

ESTUDO DE VIABILIDADE DE INTERFACE BIOCOMPUTACIONAL PARA O NERVO ÓPTICO PARA RESTAURAÇÃO DA VISÃO

Rodrigo Santos Raccuia Ferreira¹, Matheus Leandro Ferreira²

Resumo: A perda de visão afeta milhões de pessoas no mundo, sendo as soluções atuais baseadas principalmente em próteses retinianas e implantes corticais, que apresentam limitações quanto à resolução visual, dependência de estruturas biológicas específicas e elevada complexidade cirúrgica. Nesse contexto, o nervo óptico surge como uma alternativa promissora por atuar como via intermediária entre a retina e o córtex visual, preservando aspectos da organização natural da informação visual. Este trabalho tem como objetivo analisar o estado da arte atual do campo e a investigação teórica da viabilidade de uma interface biocomputacional aplicada ao nervo óptico para a restauração da visão. A metodologia adotada consiste em uma revisão narrativa da literatura, com abordagem qualitativa, analisando estudos sobre próteses visuais, interfaces neurais e estimulação do sistema visual. Os resultados indicam que a estimulação do nervo óptico apresenta potencial para superar limitações das abordagens tradicionais, especialmente em termos de resolução e menor dependência de condições biológicas específicas, embora ainda existam desafios relacionados à seletividade neural e à miniaturização de dispositivos. Conclui-se que essa abordagem representa uma linha promissora para o desenvolvimento de tecnologias de restauração visual, com potencial impacto na área da saúde e na qualidade de vida dos pacientes.

Palavras-chave: prótese visual; interfaces neurais; biocomputação; restauração da visão; nervo óptico;

ABSTRACT: Vision loss affects millions of people worldwide, and current solutions are based primarily on retinal prostheses and cortical implants, which have limitations in terms of visual resolution, dependence on specific biological structures, and high surgical complexity. In this context, the optic

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. rodrigoraccuia@unesc.net

²Orientador, Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. mlf@unesc.net

nerve emerges as a promising alternative because it acts as an intermediate pathway between the retina and the visual cortex, preserving aspects of the natural organization of visual information. This study aims to analyze the current state of the art in the field and the theoretical investigation of the feasibility of a biocomputational interface applied to the optic nerve for vision restoration. The methodology adopted consists of a narrative review of the literature, using a qualitative approach, analyzing studies on visual prostheses, neural interfaces, and stimulation of the visual system. The results indicate that optic nerve stimulation has the potential to overcome limitations of traditional approaches, especially in terms of resolution and reduced dependence on specific biological conditions, although challenges related to neural selectivity and device miniaturization remain. It is concluded that this approach represents a promising avenue for the development of visual restoration technologies, with potential impact on healthcare and patients' quality of life.

Keywords: visual prosthesis; neural interfaces; biocomputing; vision restoration; optic nerve;

1 INTRODUÇÃO

A visão representa um dos sentidos mais sofisticados do ser humano, sendo responsável por uma parcela significativa da percepção e interação com o ambiente. De acordo com estimativas da Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS) e da Organização Mundial da Saúde (OMS), aproximadamente 2 bilhões de pessoas vivem com algum tipo de deficiência visual, e cerca de 36 milhões são acometidas por cegueira total (Organização Mundial da Saúde, 2021).

Atualmente, as principais abordagens tecnológicas para restaurar a visão se concentram em implantes retinianos e estimulações corticais. Os implantes retinianos atuam diretamente sobre a retina danificada, enquanto as próteses corticais tentam estimular o córtex visual primário, com ambas as estratégias enfrentando limitações relevantes (Farnum;Pelled, 2020).

No caso dos implantes retinianos, a degeneração contínua das células fotorreceptoras compromete a eficácia do tratamento, além da limitação no número de eletrodos implantáveis e da complexidade da interpretação dos sinais. Já os sistemas de estimulação cortical exigem correntes mais elevadas e dependem intensamente da plasticidade cerebral,

o que reduz a previsibilidade e generalização dos resultados (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019).

Diante desses desafios, o nervo óptico surge como um alvo alternativo e promissor. Essa estrutura anatômica, composta por cerca de um milhão de fibras nervosas mielinizadas, é responsável por conduzir os sinais elétricos provenientes da retina até o cérebro, mantendo uma organização topográfica crucial para a codificação espacial da visão (Colunistas, 2021). Por ser uma via intermediária entre os fotorreceptores e o córtex visual, a estimulação direta do nervo óptico pode permitir a entrega de sinais visuais estruturados, tendo o potencial de reduzir a necessidade de interpretação cortical complexa e contornando a degradação retiniana.

O presente trabalho de pesquisa propõe uma análise do estado da arte atual do campo e a investigação teórica da viabilidade de uma interface biocomputacional aplicada ao nervo óptico. A ideia central é compilar conceitos e pesquisas visando elaborar um estudo de viabilidade de realizar o estímulo elétrico diretamente no nervo óptico e contribuir com a área através da centralização do conteúdo e uma análise comparativa das abordagens.

Apesar do avanço do desenvolvimento de tecnologias aplicadas à saúde, foi identificada uma expressiva lacuna tecnológica existente entre as próteses visuais atuais e a complexidade do sistema visual humano, tornando urgente a necessidade de desenvolvimento de soluções inovadoras, pois implantes retinianos e corticais ainda apresentam limitações significativas.

Uma das principais restrições está relacionada à baixa quantidade de eletrodos empregados limitada pelo tamanho físico, pois mesmo microeletrodos de silício utilizados em pesquisa neurocientífica de alto nível (como a sonda de gravação Neuropixels 2.0, com sítios de gravação de $12 \times 12 \mu\text{m}$) permanecem significativamente maiores que os axônios do nervo óptico (Cvetko Erika; Meznaric, 2018), que possuem tamanho muito variável a cada indivíduo, dificultando a integração e padronização das próteses estimulantes (Bear Mark F.; Connors, 2010), restringindo a resolução obtida e comprometendo a percepção de formas e detalhes.

Como consequência, essas limitações impactam diretamente a resolução dos sistemas, comprometendo a percepção de formas e detalhes. Em contraste, o nervo óptico humano possui aproximadamente 1 milhão de axônios mielinizados de células ganglionares da retina, cada um responsável por transmitir informações visuais de forma independente. Es-

sas fibras apresentam comprimentos variáveis, entre 35 mm e 55 mm, e características estruturais complexas (Bear Mark F.; Connors, 2010).

