente e responsivo, garantindo tempos de resposta adequados para as operações críticas que dependem dos LEDs e do botão.

A camada de dados gere o armazenamento e a recuperação de informações críticas para o funcionamento do sistema. Utilizando uma base de dados SQL, esta camada armazena informações sobre componentes, ordens de produção, utilizadores, configurações e histórico de operações. A integridade e a consistência dos dados são fundamentais para a fiabilidade do sistema.

A comunicação entre as camadas é realizada através de interfaces bem definidas que garantem a interoperabilidade e facilitam a manutenção. A comunicação entre a aplicação principal e o software embarcado utiliza o protocolo serial USB, enquanto o acesso à base de dados é realizado através de APIs Python específicas.

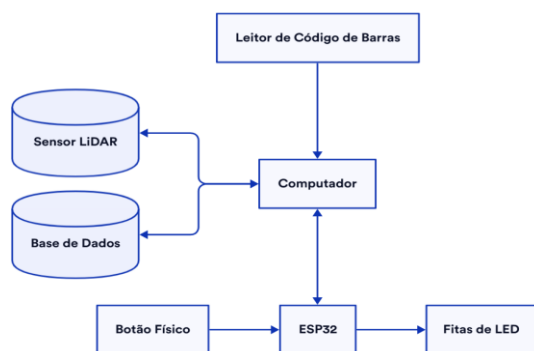


Figura 3 - Diagrama em Bloco da Arquitetura do sistema Pick-to-Light.

3.3 Hardware Principal

O hardware do sistema Pick-to-Light foi selecionado com base em critérios de facilidade de integração e adequação às necessidades específicas do ambiente de produção. Cada componente desempenha um papel crucial na funcionalidade geral do sistema e foi escolhido para garantir o desempenho ótimo e a durabilidade a longo prazo.

3.3.1 Computador Principal:

O computador do posto de trabalho é o componente central do sistema, responsável por executar a aplicação principal (Streamlit App), gerir a base de dados, processar a lógica de negócio complexa e coordenar todas as interações entre os diferentes módulos de hardware e software.

3.3.2 Sensor LIDAR:

O sensor LIDAR representa uma inovação significativa no sistema, proporcionando capacidades de detecção de presença que vão além dos sistemas Pick-to-Light convencionais. Este sensor utiliza tecnologia de medição de distância por laser para detetar a presença da mão do operador na área de recolha, oferecendo uma validação automática e precisa da ação de recolha.

O LIDAR selecionado oferece precisão adequada para a aplicação, com capacidade de detetar objetos a distâncias variáveis e com resolução suficiente para distinguir a presença da mão do operador. A comunicação com o ESP32 é realizada através de interface serial, permitindo a transmissão em tempo real dos dados de distância e a deteção de mudanças na área monitorizada.



Figura 4 - Exemplo de Sensor LiDAR modelo RPLiDAR A2M12. Fonte [10]

3.3.3 Microcontrolador ESP32:

O ESP32 serve como um módulo de interface para o controlo direto dos LEDs e a leitura do botão físico. Ao contrário de ser o cérebro do sistema, a sua função é atuar como um intermediário entre o computador principal e estes periféricos específicos. Ele recebe comandos do computador via comunicação serial (USB) para acender ou apagar LEDs e envia o estado do botão de volta ao computador. Esta abordagem permite que o computador principal se concentre na lógica de negócio e na interface do utilizador, delegando as tarefas de baixo nível ao ESP32. A sua programação é focada na eficiência e na resposta rápida aos comandos recebidos, garantindo a sincronização precisa entre a interface visual e as ações do operador.



Figura 5 - Exemplo de Microcontrolador ESP32. Fonte [11]

3.3.4 LEDs Indicadores:

Os LEDs constituem o elemento visual central do sistema Pick-to-Light, fornecendo orientação clara e inequívoca ao operador sobre a localização dos componentes a serem recolhidos. A seleção dos LEDs considerou fatores como a visibilidade em diferentes condições de iluminação, o consumo energético, a durabilidade e a facilidade de controlo.

Os LEDs utilizados são de alta luminosidade e cor específica (tipicamente verde ou azul) para garantir a visibilidade mesmo em ambientes bem iluminados. Cada LED é controlado individualmente pelo ESP32, permitindo a ativação seletiva conforme as necessidades da operação. A disposição física dos LEDs é estratégica, posicionando-os de forma a indicar claramente as localizações dos componentes sem causar confusão ou ambiguidade.



