



DO ESTATICO AO DINÂMICO: ARQUITETURA MODULAR PARA PRÓTESES ÓCULO-PALPEBRAIS COM MOVIMENTO NATURAL

From static to dynamic: modular architecture for oculo-palpebral prostheses with natural movement

De lo estático a lo dinámico: arquitectura modular para prótesis óculo-palpebrales con movimiento natural

Heitor Lara Cardoso ^{1*}, João Manoel Nascimento Ferreira ², José Aguiomar Foggatto ³, & Marcelo H. Stoppa ⁴

^{1 2 3 4} Universidade Federal de Catalão - UFCAT

^{1*} heitor.cardoso@discente.ufcat.edu.br ² joao.nascimento@discente.ufcat.edu.br ³ foggatto@utfpr.edu.br ⁴ mhstoppa@ufcat.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 31.10.2026

Disponibilizado: 07.06.2026

PALAVRAS-CHAVE: Prótese ocular dinâmica; modularidade; tecnologia assistiva; detecção de piscadas; Uncanny Valley.

KEYWORDS: Dynamic ocular prosthesis; modularity; assistive technology; blink detection; Uncanny Valley.

PALABRAS CLAVE: Prótesis ocular dinámica; modularidad; tecnología asistida; detección de parpadeo; Uncanny Valley.

*Autor Correspondente: Cardoso, H. L.

RESUMO

Com a ausência de movimento dinâmico, especialmente a falta do piscar palpebral sincronizado, existe uma limitação fundamental nas próteses oculares convencionais, contribuindo para o fenômeno Uncanny Valley e dificultando a aceitação social. Avaliou-se por tanto, a viabilidade do desenvolvimento de um sistema bioinspirado acessível que traduza os sinais de uma piscada em um dispositivo mecatrônico. Além disso, sincronizando o suficiente para aumentar a percepção de naturalidade. Abordando essa lacuna por meio do desenvolvimento de um sistema de detecção/atução em tempo real. A arquitetura integra sensores não invasivos acoplados a óculos para captura do sinal do olho funcional; um algoritmo de processamento evento; e um módulo atuador para a reprodução do movimento em uma plataforma animatrônica. Os testes validaram a hipótese inicial, demonstrando um considerável grau de sincronismo entre o estímulo biológico e a resposta protética. A análise do movimento resultante indicou uma cinemática natural, que se mostrou eficaz na melhoria da percepção da artificialidade. Estabelece-se um paradigma promissor que transcende a função puramente estética das próteses. Ao validar a integração entre sensores, algoritmos de detecção e atuadores, esta pesquisa oferece uma contribuição significativa para o campo das próteses inteligentes, demonstrando uma solução técnica viável para torná-las mais expressivas e socialmente integradas.

ABSTRACT

The absence of dynamic movement, especially the lack of synchronized eyelid blinking, represents a fundamental limitation in conventional ocular prostheses, contributing to The Uncanny Valley phenomenon and hindering social acceptance. Therefore, this study evaluated the feasibility

of developing an accessible bio-inspired system capable of translating blink signals into a mechatronic device, while providing sufficient synchrony to enhance the perception of naturalness. This gap was addressed through the development of a real-time detection and actuation system. The architecture integrates non-invasive sensors attached to eyeglasses to capture the signal from the functional eye; a processing algorithm for event detection; and an actuator module to reproduce the movement on an animatronic platform. The tests validated the initial hypothesis, demonstrating a considerable degree of synchrony between the biological stimulus and the prosthetic response. The analysis of the resulting movement indicated natural kinematics, which proved effective in improving the perception of artificiality. This establishes a promising paradigm that transcends the purely aesthetic function of prostheses. By validating the integration of sensors, detection algorithms, and actuators, this research offers a significant contribution to the field of intelligent prosthetics, demonstrating a technically feasible solution for making them more expressive and socially integrated.

RESUMEN

La ausencia de movimiento dinámico, especialmente la falta de parpadeo sincronizado constituye una limitación esencial en las prótesis oculares convencionales, favoreciendo el fenómeno del Uncanny Valley y dificultando su aceptación social. Por ello, se evaluó la viabilidad de un sistema bioinspirado accesible capaz de traducir la señal de parpadeo del ojo funcional a un dispositivo mecatrónico, proporcionando el grado de sincronización necesario para aumentar la percepción de naturalidad. La propuesta se desarrolló mediante un sistema de detección y actuación en tiempo real. La arquitectura integra sensores no invasivos acoplados a gafas para captar la señal del ojo; un algoritmo de procesamiento para detectar el evento; y un módulo actuador que reproduce el movimiento en una plataforma animatrónica. Los ensayos validaron la hipótesis planteada, demostrando una sincronía considerable entre el estímulo biológico y la respuesta protésica. El análisis cinemático reveló un movimiento natural, eficaz para reducir la percepción de artificialidad. El estudio establece un enfoque que supera la función meramente estética de las prótesis, y al confirmar la integración entre sensores, algoritmos y actuadores, aporta una solución viable para desarrollar prótesis más expresivas y mejor aceptadas socialmente.