Esse cenário evidencia a grande disparidade entre a capacidade natural do sistema visual humano e os recursos tecnológicos atualmente disponíveis, reforçando a importância de pesquisas que busquem reduzir essa diferença.

Estudos experimentais apontam a estimulação direta do nervo óptico como uma estratégia promissora para superar essas limitações. O trabalho pioneiro de (Veraart et al., 1998) demonstrou a viabilidade de induzir fosfenos localizados via estimulação elétrica direta do nervo óptico em um paciente humano com retinite pigmentosa. Resultados posteriores com arrays de eletrodos penetrantes no nervo óptico confirmaram a possibilidade de evocar respostas corticais visuotópicas organizadas espacialmente (Lu, 2013), reforçando a viabilidade de abordagens baseadas na estimulação elétrica dessa estrutura. Esses achados corroboram a hipótese de que a exploração da topografia intrínseca do nervo óptico pode viabilizar próteses de maior acurácia perceptiva em comparação a implantes corticais (Mirochnik, 2019; Farnum;Pelled, 2020).

Revisões recentes também destacam que a estimulação do nervo óptico oferece vantagens cruciais em relação a outras modalidades: maior seletividade espacial, menor dependência da interpretação cortical e manutenção da organização natural da via visual (Mirochnik, 2019; Farnum;Pelled, 2020). Avanços no design de interfaces neurais têm ampliado a possibilidade de aplicação prática dessas técnicas, aproximando o campo da realidade clínica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo analisou, através da revisão narrativa da literatura como abordagem metodológica com caráter qualitativo e exploratório, com o objetivo de investigar a viabilidade teórica de uma interface biocomputacional aplicada ao nervo óptico baseada em microeletrodos ou estímulos eletroquímicos, com foco na estimulação seletiva de fibras neurais e no desenvolvimento de soluções biocompatíveis para a restauração da percepção visual.

A busca bibliográfica foi conduzida nas bases de dados da PubMed, IEEE Xplore, Scopus (elsevier) e Web of Science, complementadas por outras plataformas de acesso livre como bioRxiv e PubMed Central. Foram utilizadas combinações de termos em inglês com operadores boo-

leanos, incluindo("optic nerve") AND ("neural interface"OR "electrical stimulation") AND ("visual restoration"OR "visual prosthesis"), além de variações como "optic nerve stimulation", "intra-neural electrode", "neuroprosthesis", "visual processing unit"e "neural encoding model". A busca priorizou estudos dos últimos dez anos, mas considerando trabalhos clássicos como referência no campo.

O processo de seleção foi conduzido através da leitura exploratória de títulos e resumos do material compilado, com leitura integral dos estudos selecionados como relevantes ao tema. Foram priorizados artigos com revisão feita por pares, estudos experimentais com resultados sintetizados realizados em humanos ou animais e revisões de escopo publicadas em periódicos indexados. Materiais de divulgação científica e fontes não acadêmicas foram utilizadas exclusivamente para contextualização introdutória, não servindo como suporte de afirmações técnicas.

Para a conclusão deste trabalho, foram selecionados estudos de maior relevância com o tema em relação aos objetivos do trabalho, considerando o impacto acadêmico, qualidade do material, definição do estado da arte atual e métodos empregados. Esta seção aborda os fundamentos conceituais e o estado da arte das tecnologias de restauração visual. O estado da arte compreende a análise crítica das soluções mais avançadas disponíveis na literatura, permitindo identificar lacunas tecnológicas e direcionar novas investigações. Nesse contexto, são apresentados os aspectos neurobiológicos do sistema visual, seguidos da análise das principais abordagens em próteses visuais e suas limitações. (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019)

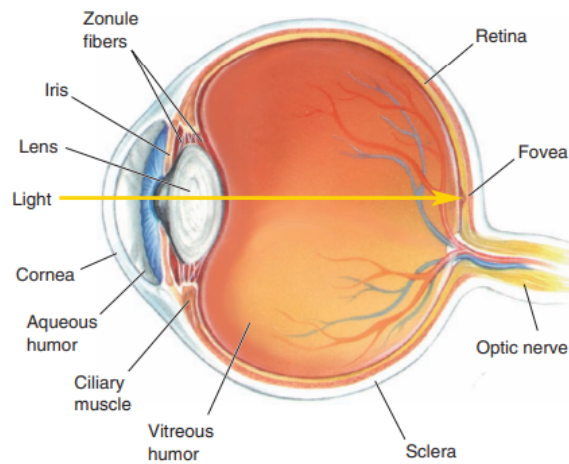
2.1 CONCEITO E ESTADO DA ARTE

2.2 NEUROBIOLOGIA DO SISTEMA VISUAL

A visão humana possui processos neurais altamente complexos, por envolverem a transmissão de estímulos luminosos em sinais elétricos, processados e desenvolvidos a partir da retina e enviados para o córtex visual através do nervo óptico. A retina é a principal responsável por "codificar"o contraste, luminosidade, movimento antes de chegar para o nervo óptico transmitir a informação através das cargas elétricas nos axônios. As estruturas visuais oculares são estruturadas (Bear Mark F.; Connors, 2010) conforme modelo didático apresentado na Figura 1.

O nervo óptico utiliza as células ganglionares como principal via de transmissão dos sinais visuais para o cérebro. Cada axônio mantém

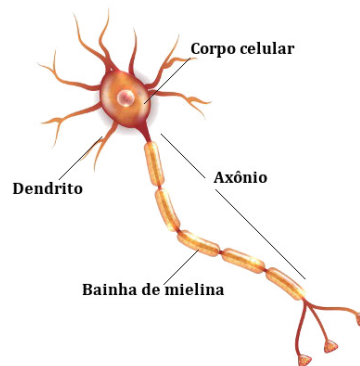
Figura 1 - Figura didática do olho humano



Fonte: Alsaleem (2014)

uma correspondência espacial com uma região da retina (organização estudada e mapeada conhecida como retinotopia), permitindo a codificação organizada e ordenada do espaço visual (Bear Mark F.; Connors, 2010). Essa ordem é o que torna teoricamente possível reproduzir estímulos artificiais que podem ser interpretados como imagens coerentes dos padrões esperados pelo sistema nervoso. No contexto contemporâneo da engenharia neural, o principal desafio é conseguir traduzir sinais digitais em estímulos bioelétricos capazes de ativar seletivamente as fibras do nervo óptico responsáveis por disparar o potencial elétrico equivalente da função visual para o córtex visual. A composição de um neurônio é representada de forma didática pela Figura 2.