Figura 6 - Fitas de LEDs 2815d. Fonte [12]

3.3.5 Leitor de Código de Barras

O leitor de código de barras é responsável pela identificação automática das ordens de produção, constituindo o ponto de entrada para o processo de recolha. Este componente deve oferecer leitura rápida e precisa de códigos de barras em diferentes formatos e condições de qualidade.

O leitor selecionado suporta múltiplos formatos de código de barras e oferece conectividade USB para comunicação direta com o computador principal. A sua integração no sistema permite o início automático do processo de recolha após a leitura bem-sucedida de um código válido.



Figura 7 - Leitor de código de barra Honeywell. Fonte [13]

3.3.6 Botão Físico de Confirmação

O botão físico serve como elemento de controlo final e segurança, garantindo que a conclusão de uma operação seja sempre confirmada intencionalmente pelo operador. Este componente simples, mas crucial adiciona uma camada de validação humana ao processo automatizado.

O botão é conectado ao ESP32 através de um pino de entrada digital configurado com resistência de pull-up interna. A sua ativação é detetada pelo software embarcado e comunicada ao sistema principal para a finalização do ciclo de recolha.



Figura 8 - Botão de pressão normalmente aberto. Fonte [14]

Tabela 2: Especificações técnica dos principais componentes hardware

Componente	Modelo/Tipo	Especificações Principais	Interface de Comunicação
Computador Principal	PC	Processador, RAM, Armazenamento; execução do HMI/serviços	USB, Ethernet
Microcontrolador	ESP32 (ESP32-WROOM)	MCU 32-bit; Wi-Fi 2.4 GHz + Bluetooth/LE; até ~34 GPIO (dependendo do módulo)	USB-Serial
LEDs	LED de Alta Luminosidade	Operação típica a 5 V; corrente ≈20 mA por LED	Pinos Digitais (via ESP32)
Sensor LIDAR	RPLIDAR A2M12 (360° 2D)	Alcance 0.2–12 m; amostragem 16k pts/s; rotação típica 10 Hz (ajustável 5–15 Hz); resolução angular 0.225°; Classe de segurança 1	USB (adaptador); alimentação 5 V
Leitor de Código de Barras	barcode honeywell 1950	Modos <i>USB HID</i> (teclado) ou <i>Virtual COM</i> ;	USB
Botão Físico	Botão normalmente aberto ASLO	Utilização com contacto para GND	Pino Digital (via ESP32)

3.4 Software e Comunicações

A arquitetura de software do sistema Pick-to-Light foi desenvolvida com foco na modularidade, manutenibilidade e eficiência operacional. A estrutura de software abrange desde o firmware de baixo nível no microcontrolador até à aplicação de interface de utilizador, passando pela gestão de dados e comunicações entre componente

3.4.1 Fluxo de Comunicação do Ciclo de Retração

A Figura 9 ilustra o diagrama de sequência do ciclo de retração, evidenciando a interação entre o operador, a aplicação Pick-to-Light (Streamlit App), o leitor de código de barras, o microcontrolador ESP32, o sensor LiDAR e a base de dados. O diagrama detalha as trocas de informação e as validações realizadas em cada etapa, incluindo:

- Login do operador e verificação da conectividade do hardware.
- Leitura do código de barras da ordem de produção e consulta à base de dados.
- Acendimento dos LEDs na caixa correspondente via ESP32.

- Validação da ação através da deteção de mão pelo LiDAR ou em modo de simulação.
- Registo das operações (sucesso/falha) na base de dados.
- Confirmação final por botão físico e reinicialização do sistema.

Esta representação evidencia os mecanismos de Poka-Yoke incorporados, nomeadamente a validação automática pelo LiDAR e a confirmação manual por botão físico, reforçando a fiabilidade do processo.

