

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

JONATHAN CHRYSOSTOMO CABRAL BONETTE

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA IOT PARA DISPENSAÇÃO
AUTOMATIZADA E MONITORAMENTO REMOTO DE
MEDICAMENTOS**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

JONATHAN CHRYSOSTOMO CABRAL BONETTE

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA IOT PARA DISPENSAÇÃO
AUTOMATIZADA E MONITORAMENTO REMOTO DE
MEDICAMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro em Engenharia Eletrônica.

Orientador:
Prof. Dr. Robinson Pizzio

FLORIANÓPOLIS, 2026.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Bonette, Jonathan Chrysostomo Cabral
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA IOT PARA DISPENSAÇÃO
AUTOMATIZADA E MONITORAMENTO REMOTO DE MEDICAMENTOS / Jonathan
Chrysostomo Cabral Bonette; orientação de Robinson
Pizzio. - Florianópolis, SC, 2026.
80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico
de Eletrônica.
Inclui Referências.

1. Internet das Coisas. 2. Sistemas embarcados.
3. Dispensação automatizada de medicamentos. 4. Tecnologia
assistiva. 5. Saúde domiciliar. I. Pizzio, Robinson.
II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. DESENVOLVIMENTO
DE UM SISTEMA IOT PARA DISPENSAÇÃO AUTOMATIZADA
E MONITORAMENTO REMOTO DE MEDICAMENTOS.

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA IOT PARA DISPENSAÇÃO AUTOMATIZADA E MONITORAMENTO REMOTO DE MEDICAMENTOS

JONATHAN CHRYSOSTOMO CABRAL BONETTE

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro em Engenharia Eletrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de Julho, 2026.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ROBINSON PIZZIO**
Data: 27/07/2026 12:50:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Robinson Pizzio, Dr.
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **HUGO MARCONDES**
Data: 27/07/2026 19:34:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Hugo Marcondes, M.Sc.
Membro da Banca

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO GIASSI JUNIOR**
Data: 27/07/2026 22:27:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pedro Giassi Junior, Dr.
Membro da Banca

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a Deus, por sua presença constante em cada passo desta caminhada. À minha família, pelo amor e por nunca deixarem de me incentivar nos dias difíceis. Aos professores, pelos ensinamentos, pela paciência e por contribuírem, de diferentes formas, para que este momento fosse possível. E a todos os recomeços que, mesmo sem perceber, me trouxeram até aqui.

RESUMO

O crescimento da população idosa e a necessidade de administração contínua de medicamentos evidenciam desafios relacionados ao cumprimento adequado de regimes terapêuticos, especialmente entre idosos e indivíduos com limitações cognitivas. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado de dispensação de medicamentos baseado em Internet das Coisas (IoT) e sistemas embarcados. O projeto foi concebido com o objetivo de reduzir falhas na administração medicamentosa, como esquecimentos, duplicações de doses e atrasos na retirada do medicamento, por meio da automação, do monitoramento e da rastreabilidade do processo. Para aumentar a confiabilidade da solução, o sistema utiliza uma arquitetura tolerante a falhas que combina sincronização híbrida de tempo, com uso de NTP e do RTC DS3231, uma máquina de estados com mecanismos de temporização assíncrona e conectividade adaptativa por meio de Captive Portal. A rastreabilidade do tratamento é realizada por meio de registros locais em memória Flash, com rotação de logs, integrados a um *bot* do *Telegram* para envio de alertas críticos, confirmações de dispensação e retirada do copo, além da consulta ao histórico de utilização. Espera-se que a solução contribua para a segurança do paciente, a autonomia do usuário e a redução da sobrecarga de cuidadores no ambiente domiciliar.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Sistemas embarcados. Dispensação automatizada de medicamentos. Tecnologia assistiva. Saúde domiciliar.

ABSTRACT

The growth of the elderly population and the need for continuous medication administration highlight challenges related to proper adherence to therapeutic regimens, especially among older adults and individuals with cognitive limitations. In this context, this work presents the development of an automated medication dispensing system based on Internet of Things (IoT) and embedded systems technologies. The project was designed to reduce failures in medication administration, such as missed doses, duplicated doses, and delays in medication retrieval, through automation, monitoring, and process traceability. To improve system reliability, the proposed solution adopts a fault-tolerant architecture combining hybrid time synchronization using NTP and the DS3231 RTC module, a state machine with asynchronous timing mechanisms, and adaptive connectivity through a Captive Portal. Treatment traceability is achieved through local records stored in Flash memory with log rotation, integrated with a Telegram bot for sending critical alerts, dispensing and cup-removal confirmations, and remote access to the usage history. The proposed solution is expected to contribute to patient safety, user autonomy, and the reduction of caregiver burden in home healthcare environments.

Keywords: Internet of Things (IoT). Embedded systems. Automated medication dispensing. Assistive technology. Home healthcare.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arquitetura funcional do sistema proposto	27
Figura 2 - Modelo conceitual inicial do dispenser desenvolvido em papelão	30
Figura 3 - Representações do modelo tridimensional do dispenser: (a) vista isométrica com transparência para visualização dos componentes internos; (b) seção transversal do mecanismo de dispensação; (c) vista superior dos compartimentos de armazenamento; e (d) vista lateral da estrutura.	32
Figura 4 - Diferentes versões do funil, rampa e disco desenvolvidas durante a prototipagem	34
Figura 5 - Protótipo físico impresso com componentes eletromecânicos instalados	36
Figura 6 - Representação da montagem eletrônica do protótipo em protoboard	41
Figura 7 - Protótipo final integrado do sistema de dispensação	60
Figura 8 - Tela de status da interface web com estoques individualizados	64
Figura 9 - Tela de cadastro de horários e seleção do compartimento de medicamento.....	65
Figura 10 - Histórico de eventos registrado e exibido pela interface web	66
Figura 11 - Comando /informacoes executado no bot do Telegram.....	67
Figura 12 - Notificações automáticas de dispensação e atualização de estoque.....	68
Figura 13 - Alerta de não retirada do copo enviado pelo Telegram.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mapeamento e distribuição de pinos do microcontrolador	37
Tabela 2 - Testes funcionais do mecanismo de dispensação e sensores.....	62
Tabela 3 - Estimativa de custo dos materiais utilizados no protótipo	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	<i>Access Point</i> (Ponto de Acesso)
CPS	<i>Cyber-Physical System</i> (Sistema Ciber-Físico)
ESP32	Microcontrolador com conectividade Wi-Fi e Bluetooth
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IR	<i>Infrared</i> (Infravermelho)
NTP	<i>Network Time Protocol</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	12
1.2	Definição do Problema	13
1.3	Objetivo Geral.....	14
1.4	Objetivos Específicos	14
1.5	Estrutura do Trabalho.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	Internet das Coisas Aplicada à Saúde	18
2.2	Tecnologia Assistiva, Adesão Medicamentosa e Cuidado Domiciliar	18
2.3	Sistemas Embarcados e Microcontroladores.....	19
2.3.1	Microcontrolador ESP32	20
2.4	Arquiteturas de Firmware e Máquina de Estados	20
2.5	Sincronização de Tempo e Tolerância a Falhas	21
2.6	Sensoriamento e Atuação Eletromecânica.....	21
2.7	Persistência de Dados em Sistemas Embarcados.....	22
2.8	Comunicação, Webserver Embarcado e Notificações Remotas.....	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Caracterização da Pesquisa.....	25
3.2	Visão Geral da Arquitetura do Sistema	25
3.3	Projeto Mecânico e Fabricação do Protótipo	28
3.3.1	Compatibilidade com diferentes formas de medicamentos	34
3.4	Projeto Eletrônico	37
3.4.1	Unidade Central e Distribuição de Pinos.....	37
3.4.2	Subsistemas de Entrada	38
3.4.3	Subsistemas de Saída e Atuação	39
3.4.4	Barramento I2C e Temporização	40
3.4.5	Considerações de Montagem	40
3.5	Desenvolvimento do Firmware	42
3.5.1	Lógica de Agendamento e Controle de Dois Compartimentos.....	43
3.5.2	Rotina de Dispensação Bidirecional e Validação por Interrupção.....	44
3.5.3	Persistência Individualizada de Estoque e Cronograma	45
3.5.4	Monitoramento de Retirada do Copo e Timeout de Segurança	45
3.5.5	Interface Web, Telegram e Acionamento Manual	46
3.6	Sincronização de Tempo e Operação Offline	47
3.7	Interface Web Embarcada e Conectividade	48
3.8	Persistência de Dados e Auditoria	49
3.9	Sistema de Notificações via <i>Telegram</i>	52
3.9.1	Criação e integração do bot	52
3.9.2	Segurança, destinatários e limitações.....	53
3.10	Procedimentos de Testes.....	56
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	59
4.1	Montagem e Integração do Protótipo Físico.....	59
4.2	Validação Eletromecânica e dos Sensores.....	60
4.3	Interface Web, Estoques e Persistência Local	63
4.4	Notificações Remotas via Telegram	67
4.5	Avaliação Integrada do Sistema	69

4.6	Estimativa de custo e análise de acessibilidade econômica	71
4.7	Síntese dos Resultados e Limitações Observadas.....	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	75

1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias digitais e a crescente integração entre dispositivos inteligentes têm ampliado as possibilidades de aplicação da automação em diferentes áreas da sociedade, incluindo a saúde. Nesse contexto, soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT) e sistemas embarcados vêm sendo empregadas para aumentar a segurança, a eficiência e a acessibilidade de processos tradicionalmente dependentes de intervenção humana. Paralelamente, o envelhecimento populacional e o aumento da incidência de doenças crônicas têm intensificado a necessidade de acompanhamento contínuo da administração medicamentosa. A correta adesão aos tratamentos representa um fator essencial para a eficácia terapêutica, tornando relevante o desenvolvimento de tecnologias capazes de auxiliar pacientes e cuidadores na gestão segura da medicação. Diante desse cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado de dispensação e monitoramento de medicamentos, fundamentado em tecnologias IoT e sistemas embarcados, visando contribuir para a autonomia do paciente e para a redução de falhas na rotina medicamentosa.

1.1 Justificativa

Nas últimas décadas, observa-se um cenário de transição demográfica global caracterizado pelo envelhecimento acelerado da população. No contexto brasileiro, os resultados do Censo Demográfico 2022 demonstram o avanço do envelhecimento populacional. Naquele ano, o país possuía 32.113.490 pessoas com 60 anos ou mais, correspondentes a 15,8% da população. Em 2010, esse grupo etário representava 10,8% da população brasileira, evidenciando o aumento da participação das pessoas idosas na estrutura etária nacional (IBGE, 2023, p. 8). Esse panorama impõe novas demandas à saúde e à rotina familiar, uma vez que a administração contínua e rigorosa de múltiplos medicamentos ao longo do dia torna-se essencial ao tratamento adequado de diversas condições clínicas. Entretanto, a complexidade da administração medicamentosa constitui um desafio significativo para pacientes idosos, indivíduos com limitações cognitivas e seus cuidadores. Fatores como a elevada quantidade de medicamentos diários, a similaridade visual entre embalagens e a necessidade de horários específicos potencializam a ocorrência de falhas, como

esquecimentos, duplicações de doses e ingestão em horários inadequados. Tais intercorrências comprometem a eficácia terapêutica, além de elevarem o risco de internações hospitalares e agravamento dos quadros clínicos. Diante dessa problemática, o desenvolvimento de tecnologias assistivas fundamentadas na Internet das Coisas (IoT) e em sistemas embarcados apresenta-se como uma alternativa viável e de elevado impacto social. A automação do processo de dispensação e organização de medicamentos reduz a dependência da memória humana e contribui para diminuir a sobrecarga física e emocional dos cuidadores. Justifica-se, portanto, a concepção deste projeto não apenas por sua relevância técnica no campo da engenharia e do desenvolvimento de sistemas, mas sobretudo por seu potencial de promover autonomia, segurança do paciente e maior eficiência na gestão da saúde domiciliar.

1.2 Definição do Problema

Apesar dos avanços na medicina e da ampla disponibilidade de tratamentos para doenças crônicas, a eficácia terapêutica permanece relacionada ao cumprimento adequado da rotina medicamentosa. A administração diária de medicamentos envolve fatores como o atendimento aos horários prescritos, a identificação correta das doses e a organização do paciente ou de seu cuidador.

Em ambientes domésticos, métodos tradicionais de organização, como caixas plásticas de separação manual e calendários de controle, estão sujeitos a falhas humanas. O esquecimento ou a duplicação de doses podem comprometer o efeito terapêutico e provocar riscos à saúde. Adicionalmente, cuidadores familiares podem enfrentar sobrecarga decorrente da necessidade de acompanhar presencialmente a administração dos medicamentos, reduzindo a autonomia do paciente e aumentando o esforço associado à rotina de cuidados.

Entre as soluções comerciais existentes encontram-se o Hero Smart Dispenser, que realiza a dispensação automática de medicamentos e utiliza um aplicativo para configuração de horários, envio de lembretes e acompanhamento por cuidadores, e o MedMinder, que combina compartimentos programados, alertas visuais e sonoros e recursos de monitoramento remoto. Esses exemplos demonstram a existência de produtos com diferentes níveis de automação e conectividade

destinados ao auxílio da administração medicamentosa. Entretanto, suas capacidades, arquiteturas, funcionalidades e modelos de serviço diferem do protótipo acadêmico desenvolvido neste trabalho, não sendo possível estabelecer uma equivalência direta entre as soluções (HERO HEALTH, s. d.; MEDMINDER, s. d.).

Além disso, sistemas que dependem de serviços externos para sincronização, registro ou monitoramento remoto podem apresentar limitações durante períodos de indisponibilidade da conexão com a internet. A perda da referência temporal, a interrupção do registro de eventos ou a suspensão das rotinas programadas representam riscos relevantes em aplicações relacionadas à administração contínua de medicamentos.

Diante desse cenário, estabelece-se a seguinte questão norteadora: como desenvolver um sistema automatizado, integrado, resiliente a falhas temporárias de conectividade e com custo acessível de prototipagem, capaz de auxiliar na redução de erros e esquecimentos na rotina medicamentosa de pessoas idosas e pessoas com doenças crônicas no ambiente domiciliar?

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver um sistema IoT integrado para o gerenciamento, a dispensação automatizada e o monitoramento remoto de medicamentos de uso contínuo. A solução é composta por um dispositivo físico automatizado, uma interface web local para configuração e acompanhamento, um sistema de registro de eventos em memória Flash e um canal de notificações por meio do Telegram, com a finalidade de auxiliar pessoas idosas, pessoas com doenças crônicas e seus respectivos cuidadores no ambiente domiciliar.

1.4 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Projetar e modelar, por meio de ferramentas de modelagem e impressão 3D, a estrutura física do *dispenser* e seus mecanismos de

dispensação, incluindo compartimentos, sistema de movimentação, escorregador e recipiente de entrega do medicamento;

- b) Desenvolver e implementar o mecanismo eletromecânico responsável pela dispensação controlada dos medicamentos, integrando o servomotor, o disco giratório, o funil e os canais de condução destinados à seleção e à liberação individual das doses;
- c) Projetar e montar o circuito eletrônico do dispositivo, integrando o microcontrolador ESP32 aos atuadores e sensores responsáveis pela validação da dispensação, confirmação da queda do medicamento e detecção da retirada do recipiente pelo usuário;
- d) Desenvolver o firmware do microcontrolador com uma arquitetura baseada em máquina de estados e mecanismos de temporização assíncrona, permitindo coordenar os atuadores, sensores, alarmes sonoros, sinalizações visuais e o servidor web embarcado;
- e) Implementar um sistema de sincronização híbrida de tempo, utilizando protocolo NTP e módulo RTC DS3231, de modo a garantir a execução autônoma dos cronogramas de dispensação mesmo em cenários de instabilidade ou ausência temporária de conexão com a internet;
- f) Desenvolver um *webserver* embarcado com conectividade Wi-Fi e modo de Ponto de Acesso via *Captive Portal*, permitindo a configuração local do dispositivo, o cadastro de horários programados e a visualização de informações operacionais do sistema;
- g) Implementar um subsistema de auditoria e persistência de dados em memória Flash, por meio do sistema de arquivos *LittleFS*, possibilitando o registro de eventos de dispensação, acionamento do motor, leitura dos sensores, confirmação de retirada e rotação de logs para preservação do hardware;
- h) Implementar um sistema de notificações remotas por meio de *bot* integrado ao *Telegram*, destinado ao envio de alertas críticos, confirmações de retirada, avisos de não administração dos medicamentos e consultas remotas ao histórico de utilização;

- i) Integrar e validar o funcionamento conjunto entre estrutura mecânica, circuito eletrônico, *firmware*, *webserver* embarcado e sistema de notificações, realizando testes de bancada para avaliar a precisão mecânica, a confiabilidade dos sensores, o comportamento diante de interrupções de alimentação, a persistência dos registros e o correto funcionamento do sistema de dispensação.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a apresentar o desenvolvimento lógico da solução proposta.

Neste Capítulo 1 foi contextualizado o tema da transição demográfica e a problemática da gestão de medicamentos de uso contínuo, apresentando a justificativa, a definição do problema e os objetivos gerais e específicos do projeto.

O Capítulo 2 (Fundamentação Teórica) apresenta o embasamento necessário à compreensão do trabalho, abordando conceitos relacionados à Internet das Coisas (IoT), sistemas embarcados, microcontroladores, modelagem e automação de dispositivos, além de aspectos relacionados à adesão medicamentosa e ao cuidado domiciliar.

O Capítulo 3 (Metodologia) detalha os procedimentos, materiais e ferramentas empregados na execução do projeto, contemplando a modelagem e fabricação do protótipo físico, o desenvolvimento do hardware e firmware embarcado, a arquitetura do software e a implementação dos mecanismos de conectividade e monitoramento remoto.

