

MONITORIZAÇÃO DA GLICEMIA POR DISPOSITIVOS VESTÍVEIS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

GLUCOSE MONITORING THROUGH WEARABLE DEVICES: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Dannyell Manoel Jacintho Junior¹; Micael Pereira Malaquias¹; Annansa Louise Muniz Silva Lins¹; Isabelle Cristina de Oliveira Vieira²

¹Acadêmico(a) do Curso de Medicina do Centro Universitário de Maceió (UNIMA/Afya), Maceió, AL, Brasil;

²Docente e Orientador do Curso de Medicina do Centro Universitário de Maceió (UNIMA/Afya), Maceió, AL, Brasil.

E-mail: dannyell.junior@alunos.afya.com.br

Eixo temático: Eixo 01 - Saúde

RESUMO: A monitorização contínua e não invasiva da glicemia por meio de dispositivos vestíveis (wearables) representa um avanço significativo no manejo do Diabetes Mellitus e na avaliação da saúde metabólica. Este trabalho analisa o panorama atual das tecnologias de sensoriamento glicêmico, divididas em métodos minimamente invasivos (baseados em fluido intersticial) e totalmente não invasivos (ópticos como NIR e Raman, eletroquímicos transdérmicos e de radiofrequência). Foram avaliados aspectos de precisão clínica fundamentados na métrica MARD (Mean Absolute Relative Difference), a integração com algoritmos de Inteligência Artificial para predição de eventos glicêmicos e o impacto econômico comparativo entre as abordagens. A metodologia seguiu as diretrizes PRISMA, resultando na seleção e análise detalhada de 5 artigos científicos de Acesso Aberto extraídos das bases PubMed/PMC e MDPI. Os resultados indicam que, enquanto os dispositivos minimamente invasivos possuem acurácia consolidada (MARD entre 7,9% e 9,2%), permitindo decisões terapêuticas diretas, as tecnologias totalmente não invasivas vêm progredindo (MARDs entre 11,5% e 14,2% em condições controladas), mas ainda enfrentam desafios fisiológicos relativos ao lag time e a ruídos de fundo ambientais. Conclui-se que a convergência entre novos materiais de sensoriamento e redes neurais avançadas é o caminho promissor para viabilizar a monitorização não invasiva em larga escala na prática clínica.

PALAVRAS-CHAVE: Monitorização Contínua de Glicose; Dispositivos Vestíveis; Monitorização Não Invasiva; MARD; Diabetes Mellitus; Inteligência Artificial.

Abstract

Continuous and non-invasive blood glucose monitoring through wearable devices represents a significant advancement in the management of Diabetes Mellitus and metabolic health assessment. This study analyzes the current landscape of glucose sensing technologies, categorized into minimally invasive methods (interstitial fluid-based) and fully non-invasive approaches (optical methods such as NIR and Raman spectroscopy, transdermal electrochemical sensors, and radiofrequency/microwave sensors). Clinical accuracy was evaluated based on the MARD (Mean Absolute Relative Difference) metric, alongside the integration of Artificial Intelligence algorithms for glycemic event prediction and the comparative economic impact across different modalities. Following PRISMA guidelines, a systematic screening methodology was applied. Results demonstrate that while minimally invasive devices maintain established clinical accuracy (MARD between 7.9% and 9.2%), allowing direct therapeutic decision-making, fully non-invasive technologies show promising progress (MARDs between 11.5% and 14.2% under controlled conditions). However, non-invasive sensors still face physiological challenges related to physiological lag time and environmental background noise. In conclusion, the convergence of novel sensing materials and advanced neural networks represents the most viable path toward enabling large-scale non-invasive glucose monitoring in clinical practice.

Keywords: Continuous Glucose Monitoring; Wearable Devices; Non-Invasive Monitoring; MARD; Diabetes Mellitus; Artificial Intelligence.

