



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

**Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Computação e Sistemas**

BioTrace Lock: Sistema Biométrico de Bloqueio Seguro com Registro e Rastreabilidade

Jardel Jiliardi dos Santos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ORIENTAÇÃO:
Luiz Carlos Bambirra Torres

**Novembro, 2025
João Monlevade–MG**

Jardel Jiliardi dos Santos

BioTrace Lock: Sistema Biométrico de Bloqueio Seguro com Registro e Rastreabilidade

Orientador: Luiz Carlos Bambirra Torres

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Computação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para aprovação na Disciplina “Trabalho de Conclusão de Curso II”.

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

Novembro de 2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237b Santos, Jardel Jiliardi dos.
BioTrace Lock [manuscrito]: sistema biométrico de bloqueio seguro com registro e rastreabilidade. / Jardel Jiliardi dos Santos. - 2026.
68 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Bambirra Torres Torres.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Computação .

1. Automação industrial. 2. Biometria. 3. Identificação biométrica - Controle de acesso. 4. Internet das coisas. 5. Microcontroladores. 6. Segurança industrial. 7. Sistemas embarcados (Computadores). I. Torres, Luiz Carlos Bambirra Torres. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jardel Jiliardi dos Santos

BioTrace Lock: Sistema Biométrico de Bloqueio Seguro com Registro e Rastreabilidade

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação

Aprovada em 29 de janeiro de 2026

Membros da banca

Doutor Luiz Carlos Bambirra Torres - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutor Welbert Alves Rodrigues - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre Maurício José Aureliano Junio - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Luiz Carlos Bambirra Torres, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/05/2026



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Bambirra Torres, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/05/2026, às 20:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1101917** e o código CRC **72D62C74**.

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, que sempre acreditou em mim e foi base fundamental em minha trajetória. À minha companheira, que hoje gera nossa filha, pelo apoio constante, incentivo e por ter estado ao meu lado desde o início da minha jornada acadêmica. E aos meus amigos, que permaneceram presentes nos momentos desafiadores, oferecendo suporte, e celebraram comigo cada conquista ao longo do caminho.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por iluminar meu caminho e me dar forças para superar cada etapa desta jornada. À minha família, meu porto seguro, sou profundamente grato pelo amor, pela compreensão e por acreditarem no meu potencial. Agradeço também aos meus amigos, que estiveram presentes nos momentos difíceis e celebraram comigo cada conquista. O apoio, as palavras de incentivo e a amizade verdadeira foram fundamentais para que eu continuasse avançando. Cada gesto e cada palavra de motivação foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Ao meu orientador Luiz Carlos Bambirra Torres, deixo meu sincero agradecimento pela paciência, pelas orientações e pela dedicação durante a construção deste trabalho. Seu conhecimento e comprometimento foram determinantes para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Aos professores do ICEA/UFOP, agradeço por despertarem em mim a busca pelo conhecimento, pela inovação e pela excelência. Aos colegas de jornada, sou grato por cada conversa, troca de experiências, parceria e incentivo ao longo desse percurso. Por fim, expresso minha gratidão a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste sonho. Cada apoio recebido fez diferença e tornou possível a conclusão desta etapa tão importante da minha vida.

“O aprendizado não é alcançado por acaso; ele deve ser buscado com ardor e cultivado com diligência.”

— Abigail Adams (1744 – 1818).

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de uma Caixa de Bloqueio Biométrica, cujo objetivo é modernizar e tornar mais seguras as práticas de Lockout/Tagout em ambientes industriais. A justificativa baseou-se na necessidade de ampliar a rastreabilidade, a confiabilidade e o controle operacional nas atividades de isolamento de energia, reduzindo riscos associados à remoção indevida de dispositivos durante a manutenção e atendendo às Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-12. A metodologia adotada compreendeu o levantamento de requisitos, o projeto eletrônico da solução, a implementação de firmware em C++ para microcontrolador, a integração de componentes (sensor óptico de impressão digital, módulo de comunicação e relé de acionamento) e a realização de testes funcionais em ambiente controlado. O desenvolvimento apoiou-se em referenciais teóricos sobre biometria, segurança industrial e rastreabilidade de processos. O sistema foi implementado utilizando a placa de desenvolvimento Wemos D1 R1, baseada no microcontrolador ESP8266, aliada a um sensor óptico de impressões digitais modelo R305. Além das rotinas de cadastro, autenticação e acionamento do mecanismo de bloqueio, a solução possibilita a operação em tempo real por meio da integração com um sistema de gerenciamento de bloqueios. Nesse sistema, são registradas as caixas de bloqueio em operação, os usuários autorizados a utilizá-las, bem como o monitoramento do tempo de execução das atividades e a situação dos treinamentos obrigatórios dos funcionários envolvidos.

Palavras-chaves: Biometria; Lockout/Tagout; Automação industrial; Rastreamento; Registro em tempo real; Segurança ocupacional.

Abstract

This work presents the development and validation of a Biometric Lockout Box, whose purpose is to modernize and enhance the safety of Lockout/Tagout practices in industrial environments. The motivation for this study is based on the need to improve traceability, reliability, and operational control in energy isolation activities, reducing risks associated with the improper removal of devices during maintenance and ensuring compliance with Brazilian Regulatory Standards NR-10 and NR-12. The adopted methodology included requirements analysis, electronic system design, firmware implementation in C++ for a microcontroller, integration of system components (optical fingerprint sensor, communication module, and actuation relay), and functional testing in a controlled environment. The development was supported by theoretical references on biometrics, industrial safety, and process traceability. The system was implemented using the Wemos D1 R1 development board, based on the ESP8266 microcontroller, combined with an R305 optical fingerprint sensor. In addition to registration, authentication, and lock actuation routines, the solution enables real-time operation through integration with a lockout management system. This system records the lockout boxes in operation, the users authorized to operate them, as well as monitoring the execution time of activities and the status of mandatory training of the involved personnel.

Key-words: Biometrics; Lockout/Tagout; Industrial automation; Real-time monitoring; Traceability; Occupational safety.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Caixa de bloqueio convencional com etiquetas e cadeado de bloqueio . . .	19
Figura 2 – Placa WeMos D1 R1 WiFi ESP8266	22
Figura 3 – Display OLED I2C utilizado no sistema	22
Figura 4 – Sensor biométrico óptico R305	23
Figura 5 – Módulo relé utilizado no sistema	23
Figura 6 – Solenoide de 5 volts	23
Figura 7 – Bateria de 5 volts utilizada no sistema	24
Figura 8 – Diagrama elétrico da caixa de bloqueio por biometria	24
Figura 9 – Modelagem 3D da estrutura da caixa de bloqueio desenvolvida no software 3D Builder	26
Figura 10 – Estrutura do sistema de gerenciamento de bloqueios desenvolvido em PHP e JavaScript	28
Figura 11 – Arquitetura do tipo cliente–servidor do sistema BioTrace Lock	36
Figura 12 – Arquitetura geral do sistema BioTrace Lock	37
Figura 13 – Diagrama elétrico do sistema BioTrace Lock	38
Figura 14 – Modelo 3D da caixa de bloqueio do sistema BioTrace Lock	39
Figura 15 – Fluxograma de funcionamento do sistema para bloqueio	40
Figura 16 – Fluxograma de funcionamento do sistema para desbloqueio	41
Figura 17 – Interface web do sistema: Login	42
Figura 18 – Interface web do sistema: Gerenciamento de usuários	43
Figura 19 – Interface web do sistema: Registros de acesso	43
Figura 20 – Interface web do sistema: Gerenciamento de dispositivos	43
Figura 21 – Caixa de bloqueio biométrica finalizada	44
Figura 22 – Teste prático do dispositivo de bloqueio biométrico com alunos do SENAI	49
Figura 23 – Execução do procedimento de autenticação biométrica	50
Figura 24 – Validação do protótipo em painel elétrico	51
Figura 25 – Aluno realizando o procedimento de bloqueio	51
Figura 26 – Bloqueio do painel com cadeado e etiqueta	52
Figura 27 – Cadastro do líder para abertura da caixa	52
Figura 28 – Inserção da chave na caixa de bloqueio	53
Figura 29 – Registro de bloqueio do líder e participante	53
Figura 30 – Procedimento de desbloqueio realizado pelo usuário	54
Figura 31 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno A.	63
Figura 32 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno A.	64
Figura 33 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno B.	65
Figura 34 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno B.	66

Figura 35 – Visão frontal da versão final da Caixa de Bloqueio Biométrica.	67
Figura 36 – Visão lateral da versão final da Caixa de Bloqueio Biométrica.	67

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados detalhados dos testes de reconhecimento biométrico	46
Tabela 2 – Tempo médio de resposta do sistema	46
Tabela 3 – Registros de autenticação válida em cenários de uso consecutivo	48

Lista de abreviaturas e siglas

UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
ICEA	Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
NR-10	Norma Regulamentadora nº 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade
NR-12	Norma Regulamentadora nº 12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos
LOTO	Lockout/Tagout
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
RFID	Radio-Frequency Identification
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDE	Integrated Development Environment
ESP8266	Microcontrolador com conectividade Wi-Fi
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PHP	Hypertext Preprocessor
MySQL	My Structured Query Language
C/C++	Linguagens de programação
NodeMCU	Plataforma de desenvolvimento baseada no ESP8266
Wemos D1 R1	Placa de desenvolvimento baseada no ESP8266
R305	Sensor biométrico óptico
mAh	Miliampère-hora
Wi-Fi	Tecnologia de comunicação sem fio
API	Application Programming Interface
LCD	Liquid Crystal Display
I2C	Inter-Integrated Circuit (Protocolo de comunicação serial)
GPIO	General Purpose Input/Output
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impresso)
DC	Corrente contínua
AC	Corrente alternada

Lista de símbolos

\in	Pertence
Σ	Somatório
%	Porcentagem
T	Tempo
$T_{médio}$	Tempo médio de resposta
T_i	Tempo individual de cada medição
T_{total}	Tempo total do processo
$T_{leitura}$	Tempo de leitura da impressão digital
$T_{validacao}$	Tempo de validação no sistema
$T_{acionamento}$	Tempo de acionamento do mecanismo
n	Número total de medições

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	O problema de pesquisa	18
1.2	Objetivos	19
1.3	Metodologia	20
1.3.1	Tipo de pesquisa	20
1.3.2	Procedimentos metodológicos	20
1.3.2.1	Levantamento de requisitos	21
1.3.2.2	Projeto do sistema	21
1.3.2.3	Projeto de hardware	21
1.3.2.4	Construção da estrutura da caixa de bloqueio	25
1.3.2.5	Projeto de software (firmware)	26
1.3.2.6	Arquitetura funcional do sistema	27
1.3.2.7	Sistema de gerenciamento de bloqueios	27
1.3.3	Implementação	28
1.3.4	Validação e testes funcionais	29
1.4	Organização do trabalho	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	Segurança industrial e isolamento de energia	31
2.2	Procedimentos de Lockout/Tagout	31
2.3	Biometria como mecanismo de autenticação	32
2.3.1	Normas regulamentadoras aplicáveis	32
2.4	Sistemas embarcados e microcontroladores	33
2.5	Rastreabilidade e sistemas de gerenciamento	33
2.6	Trabalhos correlatos	33
3	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA BIOTRACE LOCK	35
3.1	Arquitetura do Sistema	35
3.2	Desenvolvimento do Hardware	37
3.3	Modelagem 3D e Construção da Estrutura Física	38
3.4	Integração do Sistema Embarcado	39
3.5	Desenvolvimento da Interface Web	41
3.6	Ajustes no Design do Equipamento	44
4	RESULTADOS	45
4.1	Desempenho do reconhecimento biométrico	45

4.2	Tempo de resposta do sistema	46
4.3	Confiabilidade do controle de acesso	47
4.4	Testes do dispositivo com alunos do SENAI	48
4.5	Discussão dos resultados	50
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICES	58
	APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DA CAIXA DE BLOQUEIO BI- OMÉTRICA	59
	APÊNDICE B – CÓDIGO-FONTE DO SISTEMA DE GERENCIA- MENTO DO BLOQUEIO BIOMÉTRICO	60
	ANEXOS	61
	ANEXO A – OUTROS MATERIAIS	62

1 Introdução

A segurança em atividades de manutenção industrial depende da adoção de procedimentos eficazes de isolamento de fontes de energia perigosa, capazes de prevenir acidentes que podem resultar em danos materiais, interrupções de processo e riscos à integridade física dos trabalhadores. Nesse contexto, os procedimentos de bloqueio e etiquetagem, conhecidos como Lockout/Tagout¹, são amplamente empregados para assegurar que máquinas, equipamentos e sistemas energizados permaneçam em condição segura durante a execução de intervenções técnicas, inspeções ou manutenções corretivas e preventivas.

