



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA
GRADUAÇÃO EM FÍSICA MÉDICA

ANDRESSA SOARES AMORIM

**BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS APLICADOS À
DETECÇÃO DE GENE ESPECÍFICO PARA CÂNCER
DE PRÓSTATA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

Uberlândia

2025

ANDRESSA SOARES AMORIM

**BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS APLICADOS À
DETECÇÃO DE GENE ESPECÍFICO PARA CÂNCER
DE PRÓSTATA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Física da Universidade Federal
de Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Física
Médica.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Foschini

Uberlândia

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

| | |
|------|---|
| A524 | Amorim, Andressa Soares, 2001- |
| 2025 | BIOSENsoRES ELETROQUÍMICOS APLICADoS À DETECÇÃO DE |
| | GENE ESPECÍFICO PARA CÂNCER DE PRÓSTATA: UMA REVISÃO |
| | BIBLIOGRÁFICA. [recurso eletrônico] / Andressa Soares |
| | Amorim. - 2025. |
| | Orientador: Mauricio Foschini. |
| | Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - |
| | Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Física |
| | Médica. |
| | Modo de acesso: Internet. |
| | Inclui bibliografia. |
| | 1. Física médica. I. Foschini, Mauricio ,1977-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Física Médica. III. Título. |
| | CDU: 61:53 |

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ANDRESSA SOARES AMORIM

**BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS APLICADOS À
DETECÇÃO DE GENE ESPECÍFICO PARA CÂNCER
DE PRÓSTATA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Física da Universidade Federal
de Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Física
Médica.

Uberlândia, 07 de maio de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mauricio Foschini – INFIS- Orientador

Prof. Dr. Lucio Pereira Neves (INFIS)

Prof. Me. Antônio Ariza Gonçalves Júnior (INFIS)

Dedico este trabalho à minha querida mãe, que sempre me ensinou que a educação transforma vidas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me fortaleceu em cada passo, me guiou nos momentos de incerteza e renovou minha esperança nos dias difíceis. Sem Sua presença em minha vida, essa conquista não teria sido possível.

Aos meus pais, Marcus Vinicius e Kelly Soares, o meu mais profundo agradecimento. Vocês foram meus pilares, minha base e minha inspiração. Em especial, à minha mãe, Kelly, que nunca mediu esforços para ver sua filha formada. Sua dedicação, amor incondicional e apoio inabalável foram fundamentais para que eu chegassem até aqui. Cada sacrifício que fez por mim ecoa neste momento de realização. Cada conquista minha é também sua.

Ao meu namorado, Rendson Santos, quero dizer o quanto sou grata por ter você ao meu lado. Você nunca duvidou da minha capacidade, mesmo nos momentos em que eu mesma hesitei. Nos dias difíceis, você foi a calmaria que eu precisava, sempre me incentivando e sonhando ao meu lado. Sua presença tornou essa caminhada mais leve e feliz.

Ao meu orientador, Dr. Mauricio Foschini, minha imensa gratidão pela paciência em ensinar, pelo cuidado em orientar e, principalmente, por sempre me ouvir com atenção. Sua dedicação à profissão, exercida com tanto zelo e amor, é uma inspiração para todos que têm o privilégio de aprender com o senhor. Muito obrigado por compartilhar seu conhecimento e acreditar no meu potencial. Foi uma honra ser sua aluna.

À Universidade Federal de Uberlândia, que tantas vezes foi meu lar ao longo desses anos e a materialização de um grande sonho. Aqui, vivi experiências transformadoras que me moldaram não apenas como profissional, mas também como pessoa. Meu sincero agradecimento a essa instituição que desempenha um papel fundamental na formação de tantos estudantes.

A todos os professores do Instituto de Física, que compartilharam seu conhecimento e contribuíram para minha formação, meu muito obrigado, especialmente à Dra. Ana Paula Perini e ao Dr. Lúcio Neves, suas aulas foram motivação para continuar, o seu amor pela profissão é contagioso e notável em cada detalhe. Cada aula, cada orientação e cada palavra de incentivo foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço aos amigos que tive a felicidade de encontrar ao longo dessa jornada: Arthur Zuchetti, Douglas Luz e Jeane Menezes. Ter conhecido vocês foram, sem dúvida, um dos maiores presentes que a Universidade me proporcionou. Minha gratidão também à minha querida amiga Maria José e Ana Rachel, que sempre estiveram ao meu lado, me ajudando a enxergar com mais clareza nos momentos de dúvida e torcendo por cada uma de minhas

conquistas. Suas palavras de incentivo foram essenciais para que eu acreditasse que todo esse esforço valeria a pena.

O meu mais sincero, muito obrigada!

“... ‘Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês’, diz o Senhor, ‘planos de fazê-los prosperar e não de lhes causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro.’”

(Bíblia Sagrada, Jeremias 29:11)

RESUMO

O câncer de próstata é o segundo tipo de câncer mais comum entre os homens no Brasil, ficando atrás apenas do câncer de pele não melanoma, conforme dados do Instituto Nacional do Câncer (INCA). A doença afeta principalmente homens acima de 65 anos e está associada a fatores de risco como idade avançada, histórico familiar, sobrepeso e obesidade. O diagnóstico atual envolve exames como o toque retal e a dosagem de PSA (antígeno prostático específico). Embora o toque retal seja um procedimento rápido e minimamente invasivo, ele ainda enfrenta resistência significativa entre os homens brasileiros, devido a barreiras socioculturais e tabus relacionados à masculinidade e ao corpo. Essa resistência pode levar ao diagnóstico tardio da doença. Diante disso, o desenvolvimento de métodos diagnósticos menos estigmatizados, mais acessíveis e igualmente eficazes tem sido alvo de pesquisas. Nesse contexto, os biossensores eletroquímicos surgem como uma alternativa promissora para a detecção precoce do câncer de próstata. Esses dispositivos utilizam reações biológicas para identificar alvos específicos, como genes associados ao câncer, e convertem essas informações em sinais legíveis, facilitando o diagnóstico sem comprometer a qualidade. Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o uso de biossensores eletroquímicos na detecção de genes específicos para o câncer de próstata, avaliando a eficiência desses dispositivos no diagnóstico da doença. A revisão baseia-se na análise e síntese de fontes bibliográficas publicadas, com o intuito de contribuir para o avanço de métodos diagnósticos menos invasivos e mais precisos.

Palavras-chave: Biossensores eletroquímicos, câncer de próstata, diagnóstico precoce.

ABSTRACT

Prostate cancer is the second most common type of cancer among men in Brazil, behind only non-melanoma skin cancer, according to data from the National Cancer Institute (INCA). The disease mainly affects men over 65 years of age and is associated with risk factors such as advanced age, family history, overweight and obesity. Current diagnosis involves tests such as digital rectal examination and PSA (prostate-specific antigen) measurement. Although digital rectal examination is a quick and minimally invasive procedure, it still faces significant resistance among Brazilian men due to sociocultural barriers and taboos related to masculinity and the body. This resistance can lead to a late diagnosis of the disease. In view of this, the development of less stigmatized, more accessible and equally effective diagnostic methods has been the subject of research. In this context, electrochemical biosensors emerge as a promising alternative for the early detection of prostate cancer. These devices use biological reactions to identify specific targets, such as genes associated with cancer, and convert this information into readable signals, facilitating diagnosis without compromising quality. This study aims to conduct a literature review on the use of electrochemical biosensors in the detection of genes specific for prostate cancer, evaluating the efficiency of these devices in the diagnosis of the disease. The review is based on the analysis and synthesis of published bibliographic sources, with the aim of contributing to the advancement of less invasive and more accurate diagnostic methods.