1. INTRODUÇÃO

A monitorização da glicemia é o pilar fundamental para o controle do Diabetes Mellitus (DM) e o acompanhamento metabólico global. Historicamente, o manejo baseou-se na automonitorização da glicemia capilar (AMGC), que exige perfurações cutâneas repetidas. Embora a AMGC tenha revolucionado o cuidado contínuo, apresenta limitações severas: fornece retratos estáticos de um processo dinâmico, não identifica hipoglicemias assintomáticas/noturnas e causa dor e desconforto, reduzindo drasticamente a adesão ao tratamento.

Nas últimas duas décadas, surgiram os Monitores Contínuos de Glicose (CGM) minimamente invasivos subcutâneos e, subsequentemente, dispositivos vestíveis (*wearables*) totalmente não invasivos baseados em bioengenharia e sensoriamento de superfície. A integração desses sensores a algoritmos de Inteligência Artificial (IA) e *Deep Learning* transformou os *wearables* em sistemas preditivos capazes de antecipar eventos de hipo ou hiperglicemia a partir de séries temporais e variáveis contextuais.

A condução deste estudo justifica-se sob quatro perspectivas complementares:

Epidemiológica e de Saúde Pública: O avanço pandêmico do DM sobrecarrega os sistemas de saúde com complicações crônicas severas, tornando urgente a investigação de tecnologias contínuas de rastreamento para conter a variabilidade glicêmica.

Clínica e Humanística: A eliminação das picadas diárias de dedo remove o desconforto e o estigma, o que eleva substancialmente a adesão terapêutica, o autocuidado e a qualidade de vida do paciente.

Científica e Tecnológica: As abordagens não invasivas (ópticas, eletroquímicas e por radiofrequência) ainda enfrentam limitações técnicas como ruídos ambientais, interferências teciduais e *lag time* biológico, tornando indispensável sintetizar como a IA tem superado esses gargalos.

Socioeconômica: A substituição de insumos descartáveis recorrentes (tiras, lancetas e sensores subcutâneos) por hardwares duráveis não invasivos representa uma alternativa potencialmente mais sustentável para os usuários e para a gestão pública da saúde.

2. METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão conduzida segundo o protocolo PRISMA, com busca bibliográfica realizada entre janeiro e fevereiro de 2026 nas bases PubMed/PMC e nos periódicos MDPI (*Sensors* e *Bioengineering*). Para delimitar o escopo, definiu-se a janela de 2013 a 2025 para os artigos do tema principal (sensoriamento não invasivo/minimamente invasivo, MARD e IA) e de 2000 a 2025 para a fundamentação teórica e histórica.

A estratégia de busca utilizou a combinação dos descritores: ("non-invasive glucose monitoring" OR "wearable glucose sensor" OR "continuous glucose monitoring") AND ("wearable technology" OR "smartwatch" OR "near-infrared spectroscopy" OR "artificial intelligence") AND ("open access")

Crerios e Triagem:

Inclusão: Artigos originais e revisões por pares em Acesso Aberto focados em *wearables* de monitorização glicêmica contínua em humanos com validação de acurácia clínica (MARD).

Exclusão: Estudos pré-clínicos/sem aplicação humana, resumos, editoriais e artigos sem dados claros de acurácia ou mecanismo do sensor.

Fluxo de Seleção: Das 42 publicações identificadas (28 PubMed/PMC e 14 MDPI), 4 duplicatas foram removidas. Após a triagem por títulos ($n=38$, 20 excluídos), leitura de resumos ($n=18$, 10 excluídos) e análise dos textos integrais ($n=8$, 3 excluídos por falta de métricas de MARD), 5 artigos originais foram selecionados para a síntese do tema principal, somados a 9 referências de suporte teórico e diretrizes.

4. RESULTADOS

A análise dos estudos selecionados revela um panorama de transição acelerada na monitorização glicêmica, marcada pela consolidação dos monitores contínuos de glicose (CGM) minimamente invasivos e pelo avanço promissor, porém ainda desafiador, dos dispositivos vestíveis totalmente não invasivos.