O Capítulo 4 (Desenvolvimento e Resultados) descreve a implementação do sistema proposto, incluindo o dispenser físico, os mecanismos de dispensação, o webserver embarcado, a interface web embarcada, os mecanismos de persistência de dados e o sistema de notificações remotas, apresentando os testes realizados e a análise dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 (Considerações Finais) sintetiza as conclusões do trabalho, avaliando o cumprimento dos objetivos estabelecidos e apresentando sugestões de aprimoramentos e trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos e as tecnologias que embasam o desenvolvimento do sistema de dispensação automatizada de medicamentos. Inicialmente, discute-se o paradigma da Internet das Coisas aplicada à saúde e seu impacto na adesão medicamentosa. Na sequência, são apresentados os fundamentos de sistemas embarcados, arquiteturas de microcontroladores, técnicas de sensoriamento e atuação eletromecânica. Por fim, são abordados os princípios de tolerância a falhas, sincronização de tempo, gerenciamento de armazenamento não volátil e protocolos de comunicação, essenciais para a confiabilidade do dispositivo proposto.

2.1 Internet das Coisas Aplicada à Saúde

A Internet das Coisas (IoT — *Internet of Things*) refere-se a uma rede de objetos físicos incorporados a sensores, software e outras tecnologias com o propósito de conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet (BAHGA; MADiSETTI, 2015). No contexto médico e assistencial, essa vertente é frequentemente denominada Internet of Medical Things (IoMT) ou e-Health.

A aplicação da IoT na saúde busca auxiliar os métodos tradicionais de cuidado por meio de sistemas automatizados de monitoramento. Em cenários domiciliares, dispositivos IoT permitem que parâmetros comportamentais — como a adesão a uma rotina de medicação — sejam mensurados, registrados e transmitidos a familiares e profissionais de saúde. Essa conectividade possibilita mecanismos preventivos de acompanhamento, contribuindo para a redução de riscos associados a falhas humanas e para a promoção da autonomia do paciente (BAHGA; MADiSETTI, 2015).

2.2 Tecnologia Assistiva, Adesão Medicamentosa e Cuidado Domiciliar

A tecnologia assistiva engloba recursos, equipamentos, produtos, metodologias, estratégias, práticas e serviços desenvolvidos com o objetivo de promover funcionalidade, autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão

social de pessoas com deficiência, mobilidade reduzida ou limitações funcionais (BRASIL, 2009). No contexto do envelhecimento populacional, essas tecnologias assumem papel relevante no cuidado domiciliar, ambiente em que parte da supervisão cotidiana do tratamento passa a depender da autogestão do paciente ou do auxílio de familiares e cuidadores.

Um dos principais desafios do cuidado domiciliar é a adesão medicamentosa. A Organização Mundial da Saúde define adesão como o grau em que o comportamento de uma pessoa corresponde às recomendações acordadas com um profissional de saúde (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2003). Em pacientes idosos, a polifarmácia, caracterizada pelo uso simultâneo de múltiplos medicamentos, associada a limitações cognitivas, alterações funcionais e complexidade dos regimes terapêuticos, pode elevar os índices de não adesão e aumentar o risco de eventos adversos (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2019). Erros de omissão, como esquecimentos, ou duplicação de doses estão entre as falhas que podem comprometer a segurança do tratamento.

Nesse contexto, sistemas automatizados de dispensação podem ser compreendidos como recursos de tecnologia assistiva, uma vez que auxiliam na organização da rotina medicamentosa e reduzem a dependência exclusiva da memória do paciente ou do cuidador. Ao emitir alertas programados, controlar a liberação das doses e registrar eventos de utilização, esses dispositivos contribuem para minimizar erros de administração e reduzir a sobrecarga associada ao cuidado domiciliar.

2.3 Sistemas Embarcados e Microcontroladores

Um sistema embarcado é um sistema computacional dedicado, projetado para executar funções específicas dentro de um produto ou aplicação, geralmente sujeito a restrições de tempo de resposta, consumo de energia, custo e espaço físico (MARWEDEL, 2021). Diferentemente de computadores de uso geral, os sistemas embarcados são integrados a dispositivos físicos e interagem diretamente com o ambiente externo por meio de periféricos de entrada, como sensores, e de saída, como atuadores. Essa característica torna tais sistemas adequados para aplicações

de automação, monitoramento e controle, especialmente em dispositivos que exigem operação contínua e resposta confiável a eventos externos.

2.3.1 Microcontrolador ESP32

No centro do projeto proposto encontra-se o microcontrolador ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems. Essa arquitetura destaca-se por integrar conectividade sem fio Wi-Fi e Bluetooth em um mesmo sistema em chip, baseado em processador dual-core Xtensa LX6 de 32 bits, com frequência de operação de até 240 MHz (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024). A presença de periféricos como conversores analógico-digitais (ADC), interfaces de comunicação serial I2C, SPI e UART, além de recursos para geração de sinais PWM (Pulse Width Modulation), torna o ESP32 uma plataforma adequada para o controle integrado de sistemas ciber-físicos, especialmente em aplicações que envolvem sensoriamento, atuação eletromecânica e conectividade IoT.

2.4 Arquiteturas de Firmware e Máquina de Estados

Em sistemas embarcados, a arquitetura do firmware deve ser definida de acordo com a natureza da aplicação e com seus requisitos de temporização, processamento e resposta a eventos. Abordagens lineares e bloqueantes podem ser adequadas em sistemas mais simples, nos quais as tarefas são executadas sequencialmente e não há necessidade de atender diferentes eventos durante a execução de uma operação. Entretanto, em aplicações que envolvem leitura contínua de sensores, acionamentos temporizados e comunicação em rede, períodos prolongados de bloqueio podem atrasar o tratamento de eventos e reduzir a capacidade de resposta do sistema (BARR; MASSA, 2006).

Considerando os requisitos do sistema desenvolvido neste trabalho, adotou-se uma arquitetura baseada em Máquina de Estados Finitos (FSM — Finite State Machine), associada a mecanismos de temporização assíncrona. Nessa abordagem, o processador avalia ciclicamente o estado atual do equipamento e realiza transições entre estados, como “aguardando dose”, “dispensando medicamento” e “aguardando retirada”, sem interromper por longos períodos a

execução das demais rotinas. Essa organização permite coordenar a leitura dos sensores, o controle do servomotor, os alertas sonoros e visuais, o processamento das requisições do servidor web embarcado e a comunicação remota.

2.5 Sincronização de Tempo e Tolerância a Falhas

A confiabilidade do agendamento de eventos é um requisito crítico em sistemas automatizados de administração medicamentosa. O atraso ou a supressão de uma dose devido a falhas sistêmicas pode comprometer a terapia do usuário. Dispositivos IoT frequentemente recorrem ao protocolo NTP (*Network Time Protocol*), utilizado para sincronizar relógios de sistemas computacionais por meio de servidores distribuídos na internet (MILLS et al., 2010). Contudo, a dependência exclusiva de sincronização via rede introduz um ponto único de falha, uma vez que a indisponibilidade da conexão local pode impedir a atualização da referência temporal.

Para aumentar a tolerância a falhas, pode-se adotar uma abordagem híbrida de sincronização de tempo. A implementação de um módulo RTC (Real-Time Clock) externo, como o DS3231, operando por meio do barramento I2C, permite manter uma referência temporal local independente da conexão com a internet. O DS3231 possui oscilador compensado por temperatura (TCXO), entrada para bateria de backup e capacidade de manter a contagem de tempo quando a alimentação principal é interrompida (ANALOG DEVICES, 2015). Dessa forma, a sincronização via NTP pode ser utilizada como mecanismo de ajuste inicial ou de recalibração, enquanto o RTC fornece a base temporal para a execução autônoma dos cronogramas em cenários de instabilidade ou ausência temporária de Wi-Fi. No protótipo desenvolvido neste trabalho, o ajuste pela rede foi realizado durante a inicialização do dispositivo.

2.6 Sensoriamento e Atuação Eletromecânica

A conversão da lógica de software em ações físicas requer a especificação adequada de atuadores e sensores. Para o controle mecânico da dispensação, podem ser empregados servomotores, que se diferenciam de motores de corrente contínua convencionais por incorporarem internamente um sistema de controle de posição. O ângulo de rotação do eixo é determinado por sinais de modulação por largura de pulso,

conhecidos como PWM (Pulse Width Modulation), enviados pelo microcontrolador, permitindo o controle preciso do posicionamento de engrenagens, gavetas ou mecanismos de liberação de medicamentos (BOLTON, 2015).

Para a validação da dispensação, podem ser utilizados sensores ópticos do tipo barreira, também denominados breakbeam. Esses sensores são constituídos por um emissor de radiação infravermelha e um receptor posicionados em lados opostos da região monitorada. Enquanto o feixe emitido alcança o receptor, a saída permanece em determinado estado lógico; quando um objeto opaco à radiação infravermelha interrompe o feixe, o receptor altera seu sinal de saída, possibilitando a detecção do evento por meio de uma entrada digital do microcontrolador. No contexto dos dispensadores automatizados, esse princípio permite identificar a passagem do medicamento pelo canal de entrega e fornecer ao firmware uma confirmação da liberação da dose (ADAFRUIT INDUSTRIES, 2024). Adicionalmente, chaves mecânicas do tipo micro switch podem ser utilizadas para identificar a presença ou a retirada do recipiente coletor, contribuindo para a realimentação da máquina de estados e para a confirmação das etapas do processo de dispensação (FRADEN, 2016).

2.7 Persistência de Dados em Sistemas Embarcados

O registro histórico de eventos, também denominado auditoria, é fundamental para acompanhar a execução das rotinas de administração medicamentosa e permitir a rastreabilidade das ações realizadas pelo sistema. Em sistemas embarcados, o armazenamento não volátil é frequentemente realizado em memória Flash, tecnologia que apresenta limitações físicas relacionadas ao número máximo de ciclos de apagamento e gravação. Dessa forma, operações frequentes de escrita, especialmente quando concentradas em regiões específicas da memória, podem acelerar o desgaste do dispositivo de armazenamento. Além disso, determinadas operações em sistemas de arquivos podem gerar escritas adicionais em relação ao volume de dados originalmente solicitado, fenômeno conhecido como *write amplification* (GAL; TOLEDO, 2005).

Para reduzir esses efeitos, podem ser utilizados sistemas de arquivos projetados para ambientes embarcados, como o LittleFS. Esse sistema foi

desenvolvido para operar em memórias Flash de microcontroladores, incorporando recursos como tolerância a falhas de energia e mecanismos de nivelamento de desgaste (*wear leveling*), que distribuem as operações de escrita ao longo da memória disponível. Associada a isso, a estratégia de rotação de logs (*log rotation*) pode ser empregada na camada de aplicação. Nessa técnica, o firmware monitora o tamanho do arquivo de registro e, ao atingir um limiar predefinido, preserva o arquivo anterior como histórico e inicia um novo arquivo para escrita sequencial. Essa abordagem contribui para organizar os registros, limitar o crescimento dos arquivos e reduzir a concentração de escritas em uma única região da memória (ARM LIMITED, 2026).

2.8 Comunicação, Webserver Embarcado e Notificações Remotas

A Interface Humano-Máquina (IHM) em sistemas IoT pode ser implementada por meio de interfaces digitais acessíveis em navegadores, reduzindo a necessidade de displays físicos dedicados no dispositivo. Nesse contexto, o ESP32 pode atuar como um servidor web embarcado, processando requisições HTTP e disponibilizando páginas ou painéis de controle em HTML, CSS e *JavaScript* para configuração e acompanhamento do sistema. O protocolo HTTP define métodos de requisição utilizados para indicar a ação esperada sobre determinado recurso, como consulta, envio ou atualização de dados (MOZILLA, 2025). Em cenários nos quais o dispositivo não consegue se conectar ao roteador principal, pode-se utilizar o modo Access Point (AP), no qual o próprio ESP32 cria uma rede local para permitir o acesso direto do usuário. Associado a esse modo, o *Captive Portal* possibilita a abertura de uma interface de configuração para inserção ou atualização das credenciais de rede, dispensando a reprogramação do firmware (ESPRESSIF SYSTEMS, 2026).

A notificação de eventos críticos aos cuidadores pode ser realizada por meio da integração com a API de *Bots* do *Telegram*. Essa API consiste em uma interface baseada em requisições HTTPS, por meio da qual uma aplicação pode enviar comandos aos servidores do *Telegram* e receber respostas estruturadas em formato JSON. Cada *bot* é identificado por um token de autenticação, utilizado nas requisições para consultar mensagens, enviar notificações e executar outras operações disponibilizadas pela plataforma (TELEGRAM, 2026).

Para o recebimento de mensagens, a plataforma disponibiliza dois mecanismos mutuamente exclusivos: o uso de *webhooks* e o método *getUpdates*. No primeiro, os servidores do *Telegram* enviam uma requisição HTTPS para um endereço previamente configurado sempre que ocorre um novo evento. No segundo, a própria aplicação consulta periodicamente os servidores da plataforma em busca de atualizações pendentes. Essas atualizações são retornadas como objetos do tipo *Update*, que podem conter o texto recebido, o identificador da conversa, informações do remetente e outros dados associados à mensagem. O parâmetro *offset* indica a partir de qual atualização a consulta deve continuar, permitindo confirmar as mensagens já processadas e evitar que sejam tratadas repetidamente.

No sistema desenvolvido, o ESP32 utiliza o método *getUpdates* por meio da biblioteca *UniversalTelegramBot*. Essa abordagem foi selecionada porque permite que o próprio dispositivo inicie as conexões de saída com os servidores do *Telegram*, dispensando a manutenção de um servidor público e de uma porta de entrada acessível externamente. A cada dois segundos, o firmware consulta as atualizações posteriores à última mensagem processada por meio da chamada *bot.getUpdates(bot.last_message_received + 1)*. As mensagens retornadas são armazenadas pela biblioteca na estrutura *bot.messages*, da qual são extraídos o texto e o identificador *chat_id*. O identificador é comparado com o *tutor_id* previamente cadastrado; caso seja autorizado, o firmware interpreta comandos como */start*, */informacoes*, */historico* e */debug*. As respostas aos comandos e os alertas gerados automaticamente pelo dispositivo são enviados ao cuidador por meio do método *sendMessage*.

O fluxo de comunicação ocorre, portanto, da seguinte forma: o cuidador envia um comando pelo aplicativo *Telegram*; a mensagem é armazenada nos servidores da plataforma; o ESP32 consulta as atualizações pendentes; o firmware valida o identificador da conversa e processa o comando; por fim, a resposta é enviada novamente pela API e apresentada ao cuidador. Esse modelo também permite o caminho inverso, no qual o próprio dispositivo inicia o envio de notificações após eventos como dispensação bem-sucedida, falha mecânica ou ausência de retirada do copo.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do sistema automatizado de dispensação e monitoramento remoto de medicamentos. São descritas as etapas de concepção da arquitetura geral, modelagem e fabricação do protótipo físico, desenvolvimento do circuito eletrônico, implementação do firmware embarcado, configuração dos mecanismos de conectividade, persistência de dados e notificações remotas. Por fim, são apresentados os critérios e procedimentos utilizados para a validação funcional do sistema por meio de testes de bancada.

3.1 Caracterização da Pesquisa

Do ponto de vista de sua natureza, este trabalho classifica-se como uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos voltados à aplicação prática na solução de um problema específico: as dificuldades de adesão e os erros na administração de medicamentos no cuidado domiciliar.

Em relação aos seus objetivos, a pesquisa possui caráter exploratório e tecnológico, uma vez que envolve a concepção, o desenvolvimento e a integração de sistemas mecânicos, eletrônicos e computacionais. Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa experimental, fundamentada na construção e avaliação de um protótipo funcional de dispensação automatizada de medicamentos. O desenvolvimento do protótipo seguiu uma abordagem iterativa e incremental, permitindo a validação progressiva dos módulos mecânico, eletrônico e lógico antes da consolidação do sistema final.

3.2 Visão Geral da Arquitetura do Sistema

Para atender aos requisitos de automação, resiliência e conectividade, o sistema foi concebido a partir de uma arquitetura modular, dividida em três camadas principais: Estrutura Física e Sensoriamento, Unidade de Processamento e Controle, e Camada de Aplicação e Conectividade.

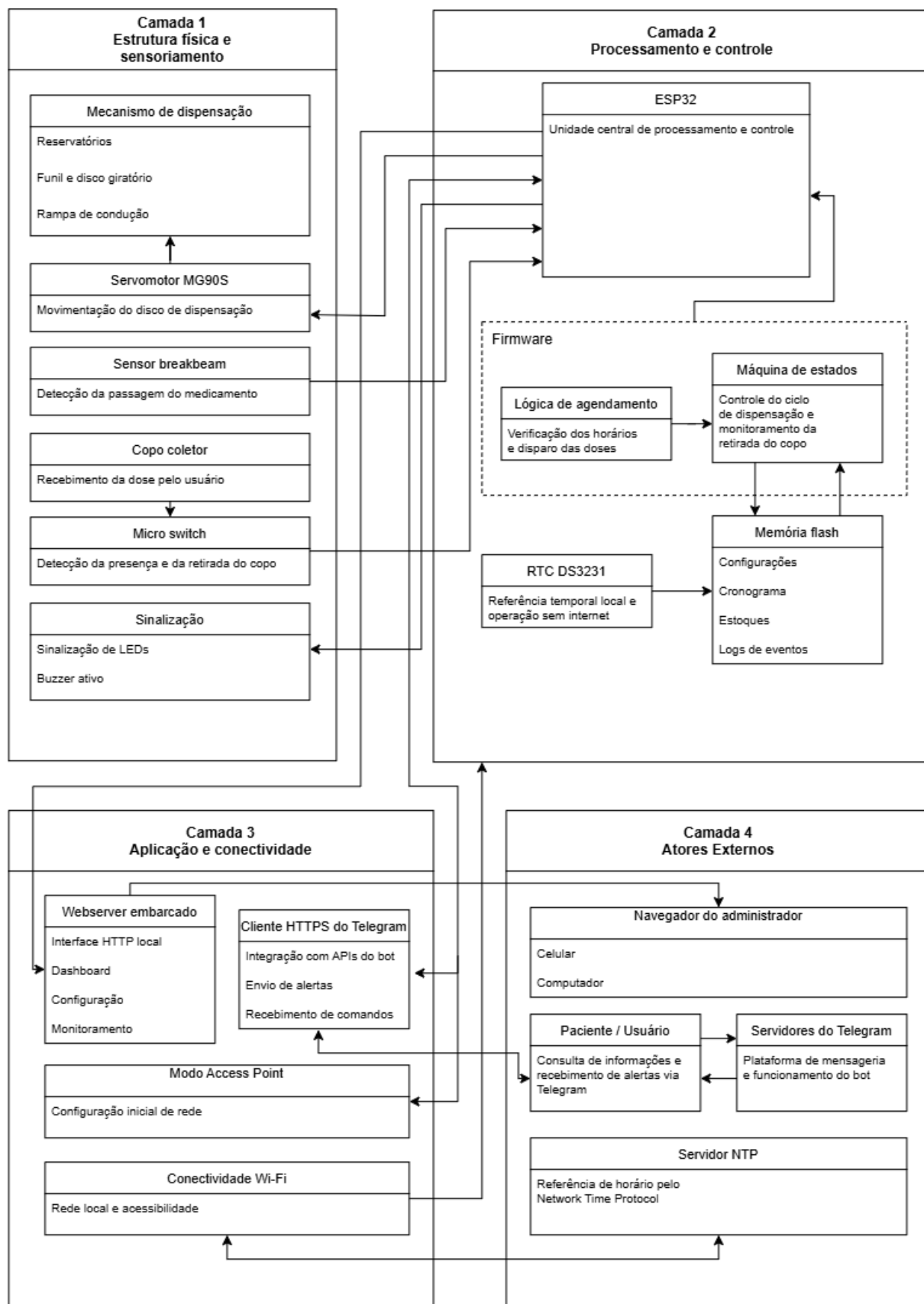
A Figura 1 apresenta a arquitetura funcional do sistema proposto, organizada em três camadas principais e complementada pelos atores e serviços externos. A Camada 1 reúne a estrutura física e os elementos de sensoriamento e atuação, incluindo o mecanismo de dispensação, o servomotor, o sensor óptico breakbeam, o micro switch do copo coletor e os dispositivos de sinalização local. Esses componentes são responsáveis pela movimentação do mecanismo, pela detecção da passagem do medicamento, pela identificação da presença ou retirada do copo e pela comunicação sonora e visual com o usuário.

