



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia

Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema Pick-to-Light

Edivaldo Haendel Bento Pinto da Costa

Aluno nº: 20220110

Orientadores

Paulo Jorge Sequeira Gonçalves, Professor Coordenador

Nuno Miguel Graça Marques (Diretor da BITZER)

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Paulo Jorge Sequeira Gonçalves, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Setembro de 2025

Composição do júri

Presidente do júri

Doutor Nuno Octávio Garcia Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Doutor Armando Lopes Ramalho

Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Doutor Paulo Jorge Sequeira Gonçalves

Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Castelo Branco

Nuno Marques

Diretor Geral na Bitzer, Castelo Branco, Portugal

Dedicatória

A Deus, pela força e por me permitir concluir este curso, à minha família e à minha namorada, pelo amor, paciência e apoio incondicional.

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento ao Prof. Paulo Jorge Sequeira Gonçalves, orientador deste trabalho, pelo acompanhamento próximo, pela confiança e por me desafiar a superar limites, mostrando-me a minha capacidade e até onde posso chegar.

A toda a equipa da Bitzer, agradeço o apoio sempre que foi necessário e a disponibilidade para a implementação e validação do sistema em ambiente real.

Agradeço também aos colegas Yanick e ao Eng. António Alves pela ajuda técnica e pelos contributos em algumas partes do relatório, que muito enriqueceram o resultado.

A todos os que, de forma direta ou indireta, contribuíram para este percurso, o meu muito obrigado.

Resumo

O presente relatório descreve o desenvolvimento e implementação de um sistema Pick-to-Light (PTL) inovador para a empresa Bitzer, com o objetivo de eliminar erros na pré-montagem de componentes num dos postos de trabalho e assim aumentar a eficiência operacional. O projeto atende à necessidade de reduzir a taxa de erro no processo de seleção manual de componentes, que impacta diretamente a qualidade dos produtos finais e os custos operacionais.

O sistema integra tecnologias de automação industrial, como o microcontrolador ESP32 para controlo das matrizes LED bicolores, um Raspberry Pi como controlador central, um leitor de códigos de barras para identificação automática de ordens de produção e uma base de dados para gestão de inventário e rastreabilidade das operações. A implementação inclui duas interfaces: uma simplificada para operadores, priorizando usabilidade e clareza visual, e uma outra para a gestão, com funcionalidades de gestão de inventário, criação de ordens de produção, monitorização de desempenho e análise de dados operacionais. O programa desenvolvido para o microcontrolador garante comunicação eficiente via protocolo I2C com as matrizes LED bicolores.

A lógica do sistema utiliza as matrizes LED bicolores para fornecer feedback visual imediato aos operadores, ao processar códigos de barras para identificação de peças e ordens de produção. Os LEDs acendem a cor verde para indicar a quantidade de componentes a serem utilizados em cada ordem de produção (quantidade > 0), ou a cor vermelha para sinalizar locais onde nenhum componente deve ser retirado (quantidade = 0), garantindo clareza e minimizando erros na seleção. Essa abordagem visual intuitiva otimiza o fluxo de trabalho e reforça a precisão do processo.

O projeto contribui para a modernização dos processos industriais da Bitzer, alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0 por meio de IoT, automação inteligente e análise de dados em tempo real. Os resultados demonstram o potencial de replicação da solução noutros contextos industriais, estabelecendo um modelo de referência para sistemas Pick-to-Light de baixo custo e alta eficiência.

Palavras chave

Pick-to-Light, Indústria 4.0, Automação Industrial, ESP32, Raspberry Pi

Abstract

This report describes the development and implementation of an innovative Pick-to-Light (PTL) system for the company Bitzer, aimed at eliminating errors in the pre-assembly of components at one of the workstations and thus increasing operational efficiency. The project addresses the need to reduce the error rate in the manual component selection process, which directly impacts the quality of the final products and operational costs.

The system integrates industrial automation technologies, such as the ESP32 microcontroller for controlling bi-color LED matrices, a Raspberry Pi as the central controller, a barcode scanner for automatic identification of production orders, and a database for inventory management and traceability of operations. The implementation includes two interfaces: a simplified one for operators, prioritizing usability and visual clarity, and another for management, with functionalities for inventory management, creation of production orders, performance monitoring, and operational data analysis. The program developed for the microcontroller ensures efficient communication with the bi-color LED matrices via the I2C protocol.

The system logic uses the bi-color LED matrices to provide immediate visual feedback to operators. When processing barcodes to identify parts and production orders, the LEDs light up green to indicate the quantity of components to be used in each production order (quantity > 0), or red to signal locations where no components should be picked (quantity = 0), ensuring clarity and minimizing selection errors. This intuitive visual approach optimizes workflow and reinforces process accuracy.

The project contributes to the modernization of Bitzer's industrial processes, aligning with Industry 4.0 principles through IoT, smart automation, and real-time data analysis. The results demonstrate the potential for replicating the solution in other industrial contexts, establishing a reference model for low-cost, high-efficiency Pick-to-Light systems.

Keywords

Pick-to-Light, Industry 4.0, Industrial Automation, ESP32, Raspberry Pi

Índice geral

1. Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Motivação e Objetivos	1
1.3. Estrutura do Relatório	2
2. Análise do Problema e Especificação de Requisitos	3
2.1 Caracterização da Empresa	3
2.2 Análise do Processo de Pré-Montagem	3
2.3 Causas Raiz	4
2.4 Requisitos Funcionais	4
2.5 Requisitos Não Funcionais	5
2.6 Justificação da Abordagem Proposta	5
3. Fundamentação Teórica e Estado da Arte	7
3.1. A Indústria 4.0 e a Automação Industrial.....	7
3.2. Sistemas de Apoio à Montagem: Pick-to-Light	7
3.2.1. Princípios de Funcionamento.....	8
3.2.2. Vantagens e Desafios	8
3.2.3. Aplicações em Contexto Industrial.....	9
3.3. Estado da Arte em Sistemas Pick-to-Light.....	9
4. Arquitetura e Design do Sistema	11
4.1. Visão Geral da Arquitetura.....	11
4.2. Camada de Hardware.....	12
4.2.1. ESP32	12
4.2.2. Matrizes LED HT16K33	12
4.2.3. Raspberry Pi 4.....	13
4.2.4. Leitor de Códigos de Barras.....	14
4.3. Camada de Comunicação	15
4.3.1. Comunicação Serial (UART).....	15
4.3.2. Barramento I2C	15
4.3.3. Ligação de Rede.....	16
4.4. Camada de Software	16
4.4.1. Python	16
4.4.2. Streamlit.....	17
4.4.3. MariaDB.....	23
4.5. Diagrama de Sequência.....	23

5.Implementação e Validação do Sistema	25
5.1 Visão Geral	25
5.2. Desenvolvimento do Sistema.....	25
5.3. Estratégia de Integração dos Componentes	25
5.4. Implementação em Ambiente de Laboratório.....	26
5.5. Implementação em Ambiente Industrial (Bitzer).....	27
5.6. Metodologia de Testes.....	28
5.7. Resultados Obtidos	29
5.8. Resultados Quantitativos Comparativos.....	30
5.9. Análise Crítica e Discussão dos Resultados.....	31
6. Conclusões e Trabalho Futuro	33
6.1 Conclusões.....	33
6.2. Limitações	33
6.3. Propostas para Trabalho Futuro	33
Referências	35

Índice de figuras

Figura 1 - Bancada de pré-montagem utilizada na empresa.....	4
Figura 2 - Arquitetura geral do sistema Pick-to-Light.	11
Figura 3 - ESP32 (Figura copiada de [15]).	12
Figura 4 - Matriz Frente e verso (Figura copiada de [16]).	13
Figura 5 - Raspberry Pi 4 (Figura copiada de [18]).	14
Figura 6 - Leitor de Código de Barras (Figura Copiada de [19]).	15
Figura 7 -Interface do Operador (Ecrã de Login)	17
Figura 8 - Interface do Operador (Execução da Ordem de Produção	18
Figura 9 - Interface do Administrador (Ecrã de Login)	18
Figura 10 - Interface do Administrador (Dashboard).....	19
Figura 11 - Interface do Administrador (Inventário Completo)	19
Figura 12 - Interface do Administrador (Adicionar Novo Componente)	20
Figura 13 - Interface do Administrador (Atualizar Stock)	20
Figura 14 - Interface do Administrador (Desempenho Operadores - Filtro)	21
Figura 15 - Interface do Administrador (Desempenho Operadores - Tabela) ...	21
Figura 16 - Interface do Administrador (Criar Peça - Consultar).....	22
Figura 17 - Interface do Administrador (Criar Peça - Adicionar Componente)..	22
Figura 18 - Diagrama de sequência do sistema PTL, desde a leitura do código de barras até à atualização do stock	24
Figura 19 - Implementação física inicial do sistema em ambiente de laboratório.	27
Figura 20 - Implementação final do sistema em ambiente industrial na Bitzer. .	28

Lista de tabelas

Tabela 1 - Conexões e endereços I2C no ESP32.....	16
Tabela 2 - Resultados Quantitativos dos Testes.....	29
Tabela 3 - Comparativo de Resultados Antes e Depois da Implementação.....	31

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

AI - Artificial Intelligence (Inteligência Artificial)

AR - Augmented Reality (Realidade Aumentada)

CBDM - Cloud-based Design and Manufacturing (Design e Manufatura Baseados na Nuvem)

CPS - Cyber-Physical Systems (Sistemas Ciber-Físicos)

ERP- Enterprise Resource Planning (Planeamento de Recursos Empresariais)

GPIO- General Purpose Input/Output

HT16K33 - Holtek LED Driver IC

I2C - Inter-Integrated Circuit

IA - Inteligência Artificial

IoT - Internet of Things (Internet das Coisas)

LED - Light Emitting Diode (Díodo Emissor de Luz)

PTL - Pick-to-Light

RDBMS- Relational Database Management System (Sistema de Gestão de Bases de Dados Relacionais)

RFID- Radio-Frequency Identification (Identificação por Radiofrequência)

SBC - Single Board Computer (Computador de Placa Única)

UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

USB - Universal Serial Bus

WMS- Warehouse Management System (Sistema de Gestão de Armazém)

1. Introdução

1.1. Contextualização

No cenário industrial contemporâneo, a eficiência e a precisão nos processos de montagem são cruciais para a competitividade e a qualidade do produto final. Empresas de manufatura, como a Bitzer, enfrentam desafios constantes para otimizar a sua linha de produção, minimizando erros e maximizando a produtividade. A pré-montagem de componentes, em particular, é uma etapa que exige atenção meticulosa, pois falhas nesta fase podem propagar-se por todo o processo produtivo, resultando em retrabalho, desperdício de materiais e atrasos na entrega. A busca por soluções inovadoras que mitiguem estes problemas tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias avançadas no campo da automação industrial e da Indústria 4.0 [1].

O presente projeto insere-se neste contexto, abordando a necessidade premente de aprimorar a precisão na pré-montagem de componentes na empresa Bitzer, uma organização com operações em Portugal. Historicamente, os operadores desta empresa tiveram dificuldades em garantir a seleção correta de itens, o que levava a erros que comprometiam a qualidade e a eficiência. Para resolver esta questão, foi proposto à empresa, e posteriormente implementado, um sistema PTL, uma tecnologia comprovadamente eficaz na redução de erros de picking e na otimização de processos manuais [2]. Atualmente o sistema está em funcionamento na empresa.