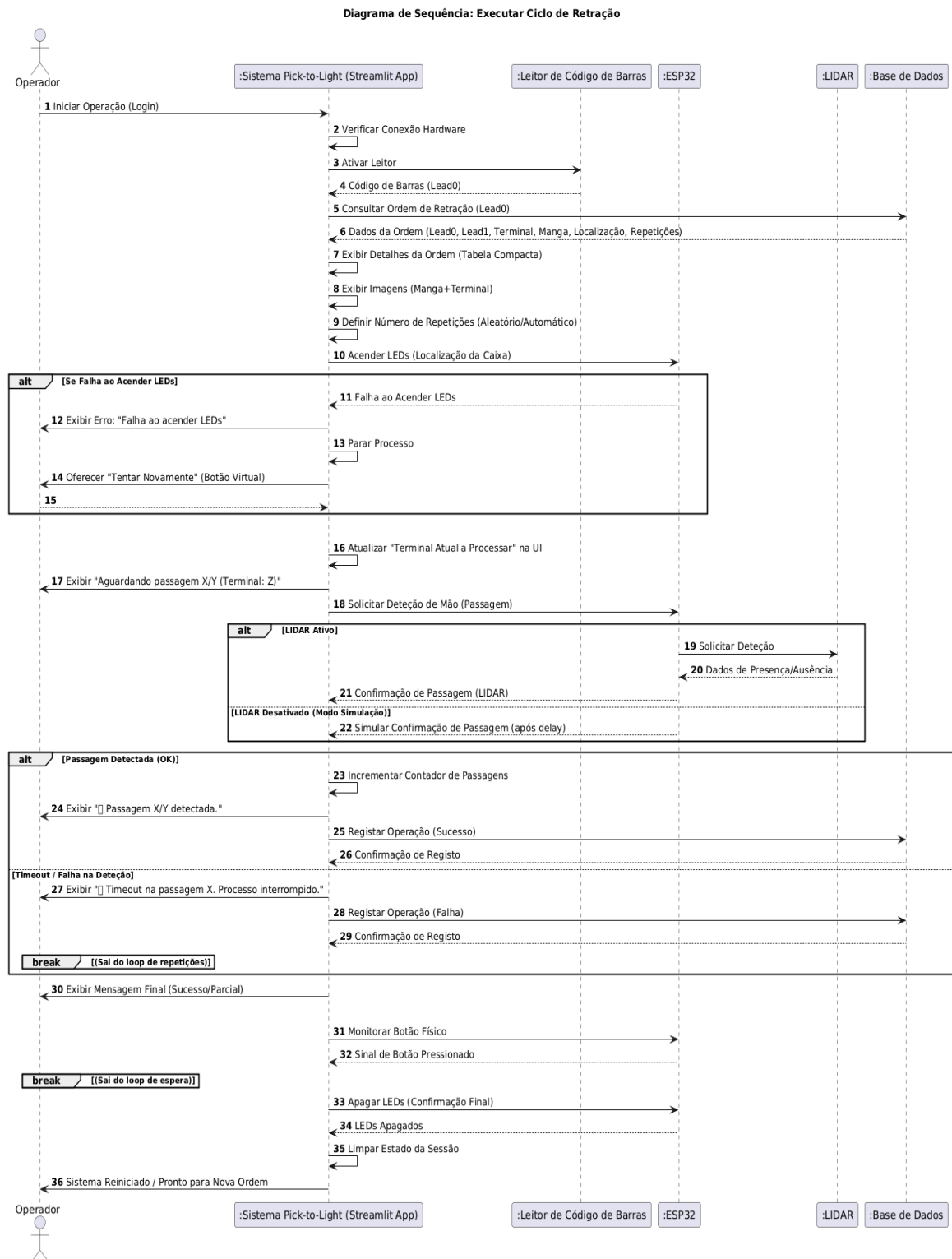


Figura 9 - Diagrama de sequência do ciclo de retração (Aplicação Streamlit, Leitor de Código de Barras, ESP32, LiDAR e Base de Dados).

3.4.2 Aplicação Streamlit

A aplicação principal do sistema é desenvolvida utilizando o framework Streamlit, uma escolha estratégica que permite o desenvolvimento rápido de interfaces web interativas com Python. O Streamlit oferece a vantagem de combinar a simplicidade

de desenvolvimento com a capacidade de criar interfaces responsivas e funcionais adequadas ao ambiente industrial.

A interface de utilizador foi concebida com um foco primordial na usabilidade e na otimização da experiência do operador. O design elimina completamente a necessidade de utilização constante do mouse para rodar para baixo, apresentando todas as informações críticas num único ecrã. Esta abordagem reduz significativamente a carga cognitiva do operador e minimiza o tempo necessário para localizar informações relevantes.