INTRODUÇÃO

A exenteração ocular, frequentemente decorrente de neoplasias, constitui um desafio que transcende a reposição anatômica e envolve também dimensões funcionais e psicossociais (Baum & Mohr, 2021). Próteses artesanais oferecem boa fidelidade estética, mas permanecem estáticas e a ausência do piscar compromete a naturalidade da expressão,

gerando discrepâncias perceptíveis no convívio social. Esse descompasso está diretamente associado ao fenômeno descrito por Masahiro Mori como uncanny valley (Mori, 2012), em que representações artificiais próximas do humano provocam estranhamento ao falhar na reprodução de microgestos e movimentos sutis.

Para superar essas limitações, o presente projeto propõe uma arquitetura modular inovadora, que integra um sensor óptico adaptado a armações de óculos para detecção da piscada do olho contralateral e um microatuador discreto, incorporado à prótese, para reprodução do movimento palpebral. Esta abordagem visa não apenas aprimorar a estética, mas também a funcionalidade e a interação social. Assim, a proposta não se restringe a recuperar a aparência, mas pretende devolver parte da expressividade perdida, reduzindo o uncanny valley e favorecendo a reinserção social de pacientes submetidos à exenteração ocular.

REABILITAÇÃO OCULAR: IMPACTO ESTÉTICO, FUNCIONAL E PSICOLÓGICO

A perda ocular não implica apenas alteração anatômica; ela afeta profundamente a comunicação não verbal, a percepção da própria imagem e a qualidade das interações sociais. Do ponto de vista estético, a prótese substitui a região mais visível do rosto, que atrai o olhar em qualquer contato interpessoal. Pequenas discrepâncias em cor, brilho, alinhamento ou, sobretudo, na ausência de movimento, são rapidamente percebidas e frequentemente associadas a sensações de estranhamento que se tornam ainda mais intensos diante da falta de microgestos ou de assimetrias sutis, capazes de amplificar o estigma e fragilizar a autoestima.

Além de seu papel simbólico e expressivo, o ato de piscar cumpre funções fisiológicas essenciais: lubrifica os tecidos remanescentes, protege contra partículas externas e participa da regulação neural que coordena expressões faciais e atenção visual. Em nível social, o piscar e outros movimentos sutis organizam a conversação, sinalizam emoções e sustentam a empatia, de modo que sua ausência compromete a naturalidade do convívio. Estudos recentes demonstram que até mesmo diferenças mínimas na duração das piscadas podem ser percebidas inconscientemente e influenciar diretamente o fluxo comunicativo entre interlocutores (Hömke, Holler, & Levinson, 2018; Plos, 2018).

Nesse contexto de compreensão da multifuncionalidade do piscar, soluções protéticas que permanecem estáticas oferecem apenas uma restauração parcial, incapaz de devolver integralmente a expressividade. Evidências tanto da literatura quanto dos experimentos realizados no projeto indicam que a reintegração do movimento, ainda que restrita ao piscar, é suficiente para atenuar a percepção de artificialidade e melhorar de maneira significativa a aceitação social. Pesquisas confirmam que a coordenação da conversação depende de sinais sutis como o piscar, os quais funcionam como feedback não verbal essencial para a compreensão mútua. Os protótipos desenvolvidos demonstraram que tal efeito é alcançável quando a reprodução obedece a parâmetros temporais e cinemáticos compatíveis com o olho contralateral. Esses ensaios iniciais confirmaram detecção confiável com desempenho que sustenta a viabilidade da proposta e sinaliza um futuro impacto direto na qualidade de vida dos usuários.

PRODUÇÃO ARTESANAL DE PRÓTESES OCULARES E LIMITAÇÕES ESTÁTICAS

A confecção de próteses óculo-palpebrais ainda é, em grande parte, um trabalho artesanal, no qual cada peça é feita sob medida para o paciente. Apesar de alcançar resultados visuais bastante realistas (Bindhoo & Aruna, 2011), esse processo depende fortemente da habilidade

manual do especialista e permanece limitado por sua natureza estática. A ausência de movimento compromete a naturalidade da expressão, evidencia assimetrias no olhar e contribui para o efeito uncanny valley, reforçando o caráter artificial da prótese.