4.1. Desempenho Clínico e Precisão (MARD)

A validação clínica da acurácia de qualquer dispositivo de monitorização glicêmica é regida internacionalmente pela métrica MARD (Mean Absolute Relative Difference, ou Diferença Relativa Absoluta Média). Exigida por órgãos regulatórios como a FDA norte-americana e a ANVISA, a MARD representa o percentual médio de desvio entre as leituras fornecidas pelo sensor e os valores reais obtidos por um método de referência laboratorial de alta precisão, como o analisador por hexoquinase YSI 2300.^{2, 14}

Matematicamente, a diferença relativa absoluta para uma medição individual i , é obtida pela fórmula:

$$ARD_i = \left| \frac{G_{\text{sensor},i} - G_{\text{ref},i}}{G_{\text{ref},i}} \right| \times 100$$

Sendo o MARD a média aritmética simples de N amostras analisadas durante os ensaios clínicos:

$$\text{MARD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{G_{\text{sensor},i} - G_{\text{ref},i}}{G_{\text{ref},i}} \right| \times 100$$

Onde G_{sensor} representa o valor aferido pelo dispositivo vestível e G_{ref} é a glicemia medida no padrão laboratorial. Quanto menor o valor percentual do MARD, maior a precisão do equipamento.

Dispositivos que apresentam MARD abaixo de 10% são classificados como de excelente acurácia, atingindo o padrão de segurança necessário para que o paciente tome decisões terapêuticas críticas, como a aplicação direta de doses de insulina, sem necessidade de confirmação por picada no dedo, patamar alcançado por sensores comerciais modernos como o Dexcom G7 (~8,2%) e o FreeStyle Libre 3 (~7,9%).

4.2. Integração com Inteligência Artificial e Predição

A revisão sistemática conduzida por Mian et al. (2025) demonstrou que a incorporação de algoritmos de aprendizado profundo (Deep Learning) a dados coletados por wearables reduziu o tempo de atraso fisiológico (lag time) percebido pelo usuário. Modelos preditivos de séries temporais foram capazes de antecipar episódios de hipoglicemia com 15 a 30 minutos de antecedência, apresentando uma sensibilidade média de 88,4% e especificidade de 91,2%.⁵

4.3. Aspectos Econômicos e Análise de Custos ao Usuário

A análise econômica do impacto desses dispositivos para os usuários revela diferenças marcantes entre o investimento inicial e os custos de manutenção contínua. Enquanto a glicemia capilar exige baixo investimento inicial, mas alto custo recorrente em tiras, os wearables não invasivos propõem um modelo de alto investimento em hardware com custo operacional residual.

Método de Aferição	Invasividade	Custo Inicial (Aparelho/Leitor)	Custo Recorrente (Manutenção/Insumos)	Custo Médio Mensal no Brasil
Glicemia Capilar Tradicional (Tiras)	Invasivo	R\$ 50 – R\$ 120 (Glicosímetro)	R\$ 1,50 a R\$ 3,00 por tira (4 a 6 testes/dia)	R\$ 200 – R\$ 500 / mês
CGM Subcutâneo Minimamente Invasivo	Minimamente Invasivo	R\$ 0 (com aplicativo) / R\$ 300 (Leitor)	R\$ 290 – R\$ 330 por sensor (duração de 14 dias)	R\$ 600 – R\$ 660 / mês
Wearables Não Invasivos Ópticos/RF	Totalmente Não Invasivo	R\$ 1.500 – R\$ 4.000+ (Aquisição do hardware)	Baixo / residual (apenas substituição de adesivos)	Custo amortizado ao longo do tempo

Tabela 1. Métricas de Custo e Viabilidade Financeira.

5. DISCUSSÃO

Os achados desta revisão sublinham que a evolução dos sensores vestíveis de glicose transcende a mera inovação de hardware, representando uma mudança paradigmática na abordagem do diabetes e da saúde metabólica.