Embora consolidado e normatizado em ambientes industriais, o método tradicional de Lockout/Tagout — baseado essencialmente no uso de cadeados mecânicos e etiquetas de identificação — apresenta limitações relevantes quando analisado sob a perspectiva da confiabilidade operacional e do controle de acesso. Entre essas limitações destacam-se a ausência de mecanismos robustos de autenticação do responsável pelo bloqueio, a dificuldade de rastrear, de forma precisa, quem realizou determinada intervenção e em qual momento, bem como a possibilidade de remoção indevida ou não autorizada dos dispositivos de bloqueio.

Com o avanço da automação industrial, da eletrônica embarcada e da Internet das Coisas, surgem novas possibilidades para a modernização dos sistemas de segurança aplicados à manutenção industrial. A incorporação de tecnologias eletrônicas permite a criação de soluções mais inteligentes, capazes de integrar controle de acesso, automação de processos e registro sistemático das operações realizadas. Nesse cenário, a biometria destaca-se como uma alternativa eficaz para autenticação de usuários, uma vez que se baseia em características físicas únicas e permanentes, reduzindo significativamente os riscos associados ao uso de chaves, cartões ou senhas passíveis de compartilhamento.

Além do controle de acesso, o registro local dos eventos de bloqueio e desbloqueio em um sistema de gerenciamento com banco de dados próprio representa um avanço significativo em termos de rastreabilidade e confiabilidade dos procedimentos de segurança. A centralização dessas informações em um banco de dados mantido em ambiente local possibilita o armazenamento estruturado das ações realizadas, permitindo consultas, auditorias e análises posteriores, sem dependência de serviços externos ou conectividade com a internet.

¹ Lockout/Tagout (LOTO) é um procedimento de segurança destinado ao bloqueio e à sinalização de fontes de energia perigosas, garantindo que equipamentos permaneçam desenergizados durante atividades de manutenção.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento do BioTrace Lock, um sistema biométrico de bloqueio seguro com registro e rastreabilidade, voltado à modernização dos procedimentos de Lockout/Tagout em ambientes industriais. É importante ressaltar que a utilização desse novo equipamento não elimina totalmente o uso do bloqueio físico na fonte de energia a ser isolada, mas constitui uma melhoria do processo em que são utilizadas caixas de bloqueio coletivo. Essa abordagem permite que mais de um colaborador realize intervenções nos equipamentos, possibilitando que todos participem do procedimento de bloqueio sem a necessidade do uso de múltiplos cadeados e etiquetas individuais.

A pesquisa delimita-se ao estudo, à concepção, à construção e à validação de um sistema eletrônico capaz de integrar autenticação biométrica, acionamento de bloqueio por meio de relé e comunicação com um sistema de gerenciamento responsável pelo registro dos eventos de acesso e operação.

Por fim, este trabalho busca avaliar a viabilidade técnica da solução proposta e sua aderência às recomendações de segurança estabelecidas pelas Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-12, evidenciando o potencial do uso de sistemas embarcados integrados a bancos de dados locais como ferramentas de apoio à segurança do trabalho e à automação industrial. Nos capítulos seguintes, são apresentados o referencial teórico, a metodologia adotada, o desenvolvimento do sistema, a análise dos resultados obtidos e as conclusões decorrentes deste estudo.

1.1 O problema de pesquisa

Os procedimentos tradicionais de Lockout/Tagout utilizados em ambientes industriais baseiam-se, em sua maioria, no uso de dispositivos mecânicos simples, como cadeados e etiquetas físicas, com a finalidade de garantir o isolamento de fontes de energia perigosas durante a realização de atividades de manutenção. Embora esses métodos sejam amplamente difundidos e exigidos pelas normas de segurança vigentes, apresentam fragilidades relevantes quando analisados sob a ótica da confiabilidade, do controle de acesso e da rastreabilidade das operações.

Entre as principais limitações desses procedimentos destacam-se a ausência de mecanismos eficazes de autenticação do responsável pelo bloqueio, ou seja, a impossibilidade de verificar se o indivíduo foi capacitado ou se sua capacitação para realizar o bloqueio está em dia. Soma-se a isso a dificuldade de identificar com precisão quem realizou determinada intervenção e em qual momento, bem como a possibilidade de remoção indevida ou não autorizada dos dispositivos de bloqueio, seja por meio da violação do dispositivo físico, seja pelo compartilhamento da chave, prática não permitida pelos procedimentos de segurança. A inexistência de registros automáticos e estruturados compromete a realização de auditorias, a investigação de incidentes e a verificação do cumprimento dos procedimentos de segurança, aumentando o risco de falhas operacionais e de acidentes de trabalho.

Adicionalmente, em muitos ambientes industriais, a dependência de registros manuais ou de sistemas centralizados que exigem conectividade contínua pode comprometer a confiabilidade e a disponibilidade das informações. Falhas de comunicação, limitações de infraestrutura ou indisponibilidade de acesso à internet podem resultar na perda ou inconsistência dos dados registrados. Nesse cenário, torna-se evidente a necessidade de soluções que aliem segurança, autonomia e rastreabilidade, por meio do uso de sistemas eletrônicos capazes de realizar o controle de acesso e o registro dos eventos em um banco de dados local, reduzindo a dependência de fatores humanos e de infraestrutura externa.

Figura 1 – Caixa de bloqueio convencional com etiquetas e cadeado de bloqueio



Fonte: Disponível em: YourWay Digital Storage.

Diante dessas limitações, o problema de pesquisa que orienta este trabalho pode ser formulado da seguinte maneira:

Como uma caixa de bloqueio baseada em autenticação biométrica e no registro dos eventos em um banco de dados do sistema de gerenciamento pode aprimorar os procedimentos de Lockout/Tagout, aumentando a segurança, a rastreabilidade e o controle operacional em ambientes industriais?

Essa questão direciona o desenvolvimento da solução proposta, buscando avaliar a viabilidade técnica e funcional de um sistema eletrônico capaz de garantir que apenas profissionais autorizados realizem o bloqueio e desbloqueio de fontes de energia perigosas, ao mesmo tempo em que registra, de forma confiável, todas as ações realizadas durante o processo no banco de dados do sistema. Além disso, trata-se de um equipamento que poderá ser implementado em qualquer indústria que já faça uso do método Lockout/Tagout, tornando-o mais confiável e seguro.

1.2 Objetivos

O presente trabalho consiste no desenvolvimento e na validação do BioTrace Lock, um sistema biométrico de bloqueio seguro com registro e rastreabilidade, voltado à modernização dos procedimentos de Lockout/Tagout em ambientes industriais. A proposta tem como objetivo aumentar a segurança operacional, a rastreabilidade das ações e o controle de acesso aos dispositivos de isolamento de energia, em conformidade com as normas de segurança vigentes.

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um sistema eletrônico de bloqueio baseado em microcontrolador para

aplicações de segurança industrial, adequado para utilização em campo;

- Implementar um mecanismo de autenticação biométrica por meio de sensor óptico de impressão digital;
- Integrar o sistema de bloqueio a um sistema de gerenciamento responsável pelo registro dos eventos em um banco de dados local;
- Controlar eletronicamente o acionamento do mecanismo de bloqueio, utilizando um solenoide acionado por meio de relé;
- Registrar, de forma automática e confiável, as operações de bloqueio e desbloqueio no banco de dados do sistema;
- Realizar testes funcionais em ambiente controlado para avaliar o desempenho e a confiabilidade do sistema;
- Validar a aderência da solução às recomendações das Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-12.

1.3 Metodologia

Esta seção apresenta os métodos, procedimentos e etapas utilizados para o desenvolvimento do BioTrace Lock, um sistema biométrico de bloqueio seguro com controle de acesso e registro dos eventos em banco de dados local. A metodologia adotada foi estruturada de modo a permitir a análise, a concepção, a implementação e a validação do sistema proposto, garantindo que os objetivos estabelecidos fossem alcançados de forma sistemática e coerente.

1.3.1 Tipo de pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois busca gerar uma solução prática para um problema real de segurança industrial. Apresenta também caráter experimental, uma vez que envolve a construção e o teste de um protótipo eletrônico. No âmbito metodológico, adota-se uma abordagem quantitativa e qualitativa, permitindo tanto a medição do desempenho do sistema quanto a análise de suas funcionalidades e limitações.

1.3.2 Procedimentos metodológicos

A metodologia foi organizada em quatro etapas principais: levantamento de requisitos, desenvolvimento do protótipo físico, projeto do sistema, implementação e validação por meio de testes funcionais.

1.3.2.1 Levantamento de requisitos

Nesta etapa, foram identificadas as necessidades técnicas e funcionais do sistema proposto, considerando:

- exigências estabelecidas pelas Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-12;
- requisitos associados aos procedimentos de Lockout/Tagout;
- características necessárias para uma autenticação biométrica confiável;
- condições de uso em ambientes industriais, como robustez, segurança e autonomia operacional;
- necessidade de registro dos eventos de bloqueio e desbloqueio em um banco de dados local;
- controle de acesso ao sistema para a realização do bloqueio e desbloqueio, por meio da verificação da situação dos treinamentos e capacitações dos funcionários.

A partir dessa análise, foram definidos os requisitos mínimos do sistema, incluindo autenticação biométrica, acionamento elétrico seguro, integração com um sistema de gerenciamento para registro dos eventos em banco de dados e interface simples de operação.

1.3.2.2 Projeto do sistema

O projeto do sistema foi dividido em três subetapas principais: projeto de hardware, projeto de software (firmware) e definição da arquitetura funcional.

1.3.2.3 Projeto de hardware

Para a implementação do hardware do protótipo, foram realizados testes preliminares em bancada com o objetivo de verificar o funcionamento dos componentes e avaliar se estes atendiam às necessidades funcionais do sistema proposto. Inicialmente, os testes foram conduzidos utilizando uma placa NodeMCU, juntamente com um display OLED, um leitor biométrico, um módulo relé e uma solenoide. Para a interligação dos componentes, foram utilizados cabos jumpers e uma placa de prototipagem (protoboard).

Durante esses testes, foi observado um problema recorrente na comunicação serial entre a placa NodeMCU e o computador, o que comprometia a confiabilidade da gravação do firmware e da comunicação com os periféricos. Em função dessa limitação, optou-se pela substituição da placa NodeMCU pela Wemos D1 R1, que utiliza o mesmo microcontrolador ESP8266, porém apresentou maior estabilidade de comunicação, além de maior familiaridade de uso, uma vez que já havia sido empregada em projetos anteriores.

Após a validação dos testes em bancada, foram definidos os componentes utilizados na construção do protótipo final do sistema BioTrace Lock, conforme descrito a seguir.

- Placa de desenvolvimento Wemos D1 R1, baseada no microcontrolador ESP8266, responsável pelo controle geral do sistema e pela comunicação entre os módulos.

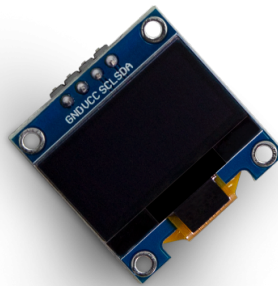
Figura 2 – Placa WeMos D1 R1 WiFi ESP8266



Fonte: internet (2026).

- Display OLED I2C, utilizado para exibição das mensagens do sistema, como autenticação, status de bloqueio e instruções ao usuário.