1.2. Motivação e Objetivos

A principal motivação para este projeto reside na identificação de uma lacuna significativa no processo de pré-montagem de componentes numa bancada da Bitzer. Neste posto de trabalho existe um armazém local, onde estão armazenados os componentes necessários para dar resposta às diversas ordens de produção. Até então, a seleção dos elementos era realizada com base em métodos manuais e visuais, prática que resultava numa taxa de erro considerável. Estes erros impactavam negativamente a qualidade dos produtos finais e geravam custos adicionais associados ao retrabalho e à gestão de não conformidades. A implementação de um sistema Pick-to-Light (PTL) surge, assim, como uma solução robusta e de baixo custo para colmatar estas deficiências, proporcionando aos operadores um guia visual claro e inequívoco durante a recolha dos componentes.

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema PTL completo e funcional, capaz de eliminar os erros de pré-montagem de componentes num posto de trabalho específico da empresa Bitzer em Castelo Branco. Para alcançar este objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e compreender em profundidade o processo atual de pré-montagem de elementos da bancada na Bitzer, identificando as causas, raiz dos erros e as necessidades operacionais.

- Projetar a arquitetura de hardware e software do sistema PTL, selecionando os componentes mais adequados para garantir fiabilidade, escalabilidade e custo-benefício.
- Desenvolver o software para o Raspberry Pi 4, que atuará como controlador central, gerindo a comunicação com o scanner de código de barras, o ESP32 e as interfaces de utilizador.
- Desenvolver o software para o microcontrolador ESP32, responsável pelo controlo das 13 matrizes de LEDs bicolores, que indica o número correto de componentes a serem recolhidos, acendendo o Led com a cor verde para sinalizar a quantidade a ser recolhida (quantidade > 0) e o Led com a cor vermelha para indicar locais onde nenhuma peça deve ser retirada (quantidade = 0).
- Implementar duas interfaces de utilizador: uma para o operador, simplificada e intuitiva, e outra para o administrador, com funcionalidades de gestão e configuração do sistema.
- Realizar testes exaustivos de unidade, integração e sistema para validar a funcionalidade, precisão e robustez do sistema PTL.
- Avaliar o impacto da implementação do sistema na redução de erros e no aumento da eficiência do processo de pré-montagem na Bitzer.

1.3. Estrutura do Relatório

Este relatório está organizado em seis capítulos, do conceito à validação do sistema Pick-to-Light (PTL):

- **Capítulo 1 – Introdução:** contextualização, motivação, objetivos e organização do documento.
- **Capítulo 2 – Análise do Problema e Especificação de Requisitos:** caracterização do posto, análise do processo de pré-montagem, causas-raiz, requisitos funcionais e não funcionais, e justificação da abordagem.
- **Capítulo 3 – Fundamentação Teórica e Estado da Arte:** enquadramento em Indústria 4.0/automação, princípios e vantagens do PTL, e análise crítica do estado da arte.
- **Capítulo 4 – Arquitetura e Design do Sistema:** descrição da arquitetura (hardware, comunicação e software), seleção/justificação dos componentes e diagrama de sequência.
- **Capítulo 5 – Implementação e Validação do Sistema:** estratégia de integração, implementação em laboratório e ambiente industrial, metodologia de testes, resultados e discussão.
- **Capítulo 6 – Conclusões e Trabalho Futuro:** síntese dos contributos, limitações e propostas de evolução.

2. Análise do Problema e Especificação de Requisitos

Esta secção apresenta uma análise detalhada do processo de pré-montagem da Bitzer, identificando problemas, causas e requisitos para o desenvolvimento do sistema Pick-to-Light (PTL). A caracterização geral da empresa e o enquadramento do contexto encontram-se no Capítulo 1, sendo aqui aprofundados os aspetos operacionais relevantes para a solução proposta.

2.1 Caracterização da Empresa

A Bitzer, localizada na Zona Industrial de Castelo Branco, é uma referência no setor de refrigeração e climatização, produzindo compressores, condensadores e unidades de condensação para diversos mercados. O posto de trabalho alvo deste projeto situa-se na fase de pré-montagem, onde é necessária a recolha precisa de múltiplos componentes. Estes elementos, muitas vezes visualmente semelhantes, exigem elevado rigor na seleção para garantir a qualidade final. A empresa adota princípios da Indústria 4.0 e procura constantemente integrar soluções inovadoras para reduzir erros, aumentar produtividade e melhorar a rastreabilidade.

2.2 Análise do Processo de Pré-Montagem

O processo atual, antes da introdução do PTL, baseia-se em métodos manuais: os operadores utilizam listas em papel ou memorizam localizações e quantidades, verificando visualmente cada componente. Embora eficaz para operadores experientes e produção reduzida, este método torna-se ineficiente em cenários de maior complexidade ou elevada rotatividade. Foram observados quatro problemas principais:

- **Erros de seleção:** Escolha de componentes incorretos ou em quantidades erradas, levando a retrabalho e desperdício.
- **Baixa produtividade:** Tempo elevado na procura e verificação de peças, agravado pela necessidade de correção de erros.
- **Formação prolongada:** Novos operadores requerem acompanhamento constante até atingirem níveis aceitáveis de precisão.
- **Rastreabilidade limitada:** Registos de stock e operações são atualizados com atraso, dificultando monitorização em tempo real.

A figura 1 apresenta a bancada de pré-montagem onde o processo é realizado, ilustrando o cenário real de trabalho que motivou o desenvolvimento do sistema Pick-to-Light.



Figura 1 - Bancada de pré-montagem utilizada na empresa.

2.3 Causas Raiz

A análise dos problemas revelou que a sua origem está associada a fatores estruturais do processo:

- Dependência da memória humana, aumentando a probabilidade de falhas sob pressão ou fadiga.
- Métodos de picking manuais, que não fornecem feedback imediato nem atualizam automaticamente a informação de stock.
- Ausência de validação automática, impossibilitando a deteção imediata de erros.
- Falta de integração de dados com sistemas de gestão de armazém ou planeamento, gerando inconsistências e reduzindo a capacidade de resposta.

2.4 Requisitos Funcionais

Com base nos problemas e causas identificados, foram definidos os seguintes requisitos funcionais:

- **RF1:** Leitura de códigos de barras 1D para identificação da ordem de produção.
- **RF2:** Ativação visual dos módulos PTL para indicar a localização e quantidade de componentes.
- **RF3:** Confirmação de recolha pelo operador através de botão no módulo.
- **RF4:** Atualização automática de stock após cada recolha.
- **RF5:** Visualização e gestão de ordens de produção pelo administrador.
- **RF6:** Adição e atualização de componentes no inventário.
- **RF7:** Registo de desempenho dos operadores, incluindo tempos e erros.
- **RF8:** Interface de operador clara e de fácil utilização.
- **RF9:** Interface de administrador completa para configuração e gestão.

2.5 Requisitos Não Funcionais

Para além das funcionalidades, o sistema deve cumprir:

- **RNF1:** Fiabilidade operacional e integridade dos dados.
- **RNF2:** Tempo de resposta inferior a 1 segundo entre leitura e ativação de LEDs.
- **RNF3:** Escalabilidade para suportar novos módulos e aumento de ordens.
- **RNF4:** Usabilidade que minimize curva de aprendizagem e erros.
- **RNF5:** Segurança na autenticação e proteção de dados.
- **RNF6:** Facilidade de manutenção e atualização da arquitetura.
- **RNF7:** Viabilidade económica, com retorno de investimento sustentado pela redução de erros e aumento da produtividade.

2.6 Justificação da Abordagem Proposta

A análise de soluções comerciais revelou que, embora robustas, estas implicam custos elevados e funcionalidades além do necessário para o caso específico da Bitzer. A abordagem proposta integra tecnologias de baixo custo, como os microcontroladores, associadas a módulos LED configurados de forma personalizada. Esta escolha garante:

- Adaptação ao processo existente, sem reestruturações dispendiosas.
- Controlo total sobre desenvolvimento e manutenção, evitando dependência de fornecedores.
- Flexibilidade para futuras expansões e integração com outros sistemas da empresa.
- Utilização de software e hardware amplamente documentados, facilitando manutenção e transferência de conhecimento.

3. Fundamentação Teórica e Estado da Arte

A presente secção aborda os conceitos fundamentais e as tecnologias relevantes que sustentam o desenvolvimento do sistema integrado de automação industrial, com foco nos sistemas PTL, gestão de stock e integração de dados. A revisão da literatura e a análise do estado da arte são cruciais para contextualizar o projeto, identificar as melhores práticas e as lacunas existentes na pesquisa e aplicação industrial.

3.1. A Indústria 4.0 e a Automação Industrial

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, representa uma transformação profunda nos processos de fabrico e gestão, impulsionada pela digitalização e interconexão de sistemas. Os pilares desta revolução incluem a Internet das Coisas (IoT), sistemas ciber-físicos (CPS), *Big Data*, inteligência artificial (IA), manufatura aditiva e robótica avançada [1]. A automação industrial, que já era uma componente chave nas revoluções anteriores, ganha uma nova dimensão na Indústria 4.0, com sistemas mais inteligentes, flexíveis e autónomos. A integração vertical e horizontal dos sistemas, desde o chão de fábrica até à gestão empresarial, permite uma otimização sem precedentes dos recursos e processos [2].

No contexto da automação industrial, a eficiência e a redução de falhas são objetivos primordiais. A implementação de sistemas automatizados visa minimizar a intervenção humana em tarefas repetitivas ou propensas a erros, garantindo maior precisão e velocidade. A monitorização em tempo real e a capacidade de adaptação dos sistemas são características essenciais para responder às dinâmicas do mercado e às exigências de produção [3].

3.2. Sistemas de Apoio à Montagem: Pick-to-Light

Os sistemas PTL são tecnologias de automação amplamente utilizadas em armazéns e linhas de montagem para otimizar os processos de separação e montagem de itens. Estes sistemas utilizam dispositivos luminosos, como díodos emissores de luz (LEDs), para guiar os operadores até à localização exata dos elementos necessários e indicar a quantidade a ser recolhida. A principal vantagem dos sistemas PTL reside na sua capacidade de reduzir significativamente os erros de separação, aumentar a velocidade das operações e melhorar a produtividade geral [4].

Um sistema PTL típico funciona da seguinte forma: quando uma ordem de montagem é iniciada, os LEDs correspondentes aos elementos necessários acendem-se nas prateleiras ou caixas de armazenamento. O operador recolhe a quantidade indicada e, em seguida, pressiona um botão para confirmar a recolha, o que apaga a luz e atualiza o inventário. Este método intuitivo e visual minimiza a necessidade de listas de papel ou dispositivos portáteis, reduzindo o tempo de formação e a probabilidade de erros humanos [5].

3.2.1. Princípios de Funcionamento

Os sistemas Pick-to-Light operam com base num princípio simples, mas eficaz: a utilização de sinais luminosos para direcionar o operador. Cada localização de stock ou compartimento de elementos é equipada com um módulo Pick-to-Light que inclui um display numérico (geralmente LEDs de 7 segmentos ou matrizes de LEDs) e um botão de confirmação. Quando uma ordem de recolha é processada, o sistema central envia um sinal para os módulos relevantes, que acendem as suas luzes e exibem a quantidade exata de itens a serem recolhidos. O operador segue as luzes, recolhe os itens e pressiona o botão para confirmar a ação, desativando a luz e enviando um sinal de conclusão de volta ao sistema central. Este processo garante que o operador está sempre a recolher o elemento correto na quantidade certa, minimizando erros e otimizando o fluxo de trabalho.