Figura 2 - Figura didática do neurônio



Fonte: Brasil Escola (Santos, [s.d.])

Pesquisas (Farnum;Pelled, 2020) indicam a possibilidade de viabilidade de uma abordagem híbrida com eletrodos, emissão de pulsos no nervo óptico, integração de hardware com outros tecidos biológicos compatíveis com o paciente e outras técnicas para recuperação da visão.

2.3 PRÓTESES VISUAIS EXISTENTES

Considerando a neurofisiologia e o estado da arte atual da tecnologia do segmento, três abordagens se destacaram das demais:

1) Estimulação cortical: Atuando diretamente sobre o córtex visual, contornando o nervo óptico, mas exigindo correntes elétricas e neuroplasticidade significativa, por depender da memória e outros referenciais para o processamento da visão pelo sensor;

2) Estimulação retiniana: Através de eletrodos e outros dispositivos auxiliares, a estimulação retiniana é realizada via prótese anexada no globo ocular, na região da retina, onde pulsos elétricos controlados são emitidos para estimular as células daquela região, conforme destacado na Figura 3, um exemplo de um dos implantes mais avançados disponíveis (Holz et al., 2026).

Figura 3 - Implante PRIMA: Olho danificado de um participante do estudo sem implante (esquerda) e com o implante de retina (direita).



Fonte: Holz et al. (2026)

3) Estimulação do Nervo óptico: Através de microeletrodos biocompatíveis mapeados para estimular respostas visuais localizadas a serem transmitidos diretamente no nervo óptico;

No campo da Ciência da Computação, diversos modelos computacionais do sistema visual foram desenvolvidos, como as redes neurais convolucionais (CNNs) e modelos de codificação neural bioinspirados, que utilizam de Deep Learning para basear seus modelos. Esses sistemas são utilizados para simular o comportamento do sistema visual, neurônios retinianos e do córtex visual, sendo possível prever como padrões artificiais de estímulos podem ser interpretados.

2.4 CONCEITOS, EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS RELEVANTES

As abordagens possuem conceitos fundamentais sobre computação, biologia e eletroquímica compartilhadas entre si, basilares para a compreensão e elaboração de qualquer aprofundamento e conceito.

a) Neuroestimulação Elétrica: Processo onde os impulsos elétricos ativam neurônios ou fibras nervosas. Parâmetros relevantes para este conceito incluem: Amplitude de corrente (μA – mA), Largura de pulso (μs – ms), Frequência de repetição (Hz), Forma do pulso e Carga injetada por fase (criticamente limitada para evitar danos ao tecido) (Kadan-Jamal, 2025) (Schmidt, 1996) (Cogan, 2008);

b) Fosfenos: Percepção luminosa causada por estimulação direta de estruturas visuais. São as percepções visuais induzidas por esses estímulos, geralmente utilizadas como unidade básica das visões artificiais. Características padrões de um fosfeno: Localização/posição retinotópica, forma e intensidade. A qualidade das próteses e interfaces são dependentes da previsibilidade desses fosfenos (Carozzo Simone; Sanitta, 2025)(Chen, 2009);

c) Retinotopia: Correspondência topográfica entre a retina e a posição do nervo óptico até o córtex visual. Organização espacial que permite reconstruir as imagens coerentes a partir dos estímulos.

d) Seletividade Neural: Estímulo seletivo de um grupo de fibras específicas que não ativam fibras fisicamente próximas. A seletividade depende do tipo de eletrodo (epineural, intraneural, extraneural), tamanho/geometria, tipo de estímulo (anódica, catódica e bifásica) e os modelos computacionais de predição dos campos elétricos (Cogan, 2008);

e) Biocompatibilidade: Qualquer dispositivo implantável deve evitar ao máximo: Inflamações, fibroses, degeneração celular, degradação tóxica e rejeição imunológica dos materiais. Alguns dos materiais mais amplamente aceitos pela medicina: Parylene-C, PDMS (silicone biomédico), ouro, platina/platina-irídio, PEDOT:PSS(hidrogel condutor), Silício dopado biocompat. e Grafeno (Yang Weiyang; Gong, 2021) (Villa, 2024);

f) VPU - Visual Processing Unit (Unidade de Processamento Visual). É o processador principal responsável pelo processamento da imagem captada por câmeras ou sensores, redução de resposta temporal e espacial, codificação dos pulsos conforme os modelos visuais, conversão das imagens para padrões biocompatíveis e execução de modelos de IA (inteligência artificial) ou filtros de contraste. Pode conter ASICs (Application-Specific Integrated Circuit - Circuito integrado para uso específico) dedi-

cado, IA embarcada (com tecnologias como CNNs, ONNX, PyTorch Mobile, etc.) e baterias externas. Alguns modelos de VPUs utilizados hoje são as VPUs do Argus II, Orion/Second Sight e IMIE 256 (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019);

g) Microeletrodos e Arrays de Eletrodos: Componentes centrais das interfaces neurais. Os mais relevantes para a área sendo os Arrays Epineurais (externos ao nervo), Intraneurais (acoplada ao feixe de Axônios) e não-metálicos condutores (como nanotubos de carbono);

2.5 COMPARATIVO DAS PRINCIPAIS ABORDAGENS E SEUS DISPOSITIVOS REFERÊNCIA

Os próximos capítulos apresentam uma análise comparativa das principais abordagens em próteses visuais, com base em trabalhos de referência selecionados na literatura científica. A escolha dos estudos considerou relevância acadêmica, impacto na área e representatividade tecnológica de cada abordagem. Foram analisadas três categorias principais: próteses corticais, próteses retinianas e abordagens emergentes relacionadas à estimulação do nervo óptico. A comparação busca identificar diferenças estruturais, limitações técnicas e potencial de evolução de cada solução, considerando aspectos como resolução visual, invasividade, biocompatibilidade e dependência de condições biológicas específicas. A partir desse contexto, são apresentados, a seguir, estudos representativos de cada abordagem, que servirão como base para a análise crítica comparativa.