Keywords: Electrochemical biosensors, prostate cancer, early diagnosis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1 - | Número de publicações sobre biossensores eletroquímicos aplicados ao diagnóstico do câncer de próstata (2010-2024) | 13 |
| Figura 2 - | Esquema de funcionamento de um biossensor..... | 15 |
| Figura 3 - | Representação gráfica do câncer de próstata | 17 |

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Biossensores Eletroquímicos para Detecção de genes do Câncer de Próstata. 20-21

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------------|--|
| AuNPs | Nanopartículas de Ouro (Gold Nanoparticles) |
| CaP | Câncer de Próstata |
| CNTs | Nanotubos de Carbono (Carbon Nanotubes) |
| CV | Voltametría Cíclica (Cyclic Voltammetry) |
| DNA | Ácido Desoxirribonucleico |
| EIS | Impedância Eletroquímica (Electrochemical Impedance Spectroscopy) |
| HPB | Hiperplasia Próstatica Benigna |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INCA | Instituto Nacional do Câncer |
| IoT | Internet das Coisas (Internet of Things) |
| NCCN | National Comprehensive Cancer Network (Rede Nacional de Combate ao Câncer) |
| PARP | Poli ADP-Ribose Polimerase |
| PCR | Reação em Cadeia da Polimerase (Polymerase Chain Reaction) |
| POC | Point-of-Care (Ponto de Atendimento) |
| PSA | Antígeno Prostático Específico |
| RNA | Ácido Ribonucleico |
| SBU | Sociedade Brasileira de Urologia |
| SWV | Voltametria de Onda Quadrada (Square Wave Voltammetry) |
| TMPRSS2-ERG | Fusão gênica entre os genes TMPRSS2 (Transmembrane Protease Serine 2) e ERG (ETS- Related Gene) |
| IUPAC | International Union of Pure and Applied Chemistry (União Internacional de Química Pura e Aplicada) |
| PARP | Poli ADP-Ribose Polimerase |
| ONU | Organização das Nações Unidas |

SUMÁRIO

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 13 |
| 2.1 | OBJETIVOS GERAIS | 13 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 13 |
| 3 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 15 |
| 3.1- | BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS..... | 15 |
| 3.2- | CÂNCER DE PRÓSTATA | 17 |
| 3.3- | BIOMARCADORES GENÉTICOS DO CÂNCER DE PROSTATA | 18 |
| 3.4- | BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS PARA DETECÇÃO DE DNA..... | 20 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 21 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 22 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 26 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 28 |

1 INTRODUÇÃO

O câncer de próstata é um dos principais desafios de saúde pública no Brasil, sendo o segundo tipo de câncer mais comum entre os homens, superado apenas pelo câncer de pele não melanoma, conforme dados do Instituto Nacional do Câncer (INCA, 2023). Essa doença, que afeta predominantemente homens acima de 65 anos, está associada a fatores de risco como idade avançada, histórico familiar, sobre peso e obesidade, o que reforça a necessidade de estratégias eficazes para seu diagnóstico precoce e tratamento adequado (INCA, 2023). A detecção precoce é fundamental para aumentar as chances de cura e reduzir a mortalidade, mas os métodos diagnósticos atuais apresentam limitações que precisam ser superadas.

Atualmente, o diagnóstico do câncer de próstata baseia-se principalmente em dois exames: o toque retal e a dosagem do antígeno prostático específico (PSA) (SCHRODER et al., 2009). Embora esses métodos sejam amplamente utilizados e reconhecidos por sua eficácia na triagem inicial da doença, ambos apresentam limitações. O toque retal, apesar de ser um procedimento simples, rápido e minimamente invasivo, ainda enfrenta resistência significativa por parte dos pacientes, especialmente no Brasil, devido a fatores socioculturais, tabus e construções de masculinidade que dificultam sua aceitação. Já o exame de PSA, embora útil, está associado a taxas consideráveis de falsos positivos e negativos, o que pode levar a diagnósticos imprecisos e intervenções desnecessárias (CATTO et al., 2011). Essas limitações evidenciam a urgência no desenvolvimento de métodos diagnósticos mais precisos, menos estigmatizados e com maior aceitação pela população masculina, permitindo a detecção precoce da doença com maior eficácia e menor impacto psicológico.

Nesse contexto, os avanços tecnológicos na área da biotecnologia têm aberto novas perspectivas para o diagnóstico do câncer de próstata. Entre as abordagens mais promissoras estão os biossensores eletroquímicos, dispositivos que combinam componentes biológicos e eletrônicos para detectar alvos específicos, como biomarcadores associados ao câncer (WANG, 2006). Esses dispositivos são capazes de converter reações biológicas em sinais elétricos legíveis, oferecendo uma alternativa rápida, sensível e menos invasiva para o diagnóstico precoce da doença.

Os biossensores eletroquímicos têm se destacado por sua capacidade de detectar genes específicos associados ao câncer de próstata, como o PCA3 e o TMPRSS2-ERG, que estão diretamente relacionados ao desenvolvimento e progressão da doença (TOMKINSON; DAY, 2018). A detecção desses genes em estágios iniciais pode permitir intervenções terapêuticas mais precoces e eficazes, reduzindo a morbimortalidade associada ao câncer de próstata. Além

disso, a utilização desses dispositivos pode minimizar os efeitos psicológicos negativos causados pelos métodos diagnósticos tradicionais.

A eficiência dos biossensores eletroquímicos no diagnóstico do câncer de próstata tem sido amplamente investigada em estudos recentes. Pesquisas demonstram que esses dispositivos apresentam alta sensibilidade e especificidade, além de serem capazes de detectar concentrações muito baixas de biomarcadores em amostras biológicas (ZHANG et al., 2020). Essas características tornam os biossensores eletroquímicos uma ferramenta valiosa para a detecção precoce e o monitoramento da doença, especialmente em populações de alto risco.

Além disso, os biossensores eletroquímicos oferecem vantagens significativas em termos de custo e praticidade. Eles podem ser miniaturizados e integrados a sistemas portáteis, permitindo seu uso em ambientes clínicos e até mesmo em locais com recursos limitados (POHANKA, 2018). Essa portabilidade e acessibilidade são particularmente relevantes em um país como o Brasil, onde as disparidades regionais no acesso a serviços de saúde ainda representam um desafio significativo.

Apesar desses avanços, é importante ressaltar que a implementação de biossensores eletroquímicos na prática clínica ainda enfrenta desafios. Questões relacionadas à padronização dos dispositivos, validação clínica em larga escala e integração com os sistemas de saúde precisam ser abordadas para garantir sua eficácia e segurança (RUSLING et al., 2010). Além disso, é fundamental que os profissionais de saúde sejam capacitados para utilizar essas novas tecnologias de forma adequada.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Realizar uma revisão bibliográfica sobre a utilização de biossensores eletroquímicos na detecção de genes específicos associados ao câncer de próstata.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente, busca-se investigar os princípios de funcionamento dos biossensores eletroquímicos aplicados ao diagnóstico molecular, identificar os principais alvos genéticos associados ao câncer de próstata que podem ser detectados por esses dispositivos, levantar e analisar

publicações científicas recentes que tratam do desenvolvimento e da aplicação desses biossensores na detecção precoce da doença, além de avaliar as vantagens, limitações e perspectivas futuras de sua utilização no contexto clínico.

A Figura 1 ilustra o aumento no número de artigos científicos publicados sobre o tema "biossensores eletroquímicos aplicados ao diagnóstico do câncer de próstata" ao longo dos últimos dez anos. Os dados foram obtidos a partir de buscas em bases de dados como PubMed, Scopus e Web of Science, utilizando termos como "electrochemical biosensors", "prostate cancer", e "early diagnosis".

Figura 1- Número de publicações sobre biossensores eletroquímicos aplicados ao diagnóstico do câncer de próstata (2013-2023).