3.2.2. Vantagens e Desafios

As vantagens dos sistemas Pick-to-Light são múltiplas e impactam diretamente a eficiência operacional:

- **Redução Drástica de Erros:** A orientação visual direta elimina a ambiguidade, minimizando a seleção incorreta de itens. Estudos demonstram reduções de erros [6].
- **Aumento da Produtividade:** Acelera o processo de separação e montagem, pois os operadores não precisam de consultar listas ou procurar itens manualmente. O tempo de ciclo por ordem pode ser reduzido [7].
- **Redução da Fadiga:** O sistema é intuitivo e reduz a carga cognitiva do operador, minimizando a fadiga e aumentando a precisão ao longo do turno de trabalho.
- **Facilidade de Formação:** Novos operadores podem ser formados rapidamente, pois o sistema é autoexplicativo e visualmente guiado.
- **Controlo de Inventário em Tempo Real:** A confirmação de cada recolha atualiza o stock instantaneamente, proporcionando dados precisos para a gestão de inventário.

No entanto, a implementação de sistemas PTL também apresenta desafios:

- **Custo Inicial:** O investimento inicial em hardware (módulos Pick-to-Light, cablagem, integração) pode ser significativo.
- **Integração com Sistemas Existentes:** A necessidade de integrar o sistema Pick-to-Light com sistemas de gestão de armazém (WMS) ou sistemas de planeamento de recursos empresariais (ERP) pode ser complexa e exigir um planeamento cuidadoso.
- **Manutenção:** A manutenção dos módulos PTL e da infraestrutura de comunicação é essencial para garantir a fiabilidade do sistema.

- **Flexibilidade:** Em ambientes com alta variabilidade de produtos ou layouts de armazém em constante mudança, a reconfiguração do sistema pode ser um desafio.

3.2.3. Aplicações em Contexto Industrial

Os sistemas PTL são amplamente aplicados em diversos setores industriais, incluindo automóvel, eletrônica, farmacêutica, retalho e logística. Em fábricas de automóveis, são utilizados para a montagem de subconjuntos complexos, garantindo que cada veículo receba as peças exatas e na sequência correta. Na indústria farmacêutica, onde a precisão é crítica, estes sistemas asseguram a correta separação de medicamentos. Em centros de distribuição de retalho, aceleram o processo de picking de encomendas, melhorando a velocidade de entrega ao cliente. A sua versatilidade e eficácia tornam-nos uma ferramenta valiosa para qualquer operação que exija a seleção rápida e precisa de itens.

3.3. Estado da Arte em Sistemas Pick-to-Light

O estado da arte em sistemas Pick-to-Light reflete a evolução contínua destas tecnologias, impulsionada pela Indústria 4.0 e pela crescente procura por eficiência e precisão na logística e manufatura. Inicialmente, os sistemas Pick-to-Light eram relativamente simples, utilizando displays numéricos básicos e comunicação cablada. No entanto, a integração de novas tecnologias tem transformado estes sistemas em soluções mais sofisticadas e adaptáveis.

Atualmente, o estado da arte em Pick-to-Light caracteriza-se por:

- **Integração com IoT e Sistemas Ciber-Físicos (CPS):** Os módulos Pick-to-Light modernos são frequentemente equipados com capacidades de IoT, permitindo a comunicação sem fios e a integração em redes de sensores e atuadores. Isto facilita a recolha de dados em tempo real sobre o desempenho das operações e a sua integração com sistemas de gestão de armazém (WMS) e planeamento de recursos empresariais (ERP) [9].
- **Sistemas Visuais Avançados:** Para além dos *displays* numéricos, os sistemas mais recentes incorporam displays gráficos, projeção de luz diretamente nas superfícies de trabalho (Pick-by-Light Projection) e até realidade aumentada (AR) para guiar os operadores. Estas tecnologias oferecem uma orientação visual mais rica e interativa, reduzindo ainda mais a probabilidade de erros [10].
- **Flexibilidade e Reconfigurabilidade:** A capacidade de reconfigurar rapidamente os layouts dos sistemas Pick-to-Light é uma tendência crescente. Soluções modulares e sem fios permitem que as empresas adaptem os seus processos de recolha e montagem a diferentes produtos e volumes de produção, sem a necessidade de grandes intervenções físicas [11].
- **Análise de Dados e Inteligência Artificial:** A recolha massiva de dados gerados pelos sistemas Pick-to-Light (tempos de recolha, erros, stock em

tempo real) é utilizada para análise de desempenho, otimização de rotas de recolha e até para a implementação de algoritmos de machine learning para prever padrões de procura e otimizar a alocação de recursos [12].

- **Ergonomia e Usabilidade:** O design dos módulos Pick-to-Light e das interfaces de utilizador tem evoluído para melhorar a ergonomia e reduzir a fadiga do operador. A simplicidade da interação e o feedback claro são prioridades no desenvolvimento de novas soluções [13].

Em suma, o estado da arte em sistemas PTL aponta para soluções cada vez mais inteligentes, conectadas e adaptáveis, que não só guiam os operadores, mas também fornecem dados valiosos para a otimização contínua dos processos logísticos e de manufatura.

No entanto, este projeto distingue-se por propor uma implementação prática, simples e económica no contexto específico da empresa Bitzer. A solução assenta em componentes de baixo custo (Raspberry Pi 4, ESP32 e matrizes de LEDs bicolores), garantindo rapidez de resposta e robustez sem os elevados investimentos associados às soluções comerciais. Desta forma, contribui para demonstrar que é possível alinhar a tecnologia Pick-to-Light com os princípios da Indústria 4.0, mas de forma acessível, modular e direcionada a um caso industrial real.

4. Arquitetura e Design do Sistema

Este capítulo descreve a arquitetura global do sistema Pick-to-Light (PTL), estruturada em camadas que asseguram modularidade, escalabilidade e robustez. São apresentados os principais componentes de hardware e software, os protocolos de comunicação utilizados e as interfaces de utilizador, acompanhadas por figuras exemplificativas.

4.1. Visão Geral da Arquitetura

O sistema Pick-to-Light (PTL) foi concebido com uma arquitetura modular, organizada em três camadas principais: hardware, comunicação e software. Esta separação permite reduzir complexidade, facilitar a manutenção e garantir escalabilidade futura.

- **Camada de Hardware:** Integra os dispositivos físicos (Raspberry Pi 4, ESP32, matrizes LEDs e leitor de código de barras).
- **Camada de Comunicação:** Responsável pela ligação entre os módulos, através de protocolos serial (UART entre Raspberry Pi e ESP32), I2C (ESP32 e matrizes LED) e rede (Raspberry Pi e MariaDB).
- **Camada de Software:** Abrange as interfaces gráficas em Streamlit, a lógica de negócio desenvolvida em Python e a base de dados MariaDB para gestão de stock, ordens e registos.

A Figura 2 apresenta a arquitetura geral do sistema, destacando a forma como os diferentes módulos interagem entre si, desde a leitura do código de barras pelo operador até à atualização da base de dados e à sinalização visual nos módulos LED.

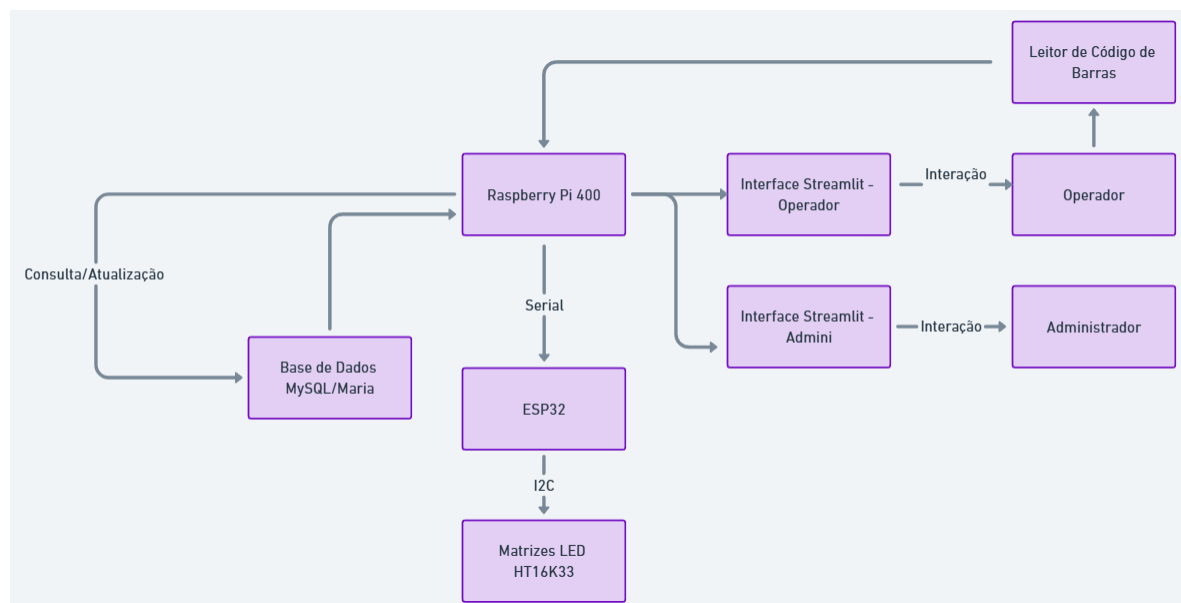


Figura 2 - Arquitetura geral do sistema Pick-to-Light.

- **Orientação do operador:** acendem a verde para indicar a quantidade de componentes a recolher e a vermelho para sinalizar locais onde não deve ser feita qualquer recolha.
- **Feedback imediato:** fornecem à operadora informação clara e em tempo real sobre as ações a realizar, minimizando erros de picking.

A simplicidade de interface, o suporte a múltiplos endereços e a possibilidade de encadeamento reduzem a complexidade da cablagem e facilitam a expansão do sistema, tornando estas matrizes uma solução adequada para ambientes industriais.

A Figura 4 apresenta as matrizes LED HT16K33, mostrando tanto a parte frontal como a traseira do dispositivo, destacando a sua estrutura bicolor e o design compacto que favorece a integração direta em postos de trabalho industriais.

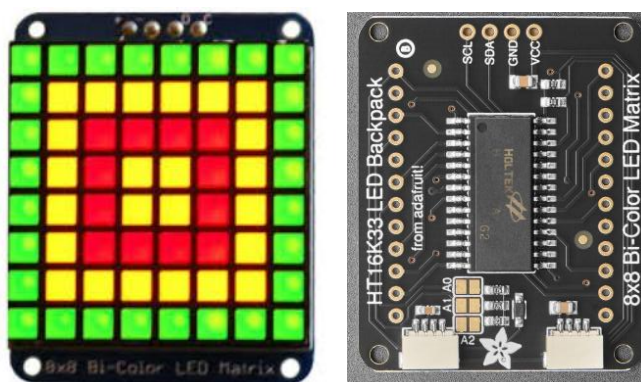


Figura 4 - Matriz Frente e verso (Figura copiada de [16]).

4.2.3. Raspberry Pi 4

O Raspberry Pi 4, desenvolvido pela Raspberry Pi Foundation, foi escolhido como controlador central do sistema devido ao seu equilíbrio entre baixo custo, elevada capacidade de processamento e versatilidade. Trata-se de um computador de placa única (SBC) capaz de executar sistemas operativos baseados em Linux, o que lhe permite orquestrar as diferentes camadas do sistema Pick-to-Light.

No contexto deste projeto, o Raspberry Pi 4 desempenha funções críticas:

- **Execução da lógica de negócio:** corre scripts desenvolvidos em Python, responsáveis pela gestão do fluxo operacional.
- **Interfaces de utilizador:** hospeda aplicações em Streamlit, assegurando que operadores e administradores dispõem de interfaces intuitivas e acessíveis.
- **Comunicação com periféricos:** estabelece ligação com o microcontrolador ESP32 através de UART e com a base de dados MariaDB via rede local.
- **Gestão de dados:** garante o processamento e armazenamento eficiente das ordens de produção e do inventário.