PROPOSTA DE INOVAÇÃO: SISTEMA MODULAR DE DETECÇÃO E SIMULAÇÃO DE PISCADAS

Para superar as limitações das próteses estáticas, propõe-se uma solução modular que devolve o movimento do piscar sem alterar o processo artesanal. O sistema é composto por um módulo sensor, acoplado aos óculos, que utiliza o APDS9960 e o microcontrolador ESP32-C3 SuperMini para identificar a piscada do olho saudável. Na sequência o sinal é transmitido, por meio de tecnologia wireless a um módulo atuador acoplado na prótese, o qual é formado por microatuador e eletrônica miniaturizada, responsável por reproduzir o fechamento palpebral.

A modularidade garante compatibilidade com as etapas tradicionais de confecção, permitindo inserir um dispositivo padronizado em próteses personalizadas. Os primeiros protótipos demonstraram detecção confiável em diferentes condições e movimento realista validado por análises visuais, indicando um caminho promissor para transformar a prática artesanal em soluções dinâmicas de maior naturalidade e aceitação social.

ESTADO DA ARTE

PROCESSOS TRADICIONAIS NA CONFECÇÃO DE PRÓTESES OCULARES

A confecção de próteses óculo-palpebrais permanece, em grande parte, um processo artesanal de alta complexidade, no qual cada unidade é elaborada sob medida a partir das características anatômicas e estéticas do paciente. O protocolo clínico tradicional envolve etapas sucessivas que se iniciam com a análise detalhada da cavidade orbitária e das regiões periorbitais, por meio de medições, fotografias e moldagem facial, frequentemente realizada com alginato, para obtenção de um modelo em gesso (Bindhoo & Aruna, 2011). Esse modelo serve de base para o planejamento da retenção e estética da prótese, que pode empregar adesivos, armações de óculos, aproveitamento de undercuts anatômicos ou elementos magnéticos.

A partir do molde, o profissional esculpe manualmente um modelo em cera ou resina, reproduzindo volumes e contornos periorbitais, incluindo pálpebras e transições de tecido adjacente. Após sucessivas provas clínicas e ajustes, a peça é processada em material definitivo, geralmente resina acrílica termopolimerizável ou silicone médico, com técnicas de indexação que asseguram estabilidade dimensional durante a cura. A etapa subsequente concentra-se na confecção da esclera e na pintura da íris, em que se reproduzem artesanalmente tonalidades, padrões estromais e reflexos luminosos. O acabamento envolve a coloração da esclera, inserção de veios simulados e aplicação de vernizes para conferir brilho e naturalidade, além da eventual fixação de cílios ou sobrancelhas artificiais. O resultado é uma peça de elevado realismo estético e biocompatibilidade satisfatória (Agarwal et al., 2025).

Apesar dos avanços materiais e da precisão alcançada nas técnicas de moldagem, o processo permanece limitado por sua natureza artesanal: há baixa repetibilidade, forte dependência da habilidade manual do técnico anaplastologista, longos prazos de confecção e ausência de elementos dinâmicos. As próteses oculares convencionais são essencialmente estáticas, incapazes de reproduzir movimentos oculares ou microgestos palpebrais, componentes sutis, porém determinantes, da expressividade facial. Essa limitação afeta a naturalidade da

aparência e o conforto psicossocial do usuário, uma vez que a percepção humana é particularmente sensível a assimetrias e atrasos nos movimentos do olhar (Hömke, Holler, & Levinson, 2018; Plos, 2018; Moraes & Almeida, 2021; Nyström et al., 2024).

Nos últimos anos, a integração de princípios da engenharia mecatrônica e da manufatura aditiva tem impulsionado o desenvolvimento de próteses oculopalpebrais inteligentes. Estudos recentes exploram a incorporação de atuadores miniaturizados e sensores de piscar posicionados externamente, por exemplo, em armações de óculos, de modo a preservar a personalização artesanal da superfície visível enquanto introduzem módulos tecnológicos padronizados responsáveis pela dinâmica palpebral (Frigerio et al., 2014; Pereira & Carvalho, 2022; Cogley, 2025; Souza & Lima, 2013). Essa abordagem híbrida representa uma transição do paradigma exclusivamente estético para o funcional-biomimético, buscando restituir o sincronismo e a expressividade natural do olhar, objetivo central da presente pesquisa.

ENGENHARIA MECATRÔNICA E IMPRESSÃO 3D NA TECNOLOGIA ASSISTIVA

Nas últimas décadas, a incorporação de recursos digitais e mecatrônicos tem redefinido a produção de próteses. A impressão 3D, quando associada a tecnologias de escaneamento humano, garante modelos de alta fidelidade geométrica e consistência entre diferentes peças, reduzindo a carga manual e permitindo reprodutibilidade. Ao mesmo tempo, ferramentas de modelagem paramétrica em CAD oferecem flexibilidade para ajustar proporções e criar bibliotecas digitais reutilizáveis, além de prever espaços internos destinados à integração de mecanismos de movimento (Figura 1).