A aplicação está estruturada em múltiplas abas que segregam as funcionalidades por tipo de utilizador e propósito. A aba principal, destinada ao operador, apresenta o fluxo de trabalho de recolha de forma linear e intuitiva. Após a leitura automática do código de barras, o sistema exibe uma tabela compacta com os terminais a processar, incluindo informações como o código da manga, a descrição e a localização. Simultaneamente, são apresentadas as imagens de orientação específicas para cada combinação de manga e terminal, proporcionando orientação visual clara sobre o estado correto dos componentes antes e após a retração.

A automação do fluxo de trabalho é uma característica distintiva da interface. O sistema define automaticamente o número de repetições com base no número de itens na ordem e inicia o processo sem necessidade de intervenção manual do operador. Esta automação reduz a possibilidade de erros de configuração e acelera o início das operações.

O feedback visual é fornecido em tempo real através de indicadores de progresso, mensagens de estado e confirmações de ações. O sistema utiliza um placeholder dinâmico que se atualiza para mostrar o estado atual da operação, eliminando a acumulação de mensagens que causariam scroll na interface.

A aba de administração oferece funcionalidades de gestão avançadas, incluindo a configuração de componentes, a gestão de imagens de orientação, a visualização de relatórios de produtividade e a manutenção da base de dados. Esta segregação garante que as operações críticas do operador não sejam perturbadas por funcionalidades administrativas.

Politécnico
Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

• A P T I V •

Sistema Pick-to-Light

Login

Nome de utilizador

Palavra-passe

Entrar Limpar

Figura 10 - Interface do sistema pick-to-Light etapa da autenticação

3.4.3 Software Embarcado

O firmware do ESP32 constitui a camada de controlo de baixo nível do sistema, implementando a lógica necessária para a gestão direta dos LEDs e a leitura do botão físico. Desenvolvido em C++ utilizando o framework Arduino, o software embarcado é otimizado para eficiência e responsividade.

A estrutura do firmware segue um padrão de máquina de estados que gere as diferentes fases da operação de recolha. O estado inicial aguarda comandos da aplicação principal (no computador) através da interface serial. Quando recebe um comando para acender LEDs numa localização específica, o firmware ativa os LEDs correspondentes e entra no estado de monitorização do botão.

Durante o estado de monitorização, o firmware lê continuamente o estado do botão físico. Quando uma pressão válida é confirmada, o firmware comunica o evento à aplicação principal e aguarda instruções adicionais. A gestão do botão físico é implementada através de interrupções de hardware, garantindo resposta imediata independentemente do estado atual do sistema.

A comunicação serial utiliza um protocolo simples, mas robusto baseado em comandos de texto. Cada comando inclui identificadores de ação e parâmetros necessários, com confirmações de receção e execução. Este protocolo permite a expansão futura de funcionalidades sem alterações significativas na estrutura de comunicação.

3.4.4 Base de Dados

A gestão de dados do sistema utiliza SQL como sistema de gestão de base de dados, uma escolha adequada para aplicações de pequena a média escala que requerem fiabilidade sem a complexidade de sistemas de base de dados mais robustos. A estrutura da base de dados foi concebida para suportar todas as funcionalidades do sistema mantendo a simplicidade e a eficiência.

A tabela Manga armazena informações sobre os diferentes tipos de componentes, incluindo códigos identificadores, descrições e localizações físicas. A tabela Ordem Produção contém os detalhes das ordens de trabalho, associando-as aos componentes necessários. A tabela Utilizador gere os dados de autenticação e perfis de acesso. Finalmente, a tabela Histórico Operação regista cada ação de recolha, permitindo a rastreabilidade e a geração de relatórios de desempenho. A utilização de SQL simplifica a implementação e a portabilidade da base de dados, sendo ideal para um sistema que opera num único posto de trabalho.

3.4.5 Comunicação Serial

A comunicação entre o computador e o microcontrolador ESP32 é estabelecida através de uma interface serial USB. Este método de comunicação é robusto e amplamente suportado, permitindo a troca de dados em tempo real entre as duas camadas do sistema. O computador envia comandos para o ESP32 para controlar os LEDs (acender/apagar) e o ESP32 envia de volta o estado do botão físico. A comunicação serial é gerida por bibliotecas Python no lado do computador e pelo firmware em C++ no ESP32, garantindo uma interface de comunicação fiável e de baixa latência.

