

SENSORES ENZIMÁTICOS NO MONITORAMENTO GLICÊMICO EM DIABETES MELLITUS: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

ENZYMATIC SENSORS IN GLYCEMIC MONITORING FOR DIABETES MELLITUS: AN INTEGRATIVE REVIEW

Thaís Zahlouth Serique Gato¹, Victória Ferraz Carvalho¹, Ana Lídia Corrêa da Silva Moreira².

1. Acadêmicas do curso de Medicina da Faculdade de Medicina de Itajubá;

2. Professora do curso de Medicina da Faculdade de Medicina de Itajubá. E-mail da autora correspondente:

lidialenzi@alumni.usp.br

Eixo Temático: Eixo 03 - Tecnologia e Inovação

RESUMO

O Diabetes Mellitus demanda controle glicêmico contínuo para prevenção de complicações, e os sensores enzimáticos constituem tecnologia promissora para esse acompanhamento. Objetivou-se analisar evidências recentes sobre sensores enzimáticos no monitoramento glicêmico de pacientes com Diabetes Mellitus. Realizou-se revisão integrativa na PubMed, entre 2020 e 2026, com termos de busca em inglês combinados por operadores booleanos e estrutura PCC, considerando pacientes com Diabetes Mellitus, tecnologias de sensores de glicose e monitoramento glicêmico e suas aplicações complementares. Foram incluídos 11 estudos sobre monitoramento contínuo, intermitente e integrado a sistemas híbridos de infusão de insulina, predominantemente em pessoas com diabetes tipo 1, além de gestantes com diabetes pré-gestacional e aplicações complementares. Os resultados indicaram aumento do tempo na faixa-alvo e redução da hipoglicemia com sistemas híbridos e alarmes preditivos, além de acurácia satisfatória, embora variável conforme a faixa glicêmica e a velocidade de mudança da glicose. Conclui-se que essas tecnologias podem contribuir para o controle glicêmico e a segurança, sendo necessários estudos maiores e com acompanhamento prolongado.

Palavras-chave: Diabetes Mellitus. Técnicas Biossensoriais. Monitoramento Contínuo da Glicose.

ABSTRACT

Diabetes Mellitus requires continuous glycemic control to prevent complications, and enzymatic sensors are a promising technology for this monitoring. This study aimed to analyze recent evidence on enzymatic sensors for glycemic monitoring in patients with Diabetes Mellitus. An integrative review was conducted in PubMed from 2020 to 2026 using English search terms combined with Boolean operators and the PCC framework, considering patients with Diabetes Mellitus, glucose sensor technologies, and glycemic monitoring and its complementary applications. Eleven studies on continuous, intermittent, and hybrid insulin delivery system-integrated monitoring were included, predominantly involving people with type 1 diabetes, as well as women with pregestational diabetes and complementary applications. Results indicated increased time in range and reduced hypoglycemia with hybrid systems and predictive alerts, along with satisfactory accuracy that varied according to glycemic range and rate of glucose change. These technologies may contribute to glycemic control and safety, while larger studies with longer follow-up are needed.

Keywords: Diabetes Mellitus. Biosensing Techniques. Continuous Glucose Monitoring.

INTRODUÇÃO

As doenças crônicas não transmissíveis representam importante causa de morbimortalidade e impacto para os sistemas de saúde¹. O Diabetes Mellitus destaca-se pela elevada prevalência e pelo risco de complicações cardiovasculares, renais, neurológicas e oftalmológicas^{2,3}. Em 2021, aproximadamente 529 milhões de pessoas viviam com diabetes, com projeção superior a 1,31 bilhão em 2050^{3,4}, o que reforça a importância do controle glicêmico para prevenir complicações⁵. O monitoramento inclui aferições capilares, exames

laboratoriais e sistemas de monitoramento contínuo de glicose, ainda sujeitos a limitações de invasividade, calibração, custo e adesão^{6,7}.