Figura gerada pelo autor no programa SciDAVIs. Fonte: Dados obtidos a partir de buscas nas bases PubMed, Scopus e Web of Science (2023).

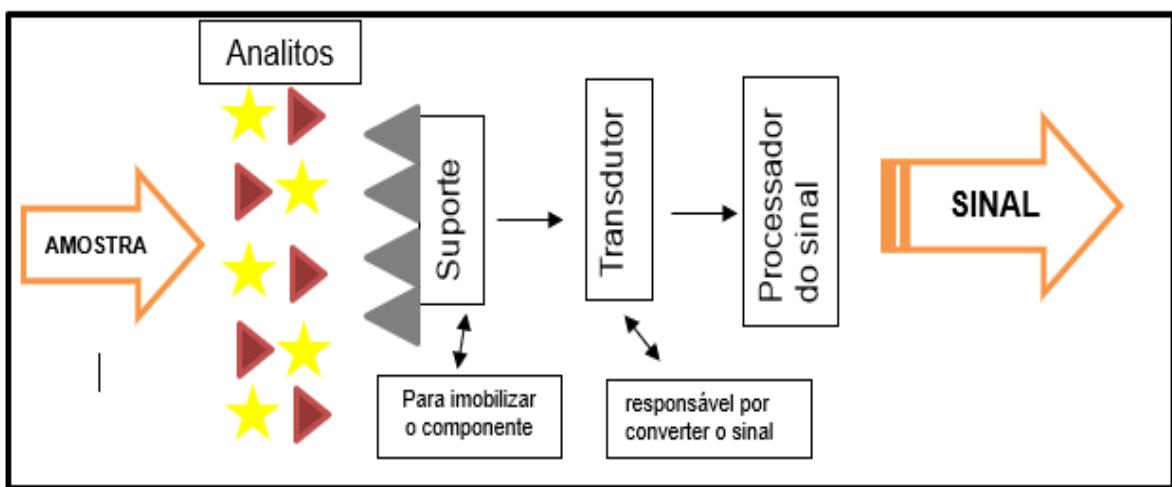
Como evidenciado pela figura 1, o número de publicações sobre o tema tem crescido de forma consistente ao longo dos anos, com um aumento significativo a partir de 2017. Esse crescimento reflete o interesse crescente da comunidade científica em desenvolver tecnologias inovadoras para o diagnóstico precoce do câncer de próstata, destacando a relevância dos biossensores eletroquímicos como uma área promissora de pesquisa. O pico observado em 2023, mesmo considerando apenas os dados até outubro, reforça a tendência de que o tema tem sido cada vez mais explorado, indicando um futuro promissor para a aplicação desses dispositivos na prática clínica.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1- BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS

Os biossensores eletroquímicos são dispositivos analíticos que combinam componentes biológicos, como enzimas, anticorpos, DNA ou células, com sistemas de detecção eletroquímica para identificar e quantificar substâncias específicas em amostras biológicas (WANG, 2006). Segundo a definição da IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), um biossensor é um dispositivo autossuficiente e integrado que fornece informações quantitativas ou semiquantitativas sobre a presença de um analito por meio de um elemento de reconhecimento biológico ligado a um transdutor fisicoquímico (IUPAC, 1999). Esses dispositivos funcionam por meio da conversão de uma reação biológica em um sinal elétrico mensurável, como corrente, potencial ou impedância, permitindo a detecção de analitos com alta sensibilidade e especificidade (THEVENOT et al., 2001), conforme indicado no esquema representado na Figura 2. De acordo com a IUPAC, sensibilidade refere-se à razão entre a variação do sinal do biossensor e a variação correspondente na concentração do analito (IUPAC, 1997). Esta capacidade de detectar analitos em concentrações extremamente baixas, juntamente com a possibilidade de miniaturização e automação, tornam os biossensores eletroquímicos uma ferramenta poderosa para análises precisas e rápidas.

Figura 2: Esquema de funcionamento de um biossensor. Fonte: autoria própria.



O princípio de funcionamento de um biossensor eletroquímico baseia-se na detecção de mudanças nas propriedades eletroquímicas de um sistema, conforme mencionado anteriormente. Quando o componente biológico é imobilizado na superfície do eletrodo, o alvo é reconhecido e, consequentemente, é gerado uma resposta que é convertida em um sinal elétrico através de um transdutor. Por exemplo, em um biossensor baseado em enzimas, a

reação catalítica entre a enzima e o substrato pode produzir espécies eletroativas, cuja oxidação ou redução é detectada eletroquimicamente (THEVENOT et al., 2001). Essa abordagem permite a detecção quantitativa de uma ampla gama de substâncias, desde glicose e colesterol até contaminantes ambientais e biomarcadores de doenças.

A escolha do material do eletrodo é um aspecto crítico no desenvolvimento de biossensores eletroquímicos, pois influencia diretamente a sensibilidade, a estabilidade e a seletividade do dispositivo. Materiais como ouro, carbono e platina são comumente utilizados devido às suas excelentes propriedades condutoras, que permitem uma transferência eficiente de elétrons entre o componente biológico da amostra e o eletrodo, garantido que o sinal gerado seja forte e estável. Além disso, os materiais condutores podem ter a sua superfície facilmente modificada para imobilizar os elementos biológicos, ou seja, eles garantem que o componente permaneça estável e funcional durante toda a operação do biossensor. Além disso, a incorporação de nanomateriais, como nanopartículas metálicas, nanotubos de carbono e grafeno, tem sido amplamente explorada para melhorar o desempenho dos biossensores, aumentando a área superficial e facilitando a transferência de elétrons (ZHANG et al., 2013). Esses avanços têm permitido a detecção de analitos em concentrações cada vez menores, ampliando as possibilidades de aplicação desses dispositivos.

Uma das principais vantagens dos biossensores eletroquímicos é a sua capacidade de integração com sistemas portáteis e de baixo custo, tornando-os ideais para aplicações point-of-care (POC). Dispositivos como glicosímetros, amplamente utilizados por pacientes diabéticos, são exemplos clássicos de biossensores eletroquímicos comercialmente bem-sucedidos. Além disso, a combinação desses sensores com tecnologias de comunicação sem fio e plataformas de Internet das Coisas (IoT) tem aberto novas perspectivas para o monitoramento contínuo e remoto de parâmetros de saúde e ambientais (TURNER, 2013). Essa tendência reflete a crescente demanda por soluções analíticas rápidas, precisas e acessíveis.

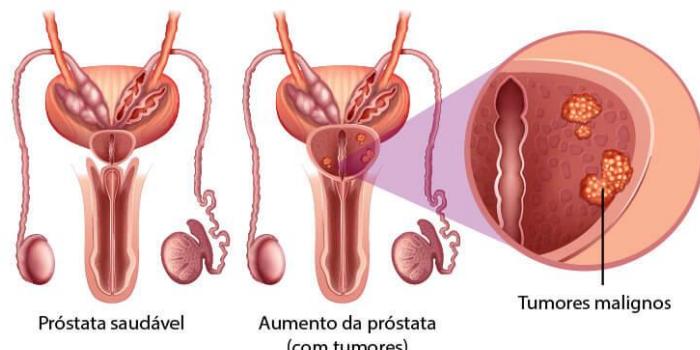
Apesar dos avanços significativos, o desenvolvimento de biossensores eletroquímicos ainda enfrenta desafios, como a necessidade de melhorar a estabilidade e a vida útil dos componentes biológicos, além de garantir a reproduzibilidade e a confiabilidade dos resultados. A imobilização eficiente do elemento biológico na superfície do eletrodo, sem comprometer sua atividade, é um dos principais obstáculos a serem superados. Além disso, a interferência de outras espécies presentes em amostras complexas, como sangue ou água, pode afetar a precisão das medições, exigindo estratégias de seletividade mais robustas (CLARK; LYONS, 1962). Pesquisas recentes têm focado no desenvolvimento de novos métodos de imobilização, como o

uso de hidrogéis e polímeros condutores, que nada mais são do que uma classe de materiais que combinam as propriedades mecânicas dos plásticos com a capacidade de conduzir eletricidade.