A sua flexibilidade, suportando múltiplas portas USB e GPIO, facilita a integração de periféricos como scanners de códigos de barras e outros sensores, ao mesmo

tempo que simplifica futuras expansões. Além disso, a integração de funções típicas de um computador completo (processador, armazenamento, rede e suporte gráfico) num dispositivo compacto e económico reforça a sua adequação ao ambiente industrial [17].

A Figura 5 apresenta o Raspberry Pi 4, evidenciando o seu formato compacto e as múltiplas portas de ligação que possibilitam a interação com diversos módulos e dispositivos externos.



Figura 5 - Raspberry Pi 4 (Figura copiada de [18]).

4.2.4. Leitor de Códigos de Barras

O sistema recorre a um scanner USB 1D, integrado diretamente no Raspberry Pi 4, como elemento essencial para a identificação rápida e precisa das ordens de produção. A sua adoção justifica-se pela rapidez e precisão na leitura, pela compatibilidade plug-and-play com sistemas Linux (dispensando drivers adicionais) e pela fiabilidade comprovada em ambientes industriais.

Este dispositivo automatiza o início das tarefas de recolha, reduzindo significativamente os erros de entrada manual de dados e garantindo maior fluidez no processo de pré-montagem. Os leitores modernos suportam diversos formatos de códigos de barras, como Code 128, Code 39 e EAN-13, além de apresentarem elevada capacidade de leitura em diferentes condições de iluminação, fator crítico no contexto industrial [19].

A Figura 6 apresenta o leitor de códigos de barras utilizado, destacando o seu design compacto e a ligação direta via USB, que simplifica a integração com o sistema central.

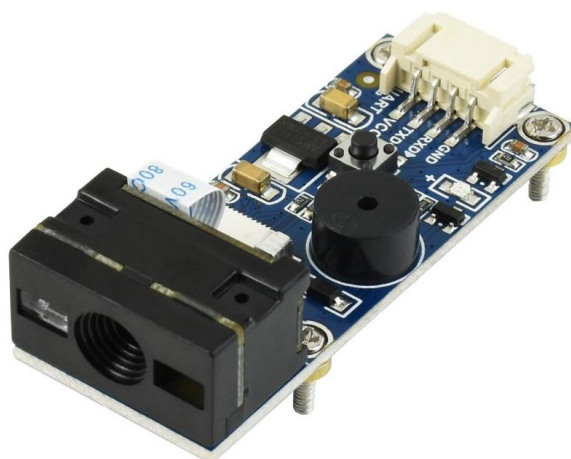


Figura 6 - Leitor de Código de Barras (Figura Copiada de [19]).

4.3. Camada de Comunicação

A camada de comunicação assegura a troca de dados entre os módulos do sistema com baixa latência, simplicidade e fiabilidade. São utilizados protocolos padronizados e amplamente suportados, reduzindo complexidade de integração e facilitando a manutenção.

4.3.1. Comunicação Serial (UART)

No sistema desenvolvido, a ligação entre o Raspberry Pi e o ESP32 é realizada através do protocolo UART. Esta ligação transporta os comandos de ativação/atualização das matrizes LED e recebe as confirmações/estados do microcontrolador. A aplicação em Python envia mensagens estruturadas (ID da matriz e quantidade/estado) e aguarda confirmação do ESP32, aplicando timeouts e mecanismos de deteção de falhas para garantir robustez em ambiente industrial. Em termos gerais, o UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) é um protocolo assíncrono, ponto-a-ponto, simples e de baixo overhead, adequado à comunicação entre dispositivos embarcados [20].

4.3.2. Barramento I2C

No sistema desenvolvido, o protocolo I2C é utilizado pelo ESP32 para controlar as matrizes LED HT16K33, através de duas linhas de comunicação: SDA (dados) e SCL (clock). O ESP32 atua como master, enquanto cada matriz LED funciona como slave com endereço de 7 bits. Para suportar as 13 matrizes sem conflitos de endereços, foi adotada a utilização de dois barramentos I2C independentes no ESP32:

- **Barramento 1 (Wire):** SDA = 21, SCL = 22, com endereços de 0x70 a 0x75.
- **Barramento 2 (Wire1):** SDA = 19, SCL = 18, com endereços de 0x70 a 0x74, 0x76 e 0x77.

Esta configuração permite repetir endereços entre os barramentos sem gerar conflitos, aumentando a capacidade do sistema, reduzindo interferências e garantindo margem de expansão.

Na tabela 1, mostra as conexões e endereços I2C no Esp32.

Nº	Barramento	Controlador	SDA	SCL	Endereço I2C
1	Wire	Wire	21	22	0x70
2	Wire	Wire	21	22	0x71
3	Wire	Wire	21	22	0x72
4	Wire	Wire	21	22	0x73
5	Wire	Wire	21	22	0x74
6	Wire	Wire	21	22	0x75
7	Wire1	Wire1	19	18	0x70
8	Wire1	Wire1	19	18	0x71
9	Wire1	Wire1	19	18	0x72
10	Wire1	Wire1	19	18	0x73
11	Wire1	Wire1	19	18	0x74
12	Wire1	Wire1	19	18	0x76
13	Wire1	Wire1	19	18	0x77

Tabela 1 - Conexões e endereços I2C no ESP32.

De forma geral, o I2C (Inter-Integrated Circuit) é um barramento de comunicação síncrono que permite a ligação de múltiplos dispositivos utilizando apenas duas linhas partilhadas (SDA e SCL). Cada dispositivo ligado ao barramento possui um endereço único, o que facilita a identificação e controlo. A simplicidade de interface, a possibilidade de encadeamento de múltiplos dispositivos e a elevada fiabilidade em curtas distâncias tornam o I2C uma escolha amplamente utilizada em sistemas embarcados. No contexto deste projeto, a sua utilização é fundamental para gerir simultaneamente várias matrizes LED com eficiência e organização [21].

4.3.3. Ligação de Rede

A interação com a base de dados é efetuada via IP na rede local, utilizando o conector MariaDB/MySQL na aplicação Python.

A consulta e atualização em tempo real de stock, ordens e registos. A solução estável, amplamente suportada em Linux e adequada a dispositivos de baixo consumo; permite operar localmente no Raspberry Pi ou migrar para um servidor central sem alterações ao código da aplicação.

4.4. Camada de Software

4.4.1. Python

O Python foi escolhido como linguagem principal pela sua simplicidade, ecossistema de bibliotecas e facilidade de integração com hardware e bases de dados. No projeto, integra a lógica de negócio, a comunicação com o ESP32 (via pyserial), o acesso aos dados (mysql.connector/mariadb) e a criação de interfaces (streamlit). Esta combinação viabilizou uma solução robusta e de fácil manutenção para o contexto industrial. De forma geral, o Python é uma linguagem de alto nível

amplamente usada em automação e aplicações industriais, suportada por documentação extensa e comunidade ativa. [22]

4.4.2. Streamlit

As interfaces foram implementadas em Streamlit, privilegiando a usabilidade e a rapidez de desenvolvimento. Foram concebidas duas interfaces distintas:

- **Interface do Operador:** orientada para simplicidade e clareza, permitindo login, leitura de códigos de barras, visualização das peças/componentes a recolher e confirmação de recolha.

As figuras seguintes ilustram os principais ecrãs da interface do operador:

Ecrã de login do sistema: Permite a autenticação do operador, garantindo o acesso seguro às funcionalidades do sistema Pick-to-Light

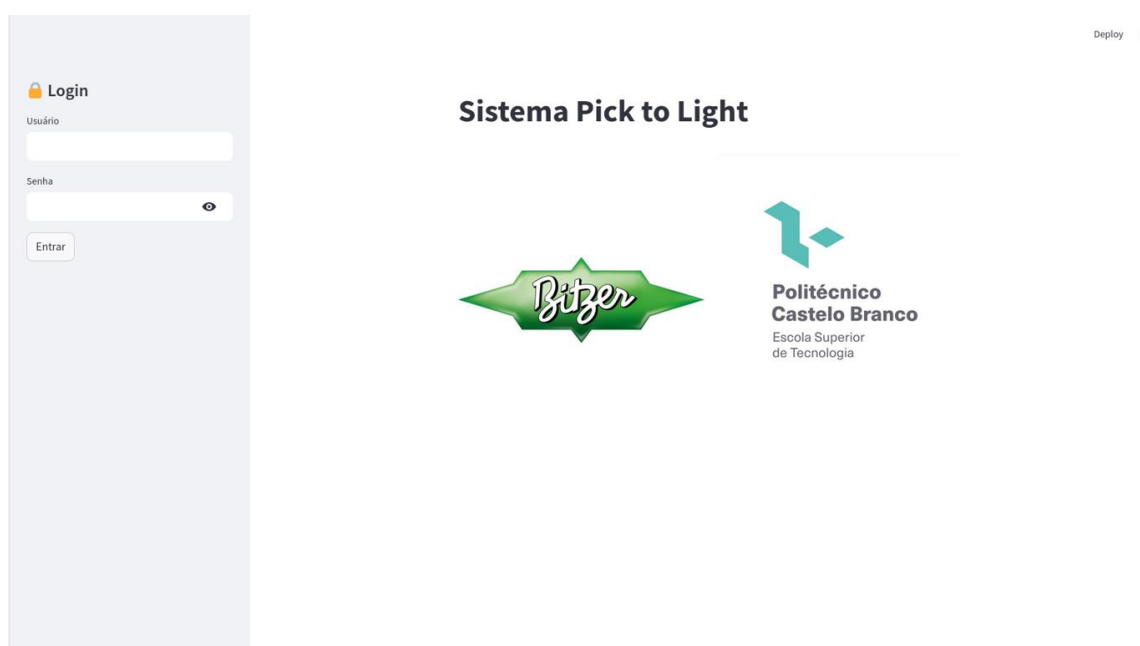


Figura 7-Interface do Operador (Ecrã de Login)

Interface do Operador (Execução da Ordem de Produção): Onde são listados os componentes a recolher para a ordem de produção em curso. Apresenta a quantidade por ordem de produção e a quantidade total a recolher, permitindo ao operador confirmar a execução através do botão Concluir Ordens Feitas.

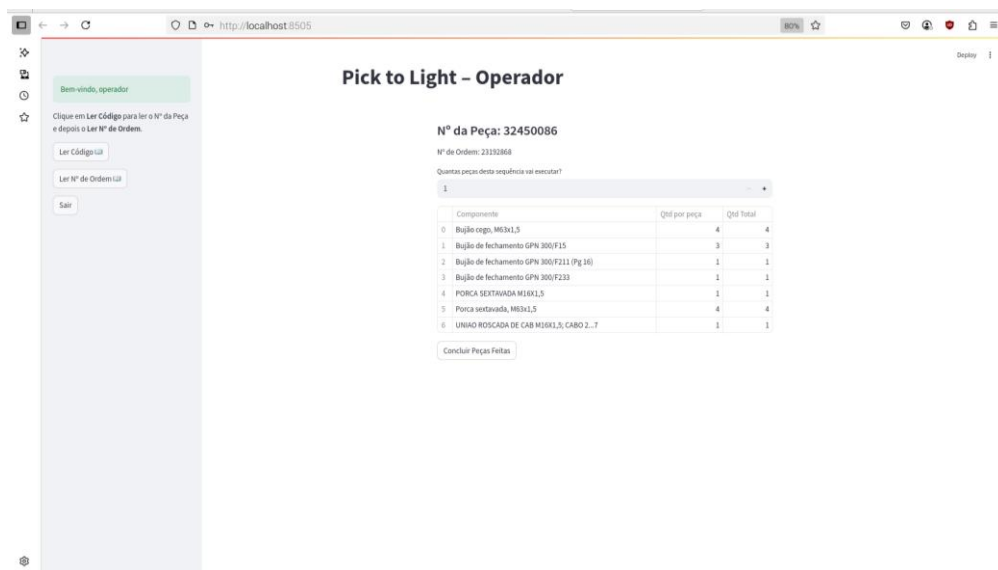


Figura 8 - Interface do Operador (Execução da Ordem de Produção)

- **Interface do Administrador:** destinada a utilizadores autorizados, com funcionalidades de gestão e monitorização: visão geral, inventário, atualização de stock, criação de ordens e análise de desempenho dos operadores.