Figura 3 – Display OLED I2C utilizado no sistema



Fonte: internet (2026)

- Sensor biométrico óptico R305, utilizado para a autenticação dos usuários autorizados.

Figura 4 – Sensor biométrico óptico R305



Fonte: internet (2026)

- Módulo relé, responsável pelo acionamento elétrico do mecanismo de bloqueio.

Figura 5 – Módulo relé utilizado no sistema



Fonte: internet (2026)

- Solenoide de 5 volts, utilizada como atuador para o mecanismo de travamento da caixa de bloqueio.

Figura 6 – Solenoide de 5 volts



Fonte: internet (2026)

- Bateria de 5 volts, responsável pela alimentação autônoma do sistema.

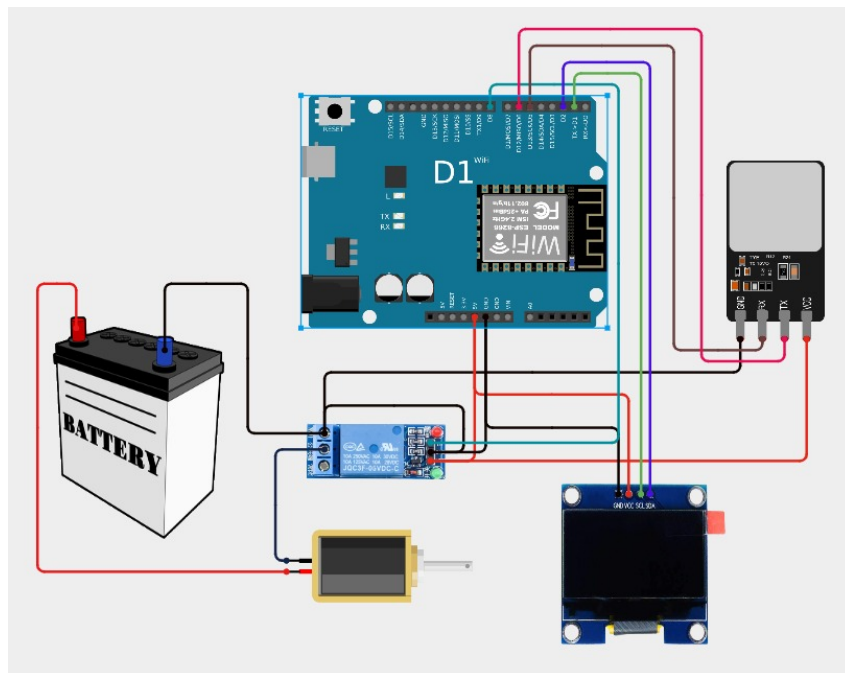
Figura 7 – Bateria de 5 volts utilizada no sistema



Fonte: internet (2026)

Após a definição dos componentes, foram elaborados os esquemas elétricos e o diagrama de interligação entre os módulos do sistema, assegurando a compatibilidade dos níveis de tensão, a comunicação serial confiável entre os dispositivos e o isolamento elétrico adequado do relé, de modo a atender aos requisitos de segurança do projeto. O diagrama elétrico completo do sistema é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama elétrico da caixa de bloqueio por biometria



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

1.3.2.4 Construção da estrutura da caixa de bloqueio

Após a definição dos componentes eletrônicos e do diagrama elétrico, foi realizada a modelagem da estrutura física da caixa de bloqueio. O desenvolvimento mecânico foi conduzido utilizando o software de modelagem tridimensional 3D Builder, permitindo projetar uma estrutura compatível com as dimensões dos componentes eletrônicos e adequada às condições de uso em ambiente industrial.

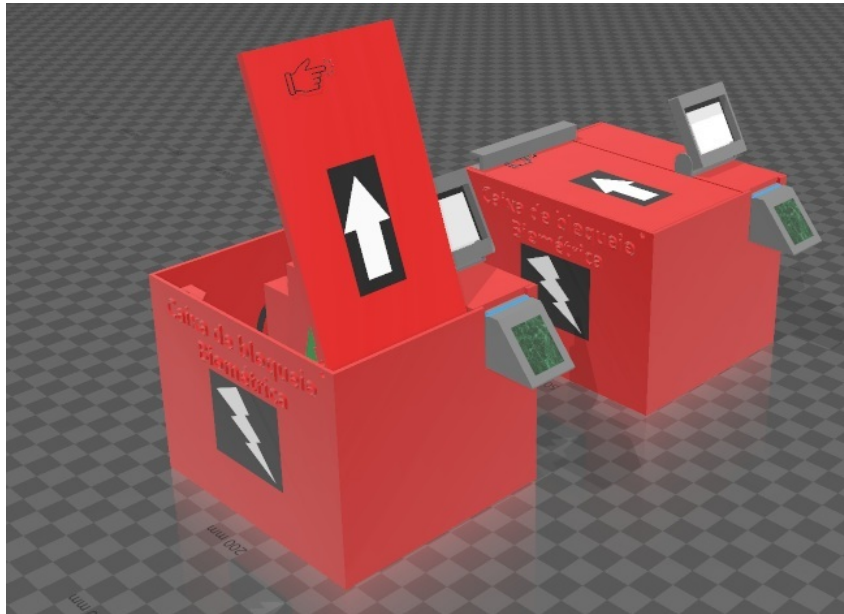
A modelagem 3D possibilitou a definição dos compartimentos internos para acomodação da placa Wemos D1 R1, do sensor biométrico, do display OLED, do módulo relé, da solenoide e da bateria, além da criação de suportes de fixação, passagens para cabeamento e aberturas para ventilação. Também foram projetados recortes específicos para o sensor biométrico e para o display, garantindo ergonomia e facilidade de operação pelo usuário.

Após a finalização da modelagem, as peças foram exportadas no formato STL e submetidas ao processo de fatiamento utilizando o software Anycubic Slicer Next. Nessa etapa, foram definidos parâmetros como altura de camada, densidade de preenchimento interno, velocidade de impressão e temperaturas de extrusão e da mesa aquecida.

Para a fabricação da estrutura, foi utilizada a tecnologia de manufatura aditiva por deposição de material fundido (FDM), por meio da impressora 3D Anycubic Kobra S1. O material escolhido para a impressão foi o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), devido à sua maior resistência mecânica e térmica quando comparado a outros materiais comumente utilizados, como o PLA. O uso do ABS também proporciona maior durabilidade, resistência a impactos e melhor desempenho em ambientes industriais, onde podem ocorrer variações de temperatura e esforços mecânicos.

Após a impressão das peças, foi realizada a montagem da estrutura, incluindo a fixação dos componentes eletrônicos, organização do cabeamento interno e testes de encaixe do mecanismo de travamento. Essa etapa permitiu validar o projeto mecânico e garantir que a caixa de bloqueio apresentasse robustez estrutural e funcionalidade adequada ao sistema proposto.

Figura 9 – Modelagem 3D da estrutura da caixa de bloqueio desenvolvida no software 3D Builder



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

1.3.2.5 Projeto de software (firmware)

O firmware do sistema foi desenvolvido em linguagem C/C++ utilizando a plataforma Arduino IDE, direcionado ao microcontrolador ESP8266 presente na placa Wemos D1 R1. A programação foi estruturada de forma modular, visando facilitar a manutenção do código, bem como permitir futuras expansões do sistema.

O desenvolvimento contemplou as seguintes funcionalidades principais:

- rotinas de cadastro e reconhecimento biométrico por meio do sensor R305;
- controle do módulo relé para os processos de bloqueio e desbloqueio da caixa;
- comunicação Wi-Fi com o servidor de gerenciamento;
- envio de registros de eventos para armazenamento em banco de dados remoto;
- exibição de mensagens de status no display OLED;
- rotinas de tratamento de falhas e procedimentos de segurança para evitar acionamentos indevidos.

A lógica do firmware foi organizada em blocos funcionais independentes, incluindo inicialização do sistema, autenticação biométrica, controle do atuador, comunicação com o servidor e interface com o usuário. Essa abordagem modular contribui para a robustez do sistema e facilita eventuais atualizações.

1.3.2.6 Arquitetura funcional do sistema

A arquitetura funcional do sistema integrou os componentes de hardware e software em um fluxo operacional composto pelas seguintes etapas:

1. inicialização dos módulos eletrônicos e conexão à rede Wi-Fi;
2. exibição do status inicial no display OLED;
3. leitura da impressão digital apresentada pelo usuário;
4. autenticação biométrica por meio do sensor e validação junto ao sistema de gerenciamento;
5. acionamento do relé conforme autorização ou negação de acesso;
6. registro do evento de bloqueio ou desbloqueio no banco de dados;
7. atualização das mensagens de status no display do sistema.

1.3.2.7 Sistema de gerenciamento de bloqueios

Para o gerenciamento das caixas de bloqueio biométrico, foi desenvolvido um sistema web utilizando as linguagens PHP e JavaScript, integrado a um banco de dados SQL. O sistema tem como objetivo gerenciar e controlar as caixas de bloqueio, bem como monitorar todos os processos de bloqueio e desbloqueio, além de acompanhar a condição de treinamento dos usuários autorizados.

A aplicação foi estruturada em arquitetura cliente-servidor, na qual o dispositivo embarcado baseado no microcontrolador ESP8266 realiza requisições HTTP ao servidor web para validação das autenticações biométricas e registro das operações. O backend, desenvolvido em PHP, é responsável pelo processamento das requisições, gerenciamento dos usuários e dispositivos, e armazenamento das informações no banco de dados. O frontend foi implementado utilizando HTML, CSS, Bootstrap e JavaScript, permitindo a interação com o sistema por meio de uma interface web responsiva.

Entre as principais funcionalidades implementadas no sistema de gerenciamento, destacam-se:

- cadastro e gerenciamento das caixas de bloqueio biométrico;
- cadastro e controle de usuários autorizados;
- monitoramento dos eventos de bloqueio e desbloqueio;
- registro dos horários das operações realizadas;

- controle da situação de treinamento dos usuários;
- validação de acesso em conjunto com o dispositivo biométrico;
- armazenamento dos registros para rastreabilidade das ações;
- geração de relatórios para acompanhamento das atividades.

O banco de dados foi estruturado para armazenar informações referentes aos dispositivos, usuários, permissões e registros de acesso, garantindo a rastreabilidade completa das operações realizadas pelo sistema. A Figura 10 apresenta a estrutura de arquivos e parte da implementação do sistema de gerenciamento desenvolvido.