A Camada 2 corresponde ao processamento e controle do sistema, centralizados no microcontrolador ESP32. Nessa camada são executadas a lógica de agendamento das doses e a máquina de estados responsável por coordenar o ciclo de dispensação e o monitoramento da retirada do copo. O ESP32 também realiza a leitura e o ajuste da referência temporal fornecida pelo módulo RTC DS3231, além de gerenciar as configurações, os cronogramas, os estoques e os registros de eventos armazenados na memória Flash por meio do sistema de arquivos LittleFS.

A Camada 3 contempla os recursos de aplicação e conectividade executados pelo dispositivo, incluindo o servidor web embarcado, a interface de configuração local, a comunicação Wi-Fi e o cliente HTTPS utilizado na integração com a API de Bots do Telegram. Esses recursos permitem o acesso ao painel de configuração e monitoramento por meio de um navegador, a sincronização temporal com um servidor NTP e a troca de mensagens entre o dispositivo e o cuidador.

Os atores e serviços externos representam o paciente, o administrador, o cuidador, os servidores do Telegram e o servidor NTP. As conexões apresentadas na figura distinguem os comandos enviados aos atuadores, os sinais e eventos provenientes dos sensores, a comunicação bidirecional de dados, as transmissões realizadas pela rede e as interações físicas relacionadas à dispensação e à retirada do medicamento.

Figura 1 – Arquitetura funcional do sistema proposto



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Camada de Estrutura Física e Sensoriamento compreende o chassi do dispenser, modelado em três dimensões, e os componentes eletromecânicos que interagem diretamente com o ambiente e com o usuário. Essa camada inclui o servomotor responsável pela liberação controlada do medicamento, o sensor óptico infravermelho (IR) posicionado na rampa de queda para validação da dispensação e a chave mecânica de fim de curso, do tipo micro switch, responsável por detectar a presença e a retirada do copo coletor.

A Unidade de Processamento e Controle é centralizada no microcontrolador ESP32, responsável pela coordenação das funções principais do sistema. Essa camada executa o firmware desenvolvido em C++, estruturado com base em uma máquina de estados com mecanismos de temporização assíncrona. O microcontrolador interpreta os sinais provenientes dos sensores, aciona o mecanismo de dispensação, controla as sinalizações sonoras e visuais, e gerencia o módulo RTC DS3231 por meio do barramento I2C para manutenção da base de tempo local. Além disso, essa unidade contempla o subsistema de persistência de dados, responsável pelo armazenamento de configurações e registros de eventos na memória Flash, utilizando o sistema de arquivos *LittleFS* e mecanismos de rotação de logs.

Por fim, a Camada de Aplicação e Conectividade gerencia a comunicação externa do dispositivo. Essa camada é composta por um servidor web embarcado, capaz de operar conectado à rede local ou em modo de Ponto de Acesso com *Captive Portal*, permitindo a configuração do dispositivo e o cadastro de cronogramas de dispensação por meio de uma interface web. Paralelamente, o sistema implementa um cliente HTTPS para comunicação com a API do *Telegram*, possibilitando o envio de alertas críticos, confirmações de retirada e consultas remotas ao histórico de utilização por parte dos cuidadores.

3.3 Projeto Mecânico e Fabricação do Protótipo

O projeto mecânico do dispositivo foi definido a partir de requisitos funcionais e construtivos relacionados ao processo de dispensação. Entre os principais requisitos estabelecidos estavam o armazenamento dos medicamentos em compartimentos independentes, a liberação individual de uma dose por acionamento, a condução do medicamento até o copo coletor, a passagem da dose pela região do

sensor óptico para validação da dispensação e o posicionamento dos componentes eletromecânicos sem interferência no movimento do mecanismo.

Com base nesses requisitos, a estrutura física do *dispenser* foi projetada para integrar os reservatórios de medicamentos, o mecanismo de movimentação e liberação, a rampa de condução, o copo coletor e os alojamentos destinados aos sensores e atuadores responsáveis pela supervisão do processo.

Antes da modelagem tridimensional, foi construído um modelo conceitual preliminar em papelão, utilizado para avaliar a organização espacial dos elementos do dispenser e o percurso inicialmente previsto para o medicamento. Nessa etapa, foram analisadas a posição aproximada dos compartimentos, a região destinada ao mecanismo de liberação, a condução da dose e a localização do copo coletor.

Embora não apresentasse dimensões ou mecanismos suficientemente precisos para a realização de ensaios funcionais, o modelo preliminar auxiliou na identificação de limitações relacionadas ao aproveitamento do espaço e à disposição dos componentes. A partir dessas observações, o conceito foi transferido para o ambiente CAD, no qual as geometrias do reservatório, do funil, do disco de dispensação, da rampa e dos alojamentos dos componentes eletromecânicos puderam ser desenvolvidas com maior precisão.

Figura 2 - Modelo conceitual inicial do dispenser desenvolvido em papelão



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

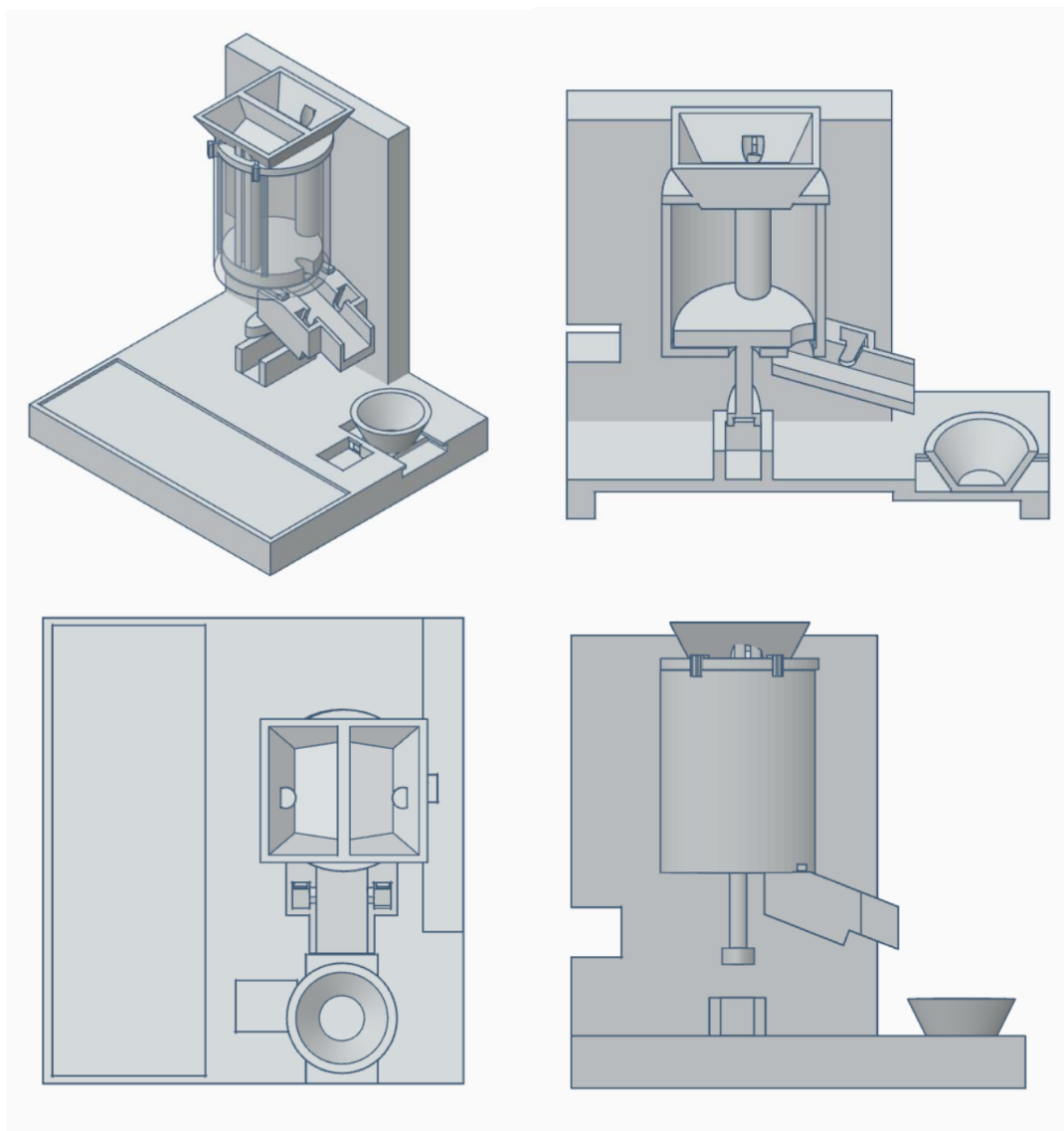
A modelagem tridimensional das peças foi realizada por meio de ferramentas de Desenho Assistido por Computador (CAD), utilizando a plataforma *Tinkercad* para o desenvolvimento das geometrias funcionais. O modelo contemplou a criação do reservatório de armazenamento dos medicamentos, do funil de direcionamento, da região de atuação do mecanismo de dispensação, da rampa de condução e do berço inferior de sustentação do copo coletor. Também foram previstos alojamentos para os sensores e suportes estruturais para os componentes eletrônicos e eletromecânicos.

A Figura 3 apresenta quatro representações complementares do modelo tridimensional do *dispenser*. A vista isométrica com transparência permite observar a organização interna do dispositivo, incluindo os dois compartimentos destinados ao

armazenamento dos medicamentos, o mecanismo de liberação, a rampa de condução e o copo coletor. Cada compartimento está associado ao respectivo canal de dispensação, permitindo que o mecanismo direcione a liberação do medicamento de acordo com o sentido de movimentação selecionado.

A seção transversal evidencia a disposição interna do reservatório, do disco giratório e da região de saída da dose. Após a liberação, o medicamento é conduzido pela rampa até o copo coletor. As vistas superior e lateral complementam a representação, mostrando, respectivamente, a divisão dos compartimentos e o posicionamento relativo dos elementos ao longo da estrutura. Em conjunto, essas vistas facilitam a compreensão do funcionamento mecânico e da organização espacial dos componentes do *dispenser*.

Figura 3 - Representações do modelo tridimensional do dispenser: (a) vista isométrica com transparência para visualização dos componentes internos; (b) seção transversal do mecanismo de dispensação; (c) vista superior dos compartimentos de armazenamento; e (d) vista lateral da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a fabricação das peças, foi adotada a tecnologia de impressão 3D por Modelagem por Fusão e Deposição (FDM — Fused Deposition Modeling). A escolha dessa técnica justifica-se pelo baixo custo de fabricação, pela ampla disponibilidade dos equipamentos e pela possibilidade de realizar ajustes geométricos e dimensionais de forma iterativa durante o desenvolvimento do protótipo. As peças foram manufaturadas em filamento PLA, material comumente empregado em prototipagem devido à facilidade de impressão, à rigidez adequada e à estabilidade dimensional em aplicações de baixa carga mecânica.

O desenvolvimento do mecanismo de dispensação ocorreu de forma iterativa, por meio de sucessivas etapas de modelagem, impressão e avaliação funcional. Em cada etapa, os problemas identificados durante a montagem ou a passagem dos medicamentos foram utilizados como referência para a revisão das geometrias em ambiente CAD. Os principais critérios considerados nesse processo foram a liberação individual da dose, a redução do risco de travamento, o livre movimento das partes móveis, a integração com os sensores e a possibilidade de selecionar medicamentos armazenados em dois compartimentos independentes.

Nas primeiras versões impressas, foram observadas interferências entre a estrutura, os elementos de condução do medicamento e os alojamentos destinados aos sensores, especialmente nas regiões do funil e da rampa. Essas interferências dificultavam o encaixe dos componentes e o posicionamento adequado da região de detecção da passagem da dose. Para possibilitar a avaliação inicial do conceito, foram realizadas correções provisórias, como a remoção localizada de material e o uso de fixações temporárias. Embora essas medidas tenham permitido a montagem preliminar, elas evidenciaram a necessidade de revisão do modelo tridimensional.

A partir das limitações observadas, foram ampliadas as folgas de montagem, reposicionados os alojamentos dos sensores e modificadas as geometrias do funil e da rampa. O funil foi ajustado para direcionar os medicamentos à região de liberação e reduzir a ocorrência de pontos de retenção. A rampa, por sua vez, foi modificada para conduzir a dose até o copo coletor e garantir que o medicamento atravessasse a região de detecção do sensor óptico breakbeam.

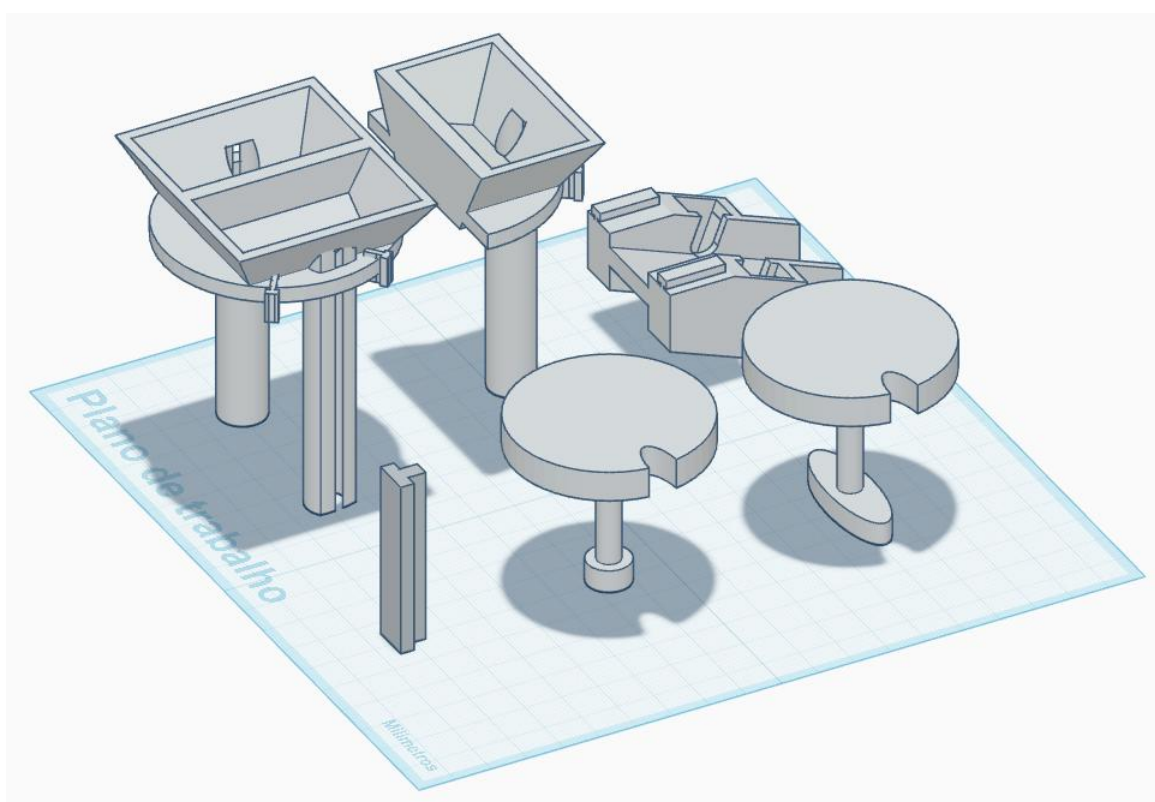
Para possibilitar a utilização de dois medicamentos, foram desenvolvidas versões do reservatório e do funil com dois compartimentos e canais independentes de condução. Também foram avaliadas diferentes configurações do disco giratório, de modo que o acionamento do servomotor permitisse selecionar o canal associado ao medicamento desejado. No mecanismo final, a posição central corresponde ao estado de repouso, enquanto o deslocamento do disco para lados opostos permite realizar a dispensação a partir dos compartimentos dos medicamentos 1 e 2.

Durante o ciclo de dispensação, o servomotor movimenta o disco até a posição associada ao compartimento selecionado. A dose é liberada por ação da gravidade, percorre a região de condução, atravessa o feixe do sensor óptico e é

direcionada pela rampa até o copo coletor. Após o acionamento, o disco retorna à posição central, preparando o mecanismo para o ciclo seguinte.

A configuração final foi selecionada por apresentar melhor integração entre os dois compartimentos, o disco giratório, a rampa, o sensor óptico e o copo coletor. Também foram considerados como critérios de escolha a redução das interferências físicas, a facilidade de montagem, o movimento adequado das partes móveis e a capacidade de realizar a dispensação individualizada dos dois medicamentos.