As figuras seguintes ilustram os principais ecrãs da interface de administrador:

Ecrã de login do sistema: Permite a autenticação do administrador, garantindo o acesso seguro às funcionalidades do sistema Pick-to-Light.



Figura 9 - Interface do Administrador (Ecrã de Login)

Dashboard do administrador (Visão Geral): Apresenta um resumo do inventário e destaca peças com stock abaixo do limite definido.

The screenshot shows the 'Dashboard Administrador' interface. The main section is titled 'Visão Geral' and features a yellow highlight for 'Stock abaixo do limite:'. Below this is a table with the following data:

Componente	Quantidade Disponível
0 Bujão cego, M6x1,5	3
1 Porca sextavada, M6x1,5	2
2 Bujão de fechamento GPN 300/F233	0
3 Bujão de fechamento GPN 300/F15	0
4 UNIAO ROSCADA DE CAB M16x1,5; CABO 2...7	0
5 PORCA SEXTAVADA M16x1,5	0
6 Tampão de vedação GPN 910/3044 (Pg 48)	4
7 Bujão de fechamento GPN 300/F211 (Pg 16)	0
8 Tampão de vedação Henke K 18 D19,5x9	4
9 Tampão de vedação TL 4-158	4
10 Porca hexagonal Pg9 DIN 46320-F5	4
11 Prensa-cabo PG 9	4

At the bottom of the table, it shows 'Total de Ordens Registradas: 91' and 'Total de Componentes: 13'.

Figura 10 - Interface do Administrador (Dashboard)

Inventário completo: Lista os componentes registados na base de dados, permitindo ao administrador consultar e gerir o stock existente.

The screenshot shows the 'Dashboard Administrador' interface with the 'Inventário Completo' section active. It displays a table with the following data:

ID Componente	Número	Nome	Quantidade Disponível
0	1	34512604 Bujão cego, M6x1,5	3
1	2	34512204 Porca sextavada, M6x1,5	2
2	3	37502215 Bujão de fechamento GPN 300/F233	0
3	4	37502214 Tampão de vedação GPN300 F181	5
4	5	37502213 Bujão de fechamento GPN 300/F15	0
5	6	34512102 UNIAO ROSCADA DE CAB M16x1,5; CABO 2...7	0
6	7	34512201 PORCA SEXTAVADA M16x1,5	0
7	8	37502204 Tampão de vedação GPN 910/3044 (Pg 48)	4
8	9	37502210 Bujão de fechamento GPN 300/F211 (Pg 16)	0
9	10	37502103 Tampão de vedação Henke K 18 D19,5x9	4

Below the table, there is a section titled 'Adicionar Novo Componente' with a text input field for 'Nome do Componente'.

Figura 11 - Interface do Administrador (Inventário Completo)

Formulário de adição de novo componente: possibilita a introdução de novos itens no inventário, incluindo nome, número e quantidade inicial.

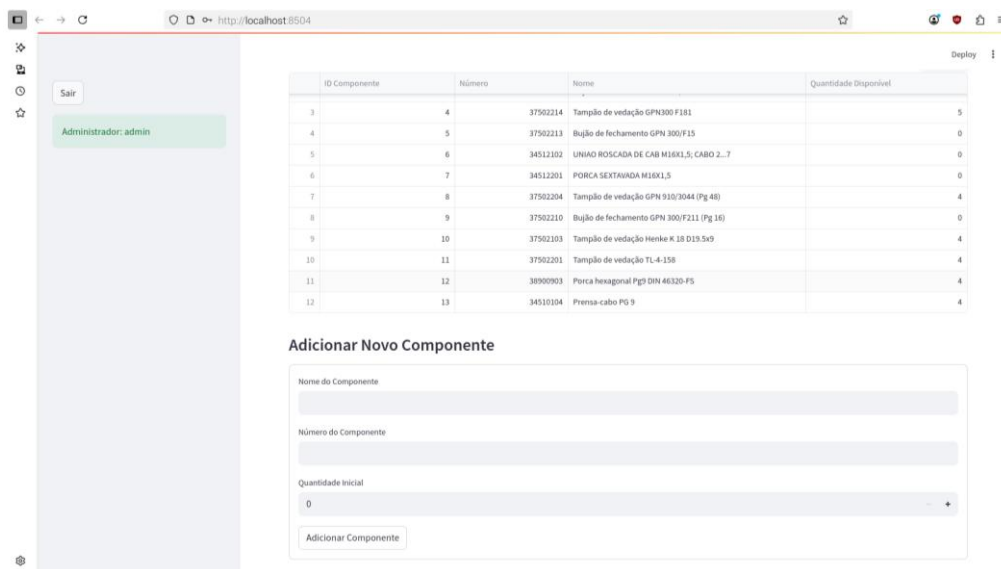


Figura 12 - Interface do Administrador (Adicionar Novo Componente)

Atualização de stock: Funcionalidade que permite ajustar as quantidades de componentes já registados, assegurando a gestão contínua do armazém.

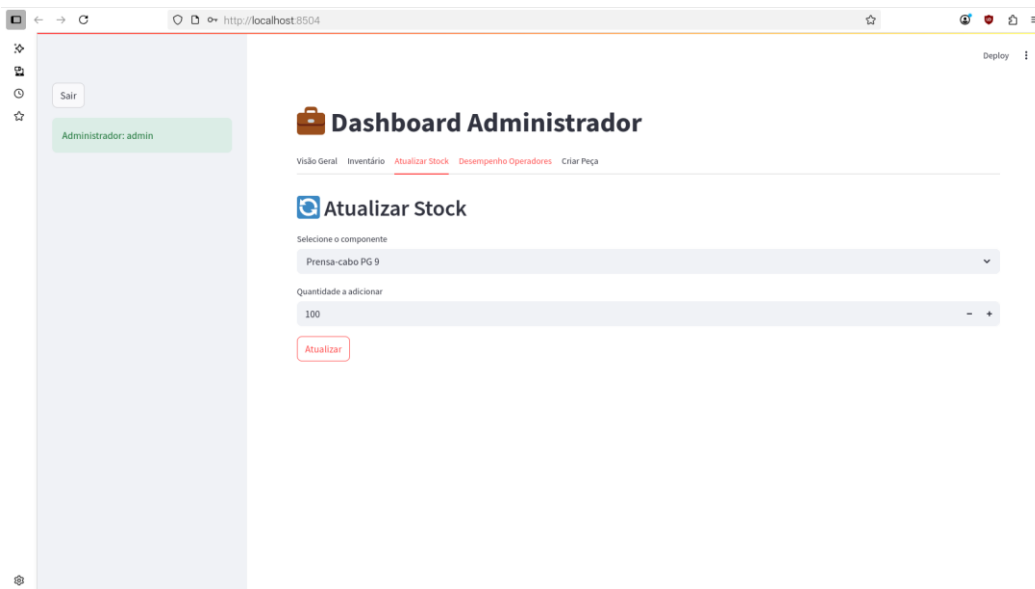
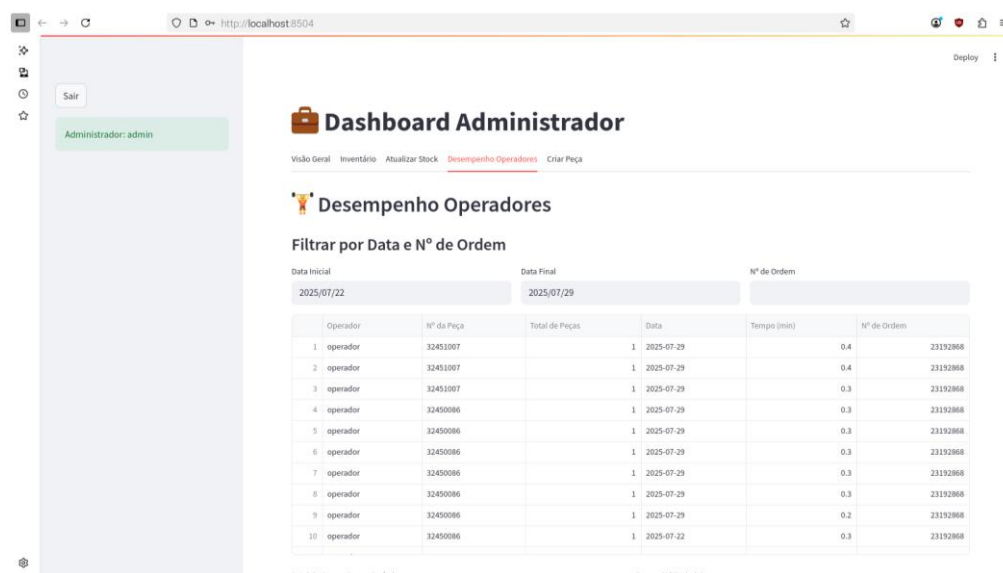


Figura 13 - Interface do Administrador (Atualizar Stock)

Desempenho Operadores (Filtro): Permite ao administrador filtrar o desempenho dos operadores por data e número de ordem.



Dashboard Administrador

Visão Geral Inventário Atualizar Stock **Desempenho Operadores** Criar Peça

Desempenho Operadores

Filtrar por Data e Nº de Ordem

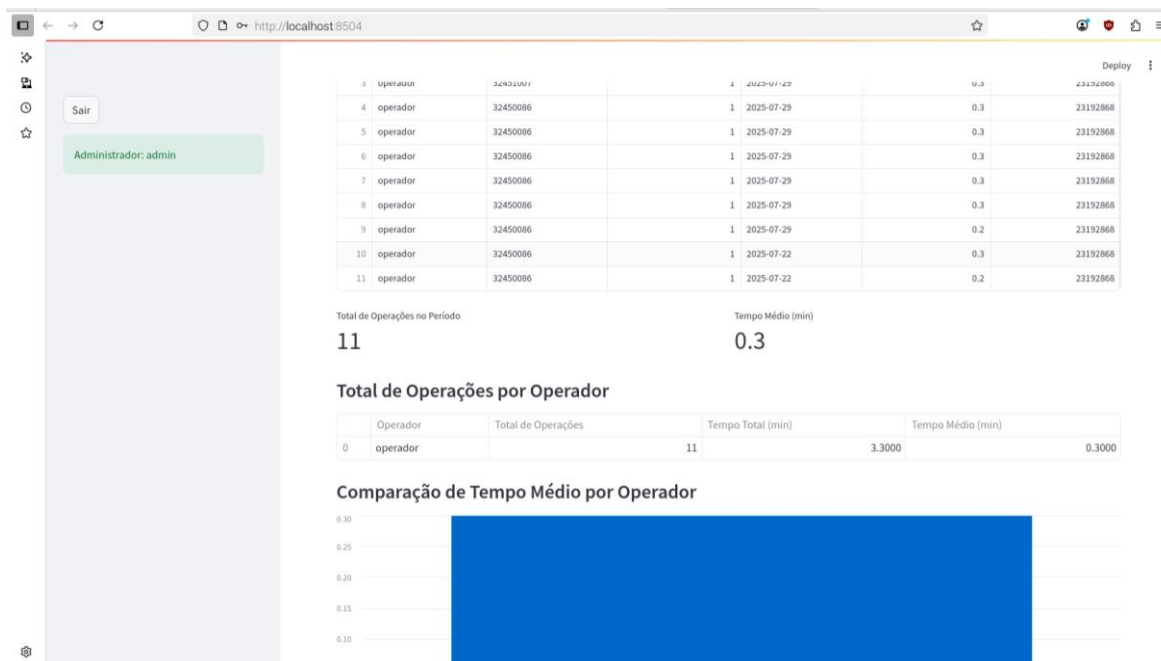
Data Inicial: 2025/07/22 Data Final: 2025/07/29 Nº de Ordem: []

Operador	Nº da Peça	Total de Peças	Data	Tempo (min)	Nº de Ordem
1 operador	32451007		1 2025-07-29	0.4	23192868
2 operador	32451007		1 2025-07-29	0.4	23192868
3 operador	32451007		1 2025-07-29	0.3	23192868
4 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
5 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
6 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
7 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
8 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
9 operador	32450086		1 2025-07-29	0.2	23192868
10 operador	32450086		1 2025-07-22	0.3	23192868

Total de Operações no Período: [] Tempo Médio (min): []

Figura 14 - Interface do Administrador (Desempenho Operadores - Filtro)

Desempenho de operadores (tabela): Apresenta métricas de produtividade, como número de peças processadas, tempo gasto e ordens concluídas por operador.