Figura 10 – Estrutura do sistema de gerenciamento de bloqueios desenvolvido em PHP e JavaScript

```

17 /*!40101 SET @OLD_COLLATION_CONNECTION=@COLLATION_CONNECTION */;
18 /*!40101 SET NAMES utf8mb4 */;
19
20 --
21 -- Banco de dados: `bloqueioBiométrico`
22 --
23
24 -----
25
26 --
27 -- Estrutura para tabela `admin`
28 --
29
30 CREATE TABLE `admin` (
31   `id` int(11) NOT NULL,
32   `admin_name` varchar(30) NOT NULL,
33   `admin_email` varchar(80) NOT NULL,
34   `admin_pwd` longtext NOT NULL
35 ) ENGINE=InnoDB DEFAULT CHARSET=latin1 COLLATE=latin1_swedish_ci;
36
37 --
38 -- Despejando dados para a tabela `admin`
39 --
40
41 INSERT INTO `admin` (`id`, `admin_name`, `admin_email`, `admin_pwd`) VALUES
42 (1, 'Admin', 'admin@gmail.com', '$2y$10$89uX3LBy4mlU/DC8veQ11.32nSiandP/E1MFuH.z.6B420ql3y7PK');
43
44 -----
45
46 --
47 -- Estrutura para tabela `devices`
48 --
49
50 CREATE TABLE `devices` (

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

1.3.3 Implementação

A etapa de implementação teve início com a montagem dos componentes eletrônicos em uma placa de prototipagem (protoboard), permitindo a validação das conexões e o correto funcionamento do conjunto. Nessa fase, foram integrados o microcontrolador Wemos D1 R1 baseado no ESP8266, o sensor biométrico R305, o display OLED, o módulo relé e a solenoide, possibilitando a verificação individual e conjunta dos módulos, bem como a identificação e correção de eventuais falhas de comunicação e operação.

Após a validação em bancada, os componentes foram integrados à estrutura física da caixa de bloqueio previamente modelada em ambiente tridimensional e fabricada por meio de impressão 3D em material ABS. A montagem final incluiu a fixação dos módulos eletrônicos, a organização do cabeamento interno e a verificação do funcionamento do mecanismo de travamento acionado pela solenoide.

Paralelamente à implementação do hardware, foi desenvolvido o sistema de gerenciamento de bloqueios utilizando as linguagens PHP e JavaScript, integrado a um banco de dados SQL. Esse sistema foi projetado para gerenciar as caixas de bloqueio biométrico, controlar usuários autorizados, registrar eventos de bloqueio e desbloqueio e monitorar a condição de treinamento dos operadores. A comunicação entre o dispositivo embarcado e o servidor foi realizada por meio de requisições HTTP via rede Wi-Fi.

A programação do microcontrolador ESP8266 foi implementada em linguagem C/C++ utilizando a plataforma Arduino IDE, contemplando as rotinas de autenticação biométrica, controle do relé, comunicação com o servidor e exibição de mensagens no display OLED. O firmware foi continuamente ajustado com base nos resultados dos testes experimentais, assegurando a estabilidade do sistema, a correta comunicação com o servidor e a confiabilidade no registro dos eventos.

1.3.4 Validação e testes funcionais

Os testes foram realizados em ambiente controlado, com o objetivo de verificar o correto funcionamento do sistema e avaliar seu desempenho sob diferentes condições de operação. As seguintes métricas e aspectos foram analisados:

- taxa de reconhecimento biométrico do sistema;
- tempo médio de resposta entre a autenticação do usuário e o acionamento do mecanismo de bloqueio;
- consistência, integridade e confiabilidade dos registros armazenados no banco de dados;
- comportamento do sistema diante de tentativas de acesso com impressões digitais não cadastradas;
- confiabilidade do relé sob condições de acionamento repetido;
- funcionamento do sistema em situações de indisponibilidade temporária da rede;
- verificação da sincronização dos registros após o restabelecimento da conexão;
- validação do funcionamento do display OLED para indicação do status do sistema;
- verificação do acionamento mecânico da solenoide na estrutura impressa em 3D.

Os resultados obtidos nessa etapa foram documentados e analisados, servindo de base para a realização de ajustes finais no sistema, com o objetivo de aprimorar seu desempenho, sua robustez e sua confiabilidade operacional.

1.4 Organização do trabalho

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, abordando os principais conceitos relacionados à segurança industrial, aos procedimentos de Lockout/Tagout, à biometria aplicada à autenticação, aos sistemas embarcados e às tecnologias de registro e gerenciamento de dados, que fundamentam o desenvolvimento da solução proposta.

O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento da Caixa de Bloqueio Biométrica, contemplando a arquitetura do sistema, o projeto e a integração do hardware e do software embarcado, a modelagem e a fabricação da estrutura por impressão 3D, bem como o desenvolvimento do sistema de gerenciamento e da interface web responsável pelo armazenamento e pelo controle dos registros de bloqueio e desbloqueio.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos com a implementação do sistema, incluindo a avaliação do desempenho do reconhecimento biométrico, do tempo de resposta, da confiabilidade do mecanismo de acionamento do bloqueio e da integridade dos registros armazenados no banco de dados do sistema de gerenciamento.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, destacando as principais contribuições alcançadas, as limitações identificadas durante o desenvolvimento e a validação do protótipo, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta a revisão da literatura que fundamenta o desenvolvimento do sistema BioTrace Lock: Sistema Biométrico de Bloqueio Seguro com Registro e Rastreabilidade. São abordados os principais conceitos relacionados à segurança industrial, aos procedimentos de Lockout/Tagout, à biometria aplicada à autenticação, ao uso de sistemas embarcados e à rastreabilidade digital de processos. O objetivo é situar o trabalho no estado da arte e evidenciar a aderência da solução proposta às práticas e pesquisas consolidadas na área, destacando a integração entre hardware, software e monitoramento em tempo real implementados neste projeto.

2.1 Segurança industrial e isolamento de energia

A segurança em ambientes industriais está diretamente associada à adoção de práticas preventivas capazes de minimizar os riscos de acidentes durante a operação e, principalmente, durante atividades de manutenção de máquinas e equipamentos. Nesse contexto, o isolamento adequado das fontes de energia é considerado uma das medidas mais críticas para a prevenção de acidentes graves e fatais.

Segundo [Manuele \(2014\)](#), falhas no controle e no isolamento de energias perigosas figuram entre as principais causas de acidentes industriais, sobretudo em intervenções de manutenção. Dessa forma, torna-se essencial a implementação de sistemas que assegurem procedimentos seguros, padronizados e confiáveis para o bloqueio de fontes de energia, contribuindo de maneira significativa para a redução dos riscos ocupacionais.

No contexto do sistema BioTrace Lock, esse conceito é aplicado por meio de uma caixa de bloqueio física com controle biométrico, que impede a liberação da chave de energia sem autenticação do usuário autorizado. Além disso, o sistema registra todas as ações realizadas, permitindo rastreabilidade completa do processo de bloqueio e desbloqueio.

2.2 Procedimentos de Lockout/Tagout

O procedimento de Lockout/Tagout (LOTO) é amplamente utilizado para garantir que máquinas e equipamentos permaneçam devidamente isolados durante intervenções técnicas. A norma regulamentadora definida pela [Occupational Safety and Health Administration \(2019\)](#) estabelece que dispositivos de bloqueio físico e de sinalização devem ser empregados para impedir a liberação inesperada de energia.

Entretanto, estudos conduzidos pelo [National Institute for Occupational Safety](#)

and Health (2016) indicam que falhas humanas, remoções indevidas dos dispositivos de bloqueio e a ausência de mecanismos formais de identificação do responsável pelo bloqueio ainda representam riscos significativos. Nesse sentido, abordagens mais recentes defendem a modernização dos procedimentos de LOTO por meio da incorporação de tecnologias eletrônicas e sistemas de autenticação, capazes de aumentar a confiabilidade, a rastreabilidade e o controle do processo [Occupational Safety and Health Administration \(2023\)](#).

O sistema BioTrace Lock propõe justamente essa modernização, integrando bloqueio físico com autenticação biométrica e registro digital das operações. Dessa forma, além de impedir o acesso não autorizado, o sistema mantém histórico das ações realizadas, permitindo auditoria e controle dos processos de bloqueio.

2.3 Biometria como mecanismo de autenticação

A biometria consiste na utilização de características fisiológicas ou comportamentais para a identificação e autenticação de indivíduos. Conforme apresentado por [Jain, Ross e Nandakumar \(2016\)](#), sistemas biométricos oferecem vantagens relevantes em relação a métodos tradicionais, como senhas ou cartões, por se basearem em atributos únicos, permanentes e de difícil transferência.

Dentre as técnicas biométricas disponíveis, a impressão digital destaca-se pela maturidade tecnológica, ampla disseminação e elevada confiabilidade. Estudos clássicos, como os de [Maltoni et al. \(2009\)](#) e [Ratha et al. \(2001\)](#), demonstram que sistemas baseados em impressões digitais apresentam altas taxas de reconhecimento, mesmo em aplicações em tempo real. Em contextos mais recentes, trabalhos como o de [Iyen e Others \(2024\)](#) evidenciam a viabilidade da biometria digital em sistemas de controle de acesso industrial, reforçando sua adequação a aplicações críticas de segurança.

No BioTrace Lock, a biometria é utilizada como mecanismo principal de autenticação, garantindo que apenas usuários autorizados possam realizar operações de bloqueio e desbloqueio. Essa abordagem elimina problemas associados ao uso de chaves compartilhadas ou cartões, aumentando a segurança do processo.

2.3.1 Normas regulamentadoras aplicáveis