3.4.6 Integração MES

Embora não seja um requisito inicial do projeto, a arquitetura do sistema foi concebida para permitir uma futura integração com um Sistema de Execução de Manufatura. Esta integração permitiria a troca de dados em tempo real com os sistemas de gestão de produção da Aptiv, otimizando o fluxo de trabalho, a rastreabilidade e a tomada de decisões. A flexibilidade da arquitetura em camadas facilita a adição de um módulo de integração MES sem a necessidade de reestruturar todo o sistema, demonstrando a escalabilidade e a adaptabilidade da solução proposta.

3.5 Estratégia de Validação

A qualidade e fiabilidade do sistema são asseguradas através de uma estratégia de validação que inclui testes unitários e integrais.

3.5.1 Testes Unitários

Os testes unitários são realizados em módulos individuais do software para verificar se cada componente funciona corretamente de forma isolada. Isso inclui testes para as funções de comunicação com o hardware, operações da base de dados e lógica de processamento de dados.

3.5.2 Testes Integrais

Os testes integrais avaliam o funcionamento do sistema como um todo, verificando a interação entre os diferentes módulos de hardware e software. Estes testes simulam cenários de uso reais no posto de trabalho, garantindo que o sistema atende aos requisitos funcionais e não-funcionais, como a precisão da deteção de mão, a velocidade de resposta dos LEDs e a correta atualização da base de dados. Testes em linha piloto são cruciais para validar o desempenho em ambiente de produção real

4. Desenvolvimento, Implementação e Resultados

Este capítulo detalha as fases de desenvolvimento e implementação do sistema Pick-to-Light proposto, abordando desde a seleção das tecnologias e ferramentas até a construção dos módulos de hardware e software. No final, são apresentados os resultados qualitativos da aplicação do sistema no posto de trabalho de retração, evidenciando os benefícios operacionais e o impacto na experiência do operador.

4.1 Metodologia de Desenvolvimento

O desenvolvimento do sistema Pick-to-Light seguiu uma metodologia iterativa e incremental, permitindo a adaptação contínua às necessidades do projeto e a integração faseada dos componentes de hardware e software. Esta abordagem facilitou a identificação precoce de potenciais problemas e a validação das soluções em cada etapa do ciclo de desenvolvimento. A escolha desta metodologia foi motivada pela complexidade intrínseca de um sistema que envolve a interação entre componentes físicos e lógicos, bem como a necessidade de garantir a compatibilidade e a comunicação eficiente entre eles.

4.2 Seleção de Tecnologias e Ferramentas

A seleção das tecnologias e ferramentas foi um passo crucial para o sucesso do projeto, baseando-se em critérios como desempenho, custo, facilidade de integração, suporte da comunidade e familiaridade da equipa de desenvolvimento. Para o hardware, foram escolhidos microcontroladores e sensores que oferecessem a precisão e a fiabilidade necessárias para a operação de recolha. No que diz respeito ao software, optou-se por linguagens de programação e frameworks que permitissem o desenvolvimento rápido de uma interface de utilizador intuitiva e a gestão eficiente da comunicação com o hardware.

4.3 Desenvolvimento do Hardware

O desenvolvimento do hardware envolveu a conceção e montagem dos módulos eletrónicos responsáveis pela interação física com o operador e com os componentes. Isso incluiu a seleção dos LEDs para a indicação luminosa, o sensor LiDAR para a deteção de mão, e os botões físicos para a confirmação da recolha. A integração destes componentes foi realizada com foco na robustez e na facilidade de manutenção, garantindo que o sistema pudesse operar de forma contínua e fiável em ambiente industrial [3].

4.4 Desenvolvimento do Software

O software do sistema Pick-to-Light foi dividido em módulos para facilitar o desenvolvimento e a manutenção. O módulo principal é a aplicação de interface do operador, que gere a lógica de negócio, a comunicação com o hardware e a apresentação das informações ao utilizador. Outros módulos incluem a gestão da base de dados para armazenamento das ordens de produção e dos dados de desempenho, e a lógica de controlo para a interação com os sensores e atuadores.