Figura 4 - Diferentes versões do funil, rampa e disco desenvolvidas durante a prototipagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3.1 Compatibilidade com diferentes formas de medicamentos

O mecanismo desenvolvido não foi concebido como um sistema universal para todas as formas e dimensões de medicamentos disponíveis comercialmente. Sua compatibilidade depende da relação entre as dimensões do medicamento e as geometrias do reservatório, dos canais de condução, da abertura do disco giratório e da rampa. Dessa forma, o protótipo foi validado com as amostras utilizadas nos testes

de bancada, cujas características dimensionais orientaram o desenvolvimento das peças.

Medicamentos sólidos rígidos, como comprimidos, podem apresentar formatos circulares, ovais ou alongados, além de diferentes espessuras e acabamentos superficiais. Essas variações influenciam o comportamento da dose no interior do reservatório e durante sua passagem pelo mecanismo. Comprimidos com dimensões superiores à abertura do disco não podem ser liberados, enquanto unidades muito menores podem permitir a passagem simultânea de mais de uma dose. Formatos alongados também podem assumir orientações desfavoráveis e provocar retenção nos canais de condução.

A utilização de cápsulas exige avaliação específica, pois seu formato alongado e sua distribuição de massa podem alterar a orientação durante a queda. Cápsulas de gelatina mole, medicamentos fragmentados, unidades com superfícies pegajosas, rugosas ou irregulares e formas farmacêuticas suscetíveis à umidade apresentam maior risco de aderência, acúmulo ou travamento no mecanismo. Por essa razão, esses tipos não devem ser considerados automaticamente compatíveis sem a realização de ensaios próprios.

Para ampliar a faixa de medicamentos suportados, uma evolução do projeto poderá utilizar discos de dispensação, funis ou insertos intercambiáveis, dimensionados de acordo com o formato e o tamanho de cada medicamento. Também podem ser incorporadas guias internas ajustáveis para reduzir o espaço disponível no canal e melhorar o alinhamento das unidades. Dessa forma, a adaptação do mecanismo seria realizada pela substituição de peças específicas, sem a necessidade de modificar toda a estrutura do dispenser.

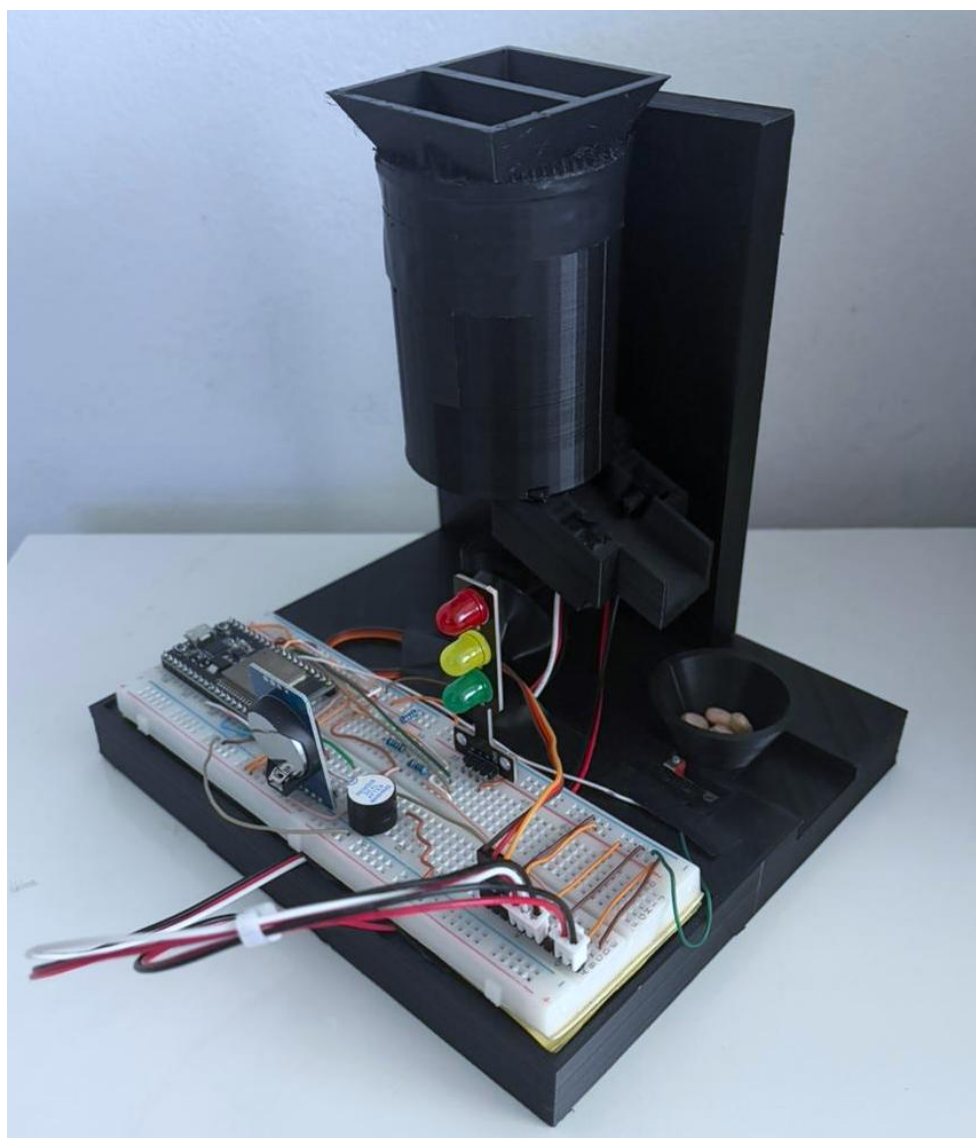
Portanto, os resultados apresentados neste trabalho demonstram a compatibilidade do protótipo somente com os medicamentos empregados nos testes de bancada, não sendo possível generalizar seu funcionamento para qualquer comprimido ou cápsula sem validação adicional.

Outro aspecto importante do projeto mecânico consistiu no dimensionamento das folgas de encaixe entre partes móveis, suportes estruturais e componentes eletrônicos. Considerando as limitações inerentes ao processo de manufatura aditiva, especialmente em impressões realizadas com bico extrusor de 0,4

mm, as junções mecânicas foram projetadas com folgas compensatórias na ordem de décimos de milímetro, permitindo o encaixe das peças sem comprometer o movimento dos componentes móveis nem a fixação dos sensores.

Esses ajustes dimensionais foram necessários para garantir o livre movimento do eixo do servomotor, reduzir atritos indesejados entre o mecanismo de dispensação e a carcaça, e manter o alinhamento adequado entre o emissor e o receptor do sensor óptico infravermelho. Com isso, buscou-se assegurar que o medicamento, ao ser liberado, percorresse a rampa de queda e atravessasse a região de detecção do sensor breakbeam, permitindo ao firmware identificar a passagem da dose e registrar corretamente o evento de dispensação.

Figura 5 - Protótipo físico impresso com componentes eletromecânicos instalados



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.4 Projeto Eletrônico

O projeto eletrônico do dispositivo foi estruturado de forma a integrar os elementos de processamento central, sensoramento, atuação eletromecânica, sinalização audiovisual e temporização. A arquitetura eletrônica foi concebida em torno do microcontrolador ESP32, responsável pela leitura dos sensores, acionamento dos atuadores, controle dos alarmes, comunicação com o módulo RTC e execução das rotinas de conectividade do sistema.

Durante a montagem do circuito, considerou-se a compatibilidade entre os níveis lógicos dos periféricos e do microcontrolador, bem como a necessidade de alimentação adequada para os componentes de maior consumo, especialmente o servomotor. Também foi adotada referência comum de terra entre os módulos, de modo a reduzir instabilidades de leitura e permitir o funcionamento integrado entre sensores, atuadores e unidade de controle.

3.4.1 Unidade Central e Distribuição de Pinos

A unidade central de processamento do sistema é baseada no módulo de desenvolvimento ESP32. Para possibilitar a integração dos periféricos utilizados no protótipo, foi realizado o mapeamento das portas de entrada e saída de uso geral, denominadas GPIO (General Purpose Input/Output), bem como das linhas utilizadas pelo barramento I²C. A distribuição dos pinos foi definida de acordo com as características elétricas de cada componente e com a implementação realizada no firmware, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Mapeamento e distribuição de pinos do microcontrolador

Componente de hardware	Tipo de sinal	Pino GPIO	Função no subsistema
Servo motor MG90S	Saída PWM	12	Controle angular do mecanismo de dispensação
Sensor óptico IR <i>Breakbeam</i>	Entrada digital com interrupção	14	Deteção da passagem do medicamento pela rampa de queda
Botão de <i>BOOT</i> da placa	Entrada digital com <i>pull-up</i>	0	Acionamento manual do ciclo de dispensação

LED vermelho	Saída digital	27	Sinalização visual de erro, falha ou não retirada
LED amarelo	Saída digital	26	Sinalização visual de ciclo de dispensação em execução
LED verde	Saída digital	25	Sinalização visual de dispensação bem-sucedida
Micro switch do copo coletor	Entrada digital com <i>pull-up</i>	33	Deteção da presença ou retirada do copo
Buzzer ativo	Saída digital	5	Sinalização sonora de alertas e confirmações
RTC DS3231 – SDA	Linha de dados do barramento I ² C	21	Transferência de dados entre o RTC e o ESP32
RTC DS3231 – SCL	Linha de clock do barramento I ² C	22	Sincronização da comunicação entre o ESP32 e o RTC

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O uso de entradas configuradas com resistores internos de pull-up reduz a necessidade de componentes externos para estabilização dos sinais do botão e do micro switch. O sensor óptico foi associado a uma entrada capaz de gerar interrupção de hardware, enquanto o servomotor foi conectado a uma saída PWM para controle de posição. O módulo RTC utiliza o barramento I²C, permitindo a comunicação por meio de apenas duas linhas de sinal.

3.4.2 Subsistemas de Entrada

O subsistema de entrada é composto pelos sensores e comandos físicos responsáveis por fornecer informações ao firmware. O primeiro elemento é o sensor óptico de barreira infravermelha, também denominado breakbeam, conectado ao GPIO 14. Esse sensor foi empregado para identificar a passagem do medicamento pela rampa de queda. Devido à curta duração do evento de passagem da pílula pelo feixe óptico, a leitura foi configurada com interrupção de hardware por borda de descida, permitindo que a detecção ocorra de forma assíncrona em relação ao fluxo principal do programa.

O segundo elemento de entrada é a chave mecânica de fim de curso, do tipo micro switch, conectada ao GPIO 33. Esse componente foi utilizado para detectar a presença e a retirada do copo coletor. No firmware, o pino correspondente foi configurado com resistor de pull-up, mantendo o sinal em nível lógico alto quando o copo é retirado e alterando o estado lógico quando a chave é acionada pela presença do recipiente. Essa leitura permite ao sistema verificar se o copo está posicionado antes da dispensação e se foi removido pelo usuário após a liberação do medicamento.

Além dos sensores, o botão de boot presente na própria placa de desenvolvimento foi utilizado como entrada digital auxiliar para acionamento manual do ciclo de dispensação. Esse recurso foi empregado durante os testes de bancada, permitindo disparar o mecanismo sem depender exclusivamente do cronograma programado.

3.4.3 Subsistemas de Saída e Atuação

A atuação mecânica do sistema é realizada por meio do servomotor MG90S, conectado ao GPIO 12. O controle angular do motor é feito por modulação por largura de pulso, com frequência configurada em 50 Hz. No firmware, o servomotor foi parametrizado com largura de pulso mínima de 500 μ s e máxima de 2400 μ s, permitindo o deslocamento entre as posições utilizadas pelo mecanismo de dispensação. Durante os testes, foram adotadas três posições principais: 90° como posição central de repouso, 0° para acionamento do mecanismo associado ao Remédio 1 e 180° para acionamento do mecanismo associado ao Remédio 2.

Para comunicação direta com o usuário, foram utilizados um conjunto de LEDs em formato de semáforo e um buzzer ativo. Os LEDs vermelho, amarelo e verde foram conectados aos GPIOs 27, 26 e 25, respectivamente, sendo empregados para indicar estados operacionais do sistema, como falha, ciclo em andamento e dispensação bem-sucedida. O buzzer ativo, conectado ao GPIO 5, foi utilizado como sinalização sonora complementar, emitindo alertas em situações de confirmação, erro ou ausência de retirada do medicamento.

A utilização conjunta do semáforo de LEDs e do buzzer ativo também foi considerada sob a perspectiva de acessibilidade e redundância de alertas. A sinalização visual permite indicar o estado operacional do dispositivo por meio de cores, auxiliando usuários com audição reduzida ou ambientes com elevado ruído. Por outro lado, a sinalização sonora amplia a percepção dos eventos para usuários com baixa visão ou para situações em que o dispositivo não esteja no campo visual direto do paciente ou cuidador. Dessa forma, a combinação entre alertas visuais, sonoros e notificações remotas contribui para uma interface humano-máquina mais inclusiva e adequada ao contexto de cuidado domiciliar.

3.4.4 Barramento I2C e Temporização

A manutenção da base de tempo local é realizada pelo módulo RTC DS3231, conectado ao ESP32 por meio do barramento I2C. Foram utilizados os pinos GPIO 21 e GPIO 22 para as linhas SDA e SCL, respectivamente, correspondentes à configuração padrão do barramento I2C no ESP32. Esse módulo fornece ao sistema uma referência temporal independente da conexão com a internet, permitindo a execução dos cronogramas de dispensação mesmo em cenários de instabilidade de rede.

O uso do barramento I2C possibilita a comunicação entre o microcontrolador e o RTC utilizando apenas duas linhas de sinal, simplificando a montagem do circuito e reduzindo a quantidade de conexões necessárias. Dessa forma, o ESP32 realiza a leitura dos registros de data e hora do DS3231 e utiliza essas informações para verificar os horários programados e acionar o ciclo de dispensação.

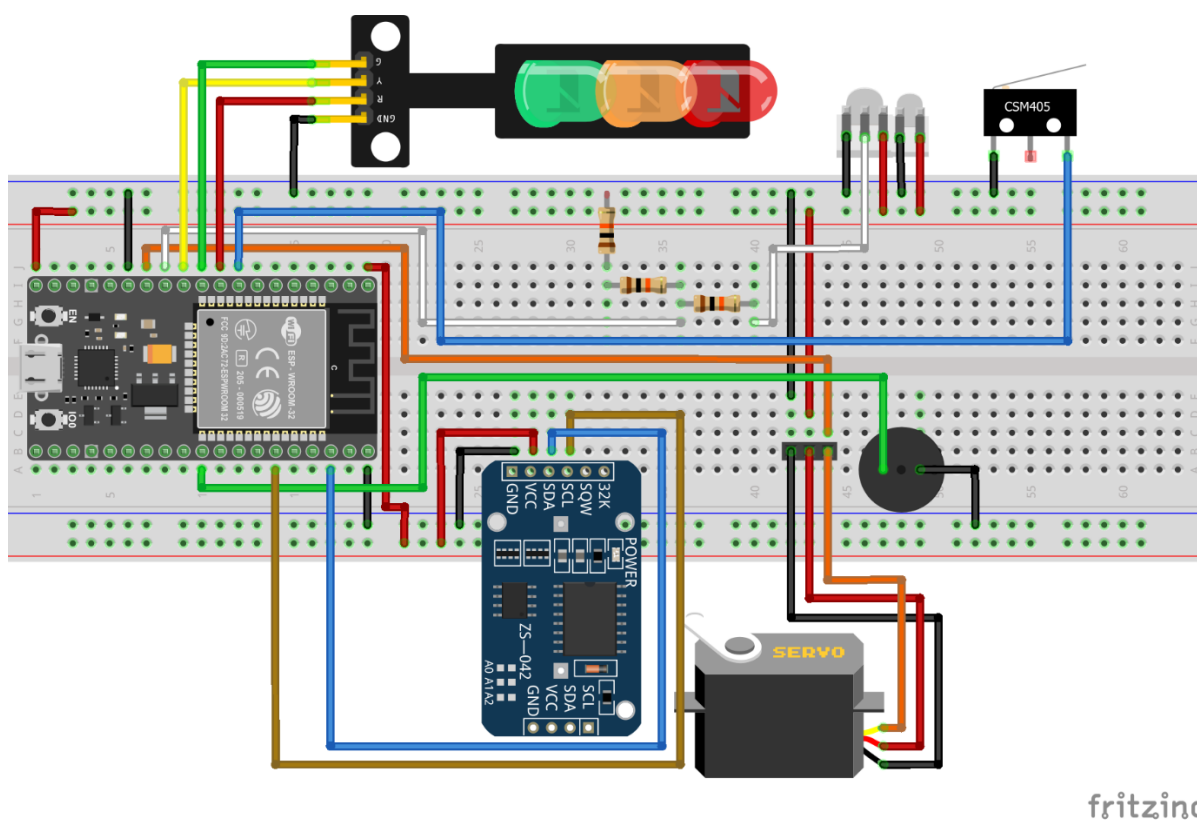
3.4.5 Considerações de Montagem

Na montagem do protótipo, os módulos eletrônicos foram integrados em protoboard, permitindo alterações rápidas nas conexões durante as etapas de desenvolvimento e testes funcionais. Os barramentos de alimentação foram utilizados para distribuir as tensões requeridas pelos componentes, mantendo-se uma referência comum de terra entre o ESP32, os sensores, o módulo RTC, os dispositivos

de sinalização e o servomotor. Essa referência comum é necessária para a correta interpretação dos sinais digitais e do comando PWM enviado ao atuador.

Para documentar a disposição dos componentes e suas interligações, foi elaborada uma representação da montagem por meio do software Fritzing, apresentada na Figura 6. A imagem evidencia a posição do ESP32 na protoboard, os módulos periféricos, os barramentos de alimentação e terra e o roteamento dos sinais utilizados pelo sistema. O mapeamento detalhado das interfaces e dos respectivos pinos é apresentado na Tabela 1.

Figura 6 - Representação da montagem eletrônica do protótipo em protoboard



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na implementação do circuito, o botão de acionamento manual e o micro switch foram configurados como entradas digitais com resistores internos de pull-up. O sensor óptico também foi configurado como entrada digital e associado a uma interrupção de hardware acionada pela alteração do estado do feixe infravermelho. O servomotor, o buzzer e os LEDs foram configurados como saídas, enquanto o módulo RTC foi conectado ao ESP32 por meio do barramento I²C. Essa configuração

estabelece a integração entre o processo físico de dispensação e a lógica de controle executada pelo firmware.