5.1. O Gargalo Fisiológico e o Impacto do Lag Time: Um dos principais pontos de discussão emergentes dos resultados é a disparidade biológica entre a glicemia plasmática (arterial/capilar) e a glicose tecidual periférica. Conforme discutido por Rebrin & Steil (2000) e reforçado por Kovatchev et al. (2015), o atraso de 5 a 15 minutos na difusão da glicose do vaso sanguíneo para o fluido intersticial ou suor impõe um limite físico à precisão instantânea. Durante períodos de rápida alteração glicêmica, como no pós-prandial imediato ou durante o exercício físico, a MARD do sensor sofre uma elevação artificial. A integração de modelos algoritmos baseados em IA surge como a principal ferramenta para mitigar esse fenômeno, atuando na "previsão estatística" do valor sanguíneo a partir da taxa de variação tecidual.^{15, 14, 5}

5.2. Desafios da Monitorização Não Invasiva: Interferentes e Calibração: Embora os métodos ópticos (NIR e Raman) e de Radiofrequência apresentem a vantagem crucial da não invasividade total, sua translação clínica esbarra no alto ruído de fundo. Variações na espessura do tecido adiposo, pigmentação da pele (melanina), hidratação, fluxo sanguíneo cutâneo e até mesmo a pressão exercida pelo dispositivo contra a pele afetam drasticamente a permissividade dielétrica e o espectro de absorção da luz.^{7, 4} isso explica por que, a despeito do avanço tecnológico, nenhuma solução 100% não invasiva obteve até o momento autorização regulatória irrestrita (como FDA ou ANVISA) para substituição completa da dosagem de insulina sem confirmação prévia.

5.3. Mudança de Paradigma: Da Abordagem Reativa ao Acompanhamento Preventivo: Outro aspecto relevante identificado por estudos recentes é a expansão do uso dessas tecnologias para populações sem diagnóstico de diabetes mellitus. A monitorização contínua em indivíduos hígidos ou pré-diabéticos têm revelado padrões de variabilidade glicêmica e picos pós-prandiais subclínicos até então indetectáveis pela hemoglobina glicada (HbA1c) ou glicemia de jejum isoladas. Essa aplicação abre caminho para intervenções nutrológicas e de estilo de vida altamente personalizadas, atuando diretamente na prevenção primária de doenças cardiovasculares e da síndrome metabólica.¹⁶

5.4. Limitações do Estudo: Este estudo apresenta limitações inerentes à heterogeneidade dos trabalhos analisados. A variação nas metodologias de teste dos protótipos não invasivos

(diferentes tamanhos de amostra, durações de ensaio e populações) dificulta a realização de uma metanálise direta sobre a MARD global das tecnologias emergentes.

6. CONCLUSÃO

A monitorização da glicemia por dispositivos vestíveis consolidou-se como uma ferramenta indispensável na medicina moderna, permitindo uma transição da análise pontual para a compreensão dinâmica do metabolismo. Enquanto os sistemas minimamente invasivos (CGM) oferecem hoje a precisão necessária para o manejo clínico seguro, as tecnologias totalmente não invasivas representam o horizonte da adesão terapêutica plena. A superação dos desafios técnicos de ruído e lag time através da Inteligência Artificial é o fator determinante para a democratização dessas tecnologias. Conclui-se que a integração de sensores multimodais e algoritmos preditivos permitirá, em curto prazo, um controle glicêmico mais humano, indolor e preventivo. E com o avançar dos anos, essas tecnologias devem se mostrar cada vez mais confiáveis e apresentar custos mais acessíveis que permitam a sua popularização.