Os sensores enzimáticos utilizam reações entre enzima e substrato para gerar sinal proporcional à concentração de glicose^{8,9}. As abordagens eletroquímicas, ópticas e microfluídicas incluem dispositivos vestíveis, métodos não invasivos baseados em propriedades espectrais e plataformas de pequeno volume e fabricação de baixo custo¹⁰⁻¹³. A diversidade de mecanismos, aplicações e desafios de acurácia, estabilidade, interferências e integração torna relevante reunir criticamente as evidências disponíveis¹⁴. Assim, objetivou-se analisar evidências recentes sobre sensores enzimáticos no monitoramento glicêmico de pacientes com Diabetes Mellitus, considerando tecnologias empregadas, benefícios e limitações.

MÉTODO

Realizou-se revisão integrativa na PubMed, no período de 2020 a 2026, com a estratégia: ("Diabetes Mellitus" OR "Diabetes" OR "DM") AND ("Enzymatic Sensor*" OR "Biosensor*" OR "Glucose Sensor*") AND ("Glycemic Monitoring" OR "Glucose Monitoring"). Adotou-se a estrutura PCC: população prioritária, pacientes com Diabetes Mellitus; conceito, tecnologias de sensores de glicose; contexto, monitoramento glicêmico e aplicações complementares. A questão norteadora investigou o panorama, os benefícios e as limitações dessas tecnologias. Incluíram-se artigos completos em português, inglês ou espanhol sobre sensores de glicose em monitoramento contínuo, intermitente ou integrado a sistemas automatizados, com o Diabetes Mellitus como núcleo. Excluíram-se revisões, duplicatas, estudos *in vitro* ou em animais e publicações sem relação com sensores ou suas aplicações no monitoramento glicêmico. Onze estudos compuseram a seleção final e foram analisados quanto à tecnologia, acurácia, desempenho glicêmico, segurança e benefícios clínicos.

RESULTADOS

A seleção final compreendeu 11 estudos, predominantemente sobre monitoramento contínuo ou intermitente em pessoas com diabetes tipo 1. O Quadro 1 apresenta suas características e os principais resultados quantitativos.

Quadro 1. Caracterização dos estudos selecionados e principais resultados

Autor	Título	Ano	Tecnologia	Sensor ou aplicação	Principais resultados
-------	--------	-----	------------	---------------------	-----------------------