No contexto brasileiro, a segurança em atividades envolvendo sistemas elétricos e máquinas industriais é regulamentada por normas específicas que estabelecem requisitos mínimos para a prevenção de acidentes. A Norma Regulamentadora NR-10 trata da segurança em instalações e serviços em eletricidade, definindo medidas de controle, procedimentos operacionais e responsabilidades para garantir a proteção dos trabalhadores contra riscos elétricos [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2019\)](#). Complementarmente, a

NR-12 estabelece diretrizes para a segurança no trabalho em máquinas e equipamentos, abordando aspectos como dispositivos de proteção, sistemas de parada e procedimentos de manutenção segura [Associação Brasileira de Normas Técnicas \(2020\)](#).

A solução proposta neste trabalho contribui diretamente para o atendimento dessas normas, ao implementar um sistema que garante o isolamento seguro da energia e o controle formal dos responsáveis pelo bloqueio, além de permitir o monitoramento do status dos treinamentos dos usuários autorizados.

2.4 Sistemas embarcados e microcontroladores

Sistemas embarcados são dispositivos computacionais dedicados à execução de funções específicas, geralmente integrados a sensores e atuadores. Esses sistemas são amplamente empregados em aplicações industriais e de automação devido à sua flexibilidade, baixo custo e capacidade de operar de forma autônoma.

No presente trabalho, utiliza-se a placa de desenvolvimento Wemos D1 R1, baseada no microcontrolador ESP8266. De acordo com o datasheet disponibilizado pela [Espressif Systems \(2023\)](#), esse microcontrolador possui recursos adequados para aplicações que envolvem comunicação em rede, processamento de dados e controle de dispositivos eletrônicos, sendo amplamente utilizado em soluções voltadas à automação e à segurança.

No sistema BioTrace Lock, o microcontrolador é responsável pela leitura do sensor biométrico, controle do atuador de bloqueio, comunicação com o servidor web e envio das informações para registro e rastreabilidade das operações realizadas.

2.5 Rastreabilidade e sistemas de gerenciamento

A rastreabilidade de processos é um elemento fundamental em sistemas de segurança industrial modernos, permitindo identificar responsáveis, horários e condições de execução das atividades. Sistemas digitais de gerenciamento ampliam essa capacidade ao registrar automaticamente eventos e disponibilizar relatórios para auditoria.

Nesse contexto, o BioTrace Lock incorpora um sistema web desenvolvido em PHP e JavaScript, responsável por gerenciar as caixas de bloqueio, usuários autorizados e status de treinamento. Esse sistema permite o monitoramento em tempo real das operações, além do registro histórico das ações, contribuindo para maior controle e segurança operacional.

2.6 Trabalhos correlatos

Para identificar trabalhos relacionados ao desenvolvimento do sistema BioTrace Lock, foi realizada uma busca bibliográfica em bases de dados científicas, como Google

Scholar, IEEE Xplore e ScienceDirect. Foram utilizadas palavras-chave como “Lockout Tagout”, “biometric access control”, “industrial safety”, “embedded systems” e “IoT industrial safety”, considerando publicações recentes e trabalhos clássicos relevantes à área.

Diversos estudos investigam a integração de sistemas embarcados, sensores e mecanismos de autenticação em aplicações de controle e monitoramento. O trabalho de [Al-Kuwari et al. \(2018\)](#) apresenta uma plataforma baseada em Internet das Coisas (IoT) aplicada a ambientes inteligentes, demonstrando a viabilidade do uso de sistemas embarcados para controle seguro de acesso e operação.

Apesar da existência de pesquisas relacionadas à biometria e à automação, observa-se uma lacuna específica quanto à aplicação direta dessas tecnologias aos procedimentos de Lockout/Tagout com rastreabilidade digital. A maioria dos trabalhos encontrados foca apenas no controle de acesso ou no monitoramento remoto, sem integrar bloqueio físico, autenticação biométrica e registro das operações em um sistema único.

Nesse sentido, o presente trabalho diferencia-se ao propor o sistema BioTrace Lock, que integra autenticação biométrica, bloqueio físico, estrutura impressa em 3D e sistema de gerenciamento web, oferecendo uma solução completa para segurança e controle dos processos de bloqueio industrial.

3 Desenvolvimento do Sistema BioTrace Lock

O desenvolvimento do sistema BioTrace Lock foi conduzido de forma incremental, contemplando as etapas de prototipagem eletrônica, modelagem tridimensional da estrutura da caixa, fabricação por meio de manufatura aditiva com seleção de material adequado visando maior resistência mecânica do protótipo, integração entre hardware e software, implementação do sistema embarcado e desenvolvimento de um sistema web responsável pelo monitoramento e gerenciamento das operações de bloqueio.

Por meio dessa abordagem, foi possível realizar uma validação progressiva da solução proposta, cujo foco é aprimorar a segurança de um processo já existente na indústria, proporcionando maior confiabilidade e rastreabilidade das informações ao longo do procedimento de bloqueio. O sistema foi projetado para atender aos requisitos de segurança industrial, permitindo o controle biométrico de acesso às caixas de bloqueio, bem como o monitoramento das operações e da condição de treinamento dos usuários autorizados.

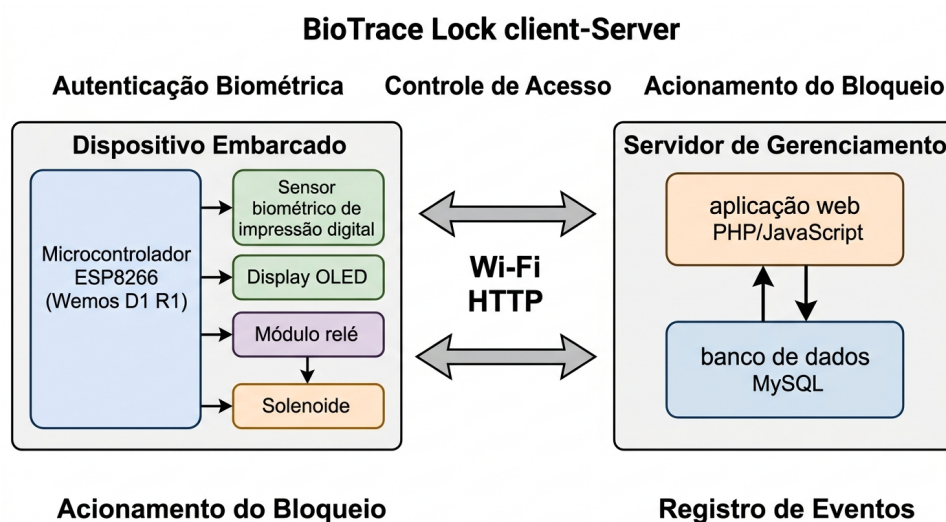
3.1 Arquitetura do Sistema

A solução proposta adota uma arquitetura do tipo cliente–servidor, estruturada em três camadas principais, conforme ilustrado na Figura 11. Essa organização foi definida com o objetivo de promover modularidade, escalabilidade e separação de responsabilidades entre os componentes do sistema.

web desenvolvido em PHP, integrado a um banco de dados relacional, permitindo o armazenamento estruturado e a rastreabilidade completa das operações.

A comunicação entre o dispositivo embarcado e o servidor web é realizada por meio de requisições HTTP via rede Wi-Fi, possibilitando a troca de informações em tempo real. Esse mecanismo permite a sincronização dos dados, a validação das operações e o registro dos eventos no banco de dados, garantindo a integridade e a confiabilidade das informações.

Figura 12 – Arquitetura geral do sistema BioTrace Lock



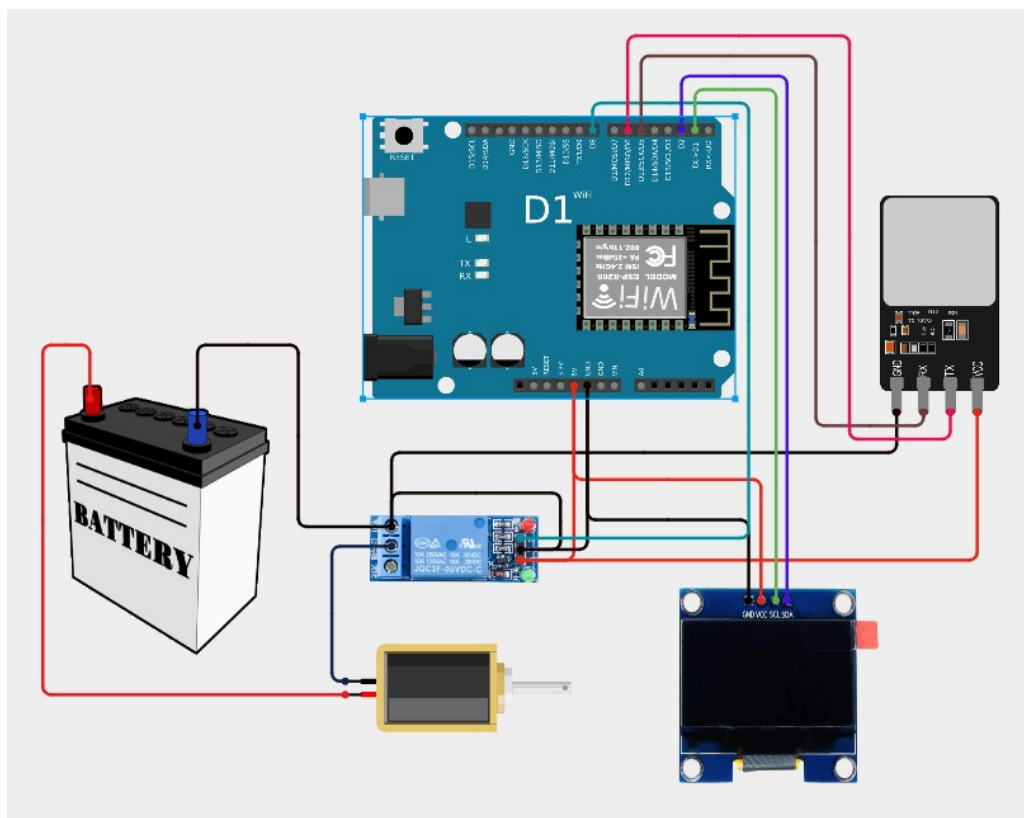
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.2 Desenvolvimento do Hardware

Na etapa inicial do desenvolvimento, realizou-se a montagem do protótipo eletrônico utilizando um microcontrolador do tipo NodeMCU. No entanto, durante a execução dos testes funcionais, foram identificadas instabilidades na comunicação serial e no controle dos periféricos conectados, especialmente no acionamento do módulo relé e na leitura contínua do sensor biométrico, comprometendo a confiabilidade do sistema.

Diante dessas limitações, optou-se pela substituição do NodeMCU pela placa de desenvolvimento Wemos D1 R1. Essa plataforma apresentou maior estabilidade operacional, melhor desempenho na comunicação com o sensor biométrico e maior confiabilidade na integração com o display OLED. A substituição exigiu ajustes no circuito eletrônico e na disposição física dos componentes, conforme ilustrado na Figura 13, resultando em um sistema mais robusto, estável e adequado às exigências da aplicação proposta.

Figura 13 – Diagrama elétrico do sistema BioTrace Lock



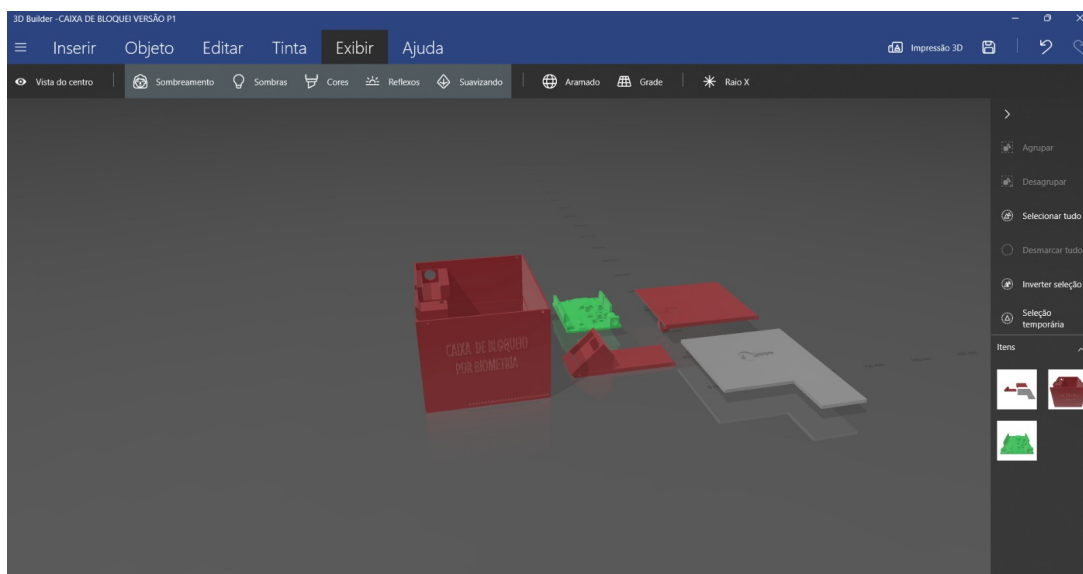
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.3 Modelagem 3D e Construção da Estrutura Física

A estrutura da caixa de bloqueio foi projetada por meio de modelagem tridimensional, com o objetivo de garantir a adequada acomodação dos componentes eletrônicos e assegurar resistência mecânica compatível com aplicações em ambiente industrial. O modelo tridimensional desenvolvido é apresentado na Figura 14.

A modelagem foi realizada no software 3D Builder, no qual foram definidos os compartimentos internos destinados ao microcontrolador, sensor biométrico, display OLED, módulo relé e mecanismo de travamento. O projeto também contemplou aberturas para ventilação, passagens para cabeamento e pontos de fixação, visando facilitar a montagem e manutenção do sistema.

Figura 14 – Modelo 3D da caixa de bloqueio do sistema BioTrace Lock



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Após a modelagem, o modelo foi exportado no formato STL e preparado para impressão por meio do software de fatiamento Anycubic Slicer Next. Nessa etapa, foram definidos parâmetros como altura de camada, densidade de preenchimento e estruturas de suporte, com o objetivo de garantir a qualidade e a integridade da peça produzida.

A fabricação da estrutura foi realizada em uma impressora 3D Anycubic Kobra S1, utilizando filamento ABS. Esse material foi selecionado devido à sua elevada resistência mecânica e térmica quando comparado ao PLA, tornando-o mais adequado para aplicações industriais e para a proteção dos componentes eletrônicos.

A utilização da manufatura aditiva possibilitou a rápida prototipagem da caixa de bloqueio, permitindo ajustes no design e adaptação às necessidades do projeto BioTrace Lock, além de contribuir para a redução de custos e facilitar futuras modificações no equipamento.

3.4 Integração do Sistema Embarcado

O software embarcado foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando a plataforma Arduino IDE. A lógica de controle do sistema foi estruturada visando simplicidade de operação, confiabilidade e baixo tempo de resposta às interações do usuário. Foram implementados dois modos principais de funcionamento:

- modo de cadastro, destinado ao registro de novas impressões digitais;
- modo de operação, responsável pela autenticação dos usuários e pelo controle do mecanismo de bloqueio.

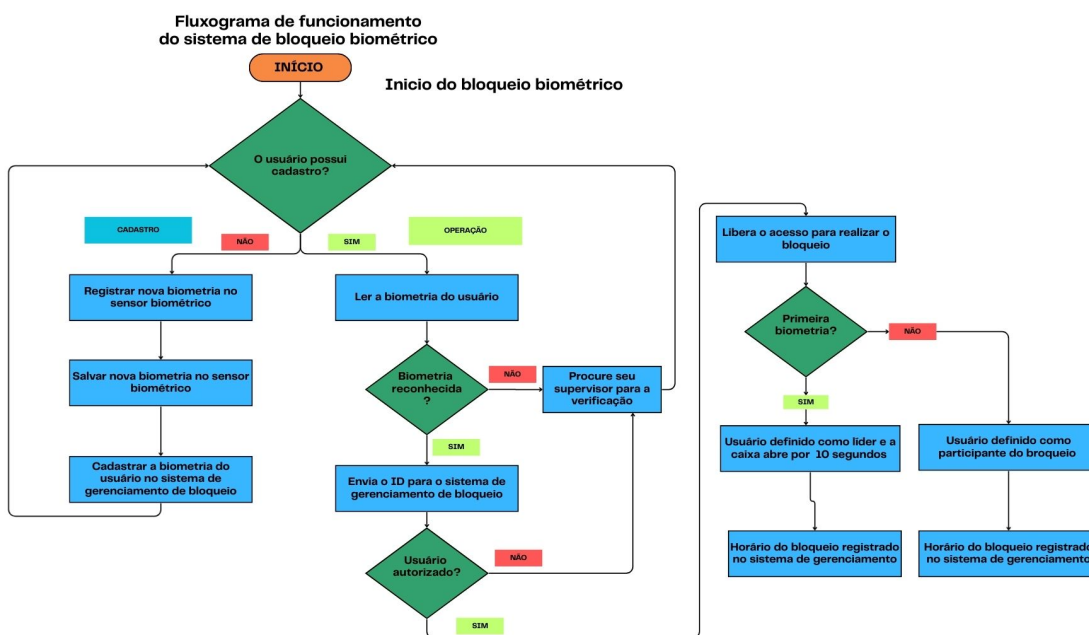
O fluxo de funcionamento do sistema durante o processo de bloqueio é apresentado na Figura 15. Inicialmente, o sistema verifica se o usuário possui cadastro no leitor biométrico. Caso não possua, o sistema exibe uma mensagem orientando o usuário a procurar um supervisor para realização do cadastro. Após a autorização do supervisor, o sistema entra no modo de cadastro, permitindo o registro da biometria diretamente no sensor biométrico e, posteriormente, no sistema de gerenciamento.