3.2- CÂNCER DE PRÓSTATA

O câncer de próstata é uma das neoplasias malignas mais comuns entre os homens, representando um significativo problema de saúde pública em todo o mundo. A próstata é uma glândula localizada abaixo da bexiga e à frente do reto, responsável pela produção de parte do fluido seminal. O câncer de próstata ocorre quando há uma multiplicação desordenada das células dessa glândula, conforme indicado na Figura 3 abaixo, podendo, em casos mais avançados, invadir tecidos adjacentes ou se disseminar para outros órgãos, processo conhecido como metástase (INCA, 2023). Segundo dados do Instituto Nacional de Câncer (INCA), esse tipo de câncer é o segundo mais frequente entre os homens no Brasil, ficando atrás apenas do câncer de pele não melanoma.

Figura 3: Representação gráfica do câncer de próstata



Fonte: HILAB. Imagem: Representação gráfica do câncer de próstata. Hilab Blog, 2023. Disponível em: <https://hilab.com.br/blog/cancer-de-prostata/>. Acesso em: 10 out. 2024.

A causa do câncer de próstata ainda não foi completamente descoberta, mas sabe-se que alguns fatores genéticos e até mesmo ambientais podem influenciar no desenvolvimento da doença. O histórico familiar de câncer de próstata, idade avançada, obesidade e hábitos alimentares inadequados são considerados fatores de risco para a doença, de acordo com a Sociedade Brasileira de Urologia. Além disso, estudos científicos da American Cancer Society apontam que a raça também é considerada um fator importante, uma vez que homens negros têm uma incidência de câncer de próstata significativamente maior em comparação com homens brancos ou asiáticos (AMERICAN CANCER SOCIETY, 2023).

O diagnóstico precoce é fundamental para o sucesso do tratamento e a redução da mortalidade. O rastreamento é realizado principalmente por meio do exame de toque retal e da dosagem do antígeno prostático específico (PSA) no sangue, que nada mais é do que uma proteína produzida tanto pelas células normais da próstata quanto por células cancerígenas localizadas na glândula prostática, que ajuda a liquefazer o sêmen, facilitando a mobilidade dos espermatozoides. Apesar de ser liberada no líquido seminal, uma pequena quantidade também entra na corrente sanguínea e, desse modo, pode ser medida por meio de um simples exame de sangue, que é capaz de quantificar a concentração dessa proteína em nanogramas por mililitro (ng/mL) (SOCIEDADE BRASILEIRA DE UROLOGIA, 2023; AMERICAN CANCER SOCIETY, 2022). Níveis elevados de PSA podem indicar a presença de células cancerígenas, uma vez que sua presença aumenta a produção desta proteína. No entanto, é importante destacar que o PSA não é um marcador exclusivo do câncer, podendo significar também a presença de outras substâncias benignas, como a hiperplasia prostática benigna (HPB) (SOCIEDADE BRASILEIRA DE UROLOGIA, 2023; ROBBINS; COTRAN, 2020).

O tratamento do câncer de próstata depende do estágio da doença, da idade do paciente e de suas condições clínicas. Para casos localizados, as opções incluem cirurgia (prostatectomia radical), radioterapia e vigilância ativa, que consiste no monitoramento rigoroso da doença com intervenção apenas se houver progressão dela. Em estágios mais avançados, o tratamento pode envolver hormonioterapia, quimioterapia ou terapias-alvo, conforme diretrizes da National Comprehensive Cancer Network – NCCN (2023). A escolha do tratamento deve ser individualizada, considerando os benefícios e os riscos de cada abordagem.

A prevenção do câncer de próstata envolve a adoção de um estilo de vida saudável, com a prática regular de atividade física, manutenção de uma dieta equilibrada rica em frutas, verduras e legumes, e a redução do consumo de gorduras e carne vermelha. Além disso, é fundamental que os homens, especialmente aqueles com fatores de risco, realizem consultas periódicas com o urologista para avaliação prostática, conforme recomendado pelas diretrizes médicas (SOCIEDADE BRASILEIRA DE UROLOGIA, 2022).

3.3- BIOMARCADORES GENÉTICOS DO CÂNCER DE PROSTATA

Apesar dos avanços nos métodos de diagnóstico, como o antígeno prostático específico (PSA) e a biópsia, a busca por biomarcadores genéticos mais precisos tem ganhado destaque na oncologia moderna. Dentre os genes-alvo associados ao *CaP*, destacam-se PCA3, TMPRSS2-ERG e BRCA2, que apresentam potencial para melhorar a acurácia diagnóstica e permitir uma abordagem terapêutica personalizada (SOKOLOFF et al., 2021).

O gene PCA3 (Prostate Cancer Antigen 3) é um RNA – molécula de ácido ribonucleico- não codificante altamente específico para o tecido prostático neoplásico, sendo amplamente estudado como um biomarcador do sistema urinário. Diferentemente do PSA, que frequentemente pode apresentar elevados índices de falsos positivos devido a condições diagnóstica benignas, o PCA3 demonstra uma maior especificidade. Alguns estudos feitos, apontados pela NCCN -Rede Nacional de Combate ao Câncer -apontam que a quantidade desse gene em amostras de urina, por meio de técnicas como a reação em cadeia da polimerase (PCR), pode auxiliar na decisão de clínica sobre a necessidade ou não de realizar biópsias repetidas, reduzindo os procedimentos invasivos desnecessários.

Outro biomarcador relevante é a fusão gênica TMPRSS2-ERG, presente em aproximadamente 50% dos casos de *CaP*. Essa alteração molecular resulta da translocação entre os genes TMPRSS2 (transmembrane protease, serine 2) e ERG (ETS-related gene), levando à superexpressão de fatores de transcrição associados à progressão tumoral (TOMIINS et al., 2022). A detecção dessa fusão em amostras sanguíneas ou de tecido prostático tem sido explorada como uma ferramenta complementar ao PSA, especialmente naqueles pacientes cujo diagnóstico é impreciso. Ademais, a presença desse biomarcador pode indicar uma maior agressividade da doença, auxiliando na estratificação de risco (CARVALHO et al., 2021).

Mutações no gene BRCA2 (Breast Cancer 2), popularmente conhecido por sua relação com câncer de mama e ovário, estão associadas a tumores prostáticos de alta letalidade, conforme demonstrado em estudos de coorte (PRITCHARD et al., 2016). Homens que possuem variações patogênicas desse gene apresentam uma maior probabilidade de desenvolver tumores de próstata agressivos e com menor resposta às terapias convencionais (CASTRO et al., 2020). O diagnóstico precoce dessas mutações por meio de testes genéticos permite não apenas a realização de um rastreamento familiar, mas também a adoção de estratégias terapêuticas direcionadas, como inibidores de PARP (Poli ADP-Ribose Polimerase) – fármacos que atuam na terapia direcionada contra células cancerígenas, especialmente em tumores com deficiências na reparação do DNA.

A detecção genética precoce desses biomarcadores representa um avanço significativo para o diagnóstico personalizado do *CaP*. A medicina de precisão, baseada no perfil molecular do tumor, possibilita intervenções mais eficazes e individualizadas, reduzindo a morbidade associada a tratamentos desnecessários (SCHWEIZER et al., 2021). Além disso, o uso desses biomarcadores juntamente com tecnologias inovadoras, como os biossensores eletroquímicos, promete viabilizar métodos de diagnóstico rápidos, sensíveis e de baixo custo.

