

Desenvolvimento de um sistema mecatrônico miniaturizado para simulação fisiológica do piscar em próteses oculares

Cardoso, Heitor Lara¹; Ferreira, João Manoel Nascimento²; Stoppa, Marcelo Henrique^{*3}

1 – Engenharia Mecatrônica, UFCAT, heitor.cardoso@discente.ufcat.edu.br

2 – Engenharia Mecatrônica, UFCAT, joao.nascimento@discente.ufcat.edu.br

3 – Engenharia Mecatrônica, UFCAT, mhstoppa@ufcat.edu.br

* Correspondência: Av. Dr. Lamartine P. Avelar, St. Universitário, Catalão, GO, Brasil, 75704-020.

DOI 10.52050/9788579177149-22

RESUMO

A reabilitação de pacientes submetidos à exenteração ocular enfrenta o desafio do uncanny valley, intensificado pela ausência de movimentos naturais como o piscar em próteses convencionais, o que resulta em uma aparência artificial que compromete a aceitação psicossocial. Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema mecatrônico miniaturizado e de baixo custo para detectar e replicar o piscar fisiológico em tempo real. A metodologia envolveu uma abordagem iterativa, partindo de sensores infravermelhos simples (TCRT5000) e evoluindo para um sistema robusto com o sensor de gestos APDS9960 e o microcontrolador ESP32 C3 SuperMini. A comunicação sem fio e a validação funcional foram realizadas utilizando uma plataforma de testes com um olho animatrônico. Os resultados demonstram a criação de um protótipo funcional capaz de detectar piscadas com alta fidelidade, compensar variações de iluminação ambiente e transmitir os dados para um atuador com latência inferior a 50 ms. A análise dos sinais do sensor APDS9960 sugere a viabilidade de classificar diferentes tipos de piscada (reflexa, voluntária), um elemento crucial para a naturalidade do movimento. O sistema proposto representa um avanço significativo para a tecnologia assistiva, com potencial para reduzir o efeito uncanny valley e melhorar a qualidade de vida e a reintegração social de usuários de próteses óculo-palpebrais.

Palavras-chave: prótese óculo-palpebral, tecnologia assistiva, detecção de piscar, uncanny valley.

ABSTRACT

The rehabilitation of patients undergoing ocular exenteration faces the challenge of the uncanny valley, which is intensified by the lack of natural movements, such as blinking, in conventional prostheses. This results in an artificial appearance that compromises psychosocial acceptance. This paper describes the development of a miniaturized, low-cost mechatronic system to detect and replicate physiological blinking in real-time. The methodology involved an iterative approach, starting with simple infrared sensors (TCRT5000) and evolving to a robust system featuring the APDS9960 gesture sensor and the ESP32 C3 SuperMini microcontroller. Wireless communication and functional validation were performed using a test platform with an animatronic eye. The results demonstrate the creation of a functional prototype capable of detecting blinks with high fidelity, compensating for ambient light variations, and transmitting data to an actuator with a latency below 50 ms. Analysis of the APDS9960 sensor signals suggests the feasibility of classifying different types of blinks (e.g., reflex, voluntary), a crucial element for achieving natural movement. The proposed system represents a significant advancement in assistive technology, with the potential to reduce the uncanny valley effect and improve the quality of life and social reintegration of oculopalpebral prosthesis users.

Keywords: Oculopalpebral Prosthesis, Assistive Technology, Blink Detection, Uncanny Valley.

1. INTRODUÇÃO

A reabilitação estética e funcional de pacientes submetidos à exenteração ocular, frequentemente motivada por neoplasias, representa um desafio complexo que abrange aspectos fisiológicos, emocionais e psicossociais (Baum e Mohr, 2021). Embora os avanços na confecção de próteses óculo-palpebrais tenham permitido melhorias substanciais na aparência externa, muitas dessas soluções ainda carecem de mecanismos dinâmicos que simulem adequadamente os movimentos oculares naturais. A ausência de gestos como o piscar, contribui para uma aparência artificial que interfere diretamente na naturalidade das interações interpessoais.