2.6 FEASIBILITY OF A VISUAL PROSTHESIS FOR THE BLIND BASED ON INTRACORTICAL MICROSTIMULATION OF THE VISUAL CORTEX

Um dos primeiros e mais promissores trabalhos realizados no segmento dos implantes corticais (e usado como base de outros estudos mais recentes), foi o estudo de Schmidt et al., 1996 em Feasibility of a Visual Prosthesis Based on Intracortical Microstimulation, que investigou a viabilidade de criar uma prótese visual baseada na microestimulação intracortical (ICMS) no córtex visual, apurando se o cérebro de uma pessoa cega por mais de duas décadas seria capaz de perceber estruturas visuais através da estimulação elétrica. O principal objetivo da pesquisa foi identificar: (i) se o córtex visual humano responde/interage mesmo após longos períodos de cegueira, (ii) se as percepções geradas pelo ICMS permaneciam estáveis

ao longo do tempo e (iii) se fosfenos integrados em padrões específicos poderiam oferecer resposta útil para aplicações de leitura e mobilidade. Além desses objetivos principais, a pesquisa também buscou definir os principais parâmetros de estimulação (frequência, intensidade, espaçamento dos eletrodos e duração dos pulsos) (Schmidt, 1996).

2.7 BRAIN-MACHINE INTERFACES FOR VISION RESTORATION: THE CURRENT STATE OF CORTICAL VISUAL PROSTHETICS

O Estado da Arte em Próteses Corticais: Análise do compilado e artigo publicado de Soroush Niketeghad e Nader Pouratian no Journal of The American Society for Experimental Neurotherapeutics de 2019. O trabalho compilado de Niketeghad e Pouratian teve como foco principal elucidar o estado atual do progresso científico de diversas próteses visuais corticais, mapeando os principais desafios e avanços da área. O objetivo deste trabalho foi comparar o design de diversos dispositivos corticais e destacar os resultados e desafios de cada abordagem, tendo como principais definições e trabalhos analisados e seus resultados (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019):

- **Orion (Second Sight):** Projeto promissor que utiliza 60 eletrodos de superfície subdurais conectados via o lobo occipital medial e componentes externos (câmeras, VPUs e transmissores). Sendo uma das principais abordagens corticais em testes clínicos, pacientes já reportaram percepção de fosfenos.
- **CORTIVIS:** Utiliza a tecnologia *Utah Electrode Array* (UEA) com 100 microeletrodos de silício que penetram 1,0–1,5 mm no córtex occipital lateral
- **Projeto ICVP:** Utiliza a tecnologia *Wireless Floating Microelectrode Arrays* (WFMA) com 16 microeletrodos por módulo, com a premissa de implantar até 9 módulos

2.8 THE FUNCTIONAL PERFORMANCE OF THE ARGUS II RETINAL PROSTHESIS

Possuindo relevância na ciência e na indústria, foi selecionado o projeto Argus II para definição e obtenção de seus resultados. Enquanto a maioria dos implantes corticais mais promissores estão em fase de pesquisa e/ou ensaios clínicos, as próteses retinianas estão muito mais amplamente disponíveis ao acesso no mercado, por serem menos invasivas

que as corticais. Isso também se deve ao fato de algumas das próteses já alcançarem aprovação regulatória, como é o caso do Argus II, que conseguiu a CE Mark na Europa em 2011 e aprovação da FDA no início de 2013, aprovados em conjunto de alguns outros dispositivos retinianos com uso comercial (Stronks H. C.; Dagnelie, 2014).

O objetivo dessas próteses retinianas é substituir a função dos fotorreceptores danificados através do estímulo elétrico nas células remanescentes da retina. O Argus II busca devolver aos pacientes a percepção de luz, movimento e contorno de objetos e capacidade limitada de leitura de letras grandes.

Embora bem-sucedidas em sua premissa inicial de restaurar a percepção visual rudimentar, as próteses retinianas enfrentam a limitação do número de eletrodos (e.g., 60 no Argus II) e a dependência da integridade das células retinianas do paciente, limitando o uso da tecnologia à condição ocular.

As próteses corticais possuem uma abordagem mais incisiva para a restauração da visão via estímulos elétricos diretamente no córtex visual. O desenvolvimento desse tipo de prótese/interface-neural teve progresso significativo nos últimos anos, com diversos projetos promissores em múltiplas fases do desenvolvimento, com cada projeto retornando uma quantidade valiosa de dados sobre cada abordagem, tal como seus sucessos e falhas.

2.9 ESTIMULAÇÃO CORTICAL

O estímulo cortical visa contornar na totalidade as vias visuais danificadas através do estímulo direcionado ao córtex visual. O sistema Orion (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019) por exemplo, um dos principais referenciais na área utilizam dos eletrodos em superfície subdural, sendo necessário correntes elevadas e dependência da neuroplasticidade cerebral do paciente, limitando o potencial de resolução e previsibilidade da solução. Outros dispositivos como o CORTIVIS e o ICVP mapeiam e utilizam neurônios específicos, tendo potencial para melhor resolução por sua abordagem de fosfenos dedicados. O problema desse tipo de abordagem, além da utilização de microeletrodos penetrantes é principalmente a biocompatibilidade e complexidade cirúrgica (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019)(Schmidt, 1996). Além de serem abordagens muito invasivas, o resultado constante é a baixa resolução espacial, tornando insuficiente para tarefas complexas como reconhecimento facial ou leitura.

2.10 ESTIMULAÇÃO RETINIANA

Próteses retinianas como o **Argus II Retinal Prosthesis System** (Second Sight Medical Products, Inc)(um dos projetos mais bem sucedidos e referenciados do campo), representam a principal abordagem estabelecida em uso clínico e comercial para a restauração visual. Com aprovação regulatória na UE (2011), EUA (2013) e Canadá (2014) (Stronks H. C.; Dagnelie, 2014). Os sistemas geralmente empregam eletrodos epirretinianos organizados em arrays padronizados. O Argus II utiliza 60 eletrodos organizados em array 6x10, implantados sobre a região macular. Além da prótese principal, são utilizados componentes externos que incluem óculos com câmera, VPUs e antena transmissora. O sistema converte informações das câmeras e sensores em padrões de estimulação elétrica visando ativar as células retinianas remanescentes (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019).