Operação Pick to Light

Ordem de Retração: SPWENG RT03

Terminal Atual a Processar

Lead0	Lead1	Terminal	Código Manga	Localização
SPWENG RT03	SPWENG 5010	12103505	13858482	E71-D12

Manuais de Montagem

Manga: 12103505 | Terminal: SPWENG 5010

AUTOMOTIVE WIRE HARNESS COMPONENTS

TERMINALS



CONNECTORS

WIRES

Pré-Montagem

Aguardando passagem 1/4 (Terminal: SPWENG 5010)...

Figura 11 - Captura de ecrã da interface principal do operador



Sistema Pick-to-Light Aptiv

Utilizador: admin
Papel: admin
[Logout](#)

Dashboard do Administrador

[Produtividade](#)
[Diagnósticos](#)
[Gestão de Mangas](#)
[Gestão de Imagens](#)
[Ordens de Produção \(WU\)](#)
[Importar Excel](#)

Produtividade dos Operadores

Data Início: 2025/07/26

Data Fim: 2025/08/02

Operador	Total Operações	Tempo Médio (s)
operador	23	0.0000

Figura 12 - Captura de ecrã da interface de administrador

4.5 Testes e Validação

A fase de testes e validação foi essencial para garantir que o sistema Pick-to-Light funcionasse conforme o esperado e atendesse a todos os requisitos. Foram realizados testes unitários para cada componente de hardware e software, seguidos de testes de integração para verificar a comunicação entre os módulos. Testes de sistema foram conduzidos para simular cenários de uso reais e avaliar o desempenho geral do sistema em termos de precisão, velocidade e fiabilidade. Quaisquer desvios ou anomalias foram registados e corrigidos, garantindo a qualidade final do produto.

4.6 Desafios e Soluções

Durante o desenvolvimento e implementação do sistema, surgiram diversos desafios técnicos e operacionais. Estes incluíram a otimização da comunicação serial entre o software e o hardware, a calibração precisa do sensor LiDAR para

diferentes condições de iluminação, e a garantia de uma interface de utilizador responsiva e intuitiva. Cada desafio foi abordado de forma sistemática, com a aplicação de soluções inovadoras e a realização de ajustes iterativos para superar as dificuldades e alcançar os objetivos do projeto.

4.7 Resultados

4.7.1 Cenário de implementação e observação

O sistema Pick-to-Light foi implementado no posto de trabalho de retração, replicando as condições operacionais reais. A instalação do hardware e a configuração do software foram realizadas para se integrarem no fluxo de trabalho existente. A observação do sistema em funcionamento e a interação com os operadores permitiram recolher informações valiosas sobre o seu desempenho e impacto.

4.7.2 Benefícios operacionais percebidos

Apesar da ausência de métricas quantitativas, por questões de confidencialidade da empresa não foi permitido divulgar dados numéricos concretos foram observados benefícios operacionais claros com a introdução do sistema:

- **Redução do tempo de procura:** A orientação visual fornecida pelos LEDs direciona o operador de forma imediata para a localização exata do componente, eliminando a necessidade de procura manual e otimizando o início de cada tarefa.
- **Fluxo de trabalho simplificado:** O sistema automatiza a identificação da ordem de produção e a apresentação das informações relevantes, tornando o fluxo de trabalho mais linear e intuitivo.
- **Minimização de erros de seleção:** A clareza da indicação luminosa e a validação automática da recolha (através do sensor LiDAR e do botão de confirmação) contribuíram para uma redução significativa dos erros na escolha de componentes, com impacto direto na qualidade final do produto.

4.7.3 Impacto na experiência do operador

O feedback qualitativo dos operadores indicou um impacto positivo na sua experiência de trabalho:

- **Redução da carga cognitiva e visual:** A interface intuitiva e a orientação visual clara diminuem a necessidade de memorização e de constante verificação manual, reduzindo o stress associado à procura de componentes.
- **Maior confiança:** Os operadores expressaram maior segurança na execução das suas tarefas, sabendo que o sistema guia e valida as suas ações.
- **Melhoria ergonómica:** A eliminação de movimentos repetitivos de procura e a centralização das informações num único ecrã contribuíram para um ambiente de trabalho mais ergonómico, reduzindo a fadiga visual e física.