Esse tipo de dissonância perceptiva está diretamente relacionado ao fenômeno conhecido como *uncanny valley*, termo cunhado por Masahiro Mori (Mori, 2012) para descrever a sensação de estranheza gerada por representações artificiais que se aproximam da aparência humana, mas falham em reproduzi-la com precisão. A ocorrência do *uncanny valley* se intensifica particularmente quando há movimento — e sobretudo quando esse movimento é imperfeito,

assimétrico, ausente ou descoordenado em relação às microexpressões faciais e ao olho contralateral funcional, prejudicando a expressividade e a aceitação social do indivíduo afetado (Mori, 2012).

Do ponto de vista fisiológico, o piscar não é um movimento homogêneo. Ele pode ocorrer de forma voluntária, reflexa ou espontânea, cada qual com diferentes parâmetros de frequência, velocidade e amplitude (Nyström et al., 2024). Esse gesto, além de essencial para a lubrificação e proteção ocular, desempenha papel comunicativo e emocional, sendo regulado por mecanismos neurais e musculares que integram o movimento palpebral com os sistemas de controle visual e facial (Falcão, 2006). Assim, qualquer tentativa de reabilitação que ignore a complexidade biomecânica e funcional do piscar tende a resultar em próteses esteticamente adequadas, porém funcionalmente dissonantes.

A tecnologia assistiva voltada à reabilitação facial vem buscando soluções que integrem recursos de detecção e replicação do piscar, especialmente em casos de paralisia facial unilateral e remoção parcial ou completa da órbita ocular. Nesse contexto, sistemas mecatrônicos de detecção de piscar baseados em sensores infravermelhos surgem como alternativas promissoras. Os estudos de Frigerio et al. (2014) demonstraram a viabilidade técnica de óculos equipados com emissores e detectores infravermelhos posicionados de forma a monitorar a fissura palpebral. A interrupção do feixe de luz durante o fechamento das pálpebras permite identificar com elevada acurácia o evento de piscar, inclusive distinguindo-o de movimentos corporais distintos e à mudança na iluminação ambiente.

Ainda que os sistemas analisados apresentam desafios em relação à sensibilidade e especificidade — especialmente durante movimentos para baixo ou expressões faciais intensas — os dados obtidos sugerem que ajustes individuais nos parâmetros de detecção, a incorporação de múltiplos sensores e o uso de softwares capazes de integrar inteligências artificiais (IA) podem aprimorar significativamente o desempenho e a sincronização entre os olhos, elemento crítico para evitar a percepção de assimetria (Frigerio et al., 2014).

Diante das limitações volumétricas impostas pelas exenterações orbitais, especialmente nos casos com comprometimento da anatomia periocular, a integração de sistemas eletrônicos em próteses faciais requer a utilização de componentes miniaturizados. A restrição de espaço disponível, aliada à variabilidade morfológica decorrente de diferentes padrões de mutilação, exige soluções de engenharia voltadas à compactação e disposição eficiente desses sistemas. Neste contexto, este projeto propõe o desenvolvimento de um módulo encapsulado, compacto e padronizado — uma unidade funcional autônoma — que seja futuramente concebida para inserção em diferentes próteses de

silicone, visando à adaptação morfofuncional às particularidades anatômicas de cada caso. Essa abordagem encontra respaldo na literatura especializada, que destaca a importância da personalização na reabilitação pós-exenteração, considerando tanto aspectos estéticos quanto funcionais (AGARWAL et al., 2025).

Diante do exposto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema mecatrônico compacto e de baixo custo, capaz de detectar, em tempo real, os diferentes tipos de piscadas fisiológicas por meio de sensores infravermelhos e replicar o movimento em próteses óculo-palpebrais através de atuadores miniaturizados. A hipótese central é que a fidelidade na reprodução do piscar pode reduzir significativamente os efeitos do *uncanny valley* e, assim, aumentar a aceitação estética, funcional e psicossocial das próteses faciais. A pesquisa visa contribuir para o avanço das tecnologias assistivas voltadas à reabilitação ocular e à reintegração social de pacientes oncológicos.