Os resultados de 5 anos de estudo clínico com 30 pacientes demonstraram

- **Segurança:** 24/30 dispositivos permaneceram funcionais em 5 anos; 60% dos pacientes não apresentaram eventos adversos sérios relacionados ao dispositivo ou cirurgia
- **Eficácia:** Melhora significativa ($p < 0.05$) em testes de localização de objetos, direção de movimento e acuidade visual com grating
- **Visão Funcional:** 80,9% dos pacientes obtiveram desempenho significativamente melhor na localização de quadrados; 50% na direção de movimento
- **Limitações:** Apenas 27-48% dos pacientes alcançaram acuidade visual de 2.9 logMAR ou melhor; dependência crítica da integridade das células retinianas remanescentes

Apesar de representar um dos melhores sucessos clínicos entre projetos correlatos, tecnologias como o Argus II enfrentam limitações basilares: o número fixo de eletrodos (e das opções seguras disponíveis de tamanhos menores, para maior isolamento dedicado de emissão de pulso), que limita a resolução visual e a eficácia também é dependente do nível de saúde retiniana do paciente, apenas estimulando as células que ainda estão suficientemente saudáveis.

2.11 ANÁLISE COMPARATIVA CRÍTICA

Considerando a abordagem e seus resultados, os estudos escolhidos e seus resultados foram compilados na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise Comparativa de Abordagens em Próteses Visuais

Método	Dispositivo	Local de estímulo	Eletrodos	Estágio	Desempenho reportado	Principais limitações
Cortical	Orion (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019)	Subdural V1	60	Ensaio clínico	Percepção de fosfenos	Neuroplasticidade; correntes altas
Cortical	CORTIVIS (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019)	Intracortical (UEA)	100	Ensaio clínico	Fosfenos	Invasividade; complexidade cirúrgica
Cortical	ICVP (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019)	Intracortical (WFMA)	16/mód. (até ~144)	Em testes	Fosfenos dedicados	Microeletrodos penetrantes; bio-compatibilidade
Retiniana	Argus II (Cruz et al., 2016)	Epirretiniano (6×10)	60	Aprovado para uso comercial (UE 2011; FDA 2013; Canadá 2014)	Acuidade de <i>grating</i> até ~2,9 logMAR; melhora em localização e movimento	Depende de células retinianas; número fixo de eletrodos
Nervo óptico	Cuff espiral (Veraart et al., 1998)	Extraneural	4	Piloto humano (1 paciente, RP)	Fosfenos localizados, dispersos pelo campo	Baixa seletividade espacial
Nervo óptico	OpticSELINE (Gaillet et al., 2020)	Intraneural	12	Pré-clínico (coelho anestesiado)	Ativação cortical seletiva (validada por ECoG)	Sem dados perceptivos em humanos; acesso intracraniano

Fonte: Niketeghad Soroush; Pouratian (2019), Cruz et al. (2016) e Gaillet et al. (2020).

Conforme informações sintetizadas na Tabela 1, a análise dos trabalhos correlatos revela lacunas significativas das abordagens e limitações atuais.

Lacunas das Próteses Corticais:

- **Neuroplasticidade:** Abordagens como o Orion dependem criticamente da neuroplasticidade cerebral, limitando a previsibilidade e generalização dos resultados.
- **Invasividade e complexidade cirúrgica:** Implantes corticais envolvem procedimentos neurocirúrgicos de alto risco, com recuperação prolongada e potencial para danos cerebrais irreversíveis (Niketeghad Soroush; Pouratian, 2019).
- **Resolução limitada:** Apesar do maior número de eletrodos em dispositivos como CORTIVIS (100 eletrodos), a resolução angular permanece entre 3°-5°, insuficiente para tarefas visuais complexas como reconhecimento facial ou leitura fluente.

- **Dependência de memória visual:** A interpretação dos estímulos corticais depende da experiência visual prévia do paciente, limitando a eficácia em casos de cegueira congênita (Schmidt, 1996).

Lacunas das Próteses Retinianas:

- **Limitação de escala:** Os eletrodos das soluções retinianas enfrentam uma limitação crítica: Mesmo com o avanço da tecnologia e redução do tamanho dos eletrodos, a tecnologia fica limitada com a quantidade de células retinianas saudáveis e funcionais, definindo um limite prático de soluções desse tipo.
- **Dependência tecidual:** A eficácia requer células retinianas funcionais, limitando a aplicação a condições específicas de degeneração retinal.
- **Resolução insuficiente:** A acuidade visual de 2,9 logMAR permite apenas percepção básica de luz e movimento.
- **Biocompatibilidade:** Eventos adversos como erosão conjuntival e hipotonia após 5 anos destacam desafios de biocompatibilidade (Cruz et al., 2016)

Oportunidades para a Abordagem do Nervo Óptico:

- **Contornar degenerações:** A estimulação direta do nervo óptico pode evitar tanto a dependência de células retinianas quanto a complexidade cortical.
- **Maior potencial de resolução:** Aproveita a organização retinotópica natural do nervo óptico.
- **Menor dependência de neuroplasticidade:** Utiliza vias neurais pré-estabelecidas, reduzindo a necessidade de adaptação cerebral.
- **Invasividade intermediária:** Procedimento menos invasivo que implantes corticais, mas mais direto que abordagens retinianas para certas condições.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 SÍNTESE COMPARATIVA DAS ABORDAGENS

A análise comparativa das três principais abordagens em próteses visuais (estimulação cortical, retiniana e nervo óptico) revela padrões

distintos de vantagens, limitações e maturidade tecnológica, tornando justificável a investigação do nervo óptico como via alternativa promissora neste campo.

As próteses corticais, representadas pelos projetos Orion, COR-TIVIS e ICVP apresentam como principal vantagem a independência de qualquer estrutura ocular, tornando esta metodologia potencialmente aplicável a qualquer modalidade de cegueira. Porém, os estudos analisados indicaram que essa abordagem exige correntes elevadas e depende fundamentalmente na neuroplasticidade cerebral do paciente, reduzindo a previsibilidade dos resultados e limitações de sua eficácia em casos como de cegueira congênita, como documentado por Schmidt et al. (1996) e revisado por Niketeghad e Pouratian (2019). A resolução angular obtida entre 3º e 6º, apesar de promissora, permanece insuficiente para tarefas visuais funcionalmente relevantes como reconhecimento facial ou leitura. Adicionalmente, os procedimentos cirúrgicos envolvidos são de alto risco e alta complexidade, representando uma barreira considerável em uma adoção clínica em larga escala.