3.4- BIOSSENSORES ELETROQUÍMICOS PARA DETECÇÃO DE DNA

Desde a implementação do conceito de biossensores eletroquímicos de DNA por Millan e Mikkelsen em 1993 e a formalização de seu conceito promovida por organizações científicas como a IUPAC anos depois, inúmeros trabalhos foram e continuam sendo realizados ao redor de todo o mundo. O DNA é uma molécula que se ajusta muito bem para as aplicações dos biossensores porque as interações dos pares de bases de sua estrutura com as sequências complementares são específicas. A detecção de sequências específicas de DNA é crucial em diversas áreas, como diagnóstico médico, monitoramento ambiental e segurança alimentar (PALECEK & BARTOSÍK, 2012).

Um biossensor básico de DNA é desenvolvido a partir da imobilização de um oligonucleotídeo de fita simples, produtos da reação em cadeia da polimerase ou DNA sobre uma superfície de um transdutor para que, desse modo, seja possível reconhecer a sequência genética através de hibridização, que nada mais é do que um processo biofísico no qual duas cadeias complementares de ácido nucleico (A-T/U e C-G) se unem por meio de ligações de hidrogênio, formando uma molécula dupla fita. A estabilidade do duplex formado depende de alguns fatores como (SILVA PEREIRA, 2019).:

- Temperatura - visto que altas temperaturas desnaturam as fitas.
- Força iônica- os íons neutralizam as cargas negativas dos fosfatos, facilitando a junção.
- pH – valores extremos podem desestabilizar as ligações de hidrogênio.

A imobilização eficiente de sondas de DNA na superfície do eletrodo é essencial para o desempenho do biossensor. Nanopartículas de ouro (AuNPs) são amplamente utilizadas devido às suas propriedades, como grande área superficial, alta estabilidade, biocompatibilidade e facilidade de modificação química. (ROSI & MIRKIN, 2005). As AuNPs aumentam a reatividade das moléculas presentes nas superfícies, facilitando a captura de moléculas alvo e, consequentemente, a resposta mais rápida no biossensor. Além disso, as nanopartículas de ouro são estáveis sob uma variedade de condições ambientais, como temperatura e pH. Isso aumenta a durabilidade dos biossensores, permitindo medições mais consistentes e de longo prazo (COSTA SOUZA, 2020). Outra abordagem envolve o uso de nanotubos de carbono (CNTs), que aumentam a área superficial e melhoram a transferência eletrônica (YANG et al., 2010). Métodos como a adsorção física, ligação covalente e camadas auto-organizadas (SAMs) também são empregados para garantir a estabilidade e orientação adequada das sondas. Ou seja, o uso de nanopartículas de AuNPs e CNT funcionam como mediadores dentro dos biossensores, que nada mais são do que substâncias ou moléculas que desempenham um papel crucial na

amplificação e transdução do sinal biológico gerado pela interação entre o componente biológico e a substância alvo (analito).

Dentre as técnicas de detecção, a amperometria é o processo no qual se mede a corrente elétrica gerada pela oxidação ou redução de espécies eletroativas em um potencial constante aplicado entre o eletrodo e o contra-eletrodo. A corrente medida é diretamente proporcional à concentração do analito em solução, conforme diz a Lei de Faraday (MURRAY, 2005). Já a impedância eletroquímica (EIS) analisa mudanças na resistência à transferência de carga, sendo extremamente sensível a pequenas alterações na interface do eletrodo (LEBLANC SHU, DUMITRU, 2005). Por fim, a voltametria, especialmente a voltametria de onda quadrada (SWV) e a voltametria cíclica (CV), permite a detecção quantitativa de DNA marcado com indicadores redox.

Esses dispositivos oferecem vantagens como baixo custo, portabilidade e análise rápida, sendo ideais para aplicações *point-of-care* (RONKAINEN et al., 2010), ou seja, são ideais para diagnósticos e tratamentos diretamente no local de atendimento ao paciente, sem a necessidade de enviar amostras a um laboratório central, possibilitando resultados rápidos e acessíveis. Além disso, a integração com sistemas micro fluídicos e plataformas *lab-on-a-chip*-dispositivos miniaturizados que integram várias funções de um laboratório tradicional amplia seu potencial para diagnósticos descentralizados (GUBALA et al., 2012). Apesar dos avanços, desafios como a reprodutibilidade, interferência de matrizes complexas e estabilidade das sondas ainda precisam ser superados e futuras pesquisas devem se preocupar com um modo de desenvolver técnicas de imobilização mais robustas.

4 METODOLOGIA

O trabalho consiste em uma revisão bibliográfica e, seguindo as diretrizes metodológicas para revisões integrativas (WHITTEMORE & KNALF, 2005) a pesquisa foi conduzida basicamente em três etapas:

1. **Estratégia de busca:** foram consultadas as bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science, Google Acadêmico utilizando as seguintes palavras chaves em inglês e português: “eletrochemical biosensors”, “prostate cancer”, “biomarcadores genéticos”, “diagnóstico precoce”, “DNA detection” e “biosensores”. Os critérios para inclusão foram: artigos publicados entre 2010 e 2024, estudos em português ou inglês e por fim, pesquisas originais ou revisões sobre biosensores eletroquímicos aplicados ao câncer de próstata.

- 2. Seleção e Análise dos artigos:** A triagem dos artigos foi realizada em duas fases: primeiramente foi feita a leitura dos títulos e resumos para identificar a relevância temática e, posteriormente, foi realizada uma análise completa dos textos dos artigos selecionados e a extração de dados como: tipo de biossensor utilizado, os genes-alvo (como o PCA3 e o TMPRSS2), a sensibilidade e especificidade do método e enfim, quais foram as limitações e o avanços relatados pelos autores. Os dados coletados foram organizados em tabelas para facilitar a síntese comparativa.
- 3. Síntese dos dados:** A análise seguiu uma abordagem qualitativa-descritiva, classificando os resultados em: eficácia diagnóstica dos biossensores, vantagens e desafios.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados na etapa 2 foram apresentados na tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Biossensores Eletroquímicos para Detecção de genes do Câncer de Próstata.

| | Autor (ano) | Biomarcador | Técnica de Detecção | Sensibilidade | Aplicação |
|---|---------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------------|
| 1 | Zhang et al. (2020) | PCA3 | Amperometria | 0.1nM | Diagnóstico Precoce |
| 2 | Tomkinson & Day (2018) | <i>TMPRSS2-ERG</i> | Voltametria cíclica (CV) | 0.05 nM | Monitoramento |
| 3 | Rusling et al. (2010) | PSA | Eletroquimioluminescência | 0.01 ng/mL | Detecção em soro |
| 4 | Paleček & Bartošík (2012) | <i>BRCA2</i> | Voltametria de pulso diferencial | 1.0 pM | Análise de mutações |
| 5 | Wang et al. (2016) | PCA3 | Impedância eletroquímica (EIS) | 0.5 nM | Diagnóstico não invasivo |
| 6 | Ronkainen et al. (2010) | PSA | Eletrodo de ouro funcionalizado | 0.1 ng/mL | Point-of-care (POC) |
| 7 | Carvalho et al. (2021) | <i>TMPRSS2-ERG</i> | Nanotubos de carbono | 0.01 nM | Identificação de fusão gênica |
| 8 | Sokoloff et al. (2021) | PCA3 | Nanopartículas de ouro (AuNPs) | 0.3 nM | Hibridização de DNA |