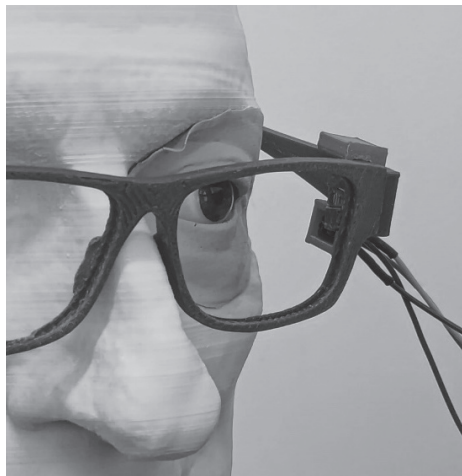
2. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto foi conduzido por meio de uma abordagem experimental iterativa para o desenvolvimento de um sistema embarcado de detecção e reprodução do piscar. A arquitetura foi refinada em fases sucessivas, com o objetivo de construir um protótipo funcional para integração em próteses óculo-palpebrais, considerando os parâmetros neurofisiológicos descritos por Trigo e Gruart (2001).

2.1 Prototipagem Inicial com Sensor de Proximidade Infravermelho

A primeira fase consistiu na implementação de um detector de piscadas utilizando o sensor de refletância infravermelha TCRT5000. O sensor foi acoplado a uma estrutura impressa em 3D, projetada para fixação em armações de óculos (Fig. 1). Um microcontrolador (Arduino) foi programado em C/C++ para processar o sinal do sensor e acionar um LED como feedback visual a cada piscada detectada. Os dados também foram enviados a um computador para simular visualmente o movimento de um olho. Este protótipo inicial serviu para validar a abordagem óptica reflexiva em ambiente controlado.

Figura 1 - TCRT500 acoplado aos óculos



Essa primeira configuração evidenciou a viabilidade técnica da abordagem óptica reflexiva em condições controladas, mas revelou limitações críticas: sensibilidade à iluminação ambiente, ruído em movimentos involuntários da cabeça e dificuldade na distinção entre tipos de piscada. Esses fatores comprometem o potencial de integração com sistemas de próteses realistas, que requerem detecção acurada e responsiva, conforme as exigências descritas por Nyström et al. (2024).

2.2 Avaliação de Sensores Alternativos

Com o objetivo de aprimorar a acurácia da detecção, foi avaliado o sensor MAX30102, comumente utilizado em fotopletismografia e oxímetros para detecção de frequência cardíaca e quantidade de oxigenação no sangue. Contudo, seu curto alcance operacional e a emissão constante de um LED vermelho visível foram considerados inadequados para a aplicação em óculos, levando ao descarte desta opção.

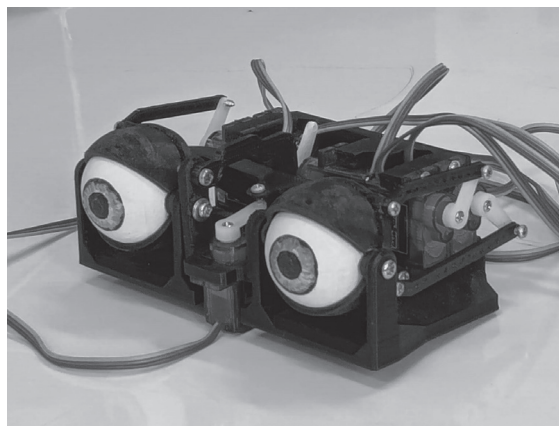
2.3 Desenvolvimento da Arquitetura Sem Fio e Plataforma de Testes

A arquitetura do sistema foi migrada para uma solução sem fio utilizando o microcontrolador ESP8266, que permitiu a comunicação via Wi-Fi (sockets TCP/IP) entre o módulo sensor e um módulo atuador remoto.

Paralelamente, foi construída uma plataforma de testes baseada em um olho animatrônico impresso em 3D, inspirado nos modelos de Will Cogley (Cogley, 2025). A estrutura foi equipada com servomotores controlados por um segundo

microcontrolador da família ESP (Fig. 2). Esta plataforma foi fundamental para validar a sincronia entre a detecção e a atuação mecânica, além de permitir a análise da latência do sistema.

Figura 2 - Animatrônico utilizado para testes em piscadas e controle sem fio



A adoção dessa plataforma permitiu antecipar problemas relativos à quebra de naturalidade perceptiva — associados ao efeito *uncanny valley*, como descrito por Mori (2012) e corroborado por Frigerio et al. (2014) — e orientou os ajustes nos parâmetros de atuação.