Boscari et al. ¹⁵	Comparing the accuracy of transcutaneous sensor and 90-day implantable glucose sensor	2021	Transcutâneo e implantável	Dexcom G5 e Eversense	11 adultos com DM1. Em casa: 11,64% versus 10,75%, p=0,58. No centro: 7,91% versus 11,4%, p<0,001; Dexcom G5 melhor nas quedas rápidas.
Mariglia no et al. ¹⁶	Glucose sensor with predictive alarm for hypoglycaemia	2024	RT-CGM com alarme	Sensor com previsão de hipoglicemia	20 adolescentes. Tempo <54 mg/dL: 0,91% para 0,32%; <70 mg/dL: 2,90% para 1,68%, p<0,02. Índice de risco: 61,5 para 51,3, p<0,01.
Liao et al. ¹⁷	Using continuous glucose monitoring as biological feedback	2025	CGM atividade	Libre 14 Day e Fitbit Inspire	12 sobreviventes de câncer, quatro semanas. CGM ativo em 84%; aceitabilidade 4,36±0,28. Preparação diminuiu; ação e manutenção aumentaram.
Tummini a et al. ¹⁸	Efficacy of flash glucose monitoring in pregnancy	2021	Flash monitoring	FGM versus glicemia capilar	40 gestantes. HbA1c semelhante. Tempo abaixo da faixa: 12,1±2,0% versus 19,6±3,9%, p=0,04; MODD: 59,1±5,4 versus 77,7±4,6, p=0,02.
Martín-San Agustín et al. ¹⁹	Interval versus continuous exercise and glycemic control	2025	CGM exercício	no Dexcom G6	39 homens com DM1. Tempo na faixa em 24 h: 66,5% após exercício intervalado versus 59,3% após contínuo; maior queda com exercício contínuo.
Pei et al. ²⁰	Hybrid closed-loop system in Chinese users with DM1	2023	Circuito fechado híbrido	MiniMed 770G e Guardian 3	62 participantes. Tempo na faixa: 75,3% para 80,9%; tempo <70 mg/dL: 4,7% para 2,2%, p<0,001. Metas combinadas: 24,2% para 77,4%. Sem hipoglicemia grave ou cetoacidose.
Moser et al. ²¹	Performance of isCGM during oral glucose challenge	2021	isCGM	FreeStyle Libre 1	19 adultos com DM1. MARD global 8,3% e 18,8% na hipoglicemia; variação com a taxa de mudança, p<0,0001; 88% na zona A de Clarke.
Cordero et al. ²²	Early use of MiniMed 780G with Guardian 4	2023	Circuito fechado avançado	MiniMed 780G e Guardian 4	109 jovens e 67 adultos por três meses, sem evento adverso grave, cetoacidose ou hipoglicemia grave. Uso real: 36.303 usuários, com baixa exposição <54 mg/dL.
Styles et al. ²³	Multicomponent intervention to increase time in range	2025	CGM intervenção	CGM e componentes comportamentais	21 participantes. Efeito do CGM no tempo na faixa: 3,3 pontos percentuais, IC95% -8,8 a 15,4. Autogestão guiada por valores: 6,1, IC95% -7,5 a 19,7.
El Fathi et al. ²⁴	Automatic insulin dose adjustments in adolescents	2020	CGM algoritmo	Libre algoritmo externo	21 jovens; 293 recomendações, 92% aceitas. Tempo na faixa: 39,5% versus 38,4%, p=0,89; hipoglicemias/dia: 0,3 versus 0,2, p=0,42.
Al Gamode et al. ²⁵	Sugary drink exposure and interstitial glucose	2026	Monitoramento intersticial	Sensor no braço	47 adultos saudáveis. Área incremental: 38,56 no enxágue versus 28,98 mmol×tempo na ingestão, p=0,025; possível maior consumo posterior de carboidratos.

Fonte: elaboração das autoras com base nos estudos selecionados.

A partir das informações reunidas no Quadro 1, os sensores de glicose apresentaram resultados relacionados à acurácia, ao controle glicêmico, à segurança e ao apoio terapêutico. O Dexcom G5 demonstrou melhor desempenho que o Eversense no centro de pesquisa, especialmente durante quedas rápidas da glicose¹⁵, enquanto o alarme preditivo reduziu o tempo em hipoglicemia e melhorou o índice de risco glicêmico em adolescentes com DM1¹⁶.

O monitoramento contínuo também apresentou boa aceitação em intervenções comportamentais¹⁷ e, entre gestantes com diabetes prévio à gestação, o monitoramento flash reduziu o tempo abaixo da faixa e a variabilidade glicêmica¹⁸. No exercício físico, o tempo na faixa alvo foi maior após a modalidade intervalada do que após o exercício contínuo¹⁹. Com o MiniMed 770G, esse indicador aumentou de 75,3% para 80,9%, enquanto o tempo abaixo de 70 mg/dL diminuiu de 4,7% para 2,2%, sem hipoglicemia grave ou cetoacidose²⁰.

A acurácia variou conforme a faixa glicêmica e a velocidade de mudança da glicose, com erro relativo absoluto mediano de 8,3% no FreeStyle Libre 1 e de 18,8% durante a hipoglicemia²¹. O MiniMed 780G com Guardian 4 apresentou baixa exposição à glicose abaixo de 54 mg/dL e ausência de eventos adversos graves nas coortes avaliadas²². Em intervenções multicomponentes, o efeito do monitoramento contínuo sobre o tempo na faixa foi de 3,3 pontos percentuais, com intervalo de confiança amplo²³. No ajuste automatizado da insulinoterapia, 92% das recomendações foram aceitas pelos médicos, com resultados semelhantes aos do ajuste médico para tempo na faixa e hipoglicemia²⁴.