REFERÊNCIAS

1. ElSayed NA, et al. 7. Diabetes Technology: Standards of Care in Diabetes—2024. *Diabetes Care* [Internet]. 2023 Dec 11 [cited 2026 Aug 10];47(Suppl 1):S126–S144. Available from: <https://doi.org/10.2337/dc24-s007>_Accessed 2026 Aug 10.
2. Heinemann L, et al. Continuous Glucose Monitoring or Blood Glucose Monitoring for People With Type 1 Diabetes. *J Diabetes Sci Technol* [Internet]. 2020 [cited 2026 Aug 10];14(2):200–211. Available from: <https://doi.org/10.1177/1932296819875185>. Accessed 2026 Aug 10.
3. Kudva YC, et al. Noninvasive Continuous Glucose Monitoring Using Multimodal Near-Infrared Spectroscopy. *PubMed Central* [Internet]. 2025 [cited 2026 Aug 10];PMC12292979. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12292979/>. Accessed 2026 Aug 10.
4. Tura A, et al. Non-Invasive Blood Glucose Monitoring Technology: A Review. *Sensors* [Internet]. 2020 [cited 2026 Aug 10];20(23):6982. Available from: <https://doi.org/10.3390/s20236982>
5. Mian Z, et al. Integration of artificial intelligence and wearable technology in the management of type 2 diabetes. *PubMed Central* [Internet]. 2025 [cited 2026 Aug 10];PMC12627454. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12627454/>_Accessed 2026 Aug 10.
6. Page MJ, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* [Internet]. 2021 [cited 2026 Aug 10];372:n71. Available from: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>_Accessed 2026 Aug 10.
7. Kang JW, et al. Direct observation of glucose fingerprint using in vivo Raman

- spectroscopy. *Sci Adv* [Internet]. 2020 [cited 2026 Aug 10];6(4):eaay5206. Available from: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay5206>_Accessed 2026 Aug 10.
8. Vashist SK. Non-invasive glucose monitoring technology in diabetes management: A review. *Anal Chim Acta* [Internet]. 2013 [cited 2026 Aug 10];779:1–15. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2013.03.008>_Accessed 2026 Aug 10.
 9. Bandodkar AJ, et al. Battery-free, skin-interfaced microfluidic/immunosensing systems. *Nat Biomed Eng* [Internet]. 2019 [cited 2026 Aug 10];3(4):273–285. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41551-019-0348-0>_Accessed 2026 Aug 10.
 10. Lee H, et al. A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive microwires. *Nat Nanotechnol* [Internet]. 2016 [cited 2026 Aug 10];11(6):566–572. Available from: <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.38>_Accessed 2026 Aug 10.
 11. Hanna J, et al. Noninvasive Real-Time Blood Glucose Monitoring System Using Microwave Sensors. *IEEE Trans Microwave Theory Tech* [Internet]. 2020 [cited 2026 Aug 10];68(1):343–355. Available from: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2936390>_Accessed 2026 Aug 10.
 12. Saha S, et al. A review on non-invasive blood glucose monitoring using microwave and RF technologies. *Sensors* [Internet]. 2017 [cited 2026 Aug 10];17(10):2252. Available from: <https://doi.org/10.3390/s17102252>_Accessed 2026 Aug 10.
 13. Kovatchev B, et al. Assessment of the Accuracy of Continuous Glucose Monitors: Sampling Frequency and Lag Time. *J Diabetes Sci Technol* [Internet]. 2009 [cited 2026 Aug 10];3(5):1010–1018. Available from: <https://doi.org/10.1177/193229680900300505>_Accessed 2026 Aug 10.
 14. Rebrin N, Steil GM. Can interstitial glucose assessment replace blood glucose measurements? *Diabetes Technol Ther* [Internet]. 2000 [cited 2026 Aug 10];2(3):461–472. Available from: <https://doi.org/10.1089/15209150050194332>_Accessed 2026 Aug 10.
 15. Non-Invasive Continuous Glucose Monitoring in Patients Without Diabetes: Use in Cardiovascular Prevention—A Systematic Review. *Sensors* [Internet]. 2025 [cited 2026 Aug 10];25(1):187. Available from: <https://doi.org/10.3390/s25010187>_Accessed 2026 Aug 10.