4.7.4 Observações e considerações finais

O sistema Pick-to-Light demonstrou ser uma solução eficaz para otimizar o processo de retração, mesmo sem a validação de métricas quantitativas específicas. As melhorias na eficiência do fluxo de trabalho e na experiência do operador foram evidentes e relatadas de forma consistente. A capacidade de direcionar o operador de forma precisa e de validar as ações em tempo real são aspectos cruciais que contribuem para um processo mais ágil e com menor probabilidade de erros. A ausência de dados quantitativos não invalida os benefícios qualitativos observados. A percepção de melhoria por parte dos operadores e a simplificação do processo constituem indicadores fortes do valor agregado pelo sistema. Futuras implementações, em contextos com menos restrições de confidencialidade, poderão validar estas observações com métricas de desempenho robustas.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

O projeto de desenvolvimento do sistema Pick-to-Light para o posto de trabalho de retração demonstrou a viabilidade e o potencial de otimização de processos manuais através da aplicação de tecnologias de automação e orientação visual. Apesar das restrições na recolha de dados quantitativos de desempenho, as observações qualitativas e o feedback dos operadores indicam uma melhoria significativa na eficiência operacional e na experiência do utilizador.

O sistema conseguiu atingir os seus objetivos principais, nomeadamente a redução do tempo de procura de componentes, a minimização de erros de recolha e a simplificação do fluxo de trabalho. A arquitetura modular, com a separação clara de responsabilidades entre o computador principal (cérebro do sistema) e o microcontrolador ESP32 (interface de baixo nível para LEDs e botões), provou ser robusta e adaptável.

A interface de utilizador, desenvolvida em Streamlit, foi particularmente bem-sucedida na criação de um ambiente intuitivo, o que contribuiu para a redução da carga cognitiva do operador e para um aumento da sua confiança na execução das tarefas. A integração do sensor LiDAR para validação automática da recolha representa uma inovação que adiciona uma camada extra de precisão ao processo. Para além dos ganhos ergonómicos e de qualidade, destaca-se ainda o impacto económico da solução. O sistema foi concebido com base em componentes de baixo custo e de fácil acesso, o que o torna financeiramente viável para implementação em postos de trabalho industriais. A sua modularidade e escalabilidade permitem que a solução seja replicada em múltiplos postos de trabalho na Aptiv ou adaptada a outros contextos industriais semelhantes, reforçando a sua aplicabilidade prática e o valor acrescentado para a empresa.

O sistema Pick-to-Light com validação por LiDAR foi desenvolvido e já se encontra operacional no posto de trabalho da APTIV, onde apoia o processo de retração térmica de cabos. A solução foi implementada com sucesso, testada e integrada ao fluxo real de produção, permitindo uma orientação luminosa precisa para os operadores e garantindo rastreabilidade por meio do registo de eventos.

Em suma, o sistema Pick-to-Light desenvolvido é uma solução eficaz que aborda os desafios de ergonomia, produtividade e qualidade identificados no posto de trabalho de retração, oferecendo um caminho claro para a otimização de processos industriais.

Este sistema representa um passo concreto da Aptiv rumo à Indústria 4.0, conciliando baixo custo, ergonomia, qualidade e escalabilidade

5.2 Trabalhos Futuros

Com base na experiência adquirida e nas observações realizadas, diversas linhas de trabalho futuro podem ser exploradas para aprimorar e expandir as funcionalidades do sistema Pick-to-Light:

- **Integração com Sistemas MES/ERP:** Aprofundar a integração com sistemas de gestão de produção (MES) para permitir a troca de dados em tempo real, otimizando o planejamento da produção, a rastreabilidade e a gestão de inventário.
- **Análise de Dados e Otimização Contínua:** Implementar módulos de análise de dados mais avançados para recolher e processar métricas de desempenho em tempo real. Isso permitiria a identificação de gargalos, a otimização contínua dos processos de recolha e a geração de relatórios de produtividade mais detalhados.
- **Expansão para Múltiplos Postos de Trabalho:** Adaptar a arquitetura do sistema para suportar múltiplos postos de trabalho de retração ou outras operações de recolha, permitindo a escalabilidade da solução para diferentes áreas da fábrica.
- **Feedback Visual e Sonoro Aprimorado:** Explorar a utilização de feedback visual mais dinâmico (por exemplo, LEDs RGB com diferentes cores para indicar estados) e feedback sonoro para alertar sobre erros ou confirmar ações, melhorando a experiência do operador.
- **Manutenção Preditiva:** Integrar sensores adicionais para monitorizar o estado dos componentes de hardware (ex: vida útil dos LEDs, desempenho do sensor LiDAR) e implementar algoritmos de manutenção preditiva para antecipar falhas e reduzir o tempo de inatividade.
- **Interface de Utilizador Adaptativa:** Desenvolver uma interface de utilizador que se adapte dinamicamente às preferências do operador ou às condições de trabalho, oferecendo personalização e maior flexibilidade.
- **Estudos Quantitativos de Desempenho:** Realizar estudos de caso em ambientes onde a recolha de dados quantitativos seja possível, para validar os ganhos de eficiência e a redução de erros com métricas robustas e estatisticamente significativas.

Referências

- [1] C. Stockinger, B. Fischer, and R. Schmitt, "The Effect of Pick-by-Light Systems on Situation Awareness in Order Recolha Activities," *Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp.770–777, 2020.
- [2] M. Łopuszyński, K. Janusz, and D. Karwat, "Comparative Study of Selected Order-Picking Methods: Efficiency, Ergonomics, and Adaptation Rate of New Employees," *Sensors*, vol. 25, no. 3, art. 923, 2025, doi: 10.3390/s25030923.
- [3] J. Trojanowska, J. Husár, S. Hrehová, and L. Knapcikova, "Poka Yoke in Smart Production Systems with Pick-to-Light Implementation to Increase Efficiency: A Study," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 21, art. 11715, 2023, doi: 10.3390/app132111715.
- [4] D. Hercog, P. Benčak, U. Vincetič, and T. Lerher, "Product Assembly Assistance System Based on Pick-To-Light and Computer Vision Technology," *Sensors*, vol. 22, no. 24, art. 9769, 2022, doi: 10.3390/s22249769.
- [5] X. Wu, A. H. Guo, S. Azenkot, and S. Feiner, "Comparing Order Picking Assisted by Head-Up Display (HUD) vs. Pick-by-Light," in *Proc. ISWC*, 2015.
- [6] F. J. Folgado, J. Calderón, and A. J. Calderón, "Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends," *Electronics*, vol. 13, no. 4, p. 782, 2024.
- [8] S. Umezu, S. Koizumi, K. Nakagawa, and S. Nishida, "Potential of Low-Cost LiDAR Sensors: Case Studies for Touchless Interaction and Tracking," *Electronics*, vol. 12, no. 15, p. 3351, 2023.
- [9] Y. A. Bozer and L. F. McGinnis, "Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model," *International Journal of Production Economics*, vol. 28, no. 1, pp. 1–19, Nov. 1992.
- [10] LiDAR datasheet disponível em: https://bucket-download.slamec.com/f9435aaf1a6563d781120f799cd63f7b0413c5bc/SLAMTEC_rplidar_datasheet_S3_v1.1_en.pdf Consultado em 11/09/2025
- [11] ESP32 WROOM-32 DEVKIT V1 - Placa com WiFi e Bluetooth. Disponível em: https://solectroshop.com/pt/modulos-wi-fi/5215-esp32-wroom-32-devkit-v1-placa-com-wifi-e-bluetooth-5905323233959.html?srsId=AfmBOoo_FsAOazDdM_jehUHyDxi9aC4sguNnEEISvmKhoi2leO-xZNxM. Consultado em 11/09/2025
- [12] WS2815 LED strip. Disponível em: <https://www.sdiplight.com/ws2815-led-strip/>. Consultado em 11/09/2025
- [13] Honeywell Xenon 1950g Scanner. Disponível em: https://www.logiscenter.pt/leitores-codigo-barras-honeywell-xenon-1950g?srsId=AfmBOorEK7jQmRTW0UIgE4ZF_chb0VosvQjitYBsWfC1UHH-yIRBgD4. Consultado em 11/09/2025
- [14] Contato Aberto para botões e chaves. Disponível em: <https://dev2.aslo.pt/electric/products/cl-asb2be101-contacto-aberto-para-botoes-e-chaves>. Consultado em 11/09/2025