O monitoramento intersticial também foi aplicado à avaliação de respostas a estímulos alimentares em adultos saudáveis²⁵. Em conjunto, os estudos demonstraram benefícios relacionados ao aumento do tempo na faixa alvo, à redução da hipoglicemia e ao suporte às decisões terapêuticas, embora a acurácia e os resultados tenham variado conforme a tecnologia, a população e a finalidade de uso.

CONCLUSÃO

Os estudos analisados indicam que as tecnologias de sensores de glicose podem contribuir para o controle glicêmico, especialmente pelo aumento do tempo na faixa alvo, redução da hipoglicemia e apoio aos ajustes terapêuticos. Entretanto, a acurácia e os benefícios variam conforme a tecnologia, a população e a finalidade de uso. A heterogeneidade dos estudos limita comparações diretas, reforçando a necessidade de pesquisas com amostras maiores, acompanhamento prolongado e critérios padronizados para melhor definição da segurança e aplicabilidade clínica dessas tecnologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hacker K. The burden of chronic disease. *Mayo Clin Proc Innov Qual Outcomes*. 2024;8(1):112-119. doi:10.1016/j.mayocpiqo.2023.08.005.
2. Azevedo MS. Complicações crônicas da diabetes. II parte. *Acta Med Port*. 1986;7(3):177-182.

3. Sun H, Saeedi P, Karuranga S, Pinkepank M, Ogurtsova K, Duncan BB, et al. IDF Diabetes Atlas: global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045. *Diabetes Res Clin Pract.* 2022;183:109119. doi:10.1016/j.diabres.2021.109119.
4. GBD 2021 Diabetes Collaborators. Global, regional, and national burden of diabetes from 1990 to 2021, with projections of prevalence to 2050: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *Lancet.* 2023;402(10397):203-234. doi:10.1016/S0140-6736(23)01301-6.
5. American Diabetes Association Professional Practice Committee. 6. Glycemic goals and hypoglycemia: Standards of Care in Diabetes-2024. *Diabetes Care.* 2024;47(Suppl 1):S111-S125. doi:10.2337/dc24-S006.
6. Lee JE, Sridharan B, Kim D, Sung Y, Park JH, Lim HG. Continuous glucose monitoring: minimally and non-invasive technologies. *Clin Chim Acta.* 2025;575:120358. doi:10.1016/j.cca.2025.120358.
7. Wu X, Zhao X, Chen W, Chen Q, Kong L, Li P. A systematic review of continuous glucose monitoring sensors: principles, core technologies and performance evaluation. *Sens Actuators Rep.* 2025;10:100361. doi:10.1016/j.snr.2025.100361.
8. Sonowal K, Borthakur PP, Pathak K. Advances in enzyme-based biosensors: emerging trends and applications. *Eng Proc.* 2025;106(1):5. doi:10.3390/engproc2025106005.
9. Ghosh M, Bora VR. Evolution in blood glucose monitoring: a comprehensive review of invasive to non-invasive devices and sensors. *Discov Med.* 2025;2:74. doi:10.1007/s44337-025-00273-1.
10. Wang M, Zheng J, Zhang G, Lu S, Zhou J. Wearable electrochemical glucose sensors for fluid monitoring: advances and challenges in non-invasive and minimally invasive technologies. *Biosensors (Basel).* 2025;15(5):309. doi:10.3390/bios15050309.
11. Le PG, Cho S. Microfluidic paper-based sensors and their applications for glucose sensing. *Chemosensors.* 2025;13(8):293. doi:10.3390/chemosensors13080293.
12. Martins AJL, Velásquez RJ, Gaillac DB, Santos VN, Tami DC, Souza RNP, et al. A comprehensive review of non-invasive optical and microwave biosensors for glucose monitoring. *Biosens Bioelectron.* 2025;271:117081. doi:10.1016/j.bios.2024.117081.
13. Wang Z, Zhang Z, Xu C. All-printed microfluidic-electrochemical devices for glucose detection. *Biosensors (Basel).* 2024;14(12):569. doi:10.3390/bios14120569.
14. Khumngern S, Jeerapan I. Synergistic convergence of materials and enzymes for biosensing and self-sustaining energy devices towards on-body health monitoring. *Commun Mater.* 2024;5:135. doi:10.1038/s43246-024-00557-6.
15. Boscarì F, Vettoretti M, Amato AML, Vallone V, Uliana A, Iori E, et al. Comparing the accuracy of transcutaneous sensor and 90-day implantable glucose sensor. *Nutr Metab Cardiovasc Dis.* 2021;31(2):650-657. doi:10.1016/j.numecd.2020.09.006.