| | Autor (ano) | Biomarcador | Técnica de Detecção | Sensibilidade | Aplicação |
|----|---|--------------------|--|---|--|
| 9 | Schweizer et al. (2021) | <i>BRCA2</i> | Biossensor magnético | 0.05 pM | Rastreamento genético |
| 10 | Yang et al. (2010) | <i>PCA3</i> | Eletrodos de grafeno | 0.2 nM | Alta sensibilidade |
| 11 | Gubala et al. (2012) | <i>PSA</i> | Lab-on-a-chip | 0.05 ng/mL | Diagnóstico rápido |
| 12 | Castro et al. (2020) | <i>BRCA2</i> | PCR eletroquímico | 0.1 pM | Detecção de mutações |
| 13 | Turner (2013) | <i>PCA3</i> | Biossensor portátil | 0.4 nM | Uso clínico descentralizado |
| 14 | NCCN (2023) | <i>BRCA2</i> | PCR em tempo real + eletroquímica | 0.08 pM | Terapia personalizada |
| 15 | Sociedade Brasileira de Urologia (2022) | <i>PSA</i> | Biossensor descartável | 0.5 ng/mL | Rastreamento populacional |
| 16 | INCA (2023) | <i>PCA3</i> | Técnica híbrida (EIS + CV) | 0.15 nM | Saúde pública |
| 17 | Ronkainen et al. (2010) | <i>TMPRSS2-ERG</i> | Aptâmeros + nanopartículas | 0.03 nM | Alta especificidade |
| 18 | Paleček & Bartošík (2012) | <i>BRCA2</i> | Voltametria de adsorção | 0.5 pM | Detecção de lesões no DNA |
| 19 | Li, Hongtao (2024) | <i>PSA, PCA 3</i> | microfibras com interfaces nanoplasmônicas | $3,97 \times 10^{-15}$ mol/L para PSA e $1,56 \times 10^{-14}$ mol/L para PCA 3 | Diagnóstico precoce e preciso do câncer de próstata. |

Fonte: A autora.

A tabela 1 apresentada acima sintetiza os principais achados de 19 artigos científicos sobre biossensores eletroquímicos aplicados à detecção de genes associados ao câncer de próstata, permitindo uma análise comparativa das abordagens metodológicas e dos resultados obtidos. Os estudos foram selecionados a partir de bases de dados como PubMed, Google Scholar e Web of Science, com foco em publicações recentes (2010-2024) que abordam esta temática emergente.

A primeira coluna, referente aos autores e ano de publicação, revela que a maioria dos trabalhos é relativamente recente, demonstrando o caráter inovador desta linha de pesquisa. Esta distribuição temporal indica um crescente interesse da comunidade científica neste campo ao longo da última década, provavelmente impulsionado pelos avanços nas técnicas de nanobiotecnologia e pelo aumento da demanda por métodos diagnósticos mais precisos.

Quanto aos biomarcadores investigados, observa-se uma concentração significativa de estudos voltados aos genes PCA3 e BRCA2, com este último apresentando, inclusive, maior frequência de ocorrência do que a fusão gênica TMPRSS2-ERG na amostra analisada. Embora seja comum encontrar na literatura a ideia de que TMPRSS2-ERG é um dos principais alvos moleculares para o câncer de próstata, os dados levantados neste trabalho indicam que o BRCA2, frequentemente associado a formas mais agressivas da doença e à predisposição hereditária, tem sido mais explorado nas pesquisas recentes. O PCA3 mantém sua relevância como biomarcador específico do tecido prostático e tem sido amplamente estudado como uma alternativa ao PSA, devido à sua maior especificidade e menor taxa de falsos positivos.

As técnicas de detecção empregadas nos diversos estudos mostram uma variedade de abordagens eletroquímicas, com destaque para a amperometria e a voltametria cíclica, que aparecem como as metodologias mais frequentemente utilizadas. Estas técnicas são preferidas por combinarem relativa simplicidade operacional com boa sensibilidade analítica. A impedância eletroquímica também se mostra relevante, especialmente em estudos que buscam detectar mudanças sutis na interface do eletrodo. Um aspecto notável é a incorporação crescente de mediadores, a fim de reduzir o impacto de ruídos externos e otimizar as condições experimentais, como nanopartículas de ouro e nanotubos de carbono, que aparecem em vários estudos como estratégia para amplificação do sinal e aumento da sensibilidade.

A coluna referente à sensibilidade dos biossensores revela uma ampla variação nos limites de detecção alcançados, que vão desde 0,05 pM para mutações no gene BRCA2 até 0,5 nM para o PSA. Essa variação não se deve apenas às diferenças intrínsecas entre os biomarcadores, mas também às abordagens metodológicas adotadas nos dispositivos. Por exemplo, técnicas baseadas em voltametria de pulso diferencial, eletroquimioluminescência e impedância eletroquímica (EIS) oferecem sensibilidades distintas, influenciadas pelo tipo de transdutor, material de eletrodo e método de imobilização do biocomponente. Observa-se que biossensores que utilizam nanopartículas de ouro, nanotubos de carbono ou aptâmeros geralmente atingem menores limites de detecção, como nos casos de TMPRSS2-ERG com aptâmeros (0,03 nM) ou BRCA2 com biossensores magnéticos (0,05 pM). Essas abordagens aumentam a área superficial de interação e a afinidade de reconhecimento, otimizando a transdução do sinal. Já

dispositivos mais convencionais, como eletrodos de ouro funcionalizados ou plataformas de lab-on-a-chip, tendem a apresentar sensibilidades moderadas, embora ofereçam vantagens de portabilidade e facilidade de uso. Assim, a performance dos biossensores está fortemente associada à tecnologia empregada, refletindo uma relação direta entre inovação metodológica e melhoria nos parâmetros analíticos.

Quanto às aplicações práticas, nota-se que a maioria dos estudos tem como foco principal o diagnóstico precoce do câncer de próstata, especialmente aqueles que trabalham com os biomarcadores PCA3 e TMPRSS2-ERG. Entretanto, também são evidentes aplicações voltadas para o monitoramento da doença e para a terapia personalizada, particularmente nos estudos que investigam mutações genéticas como as do BRCA2. Um aspecto promissor é o desenvolvimento de biossensores portáteis (lab-on-a-chip), que aparecem em vários trabalhos como uma estratégia para viabilizar o diagnóstico em ambientes com recursos limitados.

A análise global dos dados permite identificar algumas tendências marcantes na área. Há um claro direcionamento para o desenvolvimento de biossensores cada vez mais específicos, com foco em genes que apresentam maior associação com o câncer de próstata. Paralelamente, observa-se um esforço contínuo para aumentar a sensibilidade dos dispositivos, frequentemente através da incorporação de nanomateriais inovadores. A portabilidade dos sistemas também emerge como uma preocupação constante, refletindo a busca por soluções diagnósticas que possam ser utilizadas em contextos clínicos diversos.

Entretanto, os estudos também revelam desafios persistentes que precisam ser superados. A interferência de matrizes biológicas complexas, como sangue e urina, ainda representa um obstáculo significativo para muitos biossensores. Da mesma forma, questões relacionadas à estabilidade dos dispositivos e à reproduzibilidade dos resultados aparecem como limitações frequentes. Estes aspectos apontam para a necessidade de mais pesquisas que abordem não apenas o desenvolvimento dos biossensores em si, mas também sua validação em condições clínicas reais, visando sua implementação no contexto da saúde pública.

O estudo de Zhang et al. (2020), serve como exemplo ilustrativo das potencialidades desta tecnologia. Ao desenvolver um biossensor amperométrico para detecção do gene PCA3 com sensibilidade de 0,1 nM, os autores demonstraram como a combinação de biomarcadores específicos com técnicas eletroquímicas avançadas pode resultar em dispositivos com excelente desempenho para diagnóstico precoce. Trabalhos como este ajudam a pavimentar o caminho para a introdução destas tecnologias na prática clínica rotineira.