Caso o usuário já possua a biometria cadastrada no leitor, o sistema realiza a leitura da impressão digital e verifica se a biometria é reconhecida. Em caso negativo, o acesso é negado, e o usuário é orientado a procurar um supervisor para verificar a existência de cadastro ou possíveis pendências de treinamento que impeçam a execução do bloqueio.

Em caso positivo, o identificador do usuário é enviado ao sistema de gerenciamento para validação de permissões. Após a validação, o sistema libera a abertura da caixa e registra a ação realizada pelo usuário. O primeiro usuário autenticado no processo é automaticamente definido como líder do bloqueio.

O sistema verifica continuamente se o usuário está autorizado a realizar o bloqueio. Quando autorizado, o processo é iniciado, sendo possível diferenciar o usuário líder dos demais participantes. O líder possui permissão para a abertura inicial da caixa por um intervalo de tempo determinado, enquanto os demais participantes são registrados no processo de bloqueio. Todas as ações são armazenadas no sistema, garantindo a rastreabilidade das operações.

Figura 15 – Fluxograma de funcionamento do sistema para bloqueio



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

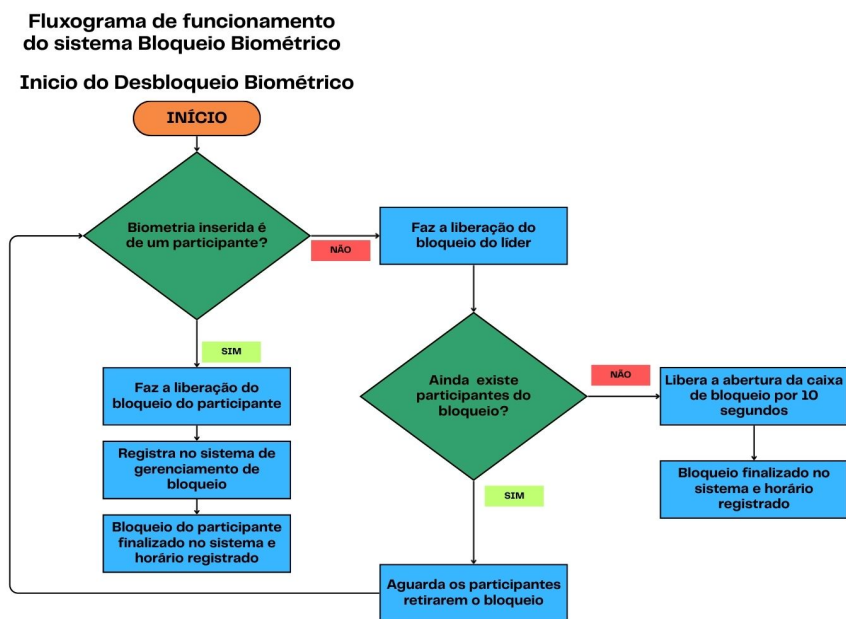
O processo de desbloqueio, ilustrado na Figura 16, inicia-se com a verificação da identidade do usuário por meio da biometria. O sistema identifica se o usuário corresponde a um participante do bloqueio ou ao líder responsável.

Caso o usuário seja um participante, o sistema realiza a liberação individual do bloqueio, registrando o evento no sistema de gerenciamento e marcando o término de sua participação no processo.

No caso do líder, o sistema verifica se ainda existem participantes ativos no bloqueio. Se houver, o sistema permanece em estado de espera até que todos os participantes realizem a liberação.

Quando não há mais participantes ativos, o sistema permite a abertura completa da caixa de bloqueio por um intervalo de tempo determinado, finalizando o processo e registrando o horário de encerramento no sistema de gerenciamento.

Figura 16 – Fluxograma de funcionamento do sistema para desbloqueio



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.5 Desenvolvimento da Interface Web

Para complementar o funcionamento do sistema BioTrace Lock e garantir a rastreabilidade das operações, foi desenvolvido um sistema web de gerenciamento utilizando as linguagens PHP, JavaScript e banco de dados MySQL. Essa interface possibilita o gerenciamento centralizado das caixas de bloqueio, dos usuários autorizados e dos registros de acesso.

A interface de autenticação do sistema, apresentada na Figura 17, é responsável por restringir o acesso ao ambiente administrativo, permitindo que apenas usuários devidamente autorizados realizem operações no sistema.

A aplicação web permite o cadastro e a administração de usuários, incluindo a associação de informações como nome, setor e identificador do dispositivo às credenciais biométricas. O módulo de gerenciamento de usuários, ilustrado na Figura 18, possibilita o cadastro, edição e controle das permissões dos usuários, garantindo que apenas indivíduos autorizados possam operar o sistema.

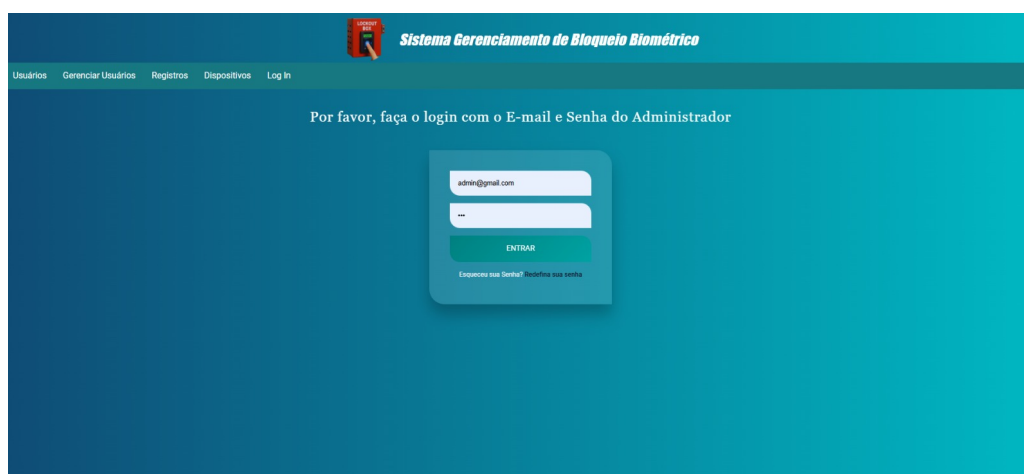
Além disso, o sistema disponibiliza a visualização do histórico completo de autenticações, contendo data, horário e status de cada operação, conforme apresentado na Figura 19. Essa funcionalidade permite a rastreabilidade das ações realizadas, sendo essencial para auditoria e controle de segurança.

A interface de gerenciamento de dispositivos, mostrada na Figura 20, permite o cadastro, identificação e monitoramento das caixas de bloqueio, possibilitando o controle operacional dos dispositivos em campo.

O sistema também permite o monitoramento da condição de treinamento dos usuários. Dessa forma, apenas colaboradores devidamente capacitados podem ser autorizados a realizar operações de bloqueio e desbloqueio, contribuindo diretamente para o aumento da segurança operacional.

A comunicação entre o dispositivo físico e o servidor é realizada por meio de requisições HTTP, possibilitando a validação das permissões de acesso e o registro das ações em tempo real, garantindo a integridade e a confiabilidade das informações.

Figura 17 – Interface web do sistema: Login



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 18 – Interface web do sistema: Gerenciamento de usuários



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 19 – Interface web do sistema: Registros de acesso



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 20 – Interface web do sistema: Gerenciamento de dispositivos



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

3.6 Ajustes no Design do Equipamento

Além das modificações no circuito eletrônico e no sistema embarcado, o design físico da caixa de bloqueio também passou por reformulações para acomodar a nova placa de controle. O layout final, apresentado na Figura 21, foi projetado no software 3D Builder e fabricado por meio de manufatura aditiva utilizando filamento ABS.

O projeto foi dimensionado para acomodar adequadamente a placa Wemos D1 R1, o sensor biométrico, o display OLED e os demais componentes eletrônicos, garantindo organização interna, facilidade de montagem e manutenção do sistema. Adicionalmente, foram incorporadas aberturas para ventilação e passagens para cabeamento, com o objetivo de melhorar a dissipação térmica e aumentar a robustez estrutural do equipamento.

Esses ajustes contribuíram para o aumento da durabilidade do equipamento, para a melhoria da dissipação térmica e para maior confiabilidade operacional do sistema. Tais características são fundamentais para aplicações em ambientes industriais, nos quais o equipamento está sujeito a condições adversas de operação.

Figura 21 – Caixa de bloqueio biométrica finalizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da implementação e dos testes experimentais da Caixa de Bloqueio Biométrica, componente físico integrante do sistema BioTrace Lock desenvolvido neste trabalho. A análise contempla o desempenho do sistema embarcado, da interface web e da integração entre hardware e software, considerando dados coletados durante ensaios funcionais e testes práticos realizados conforme a metodologia descrita no capítulo anterior.

Os testes foram conduzidos com o objetivo de avaliar o funcionamento do sistema BioTrace Lock em condições próximas às de aplicação real, abordando aspectos como a eficiência do reconhecimento biométrico, o tempo de resposta do sistema, a confiabilidade do controle de acesso e a rastreabilidade das operações realizadas.

Para subsidiar a interpretação dos resultados, são utilizados quadros, tabelas e registros visuais que sintetizam os principais achados experimentais. Adicionalmente, são analisadas as respostas do sistema em diferentes cenários de uso, incluindo tentativas de acesso não autorizado, falhas de autenticação e operações completas de bloqueio e desbloqueio.

Os resultados obtidos permitem validar o funcionamento da solução proposta, evidenciando a viabilidade técnica do sistema BioTrace Lock e sua aplicabilidade em contextos educacionais e industriais, especialmente em procedimentos relacionados à segurança operacional e controle de acesso.

4.1 Desempenho do reconhecimento biométrico

Durante os testes funcionais, foram realizadas leituras biométricas envolvendo usuários previamente cadastrados no sistema, bem como tentativas de acesso por usuários não cadastrados. O objetivo principal foi avaliar a taxa de reconhecimento do sistema, além de analisar seu comportamento em cenários de autenticação válida e inválida.

A amostra experimental foi composta por um total de 80 tentativas de leitura biométrica, sendo 50 realizadas com usuários cadastrados e 30 com usuários não cadastrados. As coletas foram distribuídas em diferentes momentos de operação e sob condições variadas de uso, incluindo múltiplas tentativas consecutivas, com o intuito de avaliar a consistência do reconhecimento e a estabilidade do sistema ao longo do tempo.

Os resultados apresentados na Tabela 1 indicam que o sistema atingiu uma taxa de reconhecimento de 96% para usuários previamente cadastrados, evidenciando um desempenho consistente do sensor biométrico utilizado. As falhas observadas estão associadas a

Tabela 1 – Resultados detalhados dos testes de reconhecimento biométrico

Tipo de usuário	Tentativas	Reconhecimentos corretos	Falhas
Usuários cadastrados	50	48	2
Usuários não cadastrados	30	0	30

fatores como posicionamento inadequado do dedo no sensor ou variações na qualidade da leitura, situações comuns em sistemas de reconhecimento biométrico.

Para usuários não cadastrados, foi observada uma taxa de rejeição de 100%, não sendo registrado nenhum acesso indevido. Esse resultado demonstra elevada confiabilidade do sistema no controle de acesso, característica essencial em aplicações voltadas à segurança industrial.

Os resultados obtidos estão em conformidade com estudos correlatos, como os apresentados por Oliveira e Costa (2022), que relatam taxas de reconhecimento superiores a 95% em sistemas embarcados com sensores ópticos de impressão digital. Dessa forma, pode-se afirmar que o sistema BioTrace Lock apresenta desempenho adequado para a aplicação proposta, atendendo aos requisitos de segurança e confiabilidade estabelecidos.

4.2 Tempo de resposta do sistema

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema BioTrace Lock em termos de agilidade operacional, foram realizados testes para mensurar o tempo de resposta nas principais etapas do processo de autenticação e controle de bloqueio.

Os ensaios consideraram o tempo decorrido desde a leitura da impressão digital até a execução da ação correspondente, incluindo validação no sistema e acionamento do mecanismo de bloqueio. Foram realizadas múltiplas medições para cada etapa, permitindo a obtenção de valores médios representativos.