Figura 1. Modelo 3D da face de um paciente que sofreu exenteração ocular impressa por manufatura aditiva a partir de imagens radiográficas



Fonte: Autores (2025). Sem a prótese à esquerda e a colocação da prótese óculo-palpebral na cavidade ocular à direita.

Paralelamente, a engenharia aplicada à reabilitação protética tem ampliado as possibilidades de devolver expressividade por meio da convergência entre eletrônica, microatuadores e design biomimético.

Tecnologias de detecção óptica, combinadas a controladores de baixo consumo, permitem identificar o piscar com precisão e transmiti-lo a sistemas de atuação cada vez mais discretos. Esses dispositivos miniaturizados conseguem reproduzir movimentos rápidos em espaços reduzidos, conciliando naturalidade de resposta com conforto para o usuário. O conjunto dessas inovações aponta para um modelo híbrido, no qual a manufatura digital fornece estruturas precisas e padronizadas, enquanto a intervenção artesanal preserva detalhes sutis indispensáveis ao realismo. Essa integração de técnicas tradicionais e tecnologias emergentes estabelece as bases para próteses oculares capazes de unir refinamento estético e dinâmica funcional, aproximando-se das demandas clínicas e sociais contemporâneas.

METODOLOGIA

DEFINIÇÃO DE REQUISITOS PARA OS MÓDULOS

O levantamento inicial concentrou-se em identificar os parâmetros técnicos necessários para viabilizar o sistema modular, com base em literatura especializada e na observação dos processos artesanais de confecção de próteses. A partir dessa análise, foram definidos critérios para guiar o projeto dos módulos de detecção e atuação: o sensor deveria reconhecer o piscar em tempo real com confiabilidade sob diferentes condições de iluminação; o atuador, por sua vez, precisava reproduzir o movimento com latência inferior a 50 ms, dimensões compatíveis com o espaço interno da prótese e peso reduzido para não comprometer o conforto. Também foram estabelecidos limites de dissipação térmica, autonomia energética e nível de ruído, de modo a garantir usabilidade prática e segurança.

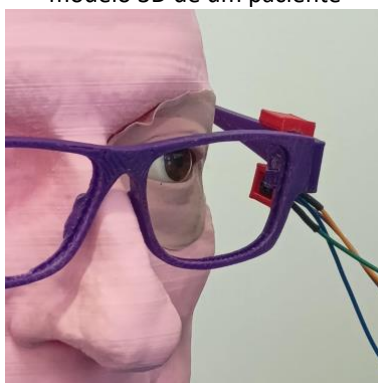
Esses requisitos funcionam como norteadores de projeto, servindo de base para a seleção dos componentes eletrônicos e para a concepção do design modular, cujo desenvolvimento é o foco deste trabalho, com a fabricação das próteses completas para uso clínico como uma perspectiva futura.

ARQUITETURA DO SISTEMA MODULAR

A metodologia adotada buscou a modularização do sistema, permitindo separar o dispositivo em duas partes distintas, mas interconectadas, o que favorece a manutenção, escalabilidade e integração ao fluxo artesanal já existente. Essa divisão modular garante que a prótese mantenha o acabamento artesanal, ao mesmo tempo que se torna dinâmica graças à integração do dispositivo.

Módulo Sensor (óculos): projetado para ser acoplado à armação de óculos convencionais, contém sensor óptico/infravermelho APDS9960, capaz de detectar o fechamento palpebral do olho saudável por variação de reflexão da luz. O sinal é processado em tempo real por um ESP32-C3 SuperMini, com transmissão sem fio ao módulo atuador. A escolha por óculos como suporte baseou-se em ergonomia, discrição e facilidade de manutenção (Figura 2).

Figura 2. O sensor TCRT5000 acoplado aos óculos simulando uma situação real do olho funcional em um modelo 3D de um paciente



Fonte: Autores (2025).

Módulo Atuador (prótese): inserido discretamente na prótese ocular confeccionada pelo protesista. Contém microatuador miniaturizado, mecanismo de linkage palpebral e placa eletrônica compacta, alimentados por bateria recarregável. Sua função é converter o comando recebido do sensor em movimento físico sincronizado de piscada. O módulo foi concebido como um dispositivo removível, permitindo substituição sem necessidade de refazer a prótese completa.

TESTES DE HARDWARE PARA O SISTEMA DE DETECÇÃO DE PISCADAS

O desenvolvimento do sistema passou por ciclos iterativos de hardware, nos quais diferentes sensores e microcontroladores foram avaliados até chegar a uma configuração que atendesse aos requisitos de detecção, processamento e integração em escala reduzida.