Em síntese, os resultados apresentados neste estudo evidenciam o potencial transformador dos biossensores eletroquímicos para o diagnóstico e monitoramento do câncer

de próstata. Contudo, também destacam a necessidade de superar desafios técnicos e operacionais para que esta promessa se concretize plenamente. Futuras pesquisas deverão focar não apenas no refinamento das técnicas de detecção, mas também na validação clínica robusta dos dispositivos e no desenvolvimento de estratégias para sua produção em escala e implementação em diferentes contextos de saúde.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O câncer de próstata permanece um desafio significativo para a saúde pública global, especialmente devido às limitações dos métodos diagnósticos tradicionais, como o PSA e o toque retal, que, embora eficazes, são invasivos e associados a altas taxas de falsos positivos (INCA, 2023, SCHRODER et al., 2009). Este trabalho buscou realizar uma revisão bibliográfica sobre biossensores eletroquímicos aplicados à detecção de genes específicos associados à doença, objetivo que foi alcançado por meio da análise crítica de 19 estudos recentes (2010-2024), conforme sintetizado na Tabela 1.

Os resultados evidenciaram que biomarcadores genéticos, como PCA3, TMPRSS2-ERG e BRCA2, apresentam maior especificidade para o câncer de próstata em comparação ao PSA, reduzindo diagnósticos equivocados (SOKOLOFF et al., 2021, CARVALHO et al., 2021). Biossensores eletroquímicos demonstraram alta sensibilidade, com limites de detecção na faixa de picomolar (pM) para mutações no BRCA2 (SCHWEIZER et al., 2021) e nanomolar (nM) para o PCA3 (ZHANG et al., 2020). Técnicas como amperometria e voltametria cíclica destacaram-se pela eficiência, enquanto a integração de mediadores como nanopartículas de ouro (AuNPs) e nanotubos de carbono (CNTs), amplificou a resposta dos dispositivos (RIVERA et al., 2016, COSTA; SOUZA, 2020).

A portabilidade e o custo-benefício emergiram como vantagens críticas, especialmente em sistemas *lab-on-a-chip* e POC, que permitem diagnósticos rápidos em ambientes com recursos limitados (GUBALA et al., 2012, RONKAINEN et al., 2010). Essas características são particularmente relevantes para o contexto brasileiro, onde disparidades regionais no acesso à saúde persistem (INCA, 2023). Contudo, desafios como interferência de matrizes biológicas complexas (sangue, urina), instabilidade de sondas e necessidade de padronização foram frequentemente relatados em vários dos artigos lidos.

Esta revisão contribui para a consolidação do conhecimento sobre biossensores eletroquímicos aplicados ao diagnóstico do câncer de próstata, ao oferecer uma síntese comparativa das principais abordagens tecnológicas, biomarcadores-alvo e níveis de sensibilidade alcançados. A análise permitiu identificar a predominância de estudos

experimentais in vitro e a carência de validações clínicas mais amplas, especialmente em ambientes hospitalares ou no contexto da saúde pública. Tal constatação ressalta a necessidade de avançar da pesquisa laboratorial para etapas posteriores de validação e regulamentação. Além disso, a discussão crítica sobre as estratégias de imobilização — como o uso de hidrogéis, polímeros condutores e nanopartículas — fornece subsídios importantes para o aprimoramento da sensibilidade, estabilidade e reproduzibilidade dos dispositivos. Dessa forma, o trabalho não apenas sistematiza o estado da arte, mas também aponta caminhos concretos para o desenvolvimento de biossensores mais eficazes e clinicamente aplicáveis.

Entre as limitações desta revisão, ressalta-se o viés temporal decorrente da seleção de artigos publicados entre 2010 e 2024, critério que pode ter negligenciado contribuições pioneiras anteriores a essa janela cronológica, embora fundamentais para o desenvolvimento do campo. Ademais, o predomínio de estudos in vitro na literatura analisada, embora tenha sido válido para explorar mecanismos moleculares, compromete a aplicabilidade clínica imediata dos resultados, uma vez que condições *in vivo* envolvem variáveis biológicas e ambientais não replicadas em laboratório (RUSLING et al., 2010, MATEO et al., 2020).

Para avançar no campo, sugere-se o desenvolvimento de métodos de imobilização mais estáveis, como a funcionalização de eletrodos com aptâmeros (RONKAINEN et al., 2010), e a implementação de tecnologias que visem validar a reproduzibilidade dos dispositivos. Estudos que integrem inteligência artificial à análise de dados de biossensores também representam uma fronteira promissora (HAHN et al., 2019).

A implementação prática dessas tecnologias pode revolucionar o diagnóstico precoce, reduzindo a mortalidade e os custos associados a tratamentos tardios. Em regiões remotas, onde os pacientes enfrentam dificuldade para ter acesso à saúde pública, biossensores portáteis poderiam democratizar o acesso a exames precisos, alinhando-se aos objetivos da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015).

Em síntese, os biossensores eletroquímicos representam um paradigma emergente no diagnóstico oncológico, combinando precisão molecular e acessibilidade. Contudo, sua consolidação exigirá colaboração multidisciplinar entre físicos, biomédicos e profissionais da saúde, além de investimentos em pesquisa translacional. Como afirmam Rusling et al. (2010, p. 2499), “*a integração de nanotecnologia e biossensores é a chave para diagnósticos personalizados no século XXI*”.

Por fim, este trabalho reforça a importância de investir em inovações tecnológicas que transcendam as barreiras atuais, transformando a promessa científica em realidade clínica. O

câncer de próstata, como outras doenças complexas, exige abordagens inovadoras — e os biossensores eletroquímicos surgem como uma luz nesse horizonte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CATTO, J. W. F. et al. Prostate cancer: advances in diagnosis. *British Journal of Cancer*, v. 105, n. 1, p. 1-7, 2011.

INCA. Instituto Nacional do Câncer. Câncer de próstata. 2023. Disponível em: <https://www.inca.gov.br>. Acesso em: 10 out. 2023.

POHANKA, M. Overview of piezoelectric biosensors, immunosensors and DNA sensors and their applications. *Materials*, v. 11, n. 3, p. 448, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11030448>

RUSLING, J. F. et al. Measurement of biomarker proteins for point-of-care early detection and monitoring of cancer. *Analyst*, v. 135, n. 10, p. 2496-2511, 2010. <https://doi.org/10.1039/c0an00204f>

-SCHRODER, F. H. et al. Screening and prostate-cancer mortality in a randomized European study. *New England Journal of Medicine*, v. 360, n. 13, p. 1320-1328, 2009

ZHANG, X. et al. *Electrochemical biosensors for detection of prostate cancer biomarkers*. *Biosensors and Bioelectronics*, 2020.

RUSLING, J. F. et al. *Measurement of biomarker proteins for point-of-care early detection and monitoring of cancer*. *Analyst*, 2010. <https://doi.org/10.1039/c0an00204f>

AMIRZADEH, Z. et al. Electrochemical biosensors for prostate cancer detection: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 159, p. 112255, 2020. DOI: [10.1016/j.bios.2020.112255](https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112255). <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112255>

BARTOSÍK, M. et al. Electrochemical detection of DNA hybridization using enzyme-functionalized nanoparticles. *Analytical Chemistry*, v. 84, n. 21, p. 9172-9178, 2012. DOI: [10.1021/ac3018925](https://doi.org/10.1021/ac3018925).