As próteses retinianas, com destaque principal no projeto Argus II, atingiram a maior maturidade clínica dentre as abordagens analisadas, sendo a única a obter aprovação regulatória em múltiplas jurisdições (UE em 2011 e FDA em 2013). Os resultados do estudo clínico de cinco anos com 30 pacientes (Cruz et al., 2016) demonstraram avanços concretos em percepção de movimento e reconhecimento de localização de objetos, com mais de 80% dos pacientes apresentando desempenho consideravelmente superior ao inicial nas tarefas de localização. Porém, a maior limitação desse paradigma é a dependência da integridade das células retinianas remanescentes. Ou seja, a eficácia desse modelo decresce proporcionalmente ao grau de degeneração retiniana, definindo assim o teto biológico desta abordagem.

A estimulação do nervo óptico, apesar de ser a abordagem com menor maturidade clínica dentre as três, contempla um perfil de vantagens estruturais que justifica o aprofundamento de estudos nessa área. Por atuar entre a via entre a retina e o córtex visual, ela consegue contornar simultaneamente a dependência de fotorreceptores funcionais e a necessidade de neuroplasticidade cortical intensa, por ser capaz de enviar o sinal já traduzido de outras fontes de origem (sem depender de condições fisiológicas do olho), pois a organização retinotópica intrínseca indica ser um substrato natural para a codificação ordenada deste espaço visual pelo seu tamanho,

complementando (mas sem depender) da reorganização adaptativa do córtex (Bear Mark F.; Connors, 2010)(Mirochnik, 2019)

3.2 ESTADO EXPERIMENTAL DA ESTIMULAÇÃO ELÉTRICA DO NERVO ÓPTICO

Sendo um dos primeiros experimentos clínicos pioneiros na estimulação elétrica do nervo óptico, o estudo conduzido por Veraart et al. (Veraart et al., 1998) utilizou um eletrodo em espiral autoajustável (*cuff*) implantado ao redor do nervo óptico de uma paciente com retinite pigmentosa sem percepção residual de luz. O experimento demonstrou a viabilidade de induzir fosfenos localizados via estimulação elétrica direta, possuindo características variáveis conforme os parâmetros estabelecidos da estimulação. Esses resultados permitiram elaborar uma prova de conceito fundamental para as abordagens subsequentes.

Uma das limitações reconhecidas dos eletrodos do tipo *cuff* é sua seletividade espacial restrita, por estarem periféricos ao nervo. Esse eletrodo tende a utilizar predominantemente as fibras externas, gerando fosfenos irregulares e de difícil controle. Essa limitação incentivou no desenvolvimento de eletrodos intraneurais, que penetram o conjunto de axônios diretamente, fornecendo maior precisão na ativação de fibras selecionadas, permitindo potencialmente o mapeamento e estímulo elétrico direcionado para a reprodução de imagens traduzidas (compreendidas por padrões de ativação seletivas verificados por exames como eletrocorticograma) através de qualquer sensor capaz de direcionar/enviar informações compatíveis (como câmeras digitais, VPUs, etc integradas complementares ao eletrodo estimulante).

Considerando essa possibilidade, o projeto OpticSELINE (Gaillet et al., 2020), publicado na Nature Biomedical Engineering, demonstrou através de testes executados em animais (coelhos anestesiados) que um array intraneural de alta estabilidade mecânica, posicionado no segmento intracraniano do nervo óptico, consegue induzir padrões de ativação seletivos e organizados no córtex visual, validados por exames de eletrocorticograma, contribuindo para a direção da viabilidade de fosfenos individualizados e controláveis.

3.3 DESAFIOS POTENCIAIS

Além dos desafios biológicos, a viabilidade de uma interface biocomputacional para o nervo óptico também depende de soluções com-

putacionais robustas que consigam integrar a captura de imagens, processamento e codificação neural da informação visual. Essa dimensão pode ser organizada em três camadas: Aquisição e pré-processamento visual, codificação neural e estimulação adaptativa.

Na camada de aquisição, a VPU (Visual Processing Unit) é responsável por converter as imagens capturadas por câmeras ou sensores externos em padrões de estimulação elétrica. Os sistemas atuais, como os utilizados no Argus II e no Orion, possuem conversões simplificadas baseadas principalmente no mapeamento pixelizado da iluminação. Para a interface do nervo óptico, por ter uma seletividade espacial maior, é necessário uma codificação mais sofisticada por precisar preservar a estrutura retinotópica do sinal, ou seja, torna-se necessário mapear as regiões topográficas do campo visual do nervo óptico, para direcionamento dos eletrodos específicos conforme compatibilidade biológica.

Na camada de codificação neural, modelos computacionais do sistema visual podem ser as ferramentas essenciais para desenvolver novas estratégias de estimulação que resultem em percepções coerentes. Nesse contexto, ferramentas como o TDANN (Topographic Deep Artificial Neural Network) (Margalit et al., 2024) se torna relevante pois trata-se de um dos primeiros modelos unificados capazes de definir com precisão a organização funcional de múltiplas áreas corticais do sistema visual, demonstrando que a organização topográfica surge como fundamental para a consideração das representações sensoriais gerais e otimização no custo de conexões neurais. Para as VPUs, esse modelo oferece um referencial computacional para simular como padrões artificiais de estimulação podem ser interpretados pelo córtex visual. Modelos como o BARseq (Chen et al., 2024), publicado na Nature, demonstram a viabilidade de mapear a expressão gênica de milhões de neurônios corticais em cérebros de camundongos, mostrando como a formação biológica pode ser influenciada por inputs sensoriais periféricos.

Na camada da estimulação adaptativa, é possível ser empregado aprendizado de máquina embarcado como uma das formas de evoluir nos estudos deste campo. Através de treinamento direcionado, este modelo técnico é capaz de auxiliar no processo de direcionamento e emissão seletivo das cargas elétricas baseadas nos retornos dos sensores e a resposta biológica esperada, visto que seria proveitoso a modelagem dinâmica considerando as características biológicas variáveis de cada paciente. Uma VPU para interface do nervo óptico poderia ser capaz de incorporar arquite-