Operador	Nº da Peça	Total de Peças	Data	Tempo (min)	Nº de Ordem
3 operador	32451007		1 2025-07-29	0.3	23192868
4 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
5 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
6 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
7 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
8 operador	32450086		1 2025-07-29	0.3	23192868
9 operador	32450086		1 2025-07-29	0.2	23192868
10 operador	32450086		1 2025-07-22	0.3	23192868
11 operador	32450086		1 2025-07-22	0.2	23192868

Total de Operações no Período: **11** Tempo Médio (min): **0.3**

Total de Operações por Operador

Operador	Total de Operações	Tempo Total (min)	Tempo Médio (min)
0 operador	11	3.3000	0.3000

Comparação de Tempo Médio por Operador

0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00

Figura 15 - Interface do Administrador (Desempenho Operadores - Tabela)

Criação de nova peça: Permite consultar peças já registadas e criar novas, associando os respetivos componentes e quantidades necessárias.

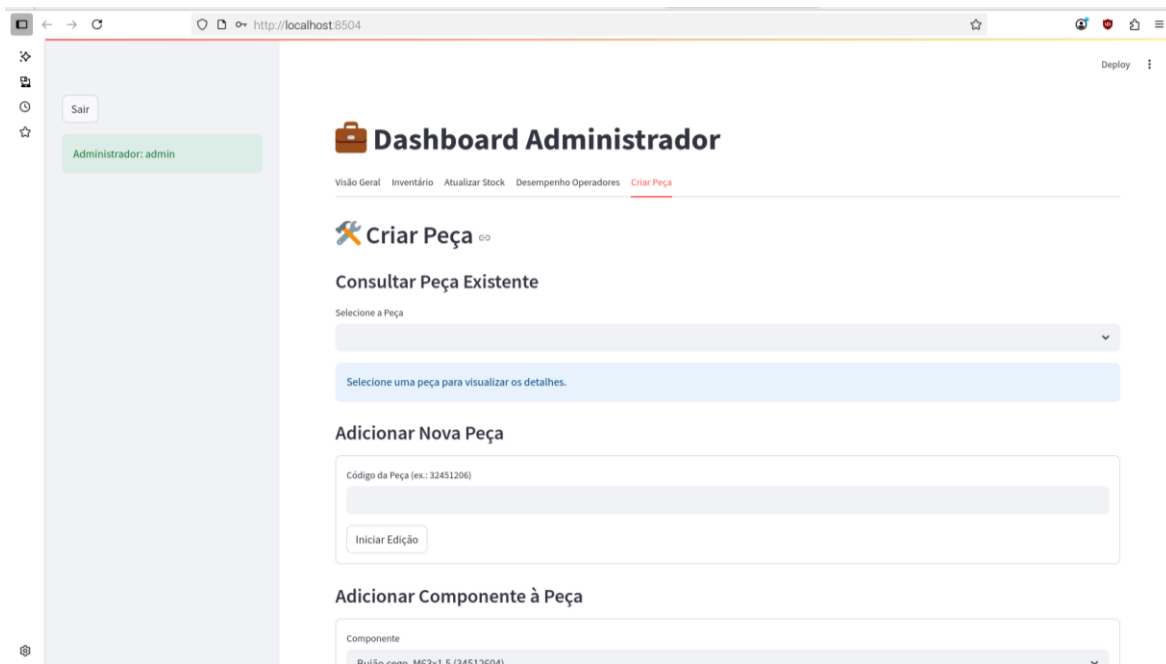


Figura 16 - Interface do Administrador (Criar Peça - Consultar)

Interface do Administrador (Adicionar Componente): Formulário para adicionar componentes a uma peça existente, definindo a quantidade necessária.

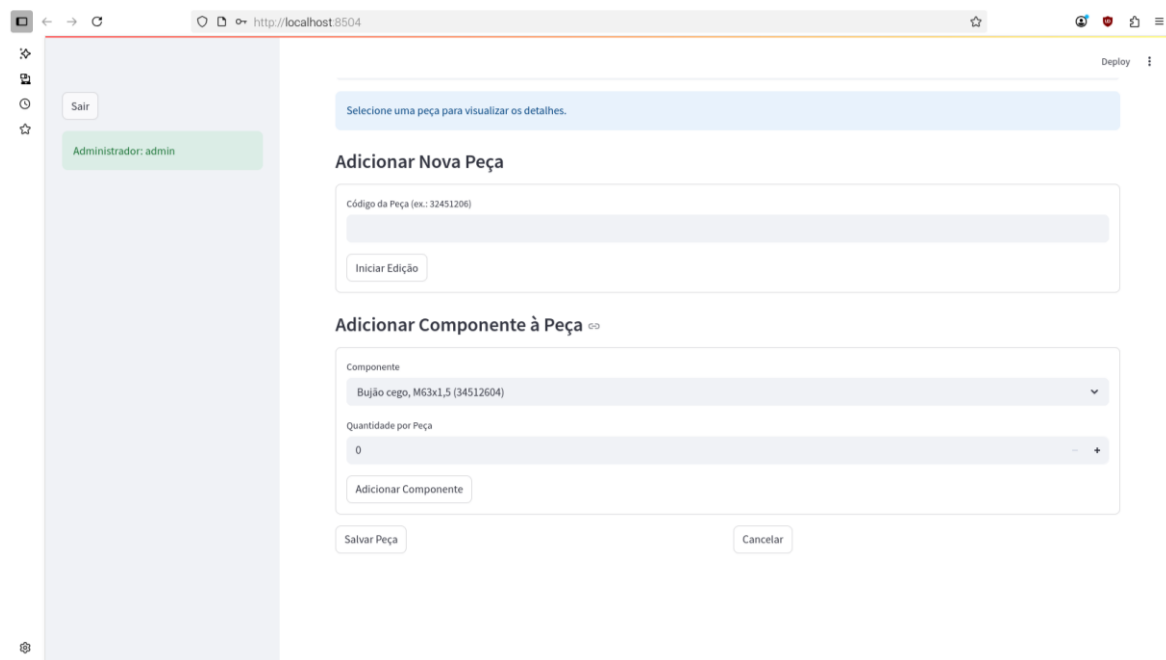


Figura 17 - Interface do Administrador (Criar Peça - Adicionar Componente)

De forma geral, o Streamlit é um software de código aberto que permite transformar rapidamente scripts Python em interfaces web interativas com abordagem declarativa, sem exigir conhecimentos avançados de frontend. Esta característica é particularmente útil em contextos industriais e acadêmicos, onde a prototipagem rápida e a clareza da interface são críticas. [23]

4.4.3. MariaDB

A base de dados do sistema foi implementada em MariaDB, um fork do MySQL otimizado e amplamente estável em dispositivos como o Raspberry Pi. A sua adoção deve-se à leveza, baixo consumo de recursos e integração plena em Linux embarcado, garantindo desempenho consistente.

O esquema inclui tabelas de componentes, stock, ordens de produção, estados de ordens e logs de operações, assegurando consistência e rastreabilidade. Em termos gerais, MySQL/MariaDB são RDBMS fiáveis e escaláveis, comuns em aplicações industriais e comerciais, oferecendo integridade transacional e disponibilidade, aspetos críticos em automação e logística. [24]

4.5. Diagrama de Sequência

O diagrama de sequência ilustra o fluxo operacional do sistema PTL, representando a interação entre os componentes (operador, interface de utilizador, Raspberry Pi, ESP32, matrizes LED e base de dados) durante o processo de picking. Este diagrama destaca as chamadas síncronas e assíncronas, desde a leitura do código de barras até à ativação dos LEDs e confirmação da operação.

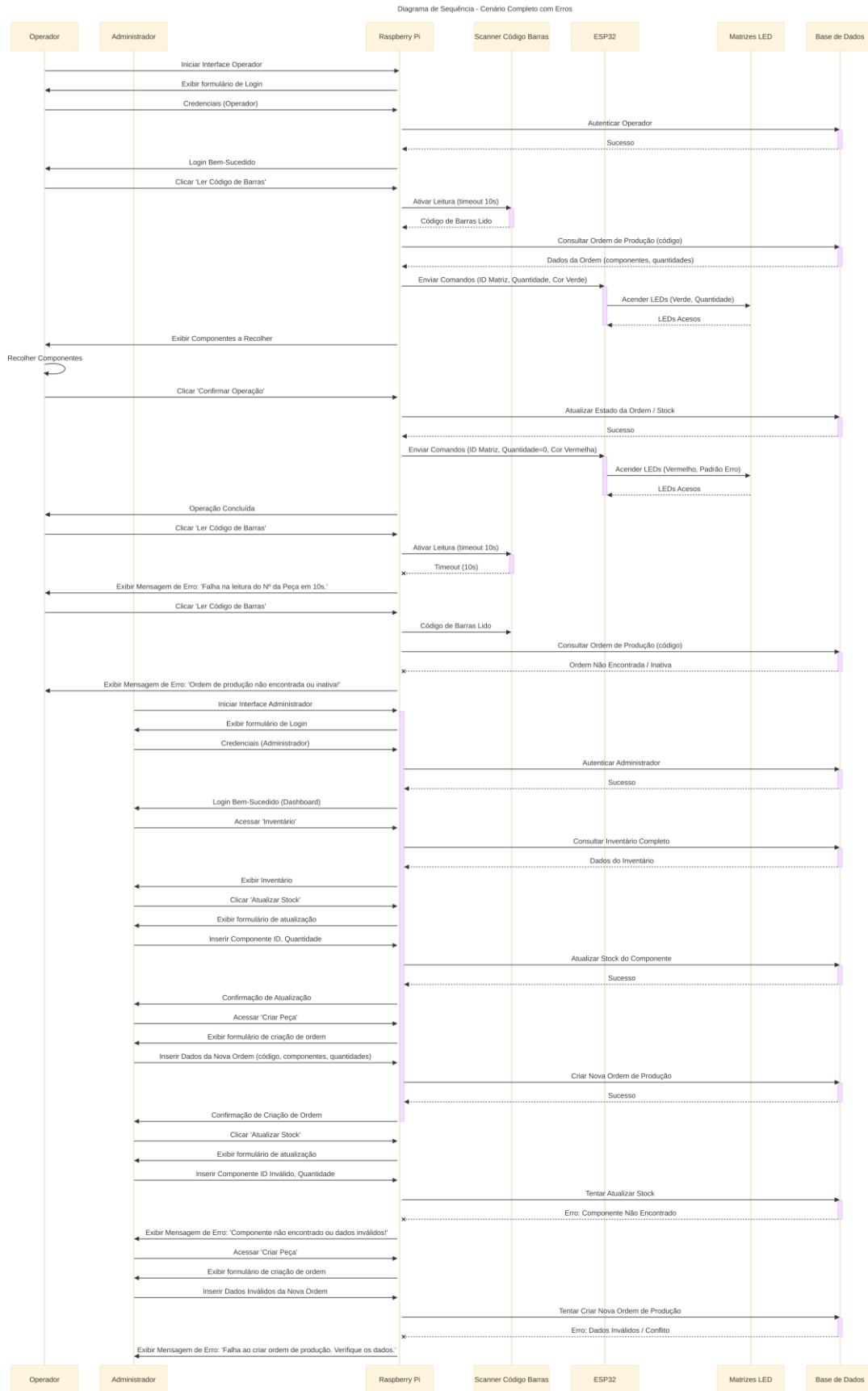


Figura 18- Diagrama de sequência do sistema PTL, desde a leitura do código de barras até à atualização do stock

5. Implementação e Validação do Sistema

5.1 Visão Geral

A fase de implementação e validação representou a transição entre o projeto teórico e a sua materialização num sistema funcional, preparado para operar em ambiente industrial. Este processo decorreu de forma integrada, permitindo que o desenvolvimento de hardware e software evoluísse em paralelo, com pontos de integração previamente planeados e testes progressivos ao longo de todo o ciclo.