2.4 Sistema Final: Miniaturização e Detecção Avançada

A versão final do protótipo foi desenvolvida com foco em miniaturização, desempenho e capacidade de detecção.

O microcontrolador (ESP8266) foi substituído pela placa ESP32 C3 SuperMini. A escolha foi motivada por seu tamanho reduzido, arquitetura RISC-V de 32 bits, maior capacidade de processamento, eficiência energética e suporte nativo a Wi-Fi e Bluetooth Low Energy (BLE).

O sensor TCRT5000 foi substituído pelo sensor de gestos e proximidade APDS9960. Este componente integra detecção de proximidade, reconhecimento de gestos básicos e compensação de luz ambiente, oferecendo maior robustez e resolução para capturar os diferentes perfis temporais das piscadas.

O software embarcado foi reestruturado em C/C++ com rotinas modulares para filtragem de ruído e análise temporal do sinal de proximidade. Foram implementados algoritmos baseados em limiares e na derivada da curva de proximidade para classificar as piscadas em tempo real, visando distinguir movimentos rápidos (reflexos) de movimentos mais lentos (voluntários ou espontâneos).

3. RESULTADOS

A implementação iterativa resultou em um protótipo funcional e miniaturizado, composto pelo sensor APDS9960 e o microcontrolador ESP32 C3 SuperMini, capaz de detectar piscadas em tempo real. O sistema completo está ilustrado na Figura 3, mostrando o módulo sensor acoplado aos óculos (A) e o módulo atuador com os olhos animatrônicos (B).

3.1 Desempenho da Detecção

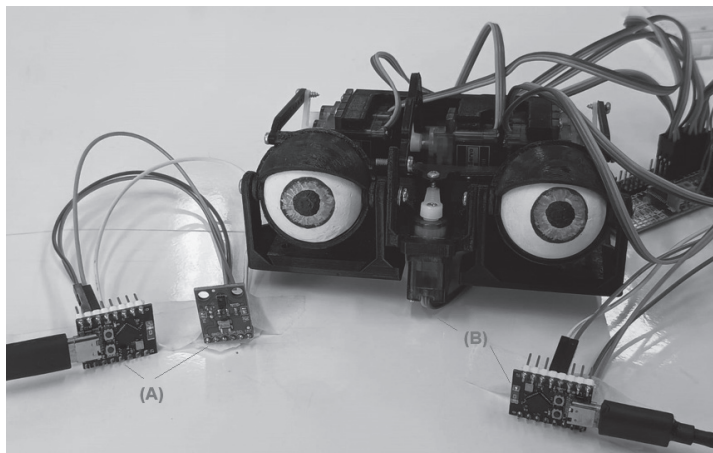
O sensor APDS9960 demonstrou desempenho superior aos sensores previamente testados (TCRT5000 e MAX30102). Sua capacidade de compensação de luz ambiente eliminou a sensibilidade a variações de iluminação, um problema crítico na primeira versão do protótipo. A maior resolução do sensor permitiu a geração de curvas de proximidade detalhadas durante o ciclo de fechamento e abertura palpebral. Análises preliminares dessas curvas revelaram padrões distintos que se correlacionam com os diferentes tipos de piscada descritos na literatura (Nyström et al., 2024; Trigo e Gruart, 2001), embora uma validação estatística formal com amostragem de usuários ainda seja necessária.

3.2 Desempenho do Sistema de Comunicação e Atuação

Os testes de comunicação sem fio entre o módulo sensor e o módulo atuador (olho animatrônico) registraram uma latência de ponta a ponta consistentemente inferior a 50 ms. Este tempo de resposta é considerado adequado para evitar uma dessincronização perceptível entre o olho funcional e a prótese, um fator chave para mitigar o efeito *uncanny valley*. O software embarcado no módulo atuador foi capaz de reproduzir o movimento de piscar de forma suave e controlada através dos servomotores.

É importante ressaltar que, no estágio atual, o módulo de atuação foi validado na plataforma de testes animatrônica. A integração dos atuadores miniaturizados em uma prótese óculo-palpebral real representa a próxima fase do projeto.