Tabela 2 – Tempo médio de resposta do sistema

Etapas do processo	Tempo médio (s)
Leitura da impressão digital	1,2
Validação no sistema	0,8
Acionamento do mecanismo de bloqueio	0,5
Tempo total do processo	2,5

Para a determinação dos tempos médios apresentados, foi utilizada a média aritmética simples das medições realizadas em cada etapa do processo, conforme a Equação 4.1.

$$T_{m\u00e9dio} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (4.1)$$

onde T_i representa cada tempo medido individualmente e n o número total de medições realizadas.

O tempo total do processo foi obtido pela soma dos tempos médios de cada etapa, conforme a Equação 4.2.

$$T_{total} = T_{leitura} + T_{validacao} + T_{acionamento} \quad (4.2)$$

Substituindo os valores médios obtidos experimentalmente:

$$T_{total} = 1,2 + 0,8 + 0,5 = 2,5 \text{ s} \quad (4.3)$$

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam que o sistema apresenta tempo médio total de resposta de aproximadamente 2,5 segundos para a execução completa do processo de autenticação e acionamento do bloqueio.

Observa-se que a etapa de leitura da impressão digital representa a maior parcela do tempo total, devido ao processamento interno do sensor biométrico e à necessidade de captura adequada da digital. A etapa de validação no sistema inclui a comunicação via requisição HTTP com o servidor, enquanto o acionamento do mecanismo de bloqueio apresenta menor tempo devido à resposta direta do sistema embarcado.

De forma geral, o tempo de resposta obtido é considerado adequado para aplicações industriais, não comprometendo a usabilidade do sistema e garantindo rapidez na execução das operações de bloqueio e desbloqueio. Esse desempenho contribui para a eficiência do processo e para a aceitação do sistema pelos usuários em ambiente real.

4.3 Confiabilidade do controle de acesso

A confiabilidade do controle de acesso foi avaliada por meio da análise do comportamento do sistema em diferentes cenários de uso, incluindo tentativas de acesso não autorizado, leituras inválidas e autenticações consecutivas realizadas em curto intervalo de tempo.

Durante todos os testes realizados, o sistema manteve o bloqueio físico da caixa sempre que a autenticação não foi validada, impedindo o acionamento indevido do relé e garantindo a integridade do mecanismo de segurança.

A Tabela 3 apresenta um conjunto de registros de autenticação válidos obtidos durante os testes, evidenciando o comportamento do sistema em cenários de uso consecutivo por diferentes usuários.

Observa-se que múltiplos usuários realizaram autenticações em intervalos de tempo próximos, sem ocorrência de conflitos, falhas de sincronização ou liberação indevida do

Tabela 3 – Registros de autenticação válida em cenários de uso consecutivo

ID	Usuário	UID Bio	UID Disp.	Data	Entrada	Saída	Intervalo
153	João Pedro	10	5bf2b...e77e	30/01/2026	14:38:02	14:41:20	3 min 18 s
154	Julia Lara	9	5bf2b...e77e	30/01/2026	14:38:39	14:40:59	2 min 20 s
155	Carlos	5	5bf2b...e77e	30/01/2026	14:38:57	14:40:35	1 min 38 s
156	Carlos	5	5bf2b...e77e	30/01/2026	14:43:50	14:44:06	16 s
157	João Pedro	10	5bf2b...e77e	30/01/2026	14:46:56	15:31:51	44 min 55 s
158	Julia Lara	9	5bf2b...e77e	30/01/2026	14:47:12	15:31:38	44 min 26 s
159	Carlos	5	5bf2b...e77e	30/01/2026	15:32:08	15:32:21	13 s

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

mecanismo de bloqueio. Os dados também demonstram que o sistema foi capaz de registrar corretamente os horários de entrada e saída, permitindo o cálculo do tempo de permanência de cada usuário no processo de bloqueio.

Destaca-se ainda a variação nos intervalos de utilização, que vão desde operações rápidas (inferiores a 20 segundos) até períodos mais longos (superiores a 40 minutos), evidenciando a capacidade do sistema de operar de forma estável tanto em interações rápidas quanto em cenários prolongados.

Esse comportamento confirma a confiabilidade e a robustez do sistema BioTrace Lock, reduzindo significativamente a possibilidade de falhas humanas durante procedimentos de bloqueio e liberação de equipamentos. Tal característica é essencial em ambientes industriais, nos quais a segurança operacional depende diretamente do controle rigoroso de acesso e da rastreabilidade das ações realizadas.

4.4 Testes do dispositivo com alunos do SENAI

Com o objetivo de avaliar o desempenho do dispositivo em um ambiente real, bem como seu uso em contexto educacional, foram realizados testes práticos com alunos do SENAI durante atividades laboratoriais supervisionadas. Esses testes tiveram como finalidade analisar a usabilidade do sistema, a clareza do processo de autenticação e a robustez do controle de acesso quando operado por diferentes usuários.

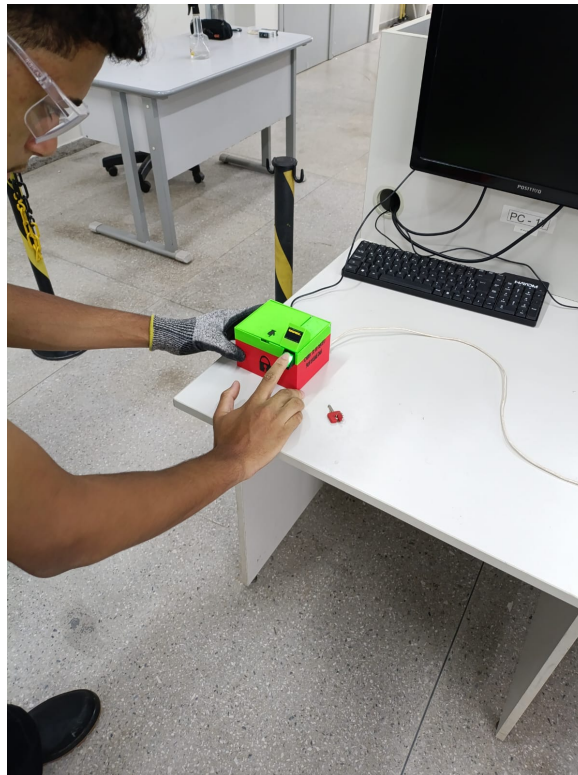
O ambiente de testes e as interações dos usuários com o sistema podem ser observados na Figura 22, na qual são apresentados o processo de autenticação biométrica e a liberação do mecanismo de bloqueio.

Figura 22 – Teste prático do dispositivo de bloqueio biométrico com alunos do SENAI



ID	NOME	MATRÍCULA	UID DA BIOMETRIA	DEPARTAMENTO DO DISPOSITIVO	DATA	INÍCIO	TÉRMINO	FUNÇÃO NO BLOQUEIO	STATUS	STATUS DO TREINAMENTO
159	Calors	185523	5	Elétrica	2026-01-30	15:32:08	15:32:21	Líder	Caixa Desbloqueada	Treinamento OK
158	Julia Lara	1208	9	Elétrica	2026-01-30	14:47:12	15:31:38	Participante	Caixa Desbloqueada	Treinamento OK
157	João Pedro	1210	10	Elétrica	2026-01-30	14:46:56	15:31:51	Líder	Caixa Desbloqueada	Treinamento OK
156	Calors	185523	5	Elétrica	2026-01-30	14:43:50	14:44:06	Líder	Caixa Desbloqueada	Treinamento OK
155	Calors	185523	5	Elétrica	2026-01-30	14:38:57	14:40:35	Participante	Caixa Desbloqueada	Treinamento OK
154	Julia Lara	1208	9	Elétrica	2026-01-30	14:38:39	14:40:59	Participante	Caixa Desbloqueada	Treinamento OK

(a) Autenticação biométrica do usuário



(b) Liberação do mecanismo de bloqueio

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Observa-se, por meio da Figura 23, a execução do procedimento de leitura biométrica, evidenciando a interação direta do usuário com o sensor e a resposta do sistema.

Figura 23 – Execução do procedimento de autenticação biométrica



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Durante os testes, o sistema operou de forma estável, apresentando comportamento coerente com os resultados obtidos nos ensaios funcionais controlados. A interação dos alunos permitiu identificar aspectos relacionados à ergonomia e à facilidade de uso do dispositivo, indicando que o processo de autenticação biométrica é intuitivo e adequado tanto ao contexto educacional quanto ao industrial.

4.5 Discussão dos resultados

De forma geral, os resultados obtidos evidenciam que o sistema BioTrace Lock atende adequadamente aos requisitos funcionais e de segurança definidos para a aplicação de bloqueio com autenticação biométrica. O desempenho do reconhecimento, o tempo de resposta e a confiabilidade do controle de acesso demonstram a viabilidade técnica da solução desenvolvida.

As Figuras 24 a 30 apresentam os registros visuais da validação do protótipo em ambiente real, demonstrando a aplicação prática do sistema em procedimentos de bloqueio e desbloqueio de painéis elétricos.

Figura 24 – Validação do protótipo em painel elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 25 – Aluno realizando o procedimento de bloqueio



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 26 – Bloqueio do painel com cadeado e etiqueta



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 27 – Cadastro do líder para abertura da caixa



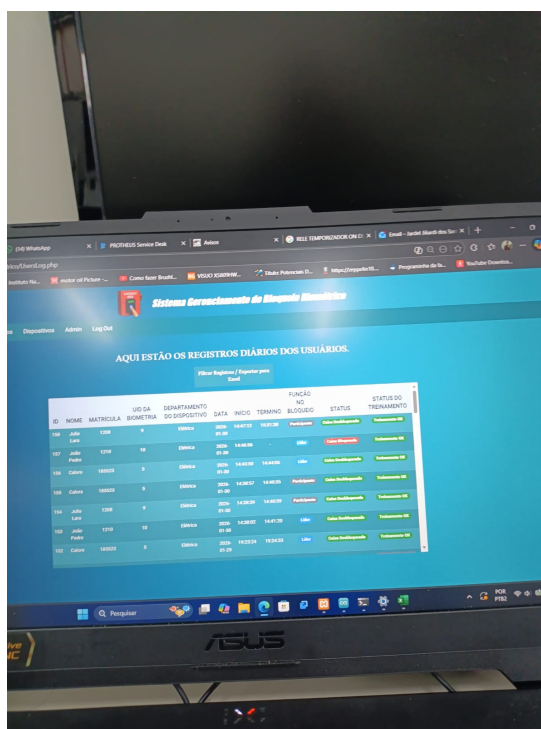
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 28 – Inserção da chave na caixa de bloqueio



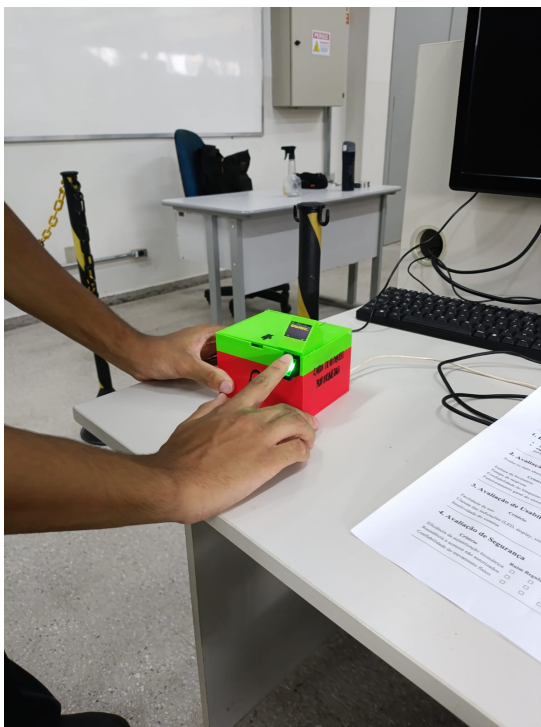
Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 29 – Registro de bloqueio do líder e participante



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

Figura 30 – Procedimento de desbloqueio realizado pelo usuário



Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

5 Conclusão

O desenvolvimento do sistema BioTrace Lock, representado pela Caixa de Bloqueio Biométrica, permitiu atingir os objetivos propostos neste trabalho, demonstrando a viabilidade técnica da integração entre tecnologias biométricas, sistemas embarcados e plataformas web de gerenciamento aplicadas à segurança industrial. A solução desenvolvida configura-se como uma alternativa moderna aos métodos tradicionais de Lockout/Tagout, contribuindo para o aumento da segurança operacional, da confiabilidade dos processos e da rastreabilidade das intervenções realizadas.

O objetivo geral, que consistiu no desenvolvimento e validação de um dispositivo capaz de controlar o bloqueio de forma segura por meio de autenticação biométrica, registro das operações e gerenciamento centralizado, foi plenamente alcançado. O sistema implementado integrou a placa Wemos D1 R1, baseada no microcontrolador ESP8266, um sensor biométrico óptico, um módulo relé para acionamento do mecanismo de bloqueio, um display OLED para interface com o usuário e uma infraestrutura de comunicação com sistema web.

No que se refere aos objetivos específicos, destacam-se a montagem e validação do protótipo eletrônico, a implementação do software embarcado com modos de cadastro e operação, a integração do sistema biométrico para autenticação de usuários e o desenvolvimento de uma aplicação web utilizando PHP e banco de dados MySQL para gerenciamento de usuários, dispositivos e registros de acesso. Adicionalmente, foram realizados testes funcionais e práticos, os quais evidenciaram elevado desempenho do sistema, com taxa de reconhecimento de 96%, tempo médio de resposta de aproximadamente 2,5 segundos e ausência de acessos indevidos durante os ensaios realizados.

A análise dos resultados demonstrou que a solução proposta apresenta vantagens significativas em relação aos métodos tradicionais, especialmente no que diz respeito à prevenção de acessos não autorizados, à identificação inequívoca dos responsáveis pelas operações e à geração automática de registros. Esses fatores contribuem diretamente para a redução de falhas humanas e para o fortalecimento das práticas de segurança, em conformidade com as exigências dos procedimentos industriais.