A abordagem adotada privilegiou a modularidade e a verificação contínua, reduzindo o risco de incompatibilidades e facilitando a deteção precoce de problemas. Esta estratégia possibilitou a implementação de melhorias desde as fases iniciais, evitando retrabalho significativos e garantindo uma integração final mais eficiente.

5.2. Desenvolvimento do Sistema

O desenvolvimento do sistema seguiu três eixos principais:

- **Configuração e programação do controlador central (Raspberry Pi):** Responsável pela gestão da lógica de negócio, interfaces de utilizador e comunicação com os restantes módulos. Incluiu o acesso à base de dados pick-to-light através de phpMyAdmin e MariaDB, permitindo interação em tempo real com as ordens de produção, inventário e registos de execução.
- **Desenvolvimento do software do microcontrolador ESP32:** Dedicado ao controlo direto das matrizes LEDs, processamento dos comandos recebidos via comunicação série e execução de ações em tempo real, incluindo a ativação de LEDs e apresentação de caracteres.
- **Conceção e implementação das interfaces de operador e administrador:** Desenvolvidas para garantir simplicidade, clareza e eficiência na recolha e gestão de ordens, com prioridade à experiência do utilizador e à resposta rápida do sistema.

A instalação física foi projetada para assegurar robustez mecânica, fácil manutenção e segurança elétrica. A escolha dos materiais e componentes considerou a durabilidade e a compatibilidade com o ambiente industrial, utilizando encapsulamento de módulos e gestão adequada da alimentação elétrica.

5.3. Estratégia de Integração dos Componentes

A integração do sistema seguiu uma metodologia incremental, reduzindo riscos e garantindo um controlo progressivo do desempenho:

- **Testes individuais:** Cada módulo (*scanner* de código de barras, matrizes LED, comunicação série, base de dados) foi testado isoladamente para confirmar o seu correto funcionamento.

- **Integração em pares:** Módulos foram combinados em pares, como por exemplo o Raspberry Pi com o ESP32, validando a comunicação e sincronização de dados.
- **Ensaio de integração total:** Testes com todos os módulos ativos, simulando condições reais de operação.
- **Ajuste fino:** Parametrização de tempos de resposta, intensidade de LEDs e gestão de falhas, otimizando a experiência do operador e a estabilidade do sistema.

Esta abordagem permitiu identificar e corrigir problemas de forma precoce, além de reduzir o tempo total de implementação.

5.4. Implementação em Ambiente de Laboratório

A primeira montagem e testes do sistema foram realizados no laboratório da instituição de ensino. O principal objetivo desta fase foi validar a comunicação entre o ESP32 e as matrizes LEDs, bem como a integração com o software desenvolvido em Python. Inicialmente, foram utilizados cabos jumper para as ligações entre os módulos e os controladores. Contudo, esta solução revelou-se inadequada para um ambiente de testes mais rigoroso, apresentando problemas de mau contacto e instabilidade elétrica, o que resultava em falhas intermitentes no acionamento das matrizes.

Para resolver estas questões e garantir a fiabilidade do sistema, foram adotadas as seguintes medidas corretivas:

- **Substituição dos cabos jumper:** Foram substituídos por cabos de cobre multifilares de 0,5 mm², que oferecem maior robustez e condutividade.
- **Trançado dos cabos:** Os cabos foram trançados para reduzir interferências eletromagnéticas e melhorar a imunidade a ruídos, um fator crítico em ambientes com muitos equipamentos eletrónicos.
- **Ajuste dos comprimentos dos cabos:** Os comprimentos dos cabos foram ajustados conforme as medidas reais das bancadas, garantindo uma instalação limpa, organizada e sem excesso de fios, o que contribui para a estabilidade física e elétrica do sistema.

Após estas alterações, o sistema apresentou um funcionamento estável e consistente no ambiente de laboratório, permitindo avançar para a fase de implementação em ambiente real.



Figura 19 - Implementação física inicial do sistema em ambiente de laboratório.

5.5. Implementação em Ambiente Industrial (Bitzer)

Após a validação bem-sucedida no laboratório, o sistema foi transportado e instalado nas instalações da Bitzer. Esta etapa foi significativamente mais rápida e direta, uma vez que todos os ajustes críticos de hardware e software já tinham sido realizados previamente. A implementação na empresa seguiu os seguintes passos:

- **Montagem física:** As matrizes LEDs foram fixadas nos suportes designados, alinhando cada uma com a sua respetiva posição na bancada de trabalho de pré-montagem. Foi dada especial atenção à ergonomia e visibilidade para o operador.
- **Ligação elétrica e de comunicação:** As ligações dos barramentos I2C foram realizadas de acordo com o planeamento detalhado, garantindo a correta separação entre o Barramento 1 (Wire) e o Barramento 2 (Wire1) para otimizar a comunicação e evitar conflitos de endereço.
- **Integração com o software:** A configuração final do código no ESP32 foi ajustada para que cada matriz correspondesse ao endereço e barramento definidos no planeamento, assegurando a correta ativação e controlo dos LEDs.
- **Calibração do sistema:** Foi realizado um teste individual de cada matriz e do leitor de códigos de barras para confirmar a correta resposta às instruções vindas da aplicação de controlo central (Raspberry Pi). Este passo incluiu a verificação da precisão do picking e a atualização do stock.

A implementação na Bitzer demonstrou a robustez e a adaptabilidade do sistema a um ambiente de produção real, validando a sua eficácia na otimização do processo de pré-montagem.

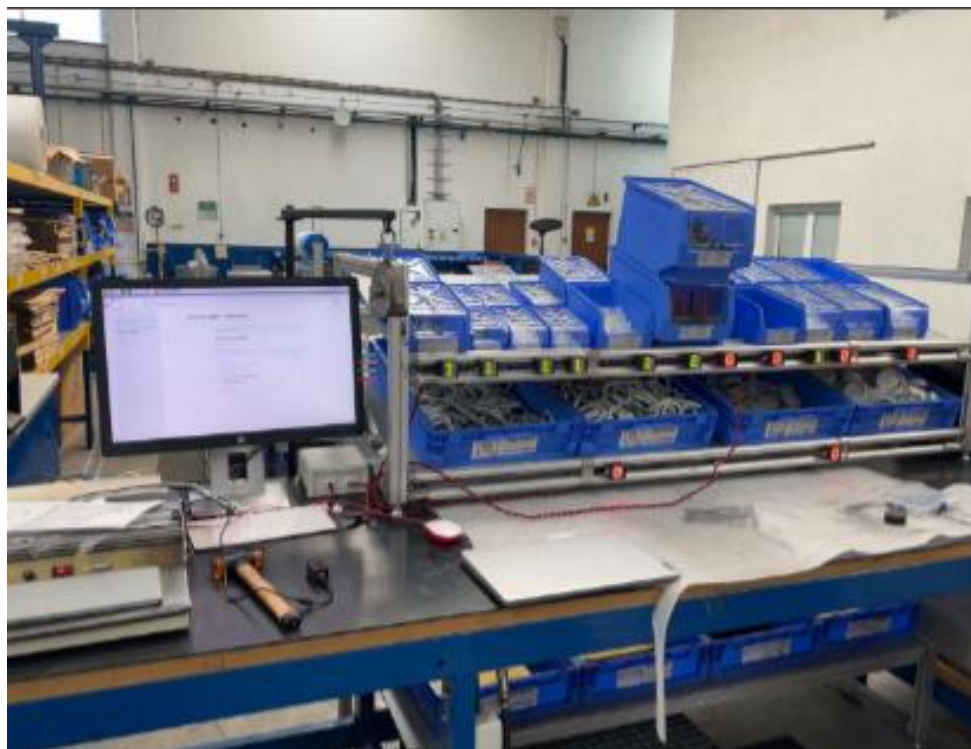


Figura 20- Implementação final do sistema em ambiente industrial na Bitzer.

5.6. Metodologia de Testes

Os testes foram concebidos para avaliar tanto a funcionalidade como o desempenho do sistema, comparando o processo de pré-montagem antes e depois da implementação da solução Pick-to-Light (PTL).

- **Contexto das ordens de produção:** apenas uma ordem de produção estava prevista para o dia da validação, pelo que todos os ensaios foram realizados sobre essa mesma ordem.
- **Número de execuções:** a ordem foi executada 72 vezes ao longo do turno, constituindo uma amostra de 72 observações.
- **Operador envolvido:** 1 operadora, representando um utilizador típico do processo.

Antes da implementação (processo manual):

- O operador utilizava listas em papel para identificar os componentes.
- O tempo de execução foi medido com cronómetro, desde o início da procura dos componentes até à conclusão da ordem.
- O número de ordens concluídas e a taxa de erros foram registados manualmente.

Depois da implementação (com PTL):

- O operador foi guiado pelas indicações luminosas das matrizes LED.
- O tempo de execução de cada ordem foi igualmente medido com cronómetro, contabilizando desde a leitura do código de barras até à confirmação na interface.

- A atualização do stock e os registos de operação foram validados automaticamente na base de dados.

Parâmetros avaliados em ambos os cenários:

- Tempo médio por ordem.
- Número de ordens concluídas em 8 horas.
- Taxa de erros por ordem.
- Tempo de resposta do sistema (código → LEDs), apenas no caso pós-implementação.

Esta abordagem comparativa garantiu a recolha de dados objetivos sobre o impacto do sistema, permitindo uma análise fiável da diferença entre o processo manual e o processo automatizado com PTL.

5.7. Resultados Obtidos

A tabela seguinte resume os principais resultados quantitativos obtidos durante a fase de validação, comparando o desempenho do sistema com os objetivos estabelecidos:

Métrica	Valor Medido	Objetivo	Status
Tempo de resposta (código → LEDs)	0,4 s	< 1 s	Aprovado
Taxa de erro de comunicação I2C	0,00%	< 0,1 %	Aprovado
Tempo de inicialização do sistema	8 s	< 10 s	Aprovado
Precisão de leitura de códigos de barras	99,5 %	> 98 %	Aprovado

Tabela 2 - Resultados Quantitativos dos Testes

- **Tempo de resposta (código → LEDs):** medido com cronómetro, contabilizando o intervalo entre a leitura de um código de barras e a ativação dos LEDs correspondentes na bancada. Em todas as 72 repetições da ordem de produção, o valor manteve-se estável, com média de 0,4 s, bem abaixo do limite estabelecido (< 1 s).
- **Taxa de erro de comunicação I2C:** avaliada através da observação de falhas na transmissão de dados entre o ESP32 e as matrizes LED durante os testes. Em 72 execuções, não se registou nenhuma falha, correspondente a uma taxa residual de 0,00 %, valor inferior ao limite de 0,1 % definido como aceitável.
- **Tempo de inicialização do sistema:** tempo necessário desde o arranque do Raspberry Pi até à total disponibilidade das interfaces e comunicação com o ESP32. O valor médio registado foi de 8 segundos, dentro do objetivo (< 10 s).