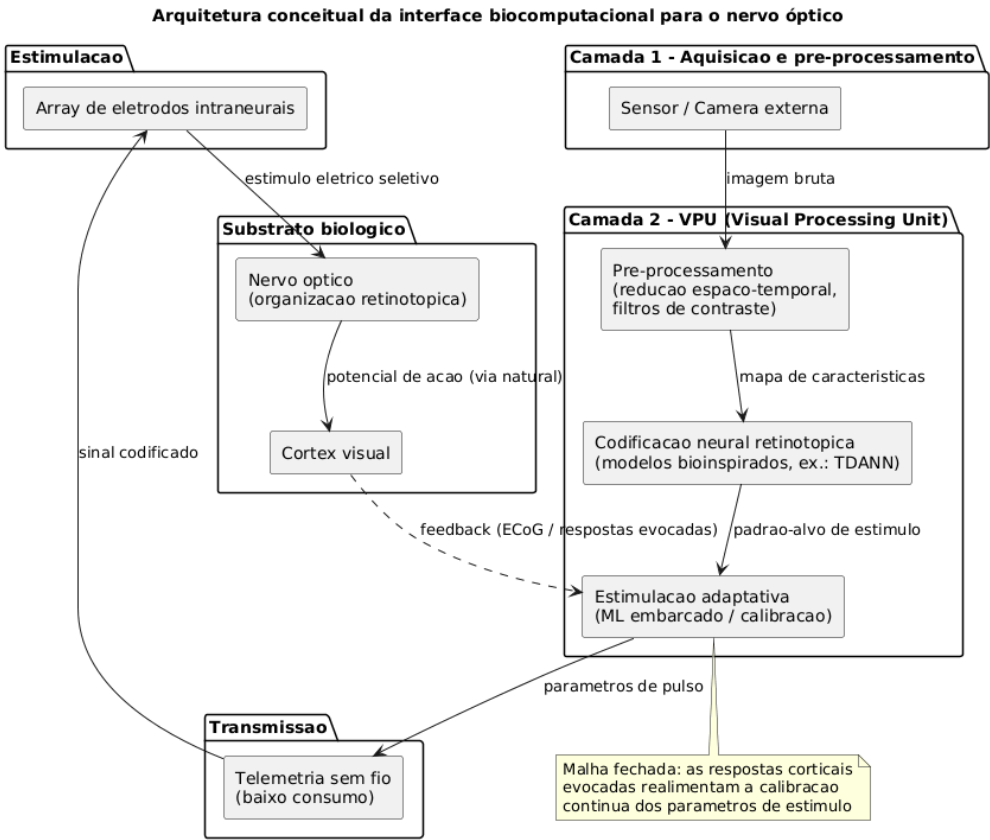
turas similares, utilizando o feedback das respostas evocadas e calibração contínua dos parâmetros de estimulação.

3.4 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE E MODELAGEM COMPUTACIONAL CONCEITUAL

Com base na análise comparativa e nos resultados experimentais levantados, é possível estruturar a avaliação de viabilidade de uma interface biocomputacional para o nervo óptico em três dimensões: tecnológica, biológica e tradutiva.

Do ponto de vista tecnológico, os principais desafios são: a miniaturização dos arrays dos eletrodos intraneurais que não comprometam a biocompatibilidade, o desenvolvimento de VPUs de baixa latência e capacidade de processamento em tempo real para codificação retinotópica e integração de sistemas de telemetria sem fio de baixo consumo energético. Este trabalho desenvolveu um modelo de arquitetura computacional conceitual sintetizado através da análise das informações compiladas, culminando no diagrama elaborado na Figura 4.

Figura 4 - Modelo conceitual da arquitetura proposta (PlantUML)



Fonte: Do autor.

Apesar de serem desafios significativos, não são fundamentalmente distintos dos já enfrentados pelas próteses retinianas e corticais avançadas. Materiais como PEDOT:PSS, Parylene-C e grafeno oferecem caminhos promissores para eletrodos biocompatíveis e flexíveis (Yang; Gong, 2021; Villa, 2024). Do ponto de vista biológico: o principal desafio é a manutenção da viabilidade do nervo óptico ao longo do tempo em contato com os dispositivos implantados, evitando a resposta inflamatória crônica, formação de fibrose e degeneração axonal por trauma mecânico. A pesquisa sobre regeneração neural via proteína Nfe2l3 (Lukomska, 2024) representa um desenvolvimento potencialmente complementar, ao sugerir mecanismos de neuroproteção que poderiam mitigar esses riscos.

Da dimensão tradutiva, ferramentas de inteligência artificial, deep learning podem auxiliar no desenvolvimento e refino deste segmento, apesar do estado da arte avaliado neste ponto, ainda se encontrar embrionário.

4 CONCLUSÃO

O presente estudo analisou o estado da arte das tecnologias de restauração visual e investigou teoricamente a viabilidade de uma interface biocomputacional aplicada ao nervo óptico. A revisão comparativa das abordagens existentes evidenciou que cada paradigma apresenta limitações estruturais que motivam a busca por alternativas. As próteses retinianas atingiram maturidade clínica mas são limitadas pela dependência biológica do estado da saúde e integridade da retina do paciente e da saúde ocular geral. As próteses corticais oferecem maior independência biológica, mas impõem complexidade cirúrgica elevadas por possuir alta invasividade e dependência na neuroplasticidade e experiência visual do paciente.

A estimulação do nervo óptico emerge como abordagem intermediária com um perfil único de vantagens: contornando a degradação retiniana, dependência ocular para com a visão e preservação da organização retinotópica natural, exigindo menor reorganização cortical, com invasividade menor se comparada aos implantes corticais. Resultados experimentais obtidos por projetos como o OpticSELINE demonstraram que arrays intraneurais são capazes de induzir padrões de ativação seletivos espacialmente organizados no córtex visual em testes executados em animais, validando o princípio fundamental que sustenta a viabilidade da abordagem: a possibilidade de explorar a topografia do nervo óptico com maior precisão para a emissão de imagens reconhecíveis pelo córtex visual.

Do ponto de vista computacional, modelos como o TDANN e técnicas de mapeamento neural como o BARseq (Chen et al., 2024) indicam alternativas viáveis para o desenvolvimento de VPUs biologicamente informadas, capazes de codificar a visão de maneira compatível com o sistema nervoso. O uso de aprendizado de máquina embarcado para calibração adaptativa de estimulação representa uma possibilidade promissora. Os principais obstáculos identificados são a biocompatibilidade crônica dos dispositivos implantados, a seletividade de estimulação em escala humana e a ausência de ensaios clínicos formais publicados. Esses desafios não inviabilizam a abordagem, mas definem a agenda de pesquisa necessária para sua transição ao contexto clínico.