Durante os ensaios de bancada, o protótipo foi alimentado por uma fonte USB de 5 V e capacidade nominal de 2 A, conectada à placa ESP32, mantendo-se referência comum de terra entre o microcontrolador e os periféricos. Essa alimentação foi utilizada para manter o ESP32 e os periféricos conectados à montagem, incluindo o servomotor, componente que apresenta maior demanda de corrente durante o acionamento. O circuito não contou com bateria recarregável, nobreak ou sistema UPS destinado à manutenção do funcionamento durante interrupções da rede elétrica.

3.5 Desenvolvimento do Firmware

O firmware do microcontrolador foi desenvolvido em linguagem C/C++, utilizando a abstração do framework Arduino por meio do ambiente de desenvolvimento PlatformIO. A escolha desse ecossistema justifica-se pela disponibilidade de bibliotecas compatíveis com os periféricos utilizados no projeto, incluindo servidor web assíncrono, manipulação de arquivos em LittleFS, controle de servomotor, integração com o módulo RTC DS3231 e comunicação com a API do Telegram.

A arquitetura do firmware foi organizada de forma modular, contemplando rotinas de inicialização dos periféricos, carregamento de configurações, leitura de sensores, acionamento do mecanismo de dispensação, sinalização audiovisual, registro de eventos, interface web embarcada e notificações remotas. O laço principal do programa foi estruturado para executar verificações periódicas baseadas em referências temporais obtidas por meio da função *millis()*, evitando bloqueios permanentes no fluxo principal de execução. Entretanto, em rotinas específicas, como acionamento do servomotor, emissão de sinais sonoros e estabilização de leituras digitais, foram empregados pequenos atrasos controlados para garantir o comportamento físico esperado durante os testes de bancada.

3.5.1 Lógica de Agendamento e Controle de Dois Compartimentos

O gerenciamento da rotina medicamentosa é realizado por meio de um agendador baseado na leitura periódica do módulo RTC DS3231. Os horários cadastrados pelo usuário são armazenados em um vetor de estruturas denominado cronograma, no qual cada posição contém a hora, o minuto, o tipo do medicamento e uma variável de controle responsável por indicar se o evento já foi processado no minuto corrente.

A inclusão do campo referente ao tipo do medicamento permite que o firmware associe cada horário programado a um dos dois compartimentos disponíveis no dispenser. Dessa forma, o sistema diferencia os acionamentos destinados ao Remédio 1 e ao Remédio 2, tratando cada compartimento de forma independente durante a dispensação.

Na versão implementada, cada item do cronograma representa um único evento de dispensação associado a apenas um dos compartimentos. Cada acionamento corresponde, portanto, à liberação nominal de uma unidade do medicamento selecionado e à redução de uma unidade do respectivo estoque. A estrutura do cronograma não possui um campo destinado à quantidade de unidades por dose, não sendo possível configurar, em um único agendamento, a liberação de vários comprimidos do mesmo compartimento ou de medicamentos provenientes dos dois compartimentos.

Embora seja tecnicamente possível cadastrar eventos independentes com o mesmo horário, esse comportamento não foi desenvolvido nem validado como uma dose combinada. Nessa situação, os eventos seriam processados sequencialmente, sem uma lógica específica para agrupá-los em uma única dose, controlar a quantidade total acumulada no copo ou confirmar individualmente a passagem de cada unidade.

Durante a execução do laço principal, o firmware consulta periodicamente a hora fornecida pelo RTC e compara seus valores de hora e minuto com os horários cadastrados. Quando ocorre correspondência com um evento ainda não processado, o sistema inicia o ciclo de dispensação, encaminhando à rotina responsável a identificação do evento e o tipo de medicamento associado. Após o acionamento, a

variável de controle é atualizada, evitando que o mesmo evento seja executado repetidamente dentro do mesmo minuto.

Quando o minuto corrente deixa de coincidir com o horário programado, a variável de controle é redefinida, permitindo que o mesmo agendamento seja executado novamente no dia seguinte. Dessa forma, o agendador possibilita a execução automática de diferentes horários ao longo do dia, distinguindo o compartimento correspondente a cada medicamento.

3.5.2 Rotina de Dispensação Bidirecional e Validação por Interrupção

A rotina de dispensação é responsável por acionar fisicamente o mecanismo de liberação do medicamento e validar se a dose foi efetivamente conduzida pela rampa de queda. O sistema utiliza o servomotor em uma posição central de repouso, definida em 90° . Quando a rotina é acionada, o firmware verifica o tipo de medicamento recebido como parâmetro e comanda o motor para uma das extremidades de rotação: 0° para o Remédio 1 ou 180° para o Remédio 2. Após o acionamento, o servomotor retorna à posição central de repouso.

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade do processo, o algoritmo permite até duas tentativas sequenciais de dispensação. Em cada tentativa, a variável de detecção da pílula é reinicializada, o servomotor é acionado no sentido correspondente ao compartimento selecionado e um registro de auditoria é gerado indicando a rotação realizada. Após o movimento, o firmware aguarda por um intervalo definido a ocorrência do sinal proveniente do sensor óptico infravermelho instalado na rampa comum de queda.

A confirmação da passagem do medicamento é realizada por meio de uma Rotina de Serviço de Interrupção (ISR — Interrupt Service Routine) associada ao sensor breakbeam. Quando a pílula atravessa o feixe infravermelho, o sinal digital do sensor é alterado e a interrupção modifica uma variável volátil utilizada pelo firmware para indicar que a dose foi detectada. Caso essa confirmação ocorra dentro do intervalo de espera, o ciclo é considerado bem-sucedido.

Em caso de sucesso, o sistema decrementa apenas o estoque associado ao medicamento dispensado, preservando a contagem independente dos dois

compartimentos. Assim, quando o Remédio 1 é liberado, somente o estoque do primeiro compartimento é reduzido; quando o Remédio 2 é liberado, apenas o estoque do segundo compartimento é atualizado. Em seguida, os novos valores são persistidos na memória não volátil, a sinalização visual de sucesso é acionada, o buzzer emite o aviso correspondente e o evento é registrado no arquivo de log. Caso nenhuma pílula seja detectada após as tentativas programadas, o sistema classifica o evento como falha crítica de dispensação, ativa a sinalização de erro e envia uma notificação remota ao cuidador.

3.5.3 Persistência Individualizada de Estoque e Cronograma

A persistência das configurações do sistema é realizada por meio de arquivo JSON armazenado no sistema de arquivos LittleFS. Nesse arquivo são mantidas as credenciais de rede, o identificador do cuidador no Telegram, o modo de depuração, os horários cadastrados e os estoques individualizados dos dois medicamentos.

O estoque anteriormente tratado como uma variável única foi dividido em duas variáveis independentes, representando os saldos do Remédio 1 e do Remédio 2. Esses valores são gravados separadamente no arquivo de configuração, permitindo que o sistema recupere corretamente a quantidade disponível em cada compartimento após reinicializações, falhas de energia ou reconfigurações.

O cronograma também foi estruturado para armazenar, além do horário da dose, o tipo de medicamento associado ao agendamento. Dessa forma, cada item do cronograma contém as informações necessárias para que o firmware identifique quando dispensar e qual compartimento deve ser acionado. Essa abordagem permite que diferentes medicamentos possuam horários próprios e sejam controlados de forma independente dentro do mesmo dispositivo.

3.5.4 Monitoramento de Retirada do Copo e Timeout de Segurança

Após a confirmação da passagem do medicamento pelo sensor óptico, o firmware inicia o monitoramento do micro switch instalado sob o copo coletor. Enquanto o recipiente permanece apoiado sobre a chave, o sistema considera que a

dose ainda não foi retirada. A mudança do sinal indica a remoção do copo pelo usuário, sendo esse evento registrado no arquivo de auditoria e, quando habilitado, enviado ao cuidador por meio do *Telegram*.

Após a retirada, o sistema passa ao estado de espera pela reposição do recipiente. O retorno do micro switch ao estado correspondente ao copo presente é interpretado como confirmação de que o coletor foi recolocado em sua posição. Esse evento também é registrado, e o sistema é então liberado para executar um novo ciclo de dispensação.

Antes de cada acionamento do servomotor, o firmware verifica o estado do micro switch. Caso o copo não esteja presente, a dispensação é bloqueada, evitando que o medicamento seja liberado sem um recipiente disponível para coleta. Nessa situação, o sistema aciona a sinalização de falha, registra a ocorrência no histórico e envia uma notificação ao cuidador.

Dessa forma, o micro switch é utilizado em três etapas distintas: validação da presença do copo antes da dispensação, identificação de sua retirada após a liberação da dose e confirmação de sua reposição antes do próximo ciclo.

3.5.5 Interface Web, Telegram e Acionamento Manual

A interface web embarcada foi adaptada para contemplar o gerenciamento independente dos dois medicamentos. Na visualização principal, o sistema apresenta separadamente os estoques do Remédio 1 e do Remédio 2. Na área de configuração, o usuário pode atualizar individualmente a quantidade disponível em cada compartimento e cadastrar novos horários de dispensação associados a um medicamento específico.

As informações configuradas pela interface são enviadas ao ESP32 por meio de requisições HTTP e armazenadas no arquivo de configuração do sistema. O cronograma salvo pela interface passa a conter objetos compostos pelo horário e pelo tipo de medicamento, permitindo que o firmware reconstrua internamente a agenda de doses após o carregamento das configurações.

A integração com o bot do Telegram também foi adequada ao controle individualizado. O comando de informações retorna o estoque atual dos dois

medicamentos, a quantidade de alertas programados, a hora fornecida pelo RTC e o endereço IP da interface web. Além disso, os eventos de dispensação, confirmação de retirada, falhas de queda e alertas de esquecimento podem ser comunicados ao cuidador, permitindo o acompanhamento remoto da operação do dispositivo.

Além dos acionamentos automáticos por horário programado, o firmware contempla uma entrada auxiliar de acionamento manual por meio do botão da própria placa de desenvolvimento. Essa funcionalidade foi utilizada nos testes de bancada para disparar o ciclo de dispensação sem depender da ocorrência de um horário previamente cadastrado. Na versão atual do firmware, esse acionamento manual está associado ao Remédio 1, servindo como recurso de teste e validação do mecanismo.

3.6 Sincronização de Tempo e Operação Offline

Caso a conexão Wi-Fi não seja estabelecida durante a inicialização, o dispositivo utiliza a data e a hora mantidas pelo RTC como referência para o agendamento local. Quando o módulo indica perda da referência temporal preservada pela alimentação auxiliar, o firmware realiza um ajuste provisório utilizando a data e a hora de compilação do programa. Caso a conexão com a internet seja obtida durante essa mesma inicialização, o valor provisório é posteriormente substituído pela referência recebida do servidor NTP.

A bateria auxiliar do RTC DS3231 é destinada exclusivamente à preservação da contagem de data e hora. Assim, durante períodos sem conexão com a internet, mas com a alimentação principal disponível, o dispositivo pode continuar consultando o RTC e executando localmente os horários programados. Eventuais desvios acumulados pelo relógio são corrigidos somente em uma nova inicialização realizada com acesso à rede Wi-Fi, pois a versão atual não executa novas sincronizações NTP durante o funcionamento contínuo.

A bateria do RTC não fornece energia ao ESP32, ao servomotor, aos sensores, aos LEDs, ao buzzer ou aos módulos de comunicação. Durante uma interrupção da alimentação principal, o processamento do firmware e todas as funções de dispensação, sensoramento, sinalização, interface web e comunicação remota são

interrompidos. Portanto, o protótipo não executa doses nem emite alertas enquanto permanece sem energia.

Após o restabelecimento da alimentação, o ESP32 reinicia o firmware e carrega as configurações, os estoques e o cronograma armazenados no arquivo `config.json`. Em seguida, tenta estabelecer conexão com a rede Wi-Fi cadastrada. Caso a conexão seja obtida e o horário NTP seja recuperado com sucesso, o RTC é novamente ajustado. Caso contrário, o sistema utiliza a referência temporal preservada localmente pelo RTC, desde que sua bateria auxiliar esteja instalada e funcional.

A versão atual não possui bateria principal, sistema de alimentação ininterrupta ou rotina de recuperação das dispensações não executadas durante a falta de energia. Assim, uma dose cujo horário ocorra durante a interrupção não é liberada automaticamente após o retorno da alimentação. O sistema retoma somente o acompanhamento dos horários subsequentes.

3.7 Interface Web Embarcada e Conectividade

A parametrização do dispositivo foi projetada para dispensar a reprogramação do firmware pelo usuário final. Para isso, o ESP32 foi configurado para atuar tanto como cliente de uma rede Wi-Fi local quanto como ponto de acesso próprio em situações nas quais não há credenciais cadastradas ou quando ocorre falha na conexão com a rede configurada.

Na primeira inicialização, ou quando não há configuração de rede armazenada, o microcontrolador cria uma rede local própria, denominada `Dispenser_Setup`. Caso exista uma rede previamente cadastrada, mas a conexão não seja estabelecida com sucesso durante a inicialização, o dispositivo cria uma rede alternativa denominada `Dispenser_Setup_Erro`. Ao conectar-se a essa rede, o cuidador pode acessar a página web de configuração hospedada no próprio ESP32, na qual são informadas as credenciais da rede doméstica e o identificador do cuidador utilizado na integração com o Telegram. Esses dados são armazenados na memória não volátil e o dispositivo é reiniciado para tentar ingressar na rede principal.

Quando conectado à rede local, o ESP32 inicializa um servidor web embarcado na porta 80, responsável por processar requisições HTTP e disponibilizar a interface de usuário ao navegador. O front-end da aplicação foi desenvolvido em HTML, CSS e JavaScript e armazenado na memória de programa do microcontrolador, permitindo que a página seja servida diretamente pelo próprio dispositivo, sem necessidade de hospedagem externa.

A interface web permite visualizar informações operacionais do sistema, como o horário fornecido pelo RTC, os próximos disparos programados, os estoques dos medicamentos e o histórico de logs registrado pelo dispositivo. Para suportar a arquitetura de duplo compartimento físico, a interface foi adaptada para tratar os dois medicamentos de forma independente. Assim, o cuidador pode visualizar separadamente os estoques do Remédio 1 e do Remédio 2, além de cadastrar horários associados a cada compartimento.

A comunicação entre a interface e o firmware ocorre por meio de rotas HTTP implementadas no servidor embarcado, como as rotas responsáveis pela consulta de status, atualização de estoque, salvamento de credenciais, cadastro de cronogramas e leitura dos registros de log. Os dados estruturados são manipulados em formato JSON com auxílio da biblioteca *ArduinoJson*, permitindo que cada item do cronograma contenha tanto o horário da dose quanto o tipo de medicamento associado. Dessa forma, o sistema possibilita o gerenciamento individualizado dos dois compartimentos, acionando o servomotor para 0° quando o agendamento corresponde ao Remédio 1 ou para 180° quando corresponde ao Remédio 2.

3.8 Persistência de Dados e Auditoria

Para gerenciar o armazenamento não volátil no microcontrolador ESP32, foi empregado o sistema de arquivos *LittleFS*, utilizado para armazenar configurações, informações de estoque e registros de auditoria na memória Flash do dispositivo. A persistência foi organizada em duas frentes principais: a manutenção do estado operacional do sistema e o registro dos eventos relacionados à dispensação dos medicamentos.

O estado do sistema compreende as credenciais da rede Wi-Fi, o identificador do cuidador no *Telegram*, os horários agendados, o modo de depuração e os estoques individualizados dos dois compartimentos de medicamentos. Essas informações são armazenadas em um arquivo de configuração estruturado em notação JSON, denominado *config.json*.

No arquivo de configuração, os estoques dos dois compartimentos são mantidos separadamente, permitindo que o sistema diferencie o saldo do Remédio 1 e do Remédio 2. A cada reabastecimento realizado pela interface web ou dispensação confirmada pelo sensor óptico, o firmware atualiza somente o valor correspondente ao compartimento envolvido. Dessa forma, após uma reinicialização, o sistema pode recuperar os dados anteriormente persistidos e reconstruir seu estado operacional.

A auditoria dos eventos é realizada por meio do arquivo *logs.txt*. Cada registro é acompanhado por um carimbo de data e hora fornecido pelo RTC DS3231. Entre os eventos registrados estão o acionamento do servomotor, a identificação do compartimento selecionado, as tentativas de dispensação, as falhas de detecção pelo sensor óptico, a liberação bem-sucedida do medicamento, a confirmação da retirada do copo coletor e os alertas relacionados à ausência de retirada dentro do período previsto.

Para controlar o crescimento do arquivo de registros, foi implementado um mecanismo de rotação com limite nominal de 50.000 bytes, equivalente a aproximadamente 48,8 KiB. Antes da inclusão de um novo evento, o firmware consulta o tamanho do arquivo *logs.txt* por meio do *LittleFS*. Quando o tamanho existente ultrapassa esse limite, o arquivo ativo é renomeado como *logs.old*, preservando o conjunto anterior de registros, e um novo arquivo *logs.txt* é iniciado para receber os eventos subsequentes.

O mecanismo mantém somente um arquivo ativo e um arquivo de histórico anterior. Caso já exista um arquivo *logs.old* no momento da rotação, ele é removido antes que o arquivo *logs.txt* atual seja renomeado. Consequentemente, os registros mais antigos são descartados e o espaço utilizado pelos arquivos de auditoria permanece controlado. Como a verificação ocorre antes da gravação da nova linha e utiliza a condição de tamanho superior a 50.000 bytes, o arquivo pode ultrapassar

esse valor pelo tamanho de um registro antes que a rotação seja executada na operação seguinte.

A utilização do tamanho do arquivo como critério de rotação foi escolhida por proporcionar controle direto sobre o espaço ocupado pelos registros na memória *Flash* do ESP32. A quantidade de eventos pode variar de acordo com o número de doses programadas, as falhas identificadas, os comandos recebidos e as interações do usuário. Assim, uma rotação exclusivamente temporal poderia gerar arquivos com tamanhos consideravelmente diferentes, enquanto o limite em bytes torna o consumo de armazenamento mais previsível.