Sensores

TCRT5000: empregado nas primeiras provas de conceito, mostrou-se funcional em condições controladas, mas com forte sensibilidade a variações de iluminação ambiente e posição do sensor em relação à pálpebra. Isso limitou sua confiabilidade para uso cotidiano.

MAX30102: introduzido na segunda etapa, oferece maior estabilidade e capacidade de medir variações sutis, mas apresentava dimensões maiores e consumo elevado para aplicação em óculos discretos.

APDS9960: escolhido para o protótipo final devido à sua versatilidade e funcionalidades adicionais. Possui dimensões reduzidas, baixo consumo de energia e capacidade de detecção de gestos, cores e luminosidade, além da função de proximidade com alcance entre 2,5 cm e 20 cm. Embora sua eficácia ainda não tenha sido completamente testada no contexto de detecção de piscadas, apresenta potencial promissor para o uso em diferentes condições de iluminação e distâncias (Figura 3).

Figura 3. Comparativo entre as principais características avaliadas no momento de escolha dos sensores infravermelhos, especialmente *range* de atuação

Sensores	Dimensões(mm)	Distância de atuação	Eficácia	Características extras
TCRT5000	10,2 x 5,8 x 7,0	0,2 mm - 15 mm	89%	Nenhuma
MAX30102	5,6 x 3,3 x 1,55	Até 0,35 mm	92%	LED vermelho para oximetria
APDS9960	3,94 x 2,36 x 1,35	2,5 cm - 20 cm	Ainda não testada	Identificação de gestos, cores e luminosidade

Fonte: Autores (2025).

Microcontroladores

Arduino Uno: utilizado na fase inicial de testes por sua simplicidade, ampla documentação e facilidade de prototipagem com sensores básicos (como o TCRT5000). Permitiu validar rapidamente a lógica de detecção do piscar e o acionamento de atuadores em bancada. Porém, apresentava dimensões grandes, consumo elevado e não oferecia recursos de conectividade wireless, o que limitava sua viabilidade para integração em um sistema vestível.

ESP8266: adotado em uma segunda etapa para explorar a comunicação sem fio entre os módulos de sensor e atuador. Essa transição marcou o início da divisão clara entre Módulo Sensor (óculos) e Módulo Atuador (prótese). Apesar de funcional e acessível, mostrou restrições de processamento e latência em aplicações de tempo real mais rigorosas.

ESP32-C3 SuperMini: escolhido para o estágio final de desenvolvimento. Reúne alto desempenho de processamento, conectividade estável (Wi-Fi e BLE), baixo consumo e dimensões extremamente compactas, compatíveis com o espaço limitado da prótese e da armação dos óculos. Atendeu à meta de latência inferior a 50 ms de ponta a ponta e abriu margem para escalabilidade do firmware (atualizações OTA, protocolos padronizados) e integração futura com algoritmos de inteligência embarcada.

Essa sequência de iterações mostrou a importância de combinar sensores robustos e controladores compactos, buscando equilíbrio entre desempenho técnico, consumo energético e fator de forma.

PROTOTIPAGEM POR MANUFATURA ADITIVA

A etapa de prototipagem foi conduzida por meio de manufatura aditiva, recurso que possibilitou o desenvolvimento de diversos protótipos rapidamente com capacidade de alteração de design e validação física dos modelos. Foram utilizados filamentos de PLA, ou polímero biodegradável e renovável, aplicado na fabricação de bioplásticos com grande eficiência e capazes de reproduzir acabamento próximo ao definitivo e de suportar ajustes sucessivos em escala reduzida. Com essa abordagem, produziram-se os cases do módulo sensor em PLA, projetadas para se integrar discretamente às armações de óculos, e as plataformas de teste. Além disso, utilizou-se resina com uma impressora de

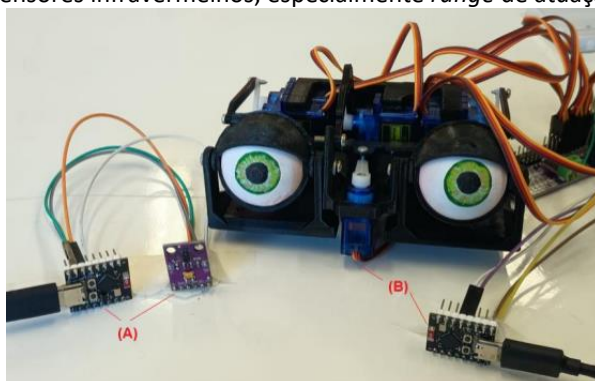
tecnologia por fotopolimerização em cuba para protótipos que necessitavam maior precisão de detalhes, como os componentes internos do atuador.