CARVALHO, F. A. et al. Genetic biomarkers in prostate cancer: Current trends and clinical implications. *Urologic Oncology*, v. 39, n. 4, p. 237-245, 2021. DOI: [10.1016/j.urolonc.2020.10.016](https://doi.org/10.1016/j.urolonc.2020.10.016). <https://doi.org/10.1016/j.urolonc.2020.10.016>

CLARK, L. C.; LYONS, C. Electrode systems for continuous monitoring in cardiovascular surgery. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 102, n. 1, p. 29-45, 1962. DOI: [10.1111/j.1749-6632.1962.tb13623.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1962.tb13623.x). <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1962.tb13623.x>

FERREIRA, A. A. et al. Nanomateriais aplicados em biosensores eletroquímicos para diagnóstico médico. *Química Nova*, v. 43, n. 5, p. 612-623, 2020. DOI: [10.21577/0100-4042.20170517](https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170517). <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170517>

GUBALA, V. et al. Point-of-care diagnostics: Recent developments in a connected age. *Biotechnology Advances*, v. 35, n. 6, p. 934-950, 2017. DOI: [10.1016/j.biotechadv.2017.08.004](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.08.004). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.08.004>

HAHN, M. A. et al. Nanoparticle-based electrochemical detection of cancer biomarkers. *Small*, v. 15, n. 34, p. 1900576, 2019. DOI: [10.1002/smll.201900576](https://doi.org/10.1002/smll.201900576).

HASAN, A. et al. Lab-on-a-chip devices for cancer biomarker detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 255, p. 3313-3325, 2018. DOI: [10.1016/j.snb.2017.09.159](https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.159). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.09.159>

JUSTINO, C. I. L. et al. Advances in electrochemical biosensors for clinical analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 85, p. 36-50, 2016. DOI: [10.1016/j.trac.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.04.004). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.04.004>

KERMALI, E. et al. Role of PCA3 in prostate cancer diagnosis: A meta-analysis. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, v. 58, n. 7, p. 1061-1070, 2020. DOI: [10.1515/cclm-2019-1012](https://doi.org/10.1515/cclm-2019-1012).

LIU, G. et al. Electrochemical sensors for the detection of cancer biomarkers. *Electroanalysis*, v. 32, n. 5, p. 945-958, 2020. <https://doi.org/10.1002/elan.201900669>

MARTÍN-YERGA, D. et al. Electrochemical biosensors for DNA hybridization and detection. *Electrochimica Acta*, v. 328, p. 135085, 2019. DOI: [10.1016/j.electacta.2019.135085](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135085)

MATEO, J. et al. BRCA mutations in prostate cancer: From prognosis to therapeutic implications. *European Urology*, v. 77, n. 4, p. 403-414, 2020. DOI: [10.1016/j.eururo.2019.09.037](https://doi.org/10.1016/j.eururo.2019.09.037).

NCCN (NATIONAL COMPREHENSIVE CANCER NETWORK). Prostate Cancer Guidelines. Version 3.2023. Disponível em: <https://www.nccn.org>. Acesso em: 15 out. 2023.

PALEČEK, E. et al. Electrochemistry of nucleic acids and proteins: Towards electrochemical sensors for genomics and proteomics. *Comprehensive Analytical Chemistry*, v. 60, p. 1-50, 2013. DOI: [10.1016/B978-0-444-53625-3.00001-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53625-3.00001-6).

RONKAINEN, N. J. et al. Electrochemical biosensors for biomarker detection. *Biosensors*, v. 10, n. 9, p. 127, 2020. <https://doi.org/10.3390/bios10090127>

SOCIEDADE BRASILEIRA DE UROLOGIA (SBU). Diretrizes de Câncer de Próstata. 2022. Disponível em: <https://sbu-sp.org.br>. Acesso em: 12 out. 2023.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE UROLOGIA. Fatores de risco para o câncer de próstata: atualizações e recomendações. 2023.

AMERICAN CANCER SOCIETY. Fatores de risco para câncer de próstata: incidência por raça e etnia. 2023.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE UROLOGIA. Diretrizes para o rastreamento do câncer de próstata: exame de PSA e toque retal. 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER (INCA). Antígeno Prostático Específico (PSA): interpretação e aplicações clínicas. 2021.

ROBBINS, C. L.; COTRAN, R. S. Bases Patológicas das Doenças. 10. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2020. (Capítulo sobre fisiologia da próstata e biomarcadores).

NATIONAL COMPREHENSIVE CANCER NETWORK. *NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology: Prostate Cancer*. Version 4.2023. Plymouth Meeting, PA: NCCN, 2023. Disponível em: <https://www.nccn.org/guidelines/guidelines-detail?category=1&id=1459>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CASTRO, E. et al. *Characteristics of BRCA2 Mutated Prostate Cancer at Presentation*. International Journal of Molecular Sciences, v. 23, n. 21, p. 13426, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/23/21/13426>. Acesso em: 15 abr. 2025. <https://doi.org/10.3390/ijms232113426>

LI, Hongtao et al. Simultaneous noninvasive ultrasensitive detection of prostate specific antigen and lncRNA PCA3 using multiplexed dual optical microfibers with strong plasmonic nanointerfaces. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 264, p. 116672, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116672>. Acesso em: 15 abr. 2025. [Revistas ACS. https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116672](https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116672)

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry. *Glossary of terms used in analytical chemistry: definitions, symbols, and abbreviations (IUPAC Recommendations 2007)*. 1. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. p. 204-205.

SILVA, João Carlos da; PEREIRA, Maria Clara. *Biossensores de DNA: Princípios e Aplicações*. São Paulo: Editora Acadêmica, 2019. p. 45-47.

COSTA, Mariana Alves da; SOUZA, Felipe Henrique. *Nanopartículas de Ouro em Biossensores: Propriedades e Aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Científica, 2020. p. 123-130.

LÓPEZ, G. F.; SANZ, J. M.; GÓMEZ, L. M. *Mediadores em biosensores eletroquímicos: aplicações e perspectivas*. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 791, p. 127-133, 2017. DOI: 10.1016/j.jelechem.2017.02.014. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.02.014>

RIVERA, A.; MARTÍNEZ, G. R.; HERNÁNDEZ, J. M. *Aplicações de mediadores redox em biosensores para detecção de biomoléculas*. *Biosensors and Bioelectronics*, v. 80, p. 456-463, 2016. DOI: 10.1016/j.bios.2015.12.016. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.12.016>

SILVA, L. A.; PEREIRA, D. P. *Nanomateriais como mediadores em biosensores: uma revisão*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 260, p. 338-345, 2018. DOI: 10.1016/j.snb.2017.12.048. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.12.048>

MURRAY, R. W. *Electrochemical methods in biosensors*. *Electroanalysis*, v. 17, n. 11-12, p. 1161-1176, 2005. DOI: 10.1002/elan.200503543.

LEBLANC, J. D.; SHU, M.; DUMITRU, D. M. *Impedância eletroquímica (EIS) em sensores químicos e biosensores: Princípios e aplicações*. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 574, p. 191-200, 2005. DOI: 10.1016/j.jelechem.2004.11.007. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2004.11.007>

PRITCHARD, C. C. et al. *Inherited DNA-Repair Gene Mutations in Men with Metastatic Prostate Cancer*. *New England Journal of Medicine*, v. 375, n. 5, p. 443-453, 2016. DOI: [10.1056/NEJMoa1603144](https://doi.org/10.1056/NEJMoa1603144).

WANG, J. *Nanomaterial-based electrochemical biosensors*. *Analyst*, v. 130, n. 4, p. 421-426, 2005. DOI: [10.1039/B414248A](https://doi.org/10.1039/B414248A). <https://doi.org/10.1039/b414248a>

WHITESIDES, G. M. *The origins and the future of microfluidics*. *Nature*, v. 442, n. 7101, p. 368-373, 2006. DOI: [10.1038/nature05058](https://doi.org/10.1038/nature05058). <https://doi.org/10.1038/nature05058>

MANZ, A. et al. *Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing*. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 1, n. 1-6, p. 244-248, 1990. DOI: [10.1016/0925-4005\(90\)80209-I](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)80209-I). [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(90\)80209-I](https://doi.org/10.1016/0925-4005(90)80209-I)