Figura 3 - Sistema sensor com ESP32 C3 SuperMini e APDS9960 (A); Sistema atuador com olhos animatrônicos e ESP32 C3 SuperMini (B)



4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo desenvolver uma solução miniaturizada e responsiva para detecção e simulação do piscar em próteses óculo-palpebrais, baseada em parâmetros fisiológicos reais e em arquitetura embarcada de baixo custo. Os resultados obtidos confirmam parcialmente esse objetivo, com a construção de um sistema funcional que opera com sensor APDS9960 via controle da ESP32 C3 SuperMini, que é capaz de capturar, interpretar e responder aos movimentos palpebrais com relevante fidelidade em ambiente controlado.

Como contribuição prática, destaca-se a miniaturização do sistema e sua compatibilidade com estruturas protéticas reais, bem como a possibilidade de distinguir padrões fisiológicos de piscadas com base em curvas de proximidade. Isso representa um avanço relevante em relação às próteses óculo-palpebrais convencionais, que permanecem estaticamente inertes e contribuem para a intensificação do efeito *uncanny valley*, afetando a aceitação social dos usuários. A capacidade de detecção em tempo real abre caminho para uma prótese que interage ativamente com os gestos naturais da face.

O protótipo proposto oferece flexibilidade para futuras melhorias, como o uso de atuadores internos à prótese e a implementação de algoritmos de inteligência artificial embarcada.

Como perspectiva futura, sugere-se o desenvolvimento de uma versão integrada final com encapsulamento biocompatível, validação em modelos anatômicos e estudo com usuários reais. Além disso, propõe-se o aprimoramento

do sistema de atuadores, para que estes reproduzam com maior precisão os microgestos palpebrais em próteses de uso clínico, elevando o realismo funcional e estético das interações humanas mediadas por tecnologias assistivas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEG e ao CNPq pelo apoio financeiro que contribuíram para a realização e divulgação do presente estudo.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, Meghna D. et al. Customized silicone ocular prosthesis for postexenteration rehabilitation: a case report. *Cureus*, [S.I.], 27 mar. 2025. Disponível em: [https://assets.cureus.com/uploads/case_report/pdf/352847/20250426-358691-w25v6i.pdf]. Acesso em: 18 jul. 2025. DOI: [<https://doi.org/10.7759/cureus.81283>].

BAUM, Sven Holger; MOHR, Christopher. Reconstruction of Orbital Exenteration Defects with Cheek Rotation Flaps: Indications, Technique, Complications, Rehabilitation, and Survival. *Facial Plastic Surgery*, Stuttgart, v. 37, n. 3, p. 288–295, 2021. Disponível em: [<https://www.thieme-connect.com/products/ejournals/ABSTRACT/10.1055/s-0040-1715618>]. Acesso em: 18 jul. 2025. DOI: [<https://doi.org/10.1055/s-0040-1715618>].

NYSTRÖM, M.; ANDERSSON, R.; NIEHORSTER, D. C.; HESSELS, R. S.; HOOGE, I. T. C. What is a blink? Classifying and characterizing blinks in eye openness signals. *Behavior Research Methods*, New York, v. 56, n. 1, p. 237–254, jan. 2024.

MORI, M. The Uncanny Valley. Tradução: Karl F. MacDorman; Norri Kageki. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 98–100, jun. 2012.

FALCÃO, M. F. Movimentos palpebrais persecutórios e sacádicos na orbitopatia de Graves. 2006. 92 f. Tese (Doutorado em Medicina – Área de Morfofisiologia das Estruturas Faciais) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.

FRIGERIO, A.; HADLOCK, T. A.; MURRAY, E. H.; HEATON, J. T. Infrared-based blink detecting glasses for facial pacing: towards a bionic blink. *JAMA Facial Plastic Surgery*, Chicago, v. 16, n. 3, p. 211–218, 2014.

TRIGO, J. A.; GRUART, A. Fisiología del sistema motor del párpado. *Revista de Neurología*, Barcelona, v. 32, n. 8, p. 755–761, ago. 2001.

COGLEY, WILL, Animatronic Eye Mechanism v3.2, Maker World, <https://makerworld.com/en/models/1184807-animatronic-eye-mechanism-e3-2#profileId-1195681>, 2025. Acesso em: 13/06/2025.