A rotação por tamanho também apresenta independência em relação à disponibilidade de uma referência temporal válida. O controle do crescimento do arquivo pode ser realizado mesmo durante a operação offline ou em situações nas quais o RTC ainda não tenha sido sincronizado corretamente, sem depender da conexão com a internet, da sincronização NTP ou da identificação da mudança de dia.

Como alternativa, a rotação poderia ser executada com base em períodos previamente definidos, como diariamente ou semanalmente. Em uma rotação diária, por exemplo, os arquivos poderiam ser identificados pela data, como *logs_2026-07-25.txt*, favorecendo a organização cronológica e a consulta dos eventos. Entretanto, essa solução exigiria uma política adicional de retenção e exclusão dos arquivos antigos, além de depender de uma referência temporal válida para identificar corretamente o início de cada período.

Uma evolução do sistema poderá adotar uma estratégia híbrida, realizando a rotação quando o arquivo atingir o limite estabelecido ou quando ocorrer a mudança de um período determinado, prevalecendo o primeiro critério alcançado. Essa abordagem reuniria o controle do espaço ocupado, proporcionado pela rotação por tamanho, com a organização cronológica oferecida pela rotação temporal.

Considerando os recursos limitados de memória do sistema embarcado e o caráter acadêmico do protótipo, a solução implementada mostrou-se adequada para preservar as configurações essenciais, manter o estado dos estoques e fornecer um histórico local dos principais eventos operacionais. Entretanto, o mecanismo mantém apenas uma geração anterior de registros e não oferece redundância externa ou retenção de longo prazo. Para uma aplicação definitiva de cuidado domiciliar, seria

recomendável complementar a persistência local com uma base de dados externa, políticas configuráveis de retenção e mecanismos de cópia de segurança.

3.9 Sistema de Notificações via *Telegram*

A escolha do Telegram como plataforma de notificação remota foi realizada com base na disponibilidade de uma API para bots, na simplicidade de integração com sistemas embarcados e na adequação ao contexto de um protótipo acadêmico. A utilização do WhatsApp também foi considerada, porém sua integração oficial para automações depende da WhatsApp Business Platform, de configurações específicas de conta e de condições comerciais relacionadas ao envio de mensagens.

A integração permite que o ESP32 envie alertas e responda a consultas do cuidador sem a necessidade de manter uma infraestrutura própria de servidores ou disponibilizar o dispositivo diretamente para conexões provenientes da internet. Nesse modelo, o microcontrolador atua como cliente da API do Telegram, iniciando as conexões necessárias para consultar mensagens e enviar notificações.

3.9.1 Criação e integração do bot

O bot utilizado no protótipo não foi criado automaticamente pelo ESP32. Sua criação foi realizada previamente por meio do BotFather, ferramenta oficial do Telegram destinada ao cadastro e à administração de bots. Inicialmente, foi iniciada uma conversa com o BotFather e enviado o comando `/newbot`. Em seguida, foram definidos o nome de exibição e o nome de usuário do bot. Ao final do procedimento, foi fornecido um token de autenticação exclusivo, utilizado para identificar o bot nas requisições realizadas à Bot API.

Após a criação, foi iniciada uma conversa privada com o bot pelo aplicativo Telegram. O envio do comando `/start` gerou uma atualização contendo os dados da mensagem e da conversa. O identificador dessa conversa, denominado `chat_id`, foi obtido a partir do campo `message.chat.id` retornado pela API. Esse identificador é utilizado para direcionar as mensagens ao cuidador e para reconhecer a origem dos comandos recebidos.

Na implementação desenvolvida, o token de autenticação foi inserido diretamente no firmware durante a compilação. O chat_id do cuidador, por sua vez, é informado por meio da interface web local do dispenser e armazenado no arquivo config.json, juntamente com as demais configurações do sistema. Dessa forma, o cuidador autorizado pode ser alterado pela interface local, enquanto a substituição do token exige a modificação e uma nova gravação do firmware.

A comunicação com a Bot API foi implementada por meio das classes WiFiClientSecure e UniversalTelegramBot. Após estabelecer conexão com a rede Wi-Fi, o ESP32 realiza consultas periódicas utilizando o método getUpdates, verificando a existência de novas mensagens direcionadas ao bot. No firmware desenvolvido, essa consulta é executada aproximadamente a cada dois segundos. Como as conexões são iniciadas pelo próprio dispositivo, não é necessário realizar redirecionamento de portas nem permitir conexões externas diretas à rede residencial.

Foram implementados os comandos /start, /informacoes, /historico e /debug. O comando /start apresenta uma mensagem inicial e informa as opções disponíveis. O comando /informacoes retorna os estoques dos dois compartimentos, a quantidade de horários programados, o horário informado pelo RTC, o endereço IP da interface web e o estado do modo de depuração. O comando /historico transmite os registros recentes armazenados no arquivo logs.txt, enquanto o comando /debug habilita ou desabilita o envio de mensagens operacionais adicionais.

Além das respostas aos comandos, o firmware envia automaticamente notificações relacionadas ao início da dispensação, à detecção da passagem do medicamento, à atualização do estoque, às falhas do mecanismo e à ausência de retirada do copo coletor dentro do intervalo estabelecido. Dessa forma, a comunicação opera tanto sob demanda, a partir de solicitações do cuidador, quanto de maneira automática, em resposta aos eventos identificados pelo sistema.

3.9.2 Segurança, destinatários e limitações

O controle de acesso às funcionalidades do bot é realizado por meio da comparação do chat_id. Para cada mensagem recebida, o firmware compara o identificador da conversa de origem com o identificador do cuidador armazenado no

arquivo de configuração. Caso os valores sejam diferentes, o comando não é executado e o remetente recebe uma mensagem de acesso negado.

Na versão implementada, o sistema admite apenas um destinatário remoto, correspondente à conversa do cuidador cadastrado. Todas as notificações automáticas e as respostas aos comandos são direcionadas a esse único chat_id. Não foram implementados o cadastro de múltiplos contatos nem um identificador adicional destinado ao paciente. O paciente recebe as sinalizações localmente, por meio dos LEDs e do buzzer, enquanto o Telegram é utilizado como canal de acompanhamento remoto pelo cuidador.

A utilização de um único destinatário simplifica o controle de acesso e reduz a exposição das informações operacionais. A inclusão de outros cuidadores ou do próprio paciente como destinatário adicional exigiria o armazenamento de uma lista de identificadores autorizados, além de mecanismos para inclusão, alteração, remoção e gerenciamento individual das permissões.

Embora a comparação do chat_id restrinja a execução dos comandos ao identificador cadastrado, esse mecanismo não constitui autenticação multifator e não protege o sistema caso a conta autorizada do Telegram seja comprometida. O chat_id também não deve ser tratado como uma credencial secreta, pois sua função é identificar a conversa autorizada. A principal credencial sensível da integração é o token do bot.

Na versão implementada, o token é definido diretamente no código-fonte e incorporado ao firmware durante a compilação. Essa abordagem simplifica o desenvolvimento do protótipo, porém representa uma limitação de segurança, pois a exposição do código-fonte, do repositório ou de arquivos contendo essa definição pode permitir que terceiros utilizem o bot indevidamente. Por esse motivo, o token não deve ser apresentado no corpo deste trabalho, em imagens, apêndices ou repositórios públicos.

Em uma aplicação definitiva, recomenda-se separar o token do código principal, armazenando-o em um arquivo de credenciais não incluído no controle de versão ou provisionando-o de forma protegida na memória do dispositivo. Caso exista suspeita de exposição, a credencial deve ser revogada e substituída por meio das

ferramentas de administração de bots do Telegram. Na implementação atual, essa substituição exige a alteração e uma nova gravação do firmware.

O identificador do cuidador pode ser alterado pela interface web local, que armazena o novo valor no arquivo `config.json`. Entretanto, o acesso a essa interface também deve ser controlado, pois uma pessoa com acesso à rede local e à página de configuração poderia modificar o destinatário autorizado. Uma aplicação definitiva deveria incluir autenticação no painel web e mecanismos de registro das alterações realizadas.

A comunicação com os servidores do Telegram utiliza a classe `WiFiClientSecure`, compatível com conexões TLS. Entretanto, no protótipo foi utilizado o método `setInsecure()`, que desabilita a validação do certificado apresentado pelo servidor. Nessa configuração, os dados podem trafegar de forma cifrada, mas o dispositivo não confirma adequadamente a identidade do servidor remoto. Para uma aplicação definitiva, recomenda-se utilizar a validação do certificado raiz ou outro mecanismo equivalente de autenticação do servidor.

A privacidade das informações transmitidas também deve ser considerada, pois os comandos e alertas podem transportar dados relacionados à rotina medicamentosa. O comando `/informacoes`, por exemplo, apresenta os estoques dos compartimentos, a quantidade de horários programados e o horário do sistema. O comando `/historico` transmite registros recentes de dispensação, retirada do copo e eventuais falhas. Embora essas informações não incluam necessariamente diagnósticos ou prescrições completas, elas podem permitir inferências sobre os hábitos e horários do paciente.

Como medida de minimização de dados, as mensagens devem conter apenas as informações necessárias ao acompanhamento do dispositivo, evitando nomes completos, diagnósticos, prescrições detalhadas ou outros dados pessoais que não sejam indispensáveis. Também é recomendável utilizar uma conversa privada, proteger a conta do cuidador e evitar o compartilhamento de capturas de tela que revelem identificadores ou credenciais.

A integração depende ainda da conexão com a internet e da disponibilidade da infraestrutura externa do Telegram. Em situações de falha na rede, indisponibilidade do serviço ou alteração da API, as notificações remotas e os

comandos podem ficar temporariamente indisponíveis. Essa condição não impede o funcionamento local do agendamento, do RTC, do servomotor, dos sensores, dos LEDs, do buzzer e do armazenamento em LittleFS, mas impossibilita temporariamente o acompanhamento remoto pelo cuidador.

Portanto, a integração com o Telegram mostrou-se adequada para a validação funcional do protótipo acadêmico, porém não deve ser considerada, em sua configuração atual, uma solução definitiva para o tratamento de informações sensíveis. Uma aplicação real demandaria proteção adequada do token, validação dos certificados TLS, autenticação da interface local, políticas de alteração e revogação das credenciais, gerenciamento dos destinatários autorizados, minimização dos dados transmitidos e avaliação dos requisitos de privacidade aplicáveis.

3.10 Procedimentos de Testes

A validação do sistema proposto foi estruturada com base em ensaios de bancada, nos quais o protótipo integrado foi submetido a cenários de operação nominal e a condições controladas de falha. Os procedimentos tiveram como objetivo avaliar a integração entre os subsistemas mecânico, eletrônico e computacional, verificando o comportamento do sistema durante a dispensação, a leitura dos sensores, a comunicação remota, a persistência dos dados e a operação sem conexão com a internet.

Inicialmente, foram realizados testes de estabilidade mecânica para verificar o acionamento do servomotor e o comportamento do mecanismo de dispensação. Nessa etapa, foram avaliadas a posição central de repouso e as posições associadas aos dois compartimentos de medicamentos. O objetivo foi verificar se o deslocamento do mecanismo permitia a liberação da dose sem provocar interferências, travamentos ou esforços excessivos sobre as peças impressas em 3D.

Também foi avaliada a capacidade do mecanismo de realizar a liberação individual da dose. Para esse ensaio, o compartimento foi abastecido com várias unidades do medicamento utilizado nos testes, sendo executados acionamentos sucessivos do disco giratório. Em cada ciclo, observou-se a quantidade de unidades

liberadas, com o objetivo de identificar a ocorrência de passagem simultânea de mais de um comprimido e verificar a adequação entre a abertura do disco e as dimensões das amostras empregadas.

Também foram realizados testes com o sensor óptico infravermelho do tipo breakbeam, responsável pela confirmação física da passagem do medicamento pela rampa. Os ensaios consistiram na interrupção do feixe óptico durante os ciclos de dispensação, verificando-se o acionamento da interrupção de hardware e o registro da liberação pelo firmware. Também foram observadas possíveis interferências provocadas pela iluminação ambiente e por reflexos provenientes da estrutura, com o objetivo de avaliar a estabilidade da leitura.

Os testes da lógica embarcada concentraram-se na validação das transições entre os estados de repouso, dispensação, confirmação da liberação, espera pela retirada do copo, alerta de não retirada e falha de dispensação. Para isso, foram simuladas situações de passagem corretamente detectada, ausência de detecção após o acionamento do servomotor, retenção mecânica da dose, retirada do copo coletor e permanência do recipiente após a liberação do medicamento.

Também foi realizado um teste específico do ciclo do copo coletor. Inicialmente, verificou-se a execução da dispensação com o recipiente corretamente posicionado. Após a passagem do medicamento, o copo foi retirado e posteriormente recolocado sobre o micro switch. Em seguida, foi simulado um novo acionamento com o recipiente ausente, com o objetivo de verificar se o firmware bloqueava a movimentação do servomotor, registrava a ocorrência e acionava as sinalizações correspondentes.

A operação offline foi avaliada por meio da interrupção da conectividade Wi-Fi após a sincronização inicial do relógio. Nesses cenários, verificou-se se o sistema continuava utilizando o RTC DS3231 como referência temporal para a execução dos horários programados, sem depender de consultas contínuas à internet. Também foram realizados testes de desligamento e reinicialização do dispositivo, observando-se o carregamento das informações previamente armazenadas no arquivo config.json, incluindo as credenciais, os cronogramas e os estoques individualizados.

Os testes de comunicação abrangeram a interface web embarcada e a integração com o Telegram. Na interface web, foram avaliados o cadastro e a alteração dos horários, a atualização independente dos estoques dos dois compartimentos e a consulta dos registros. No Telegram, foram verificados os comandos remotos de consulta de informações e histórico, bem como o recebimento de notificações automáticas associadas aos eventos de sucesso, falha e não retirada do copo coletor.

A persistência dos dados foi avaliada pela análise dos arquivos armazenados no LittleFS, verificando-se a manutenção das configurações após a reinicialização, a atualização dos estoques e a geração dos registros com carimbo de data e hora. O crescimento do arquivo logs.txt foi acompanhado durante os ensaios. O firmware também possui um mecanismo de rotação baseado no limite nominal de 50.000 bytes.

Além dos testes funcionais individuais, o protótipo foi submetido a ensaios prolongados de bancada, realizados em diferentes ciclos de aproximadamente oito horas de funcionamento contínuo. Durante esses períodos, o dispositivo permaneceu energizado com o agendador, o módulo RTC, a interface web, os sensores, os dispositivos de sinalização e a comunicação com o Telegram em execução.

Ao longo desses ciclos, foram programados diferentes horários de dispensação e realizados acionamentos manuais adicionais. Esses procedimentos permitiram observar a repetibilidade do movimento do servomotor, a leitura do sensor óptico, a atualização dos estoques, a geração dos registros locais e o monitoramento do copo coletor. O comportamento do protótipo foi acompanhado por meio do Monitor Serial, das sinalizações locais, da interface web, dos arquivos de log e das mensagens enviadas ao cuidador.

Também foram simuladas condições de falha, incluindo interrupção da conexão Wi-Fi após a sincronização inicial, desligamento e restabelecimento da alimentação principal, ausência de detecção da passagem do medicamento, retenção mecânica da dose e permanência do copo coletor após a dispensação. Esses cenários permitiram verificar a continuidade das funções locais e o acionamento dos mecanismos de repetição da tentativa, sinalização, registro e notificação.

Os procedimentos de validação foram conduzidos pelo autor em ambiente controlado de bancada. Não foram realizados testes de usabilidade com pacientes, idosos, familiares ou cuidadores, nem uma avaliação contínua do dispositivo em ambiente domiciliar real. Dessa forma, os resultados permitem analisar a integração técnica e o comportamento funcional do protótipo, mas não permitem avaliar sua aceitação, facilidade de utilização ou impacto sobre a rotina medicamentosa do público-alvo.

Os ensaios prolongados também não constituíram um teste ininterrupto de durabilidade durante vários dias, uma avaliação certificada de confiabilidade ou um ensaio de envelhecimento dos componentes. O consumo energético foi observado apenas de forma funcional, por meio da manutenção do dispositivo energizado, sem medição quantitativa com instrumentos específicos. Portanto, os procedimentos representam uma avaliação preliminar de robustez, composta por ciclos prolongados de bancada e condições controladas de falha.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

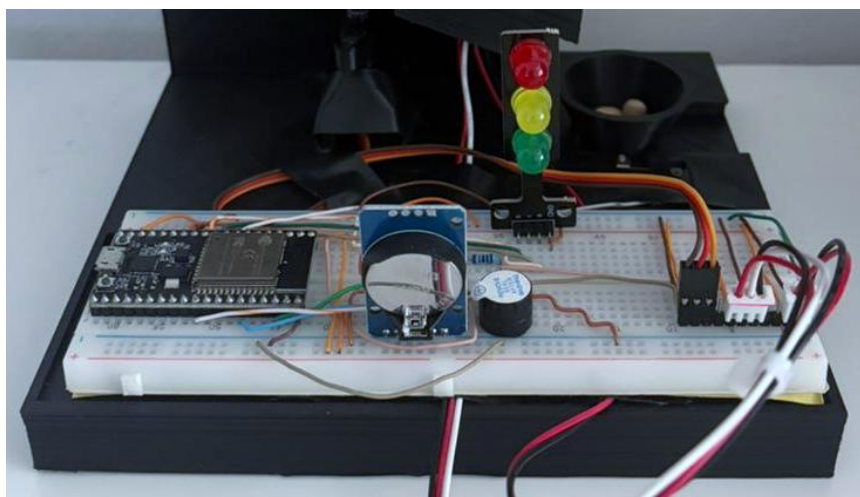
Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a implementação e os testes funcionais do sistema automatizado de dispensação e monitoramento remoto de medicamentos. Inicialmente, apresenta-se o resultado da integração dos subsistemas que compõem o protótipo físico. Em seguida, são analisados os resultados da validação eletromecânica, da interface web embarcada, da persistência local de dados, das notificações remotas via Telegram e da operação integrada do sistema. Por fim, são discutidas as principais limitações identificadas durante os ensaios e as possibilidades de aprimoramento da solução.