- **Precisão de leitura de códigos de barras:** medida contabilizando o número total de leituras corretas face ao número de tentativas. Foram efetuadas aproximadamente 200 leituras consecutivas, com apenas uma falha, resultando numa taxa de 99,5 %, superior ao objetivo definido (> 98 %).

A única falha observada pode resultar de ângulo/distância de leitura, reflexo na etiqueta ou margem de erro intrínseca do equipamento. Segundo fichas técnicas típicas, leitores 1D.

Os resultados confirmam que o sistema cumpre os requisitos de desempenho estabelecidos. O tempo de resposta rápido garante fluidez no processo de picking, a taxa de erro de comunicação confirma a fiabilidade do barramento I2C, e a elevada precisão do scanner assegura confiança na identificação das ordens de produção.

5.8. Resultados Quantitativos Comparativos

Para avaliar o impacto da implementação do sistema Pick-to-Light, foi realizada uma comparação direta entre o processo manual (antes da implementação) e o processo assistido pelo PTL (depois da implementação).

- **Número de ordens de produção diferentes:** 1 (a mesma ordem de produção, repetida durante todo o turno).
- **Número de execuções por cenário:** a ordem foi executada 72 vezes antes da implementação (processo manual) e 72 vezes depois (com PTL), correspondendo ao total de execuções realizadas pela operadora durante o dia de trabalho.
- **Operador:** a mesma operadora, garantindo consistência na recolha de dados.
- **Método de medição:** o tempo de execução foi registado manualmente com cronómetro em cada execução; o total de ordens concluídas em 8 horas foi calculado a partir da média; a taxa de erros foi acompanhada por observação direta.

A Tabela 3 apresenta os resultados médios obtidos:

Indicador	Antes	Depois	Varição (%)
Tempo médio por ordem (min)	6,67	5,67	-15,0 %
Ordens concluídas em 8 h (unid.)	72	84	+16,7 %
Taxa de erros por ordem (%)	0,0	0,0	0 %

Tabela 3 - Comparativo de Resultados Antes e Depois da Implementação

- **Tempo médio por ordem:** calculado com base nas 72 execuções antes e 72 depois. O tempo reduziu de 6,67 minutos para 5,67 minutos em média, representando uma melhoria de 15%.
- **Ordens concluídas em 8 horas:** considerando o tempo médio por ordem, o número de ordens concluídas aumentou de 72 para 84 no mesmo período, equivalente a +16,7% de produtividade.
- **Taxa de erros por ordem:** em ambos os cenários, não foram registados erros, mantendo-se em 0%. Este resultado confirma que a qualidade era já controlada, mas que o PTL trouxe ganhos de rapidez, clareza e redução do esforço cognitivo.

Mesmo limitada a uma ordem de produção repetida 72 vezes antes e 72 vezes depois, a amostra permitiu validar de forma consistente os ganhos do sistema. Os resultados demonstram que o PTL reduziu significativamente o tempo de execução e aumentou a produtividade, sem comprometer a qualidade do processo. Ainda assim, será necessário realizar novos testes com mais amostras, de modo a reforçar a robustez dos resultados e apoiar futuros desenvolvimentos do sistema.

5.9. Análise Crítica e Discussão dos Resultados

A implementação do sistema demonstrou a sua eficácia, confirmando ganhos tanto quantitativos como qualitativos no processo de pré-montagem da Bitzer. A redução de 15% no tempo médio por ordem e o aumento de 16,7% no número de ordens concluídas em 8 horas validam a robustez e a fiabilidade da solução. Estes resultados, aliados à eliminação de erros de picking, comprovam a adequação do sistema PTL às necessidades da empresa.

Pontos fortes observados:

- **Facilidade de utilização:** a operadora destacou que a orientação visual simplificou a recolha, eliminando a necessidade de listas em papel.
- **Maior confiança:** os LEDs verdes e vermelhos forneceram instruções inequívocas, reduzindo dúvidas e prevenindo erros.

- **Redução de esforço e fadiga:** a diminuição da carga cognitiva e física contribuiu para melhor bem-estar no trabalho.
- **Curva de aprendizagem reduzida:** novos operadores conseguem atingir produtividade em poucas horas, em contraste com as semanas exigidas no processo manual.
- **Escalabilidade:** a arquitetura modular garante expansão a baixo custo, facilitando a adaptação a outros postos de trabalho.

Eficácia do sistema:

- **Quantitativamente**, os testes mostraram ganhos consistentes: uma redução de 15% no tempo médio por ordem e um aumento de 16,7% no número de ordens concluídas em 8 horas, com base em 72 execuções antes e 72 execuções depois da implementação, sempre com a mesma ordem de produção e a mesma operadora.
- **Qualitativamente**, verificou-se maior consistência no processo, redução da dependência de operadores experientes e melhoria da motivação da operadora, confirmando que o sistema não só aumenta a produtividade como também melhora a qualidade e as condições de trabalho.

Oportunidades de melhoria identificadas:

- Inclusão de redundância na comunicação entre Raspberry Pi e ESP32 para reforçar a resiliência.
- Desenvolvimento de relatórios analíticos automáticos com métricas detalhadas.
- Integração futura com visão artificial para validação adicional do picking.

Em síntese, o sistema revelou-se eficaz, cumprindo integralmente os requisitos funcionais e não funcionais definidos, enquanto trouxe benefícios concretos em produtividade, consistência operacional e qualidade da experiência do utilizador.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

Este relatório descreve o desenvolvimento e a implementação de um sistema Pick-to-Light (PTL) na linha de pré-montagem da Bitzer, concebido para aumentar a precisão na seleção de peças, melhorar a experiência do operador e reforçar a estabilidade operacional. O projeto integrou hardware e software de baixo custo (Raspberry Pi, ESP32 e matrizes LEDs) de forma modular, em conformidade com os princípios da Indústria 4.0.

6.1 Conclusões

A implementação comprovou que o valor do sistema não reside apenas nos ganhos quantitativos, mas sobretudo nos benefícios qualitativos e organizacionais:

- **Integração acelerada de novos operadores:** a curva de aprendizagem reduziu-se drasticamente, permitindo atingir níveis produtivos em poucas horas.
- **Melhoria do bem-estar e motivação:** a simplificação do processo e a diminuição da carga cognitiva reduziram o stress laboral.
- **Estabilidade operacional:** a uniformização de procedimentos reduziu a variabilidade e facilitou o planeamento da produção.
- **Adaptabilidade:** a arquitetura modular permite escalar a solução para outros postos ou linhas de montagem, com alterações mínimas na infraestrutura.

Estes resultados reforçam que, em ambientes industriais, a adoção de soluções de automação deve ser avaliada de forma multidimensional, considerando não só métricas de produtividade, mas também fatores humanos, organizacionais e técnicos.

6.2. Limitações

Apesar dos avanços, identificaram-se algumas limitações:

- **Escalabilidade física:** a expansão para um número elevado de módulos pode exigir múltiplos controladores ou revisão da comunicação.
- **Dependência de conectividade:** falhas na comunicação serial ou de rede impactam a disponibilidade do sistema.
- **Gestão de exceções:** situações como ausência de peças ou falha de módulos exigem ainda intervenção manual.
- **Análise de dados limitada:** apesar da recolha de métricas, não existem dashboards avançados ou análises preditivas.

6.3. Propostas para Trabalho Futuro

- **Integração com ERP/WMS:** automatizar a criação e atualização de ordens e inventário.
- **Módulos PTL sem fios:** adotar comunicação Wi-Fi, LoRa ou Zigbee, reduzindo cablagem.
- **Validação automática de recolhas:** integrar visão artificial ou RFID, eliminando confirmações manuais.

- **Manutenção preditiva:** monitorizar o estado dos módulos e prever falhas antes de ocorrerem.
- **Otimização logística interna:** desenvolver algoritmos de rotas de picking mais eficientes.

O projeto demonstrou a viabilidade de desenvolver soluções de baixo custo alinhadas com a Indústria 4.0, reforçando a importância de abordagens modulares, escaláveis e focadas no utilizador em contextos industriais reais.

Referências

- [1] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.
- [2] Chan, F. T. S., & Wong, H. C. W. (2006). A comprehensive study of the pick-to-light system for order picking. *Industrial Management & Data Systems*, 106(7), 900–910.
- [3] Wu, D., Rosen, D. W., Wang, L., & Schaefer, D. (2015). Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 59, 1–14.
- [4] Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2019). *Warehouse & Distribution Science* (edição online 0.98.1).
- [5] Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities Planning* (4.^a ed.). John Wiley & Sons.
- [6] de Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501.
- [7] Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1–21.
- [8] Ramaa, A., Subramanya, K. N., & Rangaswamy, T. M. (2012). Impact of Warehouse Management System in a Supply Chain. *International Journal of Computer Applications*, 54(1), 14–20.
- [9] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- [10] Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385.
- [11] Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 508–517.
- [12] Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38–41.
- [13] Sanders, M. S., & McCormick, E. J. (1993). *Human Factors in Engineering and Design* (7.^a ed.). McGraw-Hill.

- [14] Espressif Systems. (n.d.). ESP32 Series Datasheet. Disponível em: [esp32 datasheet en.pdf](#). Consultado em 12.09.2025.
- [15] Random Nerd Tutorials. (n.d.). *ESP32 Pinout Reference: Which GPIOs should you use?*. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-pinout-reference-gpios/>. Consultado em 12.09.2025.
- [16] Adafruit Industries. (n.d.). *Adafruit LED Backpack – HT16K33 Guide* (ou Holtek HT16K33 Datasheet). Disponível em: <https://learn.adafruit.com/>. Consultado em 12.09.2025.
- [17] Raspberry Pi Foundation. (n.d.). Raspberry Pi 4 Model B. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>. Consultado em 12.09.2025.
- [18] Cytron Technologies. (n.d.). *Raspberry Pi 400*. Disponível em: <https://my.cytron.io/raspberry-pi-400>. Consultado em 12.09.2025.
- [19] Waveshare Electronics. (n.d.). *Barcode Scanner Module*. Disponível em: <https://www.waveshare.com/barcode-scanner-module.htm>. Consultado em 12.09.25
- [20] MariaDB Foundation. (n.d.). MariaDB Documentation. Disponível em: <https://mariadb.com/kb/en/>. Consultado em 12.09.2025.
- [20] Espressif Systems. (n.d.). *ESP32 Technical Reference Manual – UART* (ou *Serial Communication*). Disponível em: <https://www.espressif.com/>. Consultado em 12.09.2025.
- [21] NXP Semiconductors. (2014). UM10204: I2C-bus specification and user manual. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>. Consultado em 12.09.2025.
- [22] Python Software Foundation. (n.d.). Python Documentation. Disponível em: <https://docs.python.org/>. Consultado em 12.09.2025.
- [23] Streamlit Inc. (n.d.). *Streamlit Documentation*. Disponível em: <https://docs.streamlit.io/>. Consultado em 12.09.2025.
- [24] MariaDB Foundation. (n.d.). MariaDB Documentation. Disponível em: <https://mariadb.com/kb/en/>. Consultado em 12.09.2025.