Conclui-se que a interface biocomputacional aplicada ao nervo óptico é teoricamente viável e tecnologicamente promissora, representando uma linha de pesquisa relevante e pouco explorada comparativamente às abordagens dominantes. Trabalhos futuros deveriam priorizar ensaios pré-clínicos de longa duração para avaliação de biocompatibilidade crônica, o desenvolvimento de algoritmos de codificação retinotópica personalizados, e a integração de técnicas de estimulação adaptativa baseadas em aprendizado de máquina como componente da VPU.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que ferramentas de Inteligência Artificial generativa foram utilizadas exclusivamente como apoio auxiliar à elaboração deste trabalho, incluindo assistência na revisão linguística, estruturação textual e organização de ideias. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para substituição da autoria intelectual, análise científica, interpretação dos resultados ou tomada de decisões acadêmicas. A responsabilidade integral pelo conteúdo, originalidade, veracidade das informações e conformidade com os princípios de integridade científica permanece integralmente atribuída aos autores.

REFERÊNCIAS

- ALSALEEM, N. M. **Examining the Effect of Test Stimulus Size and Movement on the Detection of Contrast in Visual Field Testing.** Dissertação (Master by Research thesis) — University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia, 2014. School of Optometry and Vision Science, Faculty of Science. Supervisors: K. Sieu Khuu and Michael Kalloniatis.
- BEAR MARK F.; CONNORS, B. W. P. M. A. **Neurociências: desvendando o sistema nervoso.** 3. ed.. ed. Porto Alegre: Artmed. 38–41 p. 2010.

CAROZZO SIMONE; SANITTA, W. G. **Phosphenes and the effects of charged particles on the visual system**. *Frontiers in Neurology*. 2025, Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2025.1621659/full>>. Acesso em: 14 nov. 2025.

CHEN, S. C. e. a. **Simulating prosthetic vision: I. visual models of phosphenes**. *Vision Research*. 2009, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698909000467>>. Acesso em: 14 nov. 2025.

CHEN, X. et al. **Whole-cortex in situ sequencing reveals input-dependent area identity**. *Nature*. 2024.

COGAN, S. F. **Neural stimulation and recording electrodes**. *Annual Review of Biomedical Engineering*, v. 10, p. 275–309. 2008, Disponível em: <https://microprobes.com/files/pdf/publications/gen-knowledge/cogan_2008_neural_stimulation.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

COLONISTAS, S. **Nervo óptico: anatomia e função dos axônios**. 2021. Disponível em: <<https://sanarmed.com/nervo-optico-colonistas-2/>>. Acesso em: 08 set. 2025.

CRUZ, L. D. et al. **Five-year safety and performance results from the Argus II retinal prosthesis system clinical trial**. *Ophthalmology*, v. 123, n. 10, p. 2248–2254. 2016.

CVETKO ERIKA; MEZNARIC, M. S. P. T. **Histologia dos nervos periféricos e microscopia de luz**. 2018. Disponível em: <<https://www.nysora.com/pt/T%C3%B3picos/anatomia/histologia-nervos-perif%C3%A9ricos-microscopia-de-luz/>>. Acesso em: 08 set. 2025.

FARNUM;PELLED. **New vision for visual prostheses**. *Frontiers in Neuroscience*, v. 14, p. 36. 2020, Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2020.00036/full>>. Acesso em: 08 set. 2025.

GAILLET, V. et al. **Spatially selective activation of the visual cortex via intraneural stimulation of the optic nerve**. *Nature Biomedical Engineering*, v. 4. 2020.

HOLZ, F. G. et al. **Vision restoration with the PRIMA system in geographic atrophy due to AMD**. *The New England Journal of Medicine*, v. 394, n. 3, p. 232–242. 2026.

KADAN-JAMAL, K. e. a. **Electrical stimulation of cells: drivers, technology, and effects**. *Chemical Reviews*, v. 125, n. 15, p. 6874–6905. 2025, Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00468>>. PMID: 40674565. Acesso em: 10 nov. 2025.

LU, Y. e. a. **Electrical stimulation with a penetrating optic nerve electrode array elicits visuotopic cortical responses in cats.** Journal of Neural Engineering, v. 10, n. 3, p. 036022. 2013, Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23665847/>>. Acesso em: 08 set. 2025.

LUKOMSKA, A. e. a. **Nfe2l3 promotes neuroprotection and long-distance axon regeneration after injury in vivo.** Experimental Neurology, v. 375. 2024, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014488624000670>>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MARGALIT, E. et al. **A unifying framework for functional organization in early and higher ventral visual cortex.** Neuron, v. 112, n. 14, p. 2435–2451.e7. 2024. PMID: 38733985.

MIROCHNIK, R. M. e. a. **Contemporary approaches to visual prostheses.** Military Medical Research, v. 6. 2019, Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6549329/>>. Acesso em: 08 set. 2025.

NIKETEGHAD SOROUGH; POURATIAN, N. **Brain-machine interfaces for vision restoration: The current state of cortical visual prosthetics.** Neurotherapeutics, v. 16, p. 134–143. 2019, Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13311-018-0660-1>>. Acesso em: 10 nov. 2025.

Organização Mundial da Saúde. **Relatório mundial sobre a visão.** 2021. Disponível em: <<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/328717/9789241516570-por.pdf>>. Acesso em: 08 set. 2025.

SANTOS, V. S. d. **"O que é neurônio?"**. [s.d.]. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/biologia/o-que-e-neuronio.htm>>. Acesso em: 08 set. 2025.

SCHMIDT, E. M. e. a. **Feasibility of a visual prosthesis for the blind based on intracortical microstimulation of the visual cortex.** Brain, v. 119, p. 507–522. 1996, Disponível em: <https://microprobes.com/files/pdf/publications/by-product/custom/feasibility_of_visual_prosthesis.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

STRONKS H. C.; DAGNELIE, G. **The functional performance of the argus ii retinal prosthesis.** Expert Review of Medical Devices, v. 11, p. 23–30. 2014, Disponível em: <<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3926652>>. Acesso em: 14 nov. 2025.

VERAART, C. et al. **Visual sensations produced by optic nerve stimulation using an implanted self-sizing spiral cuff electrode.** Brain Research, v. 813, n. 1. 1998. Acesso em: 02 jun. 2026.

VILLA, J. e. a. **Enhancing biocompatibility of the brain-machine interface: A review.** Bioactive Materials. 2024, Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452199X24003724>.
Acesso em: 14 nov. 2025.

YANG WEIYANG; GONG, Y. L. W. **A review: electrode and packaging materials for neurophysiology recording implants.** Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021, Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7873964/pdf/fbioe-08-622923.pdf>.
Acesso em: 14 nov. 2025.