O emprego da impressão 3D reduziu de forma significativa o intervalo entre concepção digital e protótipo físico, além de garantir maior precisão nas tolerâncias e permitir testes de ergonomia. Após a etapa de fabricação, as peças foram combinadas ao acabamento artesanal, o que assegura qualidade estética e conforto para o usuário final. Essa integração entre manufatura digital e prática artesanal revelou-se fundamental para validar interfaces mecânicas e experimentar diferentes soluções de encapsulamento sem comprometer a aparência externa da prótese.

PLATAFORMA ANIMATRÔNICA PARA TESTES DE SINCRONIZAÇÃO

Paralelamente ao desenvolvimento do sistema modular, foi construída uma plataforma de ensaios baseada em um olho animatrônico impresso em 3D, inspirado nos modelos de Will Cogley (2025). A estrutura incorporou servomotores acionados por um microcontrolador da família ESP, configurado exclusivamente para gerar estímulos de piscada sob condições repetitivas e controladas, baseando-se em modelos como os propostos por Will Cogley (disponíveis em Maker World) (Figura 4). Esse recurso experimental foi decisivo para avaliar a sincronia entre a detecção do piscar e a atuação mecânica da prótese, além de permitir medições precisas de latência de ponta a ponta.

Figura 4. Gráfico comparativo analisando as principais características avaliadas no momento de escolha dos sensores infravermelhos, especialmente *range* de atuação



Fonte: Autores (2025).

O uso da plataforma também possibilitou analisar a naturalidade do movimento reproduzido, antecipando problemas ligados à quebra de realismo perceptivo, fenômeno associado ao “uncanny valley” (Mori, 2012; Frigerio et al., 2014). A partir dessas observações, foi possível ajustar parâmetros de controle e otimizar o perfil de movimento, assegurando maior fidelidade na simulação do piscar antes da transição para aplicações clínicas.

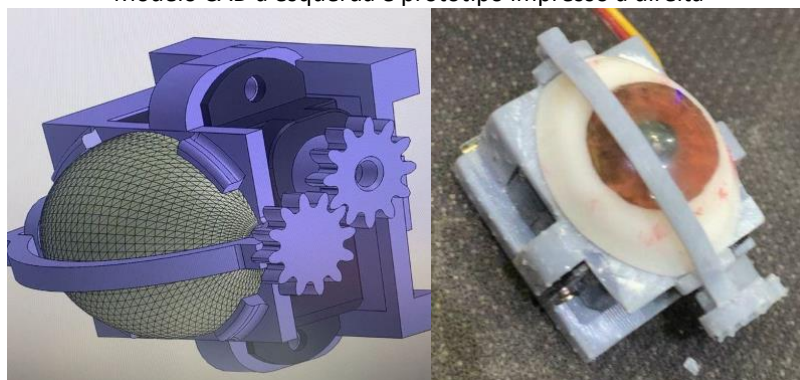
CONCEPÇÃO DO MÓDULO INTERNO

A etapa mais recente do desenvolvimento concentrou-se na criação de um módulo interno compacto, projetado para ser acoplado a próteses oculares de silicone confeccionadas artesanalmente. Esse módulo reúne o ESP32-C3 SuperMini, responsável pelo processamento e comunicação sem fio, e um micro servo de 2 g, escolhido por sua dimensão extremamente reduzida e torque suficiente para reproduzir o movimento de fechamento palpebral em escala realista.

O conjunto foi integrado em um encapsulamento inspirado na geometria da esclera e da íris, de modo que o mecanismo permaneça oculto, preservando a naturalidade estética da prótese. Essa abordagem cria um dispositivo “dinâmico” que pode ser inserido em diferentes

próteses, mantendo a personalização visual produzida pelo protesista e padronizando a tecnologia embarcada (Figura 5). A construção desse módulo representa um passo decisivo para a viabilização do sistema, pois estabelece a interface física entre a eletrônica e a prótese propriamente dita, conciliando miniaturização, eficiência energética e integração discreta.

Figura 5. Primeiro protótipo do módulo interno responsável pela movimentação da prótese de silicone: Modelo CAD à esquerda e protótipo impresso à direita



Fonte: Autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento do sistema seguiu uma trajetória evolutiva em que cada protótipo trouxe respostas a limitações anteriores e apontou novos caminhos de aprimoramento. A fase inicial, concebida como prova de conceito, utilizou um sensor óptico acoplado a armações de óculos e um microcontrolador básico, configuração suficiente para validar a viabilidade da abordagem, mas que expôs fragilidades em ambientes reais.