4.1 Montagem e Integração do Protótipo Físico

A integração dos subsistemas resultou no protótipo físico apresentado na Figura 7. Nessa configuração, a estrutura mecânica, o circuito eletrônico, os sensores, o servomotor e os dispositivos de sinalização foram reunidos em uma única plataforma, possibilitando a realização dos testes funcionais do ciclo de dispensação.

Nos ensaios integrados, o posicionamento do sensor óptico na trajetória de queda permitiu verificar a passagem do medicamento, enquanto o micro switch instalado na região de apoio do copo coletor possibilitou identificar a presença e a retirada do recipiente. Dessa forma, os dois sensores atuaram como elementos de realimentação do ciclo de dispensação.

Figura 7 - Protótipo final integrado do sistema de dispensação



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A disposição adotada permitiu acessar os componentes eletrônicos e alterar as conexões durante os ensaios. A montagem em protoboard mostrou-se suficiente para a validação funcional do protótipo, porém a presença de fiação aparente e a ausência de um gabinete definitivo reduziram sua robustez mecânica e limitaram sua adequação para utilização prolongada fora do ambiente de bancada.

4.2 Validação Eletromecânica e dos Sensores

Após a integração física do protótipo, foram realizados testes funcionais para verificar o comportamento do mecanismo de dispensação, do servomotor e dos sensores utilizados na validação do processo. Essa etapa teve como objetivo avaliar se os comandos enviados pelo firmware resultavam em movimentos mecânicos adequados e se os sensores eram capazes de fornecer retorno ao sistema durante as etapas de liberação da dose e retirada do copo coletor.

Inicialmente, foi avaliado o funcionamento do servomotor MG90S nas três posições utilizadas pelo mecanismo: 90° para repouso, 0° para acionamento do

compartimento associado ao Remédio 1 e 180° para acionamento do compartimento associado ao Remédio 2. Durante os testes, verificou-se que o deslocamento angular permitiu o acionamento dos dois lados do mecanismo de dispensação, retornando posteriormente à posição central de repouso. Esse comportamento possibilitou a liberação independente das doses de cada compartimento, conforme o tipo de medicamento definido no cronograma ou no acionamento manual.

Também foi avaliada a resposta mecânica do conjunto formado pelo funil, disco giratório e rampa de queda. Nos ensaios realizados, observou-se que a geometria adotada permitiu o direcionamento das pílulas até a região de saída do dispositivo, embora o desempenho possa variar conforme o formato, tamanho e acabamento superficial do medicamento utilizado. Essa limitação é relevante, pois comprimidos muito pequenos, irregulares ou com alta aderência superficial podem apresentar maior tendência a travamentos ou desalinhamentos durante a condução mecânica.

A validação da passagem da pílula foi realizada por meio do sensor óptico infravermelho do tipo breakbeam, posicionado na região da rampa de queda. Durante os ciclos de dispensação, a interrupção do feixe óptico permitiu ao firmware identificar a passagem do medicamento e registrar o evento de dispensação. Dessa forma, o sensor atuou como elemento de confirmação física da liberação da dose, reduzindo a dependência exclusiva do acionamento do servomotor como indicador de sucesso.

A chave mecânica micro switch, posicionada abaixo do copo coletor, foi utilizada para verificar a presença e a retirada do recipiente. Nos testes realizados, o acionamento da chave permitiu ao sistema reconhecer quando o copo estava posicionado corretamente e quando havia sido retirado após a liberação da dose. Esse sinal foi utilizado pelo firmware para controlar a etapa de espera pela retirada e para gerar alertas em caso de permanência do copo após o intervalo definido.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos principais testes eletromecânicos e de sensoriamento realizados, relacionando o comportamento esperado com o resultado observado durante a validação funcional do protótipo.

Tabela 2 - Testes funcionais do mecanismo de dispensação e sensores

Teste realizado	Ocorrência observada e ajuste realizado	Resultado após ajuste
Acionamento do servomotor	Na primeira versão, o encaixe entre a roda circular do mecanismo e o eixo do servomotor não ficou adequado, comprometendo a transmissão do movimento. Inicialmente, foi utilizada uma fixação provisória com cola quente para validar o conceito. Em seguida, a roda foi redesenhada considerando as dimensões do encaixe do servomotor e novamente impressa em 3D.	Após o redesenho e a nova impressão, o acoplamento passou a encaixar corretamente, permitindo o acionamento das posições de 0°, 90° e 180°.
Condução da pílula pelo funil e rampa	A geometria do funil e da rampa conduziu a pílula até o copo coletor conforme previsto, sem necessidade de alterações relevantes nessa etapa.	A pílula foi direcionada corretamente para a região do copo coletor.
Sensor óptico breakbeam	Inicialmente, a detecção não ocorreu de forma satisfatória, pois a passagem da pílula nem sempre era reconhecida. Foram adicionados resistores ao circuito de leitura e aplicada fita opaca ao redor do emissor e do receptor, deixando apenas uma pequena abertura para o feixe infravermelho.	Após os ajustes, o sensor passou a detectar a passagem da pílula com maior sensibilidade e consistência.
Micro switch do copo coletor	O acionamento do micro switch exigiu pequenos ajustes físicos na base de apoio do copo, incluindo cortes e lixamentos pontuais para melhorar o contato mecânico.	O sistema passou a reconhecer adequadamente a presença e a retirada do copo coletor.

Alerta de não retirada	A lógica inicial do firmware não coordenava o buzzer, o semáforo de LEDs e a notificação remota exatamente conforme o comportamento desejado. A lógica foi ajustada para tratar corretamente o tempo limite de retirada.	O sistema passou a acionar os alertas visuais, sonoros e remotos quando o copo não era retirado após o intervalo definido.
------------------------	--	--

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nos ensaios realizados com várias unidades armazenadas simultaneamente no compartimento, observou-se a liberação de uma unidade por acionamento para as amostras utilizadas. Esse resultado indica que, nas condições avaliadas, a relação entre as dimensões dos comprimidos e a abertura do disco giratório foi adequada para a separação individual das doses. Entretanto, o comportamento não pode ser generalizado para medicamentos com dimensões ou formatos diferentes sem novos ensaios.

Os resultados obtidos indicaram que o conjunto eletromecânico e os sensores foram capazes de operar de forma integrada com o firmware embarcado. O servomotor executou os movimentos necessários para a seleção dos dois compartimentos, enquanto o sensor breakbeam e o micro switch forneceram sinais de realimentação ao sistema. Assim, a validação demonstrou que o protótipo possui condições funcionais para executar ciclos de dispensação, detectar a passagem da dose e identificar a retirada do recipiente coletor.

4.3 Interface Web, Estoques e Persistência Local

A interface web embarcada foi validada a partir do acesso ao servidor HTTP executado pelo ESP32, permitindo a visualização do estado operacional do sistema e a configuração dos principais parâmetros do dispositivo. Por meio do navegador, foi possível consultar os estoques individualizados, visualizar os horários programados, ajustar configurações de rede e cadastrar novos agendamentos de dispensação sem necessidade de reprogramação do firmware.

A Figura 8 apresenta a tela principal da interface web, na qual são exibidas informações gerais do sistema, incluindo a identificação dos dois compartimentos de medicamentos e seus respectivos estoques. Essa separação permitiu gerenciar o Remédio 1 e o Remédio 2 de forma independente, mantendo coerência com a lógica de acionamento do servomotor e com a estrutura mecânica de funil duplo adotada no protótipo.

Figura 8 - Tela de status da interface web com estoques individualizados



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Também foi validada a funcionalidade de cadastro e atualização dos horários de dispensação. A interface permitiu associar cada agendamento a um dos dois compartimentos, possibilitando que o firmware identificasse qual medicamento deveria ser liberado em cada ciclo. Na versão avaliada, cada agendamento corresponde à liberação nominal de uma única unidade do medicamento selecionado.

A interface não disponibiliza um campo para configuração da quantidade de comprimidos por dose. Dessa forma, não foram validadas a liberação de várias unidades do mesmo compartimento em um único agendamento nem a dispensação combinada de medicamentos dos dois compartimentos no mesmo ciclo. O sistema desenvolvido permite configurar múltiplos horários ao longo do dia, mas cada item cadastrado representa um evento independente de dispensação.

Figura 9 - Tela de cadastro de horários e seleção do compartimento de medicamento

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além das funcionalidades de configuração, foi verificada a persistência local dos dados por meio do sistema de arquivos LittleFS. As informações de rede, horários programados, identificador do cuidador e estoques dos dois compartimentos foram armazenadas em arquivo de configuração no formato JSON. Durante os testes, observou-se que, após a reinicialização do dispositivo, os dados previamente cadastrados foram recuperados, mantendo o estado operacional do sistema.

O sistema também registrou eventos relevantes em arquivo de log, permitindo a rastreabilidade das ações executadas pelo protótipo. Entre os eventos registrados, destacam-se acionamentos do mecanismo de dispensação, detecção da passagem da pílula pelo sensor óptico, atualização de estoque, retirada do copo coletor e situações de falha simulada, como a não retirada do recipiente após o tempo limite. A Figura 10 apresenta um exemplo de histórico exibido pela interface web.

Figura 10 - Histórico de eventos registrado e exibido pela interface web



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos indicaram que a interface web e a persistência local atenderam aos requisitos funcionais propostos para configuração, gerenciamento e rastreabilidade do sistema. A possibilidade de alterar horários, consultar estoques e visualizar eventos diretamente pelo navegador facilitou a operação do dispositivo, enquanto o armazenamento em *LittleFS* permitiu preservar informações essenciais mesmo após reinicializações do ESP32. A capacidade efetivamente disponível para a persistência local depende da capacidade da memória Flash instalada no módulo e do esquema de particionamento adotado durante a compilação do firmware.

Na implementação desenvolvida, o sistema de arquivos *LittleFS* foi utilizado para armazenar o arquivo de configurações *config.json* e os arquivos de auditoria *logs.txt* e *logs.old*. O arquivo ativo de registros possui limite nominal de 50.000 bytes, equivalente a aproximadamente 48,8 KiB. Como o mecanismo mantém também uma geração anterior denominada *logs.old*, os arquivos de auditoria podem ocupar nominalmente cerca de 100.000 bytes, além do espaço utilizado pelas configurações e pela estrutura interna do sistema de arquivos.

Durante os ensaios, não foi realizada uma caracterização quantitativa da capacidade da partição *LittleFS*, do espaço total ocupado e do espaço livre no dispositivo. Dessa forma, foi possível estabelecer o limite previsto para os arquivos de auditoria, mas não determinar a ocupação efetiva da memória na configuração avaliada. A obtenção desses valores pode ser realizada por meio dos recursos de

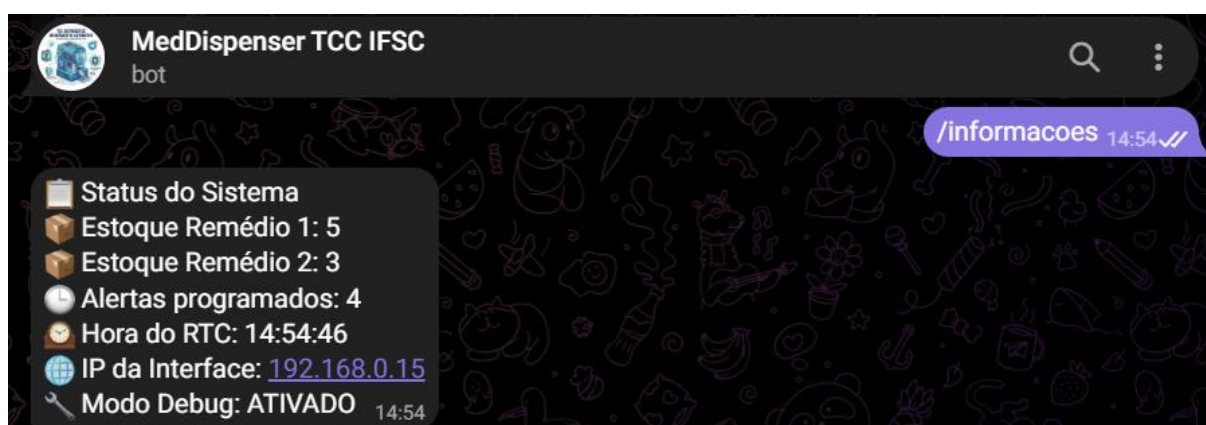
consulta disponibilizados pelo *LittleFS*, constituindo uma etapa complementar para a caracterização completa do armazenamento do protótipo.

4.4 Notificações Remotas via Telegram

Após a criação e configuração do bot conforme o procedimento descrito na Seção 3.9, a integração com o Telegram foi avaliada por meio do envio de comandos pelo cuidador autorizado e do recebimento de mensagens automáticas geradas pelo firmware. Os testes tiveram como objetivo verificar a comunicação remota dos principais eventos operacionais, complementando a sinalização local realizada pelos LEDs e pelo buzzer.

Inicialmente, foram testados os comandos de consulta disponíveis no bot. O comando `/informacoes` retornou dados operacionais do dispositivo, como os estoques individualizados dos dois medicamentos, o horário atual informado pelo RTC, o endereço IP da interface web e o estado geral do sistema. Também foi testado o comando `/historico`, utilizado para consultar remotamente os registros armazenados no arquivo de log. Esses comandos permitiram acompanhar o funcionamento do protótipo sem necessidade de acesso físico direto ao dispositivo.

Figura 11 - Comando `/informacoes` executado no bot do Telegram

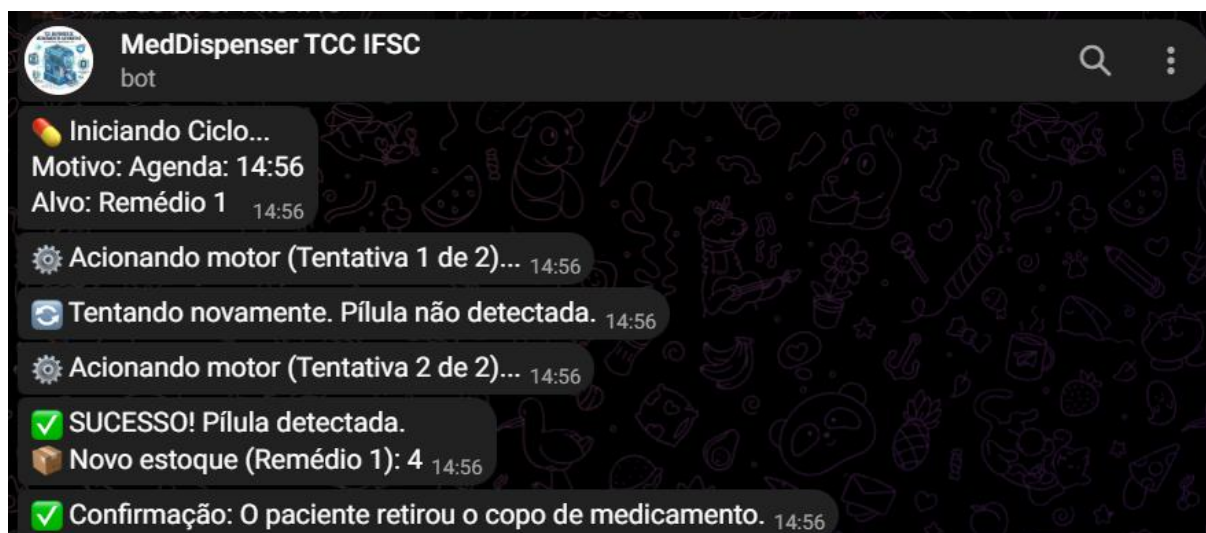


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Além dos comandos sob demanda, foram avaliadas as notificações automáticas enviadas pelo sistema durante a execução dos ciclos de dispensação. Entre os eventos comunicados ao cuidador, destacam-se o acionamento manual do mecanismo, a confirmação de dispensação, a atualização do estoque do

medicamento liberado e as condições de falha simulada. Essas mensagens possibilitaram identificar remotamente quando um ciclo foi iniciado, se a passagem da pílula foi detectada e se houve alguma ocorrência que exigisse atenção.

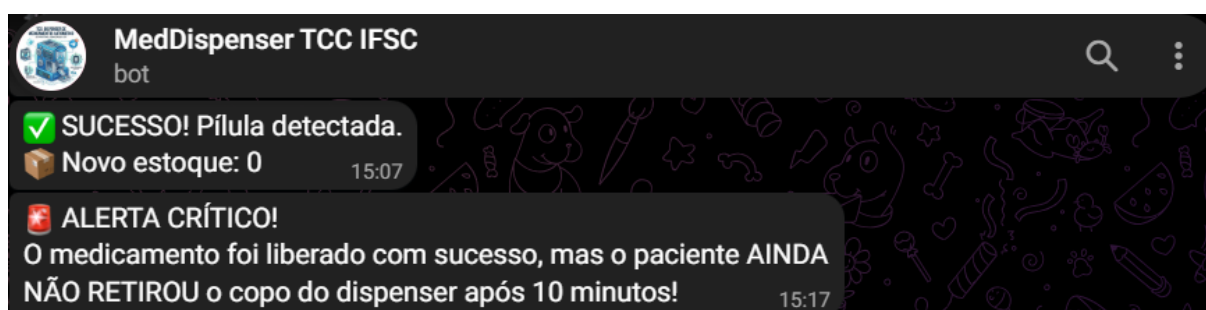
Figura 12 - Notificações automáticas de dispensação e atualização de estoque



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Também foi validado o envio de alertas críticos em situações de falha, especialmente no cenário de não retirada do copo coletor após o tempo limite configurado. Nessa condição, o sistema manteve a sinalização local por meio do semáforo de LEDs e do buzzer, enquanto enviava uma mensagem remota ao cuidador informando a ocorrência. Esse comportamento demonstrou que a integração com o Telegram contribuiu para ampliar a capacidade de acompanhamento do usuário, permitindo que falhas ou esquecimentos fossem identificados mesmo à distância.

Figura 13 - Alerta de não retirada do copo enviado pelo Telegram



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados obtidos indicaram que o bot do Telegram atendeu aos requisitos funcionais de monitoramento remoto definidos para o protótipo. A

comunicação sob demanda permitiu consultar informações e histórico de eventos, enquanto as mensagens automáticas forneceram alertas em momentos relevantes da operação, incluindo confirmações de dispensação e situações de falha simulada. Dessa forma, a integração remota complementou os recursos locais de sinalização e reforçou a rastreabilidade do processo de dispensação.