16. Marigliano M, Piona C, Mancioppi V, Morotti E, Morandi A, Maffei C. Glucose sensor with predictive alarm for hypoglycaemia: improved glycaemic control in adolescents with type 1 diabetes. *Diabetes Obes Metab*. 2024;26(4):1314-1320. doi:10.1111/dom.15432.
17. Liao Y, Brannon GE, Rethorst CD, Baum M, Bevers TB, Schembre SM, et al. Using continuous glucose monitoring as a biological feedback strategy to motivate physical activity in cancer survivors: a mixed-methods pilot study. *Cancer Control*. 2025;32:10732748251359406. doi:10.1177/10732748251359406.
18. Tumminia A, Milluzzo A, Festa C, Fresa R, Pintauro B, Scavini M, et al. Efficacy of flash glucose monitoring in pregnant women with poorly controlled pregestational diabetes (FlashMom): a randomized pilot study. *Nutr Metab Cardiovasc Dis*. 2021;31(6):1851-1859. doi:10.1016/j.numecd.2021.03.013.
19. Martín-San Agustín R, Cuerda Del Pino A, Laguna Sanz AJ, Palanca A, Rossetti P, Marco Romero C, et al. Impact of high-intensity interval exercise with elastic bands versus continuous moderate-intensity aerobic exercise on glycemic control in people with type 1 diabetes. *Sports Health*. 2025;17(6):1252-1260. doi:10.1177/19417381251316247.
20. Pei Y, Ke W, Lu J, Lin Y, Zhang Z, Peng Y, et al. Safety event outcomes and glycemic control with a hybrid closed-loop system used by Chinese adolescents and adults with type 1 diabetes mellitus. *Diabetes Technol Ther*. 2023;25(10):718-725. doi:10.1089/dia.2023.0234.
21. Moser O, Tripolt N, Pferschy P, Obermayer A, Kojzar H, Mueller A, et al. Performance of the intermittently scanned continuous glucose monitoring (isCGM) system during a high oral glucose challenge in adults with type 1 diabetes: a prospective secondary outcome analysis. *Biosensors (Basel)*. 2021;11(1):22. doi:10.3390/bios11010022.
22. Cordero TL, Dai Z, Arrieta A, Niu F, Vella M, Shin J, et al. Glycemic outcomes during early use of the MiniMed 780G advanced hybrid closed-loop system with Guardian 4 sensor. *Diabetes Technol Ther*. 2023;25(9):652-658. doi:10.1089/dia.2023.0123.
23. Styles SE, Haszard JJ, Rose S, Galland BC, Wiltshire EJ, de Bock MI, et al. Developing a multicomponent intervention to increase glucose time in range in adolescents and young adults with type 1 diabetes: an optimisation trial to screen continuous glucose monitoring, sleep extension, healthier snacking and values-guided self-management intervention components. *Contemp Clin Trials*. 2025;152:107864. doi:10.1016/j.cct.2025.107864.
24. El Fathi A, Palisaitis E, von Oettingen JE, Krishnamoorthy P, Kearney RE, Legault L, et al. A pilot non-inferiority randomized controlled trial to assess automatic adjustments of insulin doses in adolescents with type 1 diabetes on multiple daily injections therapy. *Pediatr Diabetes*. 2020;21(6):950-959. doi:10.1111/pedi.13052.
25. Al Gamode A, Malik RB, Butler J, Kubis HP. Taste of things to come: craving responses to ingestion of and mouth rinse with a sugary drink in connection with food cues and associations with continuous interstitial glucose measurement in a healthy population. *Nutrients*. 2026;18(1):177. doi:10.3390/nu18010177.