A partir dessas observações, a adoção do APDS9960 representou um marco importante, ao possibilitar detecção mais estável dos ciclos palpebrais e maior robustez frente a variações de luminosidade. Paralelamente, a plataforma de controle foi sendo refinada: a transição de sistemas simples para módulos de menor consumo e dimensões reduzidas culminou em uma solução capaz de processar sinais com precisão e confiabilidade. Nessa etapa, o firmware passou a incorporar algoritmos de filtragem, limiares adaptativos e análise de variação temporal, o que permitiu diferenciar padrões distintos de piscada e reduzir falsas detecções. Ensaio em modelo animado de pálpebra confirmaram a consistência da cadeia completa de detecção, transmissão e acionamento, demonstrando o funcionamento do conceito em condições próximas ao uso real.

A arquitetura final consolidou-se em torno da modularidade, dividindo o sistema em um bloco de sensoriamento, posicionado na armação dos óculos, e outro de acionamento, embutido na prótese. Essa separação trouxe vantagens práticas, como a possibilidade de linhas de produção paralelas, simplificação de testes unitários e redução do custo de atualizações tecnológicas, uma vez que cada unidade pode ser substituída de forma independente. Do ponto de vista do projeto de produto, a ideia de cápsulas eletrônicas padronizadas mostrou-se estratégica para lidar com a variabilidade anatômica das cavidades orbitárias: apenas a interface estética em contato com o paciente é personalizada, enquanto o núcleo eletrônico e o firmware permanecem uniformes. Essa estratégia racionaliza a cadeia de suprimentos, estabiliza custos e viabiliza produção em série com personalização sob demanda. Adicionalmente, a combinação de componentes comerciais, como microcontroladores, sensores e drivers, com peças customizadas por manufatura aditiva, estabelece um equilíbrio ideal entre a disponibilidade de mercado e a flexibilidade projetual.

Os testes realizados em bancada e em modelos mecânicos evidenciaram ainda vantagens em termos de rastreabilidade e qualidade. Cada módulo pode ser validado separadamente, sensores avaliados quanto à resposta óptica e atuadores testados em gabaritos específicos para deslocamento, velocidade e durabilidade, com registros de série, versões de firmware e relatórios de ensaio. Essa organização cria uma base sólida para futuras estratégias de produção em lote, permitindo inclusive combinações entre fabricação centralizada de núcleos eletrônicos e acabamento descentralizado em oficinas protéticas, o que preserva o valor agregado local e amplia a difusão geográfica da solução.

Apesar dos avanços, alguns obstáculos ainda se apresentam para a aplicação clínica. A miniaturização do módulo de acionamento permanece como o principal gargalo, já que os mecanismos empregados em protótipos ocupam espaço incompatível com a órbita. A superação dessa limitação exige microatuadores de alta densidade de potência, integração em cápsulas projetadas digitalmente e fabricadas em polímeros resistentes, além de montagem com tolerâncias submilimétricas. Outro ponto crítico é o ruído gerado pelos sistemas mecânicos, que pode comprometer a naturalidade do gesto; por isso, torna-se essencial adotar atuadores silenciosos, engrenagens otimizadas e estratégias de amortecimento. Soma-se a esses fatores a questão estética: embora a manufatura aditiva possibilite grande flexibilidade geométrica, as superfícies resultantes ainda necessitam pós-processo artesanal para alcançar realismo. O polimento, a pintura personalizada e a transição imperceptível entre prótese e pele permanecem etapas essenciais, sugerindo que, ao menos no estágio atual, a combinação de técnicas digitais com acabamento manual é a rota mais viável.

Do ponto de vista funcional, o restabelecimento do piscar confere expressividade ao usuário e contribui para a naturalidade da comunicação não verbal, superando a rigidez típica das próteses estáticas. Além do benefício direto ao usuário, em escala mais ampla, a arquitetura modular proposta estabelece um paradigma para futuras soluções em reabilitação facial, servindo como modelo de integração entre eletrônica embarcada, design biomimético e manufatura digital. Dessa forma, o projeto não se limita à validação experimental de um protótipo, mas delineia um caminho consistente para a difusão de tecnologias assistivas inovadoras no contexto nacional, com impacto tanto tecnológico quanto social.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento apresentado demonstrou a viabilidade de transformar próteses oculares, até então restritas à estética estática, em dispositivos capazes de reproduzir o piscar humano de maneira natural e sincronizada. A integração entre o sensor óptico APDS9960, o microcontrolador ESP32-C3 SuperMini e um microservo de dimensões reduzidas resultou em um protótipo funcional, com latência consistentemente inferior a 50 milissegundos, valor suficiente para preservar a percepção de sincronia com o olho saudável. A escolha por componentes comerciais amplamente disponíveis e pela arquitetura modular não apenas viabilizou a miniaturização do sistema, mas também estabeleceu uma base sólida para escalabilidade, simplificação da manutenção e padronização da produção, democratizando o acesso a essa tecnologia inovadora.