4.5 Avaliação Integrada do Sistema

Após a validação individual dos módulos mecânico, eletrônico, da interface web, da persistência local e das notificações remotas, foi realizada uma avaliação integrada do sistema em ambiente de bancada. Essa etapa teve como objetivo verificar o comportamento coordenado do protótipo em um cenário representativo da rotina de operação, considerando horários programados para os dois medicamentos, acionamento automático do mecanismo, detecção da passagem da dose, atualização dos estoques, registro dos eventos, sinalização local e envio de notificações ao cuidador.

Durante os testes, foram configurados agendamentos para o Remédio 1 e para o Remédio 2, permitindo avaliar se o firmware acionava o compartimento correspondente a cada horário programado. Observou-se que o sistema executou os ciclos conforme a programação definida, movimentando o servomotor para a posição associada ao medicamento selecionado e retornando posteriormente à posição de repouso. Após a detecção da passagem da dose pelo sensor óptico, o estoque do respectivo compartimento foi atualizado e o evento foi registrado no histórico local.

A avaliação integrada também permitiu observar a interação entre os mecanismos de sinalização local e remota. Durante os ciclos de dispensação, os LEDs e o buzzer indicaram os estados operacionais do dispositivo, enquanto o bot do Telegram enviou mensagens relacionadas aos eventos relevantes. Nos cenários de falha simulada, como ausência de detecção da passagem do medicamento e permanência do copo coletor após o tempo limite, o sistema acionou os alertas visuais e sonoros, registrou a ocorrência e, quando havia conectividade, enviou uma notificação ao cuidador.

Além dos ensaios funcionais individuais, o protótipo foi submetido a diferentes ciclos de aproximadamente oito horas de funcionamento contínuo. Durante esses períodos, permaneceram ativos o agendador, o módulo RTC, os sensores, a interface web, os dispositivos de sinalização e a comunicação com o Telegram. Nos períodos acompanhados, não foram observadas reinicializações espontâneas nem bloqueios permanentes do firmware. Os horários programados foram processados a partir da referência temporal fornecida pelo RTC, e os eventos correspondentes foram armazenados no sistema de arquivos local.

As falhas de dispensação simuladas ou observadas durante os acionamentos foram identificadas indiretamente pela ausência de interrupção do feixe óptico. Nessas condições, o firmware realizou uma segunda tentativa de acionamento. Quando a passagem continuou sem ser detectada, o sistema sinalizou a falha por meio dos LEDs e do buzzer, registrou a ocorrência localmente e, quando havia conexão com a internet, enviou uma notificação ao cuidador.

Durante os testes de interrupção da conexão Wi-Fi, realizados após a sincronização inicial do horário, o agendamento local continuou utilizando o RTC como referência temporal. As funções de dispensação, leitura dos sensores, sinalização e registro permaneceram disponíveis, enquanto os comandos e as notificações pelo Telegram ficaram temporariamente indisponíveis. Como a versão avaliada não possui uma rotina explícita de reconexão periódica no laço principal, a recuperação automática da comunicação remota não foi considerada garantida sem uma nova conexão ou reinicialização do dispositivo.

Nos testes de interrupção da alimentação principal, o ESP32, o servomotor, os sensores, os dispositivos de sinalização e as interfaces de comunicação deixaram de operar imediatamente. A bateria auxiliar do RTC manteve somente a contagem de data e hora, não fornecendo energia aos demais componentes do protótipo. Consequentemente, nenhuma dispensação, leitura de sensores, sinalização ou notificação foi executada durante o período sem alimentação.

Após o restabelecimento da energia, o firmware foi reiniciado e as configurações armazenadas no arquivo config.json foram novamente carregadas. A referência temporal permaneceu preservada pelo RTC quando sua bateria auxiliar estava presente e funcional. O sistema iniciou uma nova tentativa de conexão com a

rede Wi-Fi cadastrada e, quando a comunicação foi estabelecida, realizou novamente o ajuste temporal por NTP.

A versão avaliada não possui um mecanismo de recuperação das doses cujo horário ocorreu durante a interrupção. Dessa forma, essas dispensações não foram executadas retroativamente após a reinicialização, e o sistema retomou somente o acompanhamento dos horários subsequentes.

O crescimento dos arquivos de auditoria também foi acompanhado durante os ciclos de funcionamento. Os eventos gerados permaneceram disponíveis no arquivo logs.txt e na interface local. Entretanto, o arquivo não atingiu o limite nominal de 50.000 bytes durante os ensaios prolongados. Dessa forma, a geração e o crescimento dos registros foram verificados experimentalmente, enquanto o mecanismo de rotação para logs.old foi analisado apenas com base na lógica implementada no firmware, não tendo sido validado por meio do preenchimento integral do arquivo.

Os resultados da avaliação integrada indicaram que os subsistemas desenvolvidos operaram de forma coordenada durante os ensaios realizados. A execução dos agendamentos, o acionamento seletivo dos compartimentos, a leitura dos sensores, a atualização dos estoques, a persistência dos registros e o envio das notificações demonstraram a viabilidade funcional da arquitetura proposta para um protótipo acadêmico de bancada. Entretanto, os ciclos de aproximadamente oito horas não constituem um ensaio contínuo de durabilidade durante vários dias, e seus resultados não permitem estimar a vida útil dos componentes ou a confiabilidade do sistema em utilização domiciliar prolongada.

4.6 Estimativa de custo e análise de acessibilidade econômica

Para estimar o custo de desenvolvimento do protótipo, foram considerados os principais componentes eletrônicos e materiais empregados na montagem, utilizando-se como referência os preços praticados em lojas brasileiras de componentes eletrônicos em julho de 2026. Sempre que possível, foram utilizados valores da *MakerHero*, estabelecimento no qual parte dos componentes foi adquirida.

Para itens indisponíveis no momento da consulta, foram adotados preços de componentes equivalentes encontrados em outros fornecedores nacionais.

A estimativa contempla os materiais efetivamente utilizados na montagem e na prototipagem mecânica. Não foram incluídos frete, mão de obra de desenvolvimento, energia elétrica, depreciação da impressora 3D, computador, ferramentas, equipamentos de medição, custos de certificação, embalagem ou eventual fabricação de uma placa de circuito impresso.

Tabela 3 - Estimativa de custo dos materiais utilizados no protótipo

Componente ou material	Quantidade	Valor unitário de referência
Placa ESP32 DevKit	1	R\$ 51,90
Módulo RTC DS3231	1	R\$ 19,90
Servomotor MG90S	1	R\$ 22,90
Sensor IR Breakbeam	1	R\$ 8,90
Micro switch com alavanca	1	R\$ 6,00
Buzzer ativo de 5 V	1	R\$ 5,90
Módulo de semáforo	1	R\$ 4,90
Resistores para os LEDs	3	R\$ 0,24
Protoboard de 830 pontos	1	R\$ 13,90
Conjunto de fios jumper	1	R\$ 7,90
Filamento para impressão 3D	0,60 a 0,70 kg	R\$ 72,00

Fonte: Elaborado pelo autor com base em pesquisa de preços realizada em julho de 2026.

A estimativa resultou em um custo de materiais entre R\$ 214,44 e R\$ 226,44, considerando a variação do consumo de filamento durante as impressões. Adotando-se o valor intermediário de 65% de um rolo, o custo aproximado do desenvolvimento foi de R\$ 220,44. O consumo de filamento inclui não apenas as peças presentes na versão final, mas também versões intermediárias, peças sobressalentes e impressões utilizadas durante os ajustes do mecanismo.

A expressão “baixo custo”, no contexto deste trabalho, refere-se ao custo reduzido dos materiais necessários para a construção de um protótipo acadêmico funcional, utilizando componentes comerciais de ampla disponibilidade, software sem cobrança de licenças e fabricação por impressão 3D. A expressão não representa o

preço final de um produto comercial, pois não inclui mão de obra, desenvolvimento, ferramentas, certificações, impostos, embalagem, garantia, suporte técnico ou margem de comercialização.

Não foi realizada uma comparação econômica direta com produtos comerciais, pois os dispensadores automáticos encontrados apresentam características, funcionalidades e níveis de acabamento distintos daqueles do protótipo desenvolvido. Dessa forma, a estimativa apresentada limita-se ao custo dos materiais empregados na construção acadêmica e não permite afirmar que uma eventual versão comercial teria custo inferior ao dos produtos disponíveis no mercado.

Além disso, a transformação do protótipo em produto exigiria investimentos relacionados à robustez, à segurança elétrica, ao acabamento, à confiabilidade mecânica, à certificação e à conformidade com requisitos regulatórios.

Mesmo incluindo o material consumido nas impressões de teste, o custo estimado dos componentes do protótipo permaneceu inferior aos valores observados nessa amostra de dispensadores comercializados. Contudo, essa diferença não permite concluir que uma versão comercial do projeto apresentaria o mesmo custo, pois a transformação do protótipo em produto exigiria melhorias de robustez, segurança elétrica, acabamento, confiabilidade mecânica e conformidade com requisitos regulatórios.

Dessa forma, o resultado permite caracterizar a solução como um protótipo de custo acessível no contexto acadêmico e experimental. Para uma análise econômica completa, seria necessário desenvolver uma versão consolidada do dispositivo, determinar a massa exata das peças finais, substituir a protoboard por uma placa dedicada, estimar custos de montagem e avaliar diferentes volumes de produção.

4.7 Síntese dos Resultados e Limitações Observadas

De modo geral, os testes realizados demonstraram que o protótipo desenvolvido foi capaz de integrar os subsistemas mecânico, eletrônico e computacional em uma plataforma funcional de dispensação automatizada de medicamentos. O sistema permitiu o acionamento seletivo dos dois compartimentos,

a detecção da passagem da pílula pelo sensor óptico, o reconhecimento da presença e retirada do copo coletor, a atualização individualizada dos estoques, o registro local dos eventos e o envio de notificações remotas ao cuidador.

Os resultados obtidos também indicaram que a arquitetura com sincronização híbrida de tempo contribuiu para a continuidade da operação dos agendamentos, uma vez que o RTC DS3231 manteve a referência temporal local após a sincronização inicial via rede. A interface web embarcada permitiu configurar horários e estoques sem reprogramação do firmware, enquanto o uso do LittleFS possibilitou armazenar configurações e registros de auditoria na memória Flash do ESP32.

Apesar dos resultados funcionais obtidos, algumas limitações foram observadas. A montagem eletrônica permaneceu em protoboard, com fiação aparente e sem gabinete definitivo, o que limita a robustez física do protótipo para uso prolongado. O desempenho mecânico também pode variar conforme o formato, tamanho e acabamento superficial das pílulas utilizadas, exigindo ajustes futuros no mecanismo de condução e liberação. Além disso, a avaliação realizada possui caráter funcional e experimental, não representando validação clínica, certificação regulatória ou autorização para uso médico comercial.

Dessa forma, os resultados indicam a viabilidade funcional da solução proposta como protótipo acadêmico, ao mesmo tempo em que evidenciam oportunidades de aprimoramento para versões futuras, especialmente em relação ao acabamento mecânico, encapsulamento eletrônico, robustez do mecanismo de dispensação e ampliação dos testes em ambiente domiciliar assistido.

Em relação à alimentação, o protótipo depende continuamente de uma fonte externa e não dispõe de bateria principal ou sistema UPS. A bateria do módulo RTC preserva apenas a referência temporal, não mantendo o funcionamento do mecanismo de dispensação e dos demais subsistemas. Por esse motivo, interrupções de energia podem ocasionar a perda de doses programadas durante o período sem alimentação. O consumo de corrente, potência e energia também não foi quantificado com instrumentos específicos, não sendo possível estimar a autonomia de uma futura solução alimentada por bateria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho cumpriu o objetivo de desenvolver um sistema IoT integrado para a dispensação automatizada e o monitoramento remoto de medicamentos no ambiente domiciliar. Diante da necessidade de auxiliar pacientes em tratamentos contínuos, o protótipo apresentou uma solução tecnológica funcional, capaz de reduzir a dependência exclusiva da memória humana e apoiar a rotina de cuidadores e familiares.

Os resultados demonstraram a viabilidade funcional da integração entre mecânica, hardware e software. O mecanismo de duplo compartimento operou de forma adequada nos testes realizados, permitindo o acionamento individualizado dos medicamentos. A arquitetura do firmware contribuiu para a organização das etapas de dispensação, leitura dos sensores, atualização dos estoques e tratamento de falhas. Além disso, a operação offline apoiada pelo módulo RTC DS3231, associada à auditoria de dados no LittleFS e às notificações remotas via bot do Telegram, evidenciou a capacidade do sistema de manter funções essenciais mesmo em cenários de instabilidade de conexão.

Conclui-se, portanto, que a solução proposta é tecnicamente viável no contexto de um protótipo acadêmico funcional. O custo dos materiais empregados foi estimado entre R\$ 214,44 e R\$ 226,44, desconsiderando mão de obra, frete, equipamentos, certificação e custos relacionados à transformação do protótipo em produto comercial.

Apesar disso, sua aplicação prática ainda depende de aprimoramentos mecânicos, eletrônicos e de validações mais amplas em cenários reais de uso.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para a evolução e continuidade da pesquisa, sugerem-se os seguintes aprimoramentos:

Desenvolvimento de hardware definitivo: substituir a montagem em protoboard por uma Placa de Circuito Impresso (PCB) customizada e projetar um

gabinete externo fechado para proteger os componentes eletrônicos, organizar a fiação e aumentar a robustez do protótipo.

Refinamento mecânico: otimizar as geometrias do disco rotativo, do funil e da rampa para acomodar comprimidos e cápsulas de formatos e tamanhos variados, minimizando atritos, desalinhamentos e riscos de obstrução.

Validação domiciliar assistida: realizar ensaios práticos contínuos em ambiente domiciliar, com usuários do público-alvo e seus familiares ou cuidadores, visando avaliar a usabilidade, a aceitação, a clareza das sinalizações e o impacto da solução na rotina de cuidados.

Autonomia energética: integrar um circuito de alimentação ininterrupta (UPS) com baterias, garantindo o funcionamento do dispenser, dos sensores e dos recursos de conectividade durante quedas temporárias no fornecimento de energia elétrica.

Como limitação, o sistema não permite configurar uma quantidade variável de unidades por dose. Para incorporar essa funcionalidade, seria necessário adicionar um campo de quantidade ao cronograma, executar ciclos sucessivos de dispensação, confirmar individualmente a passagem de cada unidade pelo sensor óptico, atualizar o estoque conforme a quantidade efetivamente liberada e coordenar o estado do copo coletor durante todo o processo. Também seria necessário validar mecanicamente o comportamento do *dispenser* para múltiplas liberações consecutivas.

REFERÊNCIAS

ADAFRUIT INDUSTRIES. **IR breakbeam sensors**. 2014. Atualizado em: 1 maio 2024. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/ir-breakbeam-sensors/overview>. Acesso em: 19 jul. 2026.

ANALOG DEVICES. **DS3231: extremely accurate I2C-integrated RTC/TCXO/crystal**. [S. l.]: Analog Devices, 2015. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds3231.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2026.

ARM LIMITED. **LittleFS: a little fail-safe filesystem designed for microcontrollers**. GitHub, 2026. Disponível em: <https://github.com/littlefs-project/littlefs>. Acesso em: 7 maio 2026.

BAHGA, Arshdeep; MADISSETTI, Vijay. **Internet of Things: a hands-on approach**. Hyderabad: Universities Press, 2015.

BARR, Michael; MASSA, Anthony. **Programming embedded systems: with C and GNU development tools**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2006.
BOLTON, William. **Mecatrônica: uma abordagem multidisciplinar**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

BRASIL. Subsecretaria Nacional de Promoção dos Direitos da Pessoa com Deficiência. Comitê de Ajudas Técnicas. **Tecnologia assistiva**. Brasília: CORDE, 2009.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 series datasheet**. [S. l.]: Espressif Systems, 2024. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 4 abr. 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. **Wi-Fi API: WiFiAP**. Arduino ESP32 Documentation, 2026. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/api/wifi.html>. Acesso em: 28 maio 2026.

FRADEN, Jacob. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. 5. ed. Cham: Springer, 2016.

GAL, Eran; TOLEDO, Sivan. Algorithms and data structures for flash memories. **ACM Computing Surveys**, New York, v. 37, n. 2, p. 138-163, 2005.

LEE, Edward A.; SESHIA, Sanjit A. **Introduction to embedded systems: a cyber-physical systems approach**. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2017.

HERO HEALTH. **Hero smart pill dispenser and medication management service**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://herohealth.com/our-product/>. Acesso em: 26 jul. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA — IBGE. **Censo Demográfico 2022: população por idade e sexo: pessoas de 60 anos ou mais de idade: resultados do universo: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da**

Federação. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102038.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2026.

MARWEDEL, Peter. **Embedded system design: embedded systems foundations of cyber-physical systems, and the Internet of Things**. 4. ed. Cham: Springer, 2021.

MEDMINDER. **Medication management for individuals**. [S. I.], [s. d.]. Disponível em: <https://medminder.com/for-patients/>. Acesso em: 26 jul. 2026.

META PLATFORMS. **WhatsApp Cloud API**. Meta for Developers, 2026. Disponível em: <https://developers.facebook.com/docs/whatsapp/cloud-api/>. Acesso em: 9 jun. 2026.

MILLS, David L. et al. **Network Time Protocol Version 4: protocol and algorithms specification**. RFC 5905. [S. I.]: Internet Engineering Task Force, 2010. Disponível em: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5905.html>. Acesso em: 15 abr. 2026.

MOZILLA. **HTTP request methods**. MDN Web Docs, 2025. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Reference/Methods>. Acesso em: 23 maio 2026.

TELEGRAM. **Telegram Bot API**. Telegram, 2026. Disponível em: <https://core.telegram.org/bots/api>. Acesso em: 13 jun. 2026.

WHATSAPP. **WhatsApp Business Platform Pricing**. WhatsApp Business, 2026. Disponível em: <https://whatsappbusiness.com/products/platform-pricing/>. Acesso em: 9 jun. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Adherence to long-term therapies: evidence for action**. Geneva: World Health Organization, 2003.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Medication safety in polypharmacy: technical report**. Geneva: World Health Organization, 2019.