Como limitações, destaca-se a dependência da qualidade da leitura biométrica, característica inerente ao uso de sensores ópticos, além da influência de fatores ambientais no desempenho do sistema. Ressalta-se ainda que os testes foram realizados predominantemente em ambiente educacional, o que não contempla integralmente as variáveis presentes em ambientes industriais reais.

Diante disso, como trabalhos futuros, propõe-se a ampliação da solução com a

integração a sistemas supervisórios industriais, o aprimoramento da interface web com funcionalidades avançadas de auditoria e geração de relatórios, a utilização de sensores biométricos mais robustos para ambientes adversos e a realização de validações em campo, em ambientes industriais reais.

Em síntese, o sistema BioTrace Lock demonstrou ser uma solução tecnicamente viável e eficaz para a modernização dos procedimentos de bloqueio e etiquetagem. Sua aplicação contribui para o aumento da segurança dos trabalhadores, para a melhoria da gestão de intervenções e para a evolução das práticas de controle de acesso em ambientes industriais e educacionais.

Referências

- AL-KUWARI, A. et al. Smart home automation using iot-based sensing and monitoring platform. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 5, p. 1–8, 2018. Citado na página 34.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade*. Brasília, 2019. Citado na página 32.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos*. Brasília, 2020. Citado na página 33.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP8266EX Datasheet*. Shanghai, 2023. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266ex_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2026. Citado na página 33.
- IYEN, C.; OTHERS. Development of biometric user identification and access control. *European Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 2024. Disponível em: <<https://ejaset.com/index.php/journal/article/view/75>>. Acesso em: 08 fev. 2026. Citado na página 32.
- JAIN, A. K.; ROSS, A.; NANDAKUMAR, K. *Introduction to Biometrics*. New York: Springer, 2016. Citado na página 32.
- MALTONI, D. et al. *Handbook of Fingerprint Recognition*. 2. ed. London: Springer, 2009. Citado na página 32.
- MANUELE, F. A. *Advanced Safety Management: Focusing on z10 and serious injury prevention*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. Citado na página 31.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. *Preventing Worker Deaths from Uncontrolled Release of Hazardous Energy*: Dhhs (niosh) publication no. 2016-101. Atlanta, 2016. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-101/>>. Acesso em: 08 fev. 2026. Citado na página 32.
- OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. *Control of Hazardous Energy (Lockout/Tagout)*: 29 cfr 1910.147. Washington, DC, 2019. Disponível em: <<https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.147>>. Acesso em: 08 fev. 2026. Citado na página 31.
- OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. *The Control of Hazardous Energy*. Washington, DC, 2023. Disponível em: <<https://www.osha.gov/control-hazardous-energy>>. Acesso em: 08 fev. 2026. Citado na página 32.
- RATHA, N. K. et al. A real-time matching system for large fingerprint databases. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 18, n. 8, p. 799–813, 2001. Citado na página 32.

Apêndices

APÊNDICE A – Código-Fonte da Caixa de Bloqueio Biométrica

O código corresponde ao sistema embarcado responsável pelo controle da caixa de bloqueio biométrico, utilizando ESP8266, leitor biométrico, display OLED e comunicação com servidor web. Está disponível online no repositório do GitHub¹.

¹ Disponível em: <<https://github.com/Jardeljj1/Trabalho-de-Conclus-o-de-Curso-TCC-UFOP.git>>

APÊNDICE B – Código-Fonte do Sistema de Gerenciamento do Bloqueio Biométrico

O código-fonte completo do sistema desenvolvido para gerenciar a caixa de bloqueio biométrica está disponível online no repositório do GitHub¹. O repositório inclui todos os arquivos necessários à implementação do sistema, como códigos para o microcontrolador ESP8266, scripts PHP para comunicação com o servidor web, configurações do banco de dados e exemplos de utilização. Além disso, são fornecidas instruções detalhadas para instalação, configuração e execução do sistema, permitindo que pesquisadores e desenvolvedores repliquem ou adaptem a solução para aplicações similares.

¹ Disponível em: <<https://github.com/Jardeljj1/Trabalho-de-Conclus-o-de-Curso-TCC-UFOP.git>>

Anexos

ANEXO A – Outros materiais

As figuras a seguir apresentam os formulários de avaliação preenchidos pelos alunos durante os testes do protótipo da Caixa de Bloqueio Biométrica. Eles fornecem evidências da aplicação prática do sistema e da percepção dos usuários em relação ao desempenho e à usabilidade do protótipo.

As figuras a seguir mostram a versão final da Caixa de Bloqueio Biométrica, destacando sua estrutura, componentes e acabamento.

FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO

CAIXA DE BLOQUEIO POR BIOMETRIA

Avaliador(a): Julia Lara Andrade Silva
 Função/Cargo: Al aprendiz Eletromecânica
 Data: 30/01/2026
 Versão do Protótipo: V. 2.0

1. Identificação do Protótipo

- **Nome do Projeto:** Caixa de Bloqueio por Biometria
- **Objetivo do Protótipo:** Controlar o acesso por meio de autenticação biométrica, garantindo segurança e rastreabilidade.

2. Avaliação Funcional

Avalie os itens abaixo de acordo com o desempenho observado.

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Leitura da biometria	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tempo de resposta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Confiabilidade do bloqueio/desbloqueio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamento geral do sistema	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

3. Avaliação de Usabilidade

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Facilidade de uso	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Clareza das indicações (LED, display, sinais sonoros)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Intuitividade do sistema	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

4. Avaliação de Segurança

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Eficiência da autenticação biométrica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resistência a acessos não autorizados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Confiabilidade do travamento físico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 31 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno A.

5. Avaliação Física e Estrutural

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Qualidade da estrutura	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Acabamento do protótipo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

6. Pontos Positivos

Não necessita de uma quantidade maior de cadeados, usam mais tempo e não chove para ser guardada, não tendo necessidade de fechar; É prático; É fácil de aprender a conteúdos e manusear; É mais seguro, evitando que terceiros tenham acesso a chave;

7. Pontos a Melhorar

Letra simétrica, que demora um pouco para ler e os olhos tem que tirar o olhar e não momentaneamente.

8. Sugestões e Observações Gerais

Nenhuma

9. Avaliação Final

Nota Geral (0 a 10): 9

Aprovado
 Aprovado com ressalvas
 Necessita ajustes

Assinatura do Avaliador(a): Juliana Rosa P. S.

Figura 32 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno A.

FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO

CAIXA DE BLOQUEIO POR BIOMETRIA

Avaliador(a): [Assinatura]
 Função/Cargo: [Assinatura]
 Data: 30/01/2026
 Versão do Protótipo: V.2.0

1. Identificação do Protótipo

- **Nome do Projeto:** Caixa de Bloqueio por Biometria
- **Objetivo do Protótipo:** Controlar o acesso por meio de autenticação biométrica, garantindo segurança e rastreabilidade.

2. Avaliação Funcional

Avalie os itens abaixo de acordo com o desempenho observado.

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Leitura da biometria	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tempo de resposta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Confiabilidade do bloqueio/desbloqueio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Funcionamento geral do sistema	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

3. Avaliação de Usabilidade

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Facilidade de uso	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Clareza das indicações (LED, display, sinais sonoros)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Intuitividade do sistema	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

4. Avaliação de Segurança

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Eficiência da autenticação biométrica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resistência a acessos não autorizados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Confiabilidade do travamento físico	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 33 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno B.

5. Avaliação Física e Estrutural

Critério	Ruim	Regular	Bom	Ótimo
Qualidade da estrutura	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Acabamento do protótipo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

6. Pontos Positivos

*Realização em geral não é necessariamente impecável
qualidade de cada parte, sendo esse um
ponto a ser observado.*

7. Pontos a Melhorar

*A estrutura do geometria. Não preocupante, já
que é o protótipo.*

8. Sugestões e Observações Gerais

9. Avaliação Final

Nota Geral (0 a 10): 9,5

Aprovado
 Aprovado com ressalvas
 Necessita ajustes

Assinatura do Avaliador(a): *[Assinatura]*

Figura 34 – Formulário de avaliação preenchido pelo aluno B.



Figura 35 – Visão frontal da versão final da Caixa de Bloqueio Biométrica.



Figura 36 – Visão lateral da versão final da Caixa de Bloqueio Biométrica.