O dispositivo inspirado na geometria do globo ocular, assegura compatibilidade com próteses artesanais em silicone, permitindo que a tecnologia embarcada seja inserida sem alterar o processo clínico tradicional. Esse modelo combina personalização estética individualizada com

um núcleo eletrônico padronizado, equilibrando inovação tecnológica e práticas de engenharia de produção.

Os resultados obtidos até aqui consolidam um avanço inédito no contexto brasileiro de tecnologias assistivas, ao oferecer um sistema dinâmico, miniaturizado e tecnicamente robusto. As próximas etapas concentram-se na otimização do encapsulamento biocompatível, na redução adicional do volume do módulo atuador e em ensaios clínicos que permitam validar, em ambiente real, o impacto funcional e social do dispositivo.

Agradecimentos

CNPq, a UFCAT e a FAPEG pelas bolsas de produtividade em desenvolvimento tecnológico e extensão inovadora.

REFERÊNCIAS

- Agarwal, M. D., et al. (2025). Customized silicone ocular prosthesis for post-exenteration rehabilitation. *Cureus*, 17(2), e31765. <https://doi.org/10.7759/cureus.81283>
- Bindhoo, Y. A. & Aruna, U. (2011). Prosthetic rehabilitation of an orbital defect: a case report. *Journal of Indian Prosthodontic Society*, 11(4), 258-264. <https://doi.org/10.1007/s13191-011-0093-6>
- Cogley, W. (2025). Animatronic eye mechanism v3.2. *Maker World*. Recuperado de <https://makerworld.com>
- Frigerio, A., Hadlock, T. A., Murray, E. H., & Heaton, J. T. (2014). Infrared-based blink-detecting glasses for facial pacing: toward a bionic blink. *JAMA facial plastic surgery*, 16(3), 211-218. <https://doi.org/10.1001/jamafacial.2014.1>
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing (2nd ed.). *Springer*.
- Hömke, P., Holler, J., & Levinson, S. C. (2018). Eye blinks are perceived as communicative signals in human face-to-face interaction. *Plos One*, 13(12), e0208030. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208030>
- International Organization for Standardization. (2019). ISO 14971:2019. Medical devices: application of risk management to medical devices. *ISO*.
- Kumar, N., Srivastava, N., & Viswanathan, V. (2022). Rapid prototyping in prosthodontics- a review. *History of Medicine*, 8(1). Recuperado de <https://historymedjournal.com/index.php/medicine/article/view/336>
- Moraes, R. C. & Almeida, L. P. (2021). Sensores de movimento aplicados a sistemas de rastreamento ocular. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*, 1, 210-219.
- Mori, M., MacDorman, K. F., & Kageki, N. (2012). The uncanny valley. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 19(2), 98-100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>
- Nyström, M., Andersson, R., Niehorster, D. C. et al. (2024). What is a blink? Classifying and characterizing blinks in eye openness signals. *Behav Res*. 56, 3280-3299. <https://doi.org/10.3758/s13428-023-02333-9>
- Pereira, L. M. & Carvalho, H. M. (2022). Desenvolvimento de circuitos eletrônicos para dispositivos biomédicos portáteis. Monografia de conclusão de Curso de Bacharelado em engenharia elétrica, Setor de Ciências Exatas, *Universidade Federal do Paraná*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/1884/95218>
- PLOS. (2018). Length of eye blinks might act as conversational cue. *ScienceDaily*. Recuperado de <https://www.sciencedaily.com/releases/2018/12/181212140746.htm>
- Souza, V. H. & Lima, A. R. (2013). Sensores piezoresistivos e sensores piezoelétricos, VIII EPCC - Encontro Internacional de Produção Científica (22 a 25 de outubro de 2013). Recuperado de <http://rdu.unicesumar.edu.br/handle/123456789/4486>
- Stauffer, C., Brantly, N. W., Beam, D. W., Bose, R., Fiedler, G., & Fisher, L. E. (2026). 3D printing and prostheses: The current state-of-the-art and future directions. *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, 13. <https://doi.org/10.1177/20556683261448197>
- Trigo, J. A. & Gruart, A. (2001). Fisiología del sistema motor del párpado. *Revista de Neurología*, 33(6), 555-562. Recuperado de <https://storage.imrpress.com/journal/RN/32/8/10.33588/rn.3208.2000482/pdf/d4becf4d7e96b85896b7b1566eabe680.pdf>
- World Health Organization. (2019). World report on vision. WHO. Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-vision>