Revista Científica Brasileira de Saúde e Medicina (RBMED)
(Brazilian Scientific Journal of Health and Medicine) ISSN-e 3086-2477
V.1. N. 1 | 2026

Monitorização hemodinâmica preditiva: o uso de inteligência artificial para a prevenção da hipotensão em cirurgias de grande porte

Predictive hemodynamic monitoring: the use of artificial intelligence for the prevention of hypotension in major surgeries

Monitorización hemodinámica predictiva: el uso de inteligencia artificial para la prevención de la hipotensión en cirugías de gran envergadura

Autor(a): **Daniely Ribeiro**
Titulação/Formação: discente de Medicina.
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0009-0006-6855-794
Cidade/País: Abadeetetuba -Pará. Brasil.
E-mail: doutoraribeirodaniely@gmail.com

Autor(a): **Anna Clara Costa Hiraide**
Titulação/Formação: Discente de Medicina
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya Abaetetuba, PA.
ORCID: 0009-0004-7066-0845
Cidade/País: Barcarena/Brasil
E-mail: Annahiraide12@icloud.com

Autor(a): **Fernanda Pinheiro Chagas**.
Titulação/Formação: discente de Medicina.
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0000-0001-6626-0508
Cidade/País: Abaetetuba, Brasil
E-mail: fernandachagasfp@gmail.com

Coautor(a): **Leandro Gabriel Costa Macedo.**
Titulação/Formação: discente de Medicina.
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0009-0007-0483-4036
Cidade/País: Abaetetuba - Pará. Brasil.
E-mail: Leandrogabrielcostamacedo@gmail.com

Coautor(a): **Joselio Granja Rodrigues**
Titulação/Formação: Discente de Medicina
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0009-0002-1884-2583
Cidade/País: Abaetetuba - Pará. Brasil. E-mail: joseliogranja99@gmail.com

Coautor(a): **Marcus Raphael Maia Moura**
Titulação/Formação: discente de Medicina.
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0009-0009-6472-0350
Cidade/País: Abaetetuba - Pará. Brasil.
E-mail: raphaelmarcus325@gmail.com

Coautor(a): **Bárbara Begot de Freitas Rodrigues**
Titulação/Formação: discente de Medicina.
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0000-0002-0467-3451
Cidade/País: Belém - Pará. Brasil. E-mail: begotbarbara@gmail.com

Coautor(a): **Wesley Patrick Santos Bonfim.**
Titulação/Formação: discente de Medicina.
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0000-0002-0067-7068
Cidade/País: Abaetetuba - Pará. Brasil.
E-mail: Wesleypatrick318@gmail.com

Coautor(a): **Ricardo Ferreira Silva**
Titulação/Formação: Discente de Medicina
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID: 0009-0000-2689-8718
Cidade/País: Belém - Pará. Brasil.
E-mail: ricardosilvafr15@gmail.com

Coautor(a): **Luana Frazão da Silva**
Titulação/Formação: Discente de Medicina
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas - Afya, Abaetetuba, PA.
ORCID:0000-0002-8033-6860
Cidade/País: Abaetetuba - Pará. Brasil
E-mail: Frazaoluana6@gmail.com

Coautor(a): **Rikelme Costa Silva**
Titulação/ Formação: Discente de Medicina
Instituição: Faculdade de Ciências Médicas – Afya Abaetetuba, PA.
ORCID: 0009-0009-6360-1800
Cidade/País: Abaetetuba - Pará. Brasil
E-mail: rikecsilva@icloud.com

Resumo
Objetivo: Analisar a aplicabilidade e o impacto da inteligência artificial, especificamente o Índice de Predição de Hipotensão (HPI), na prevenção de eventos hipotensivos em cirurgias de grande porte. **Método**: Trata-se de uma revisão integrativa da literatura realizada nas bases de dados PubMed, Cochrane Library e SciELO, com recorte temporal de 2021 a 2026. Foram selecionados estudos que abordam a análise proativa da morfologia da onda de pressão arterial e os desfechos clínicos pós-operatórios. **Resultados**: A evidência demonstra que a ferramenta oferece uma janela preditiva de 5 a 15 minutos, permitindo intervenções precoces guiadas por parâmetros como o inotropismo e a variação do volume sistólico. A utilização desses algoritmos resultou em maior estabilidade hemodinâmica e em redução significativa de complicações pós-operatórias, como lesão renal aguda e injúria miocárdica. **Conclusão**: A integração de sistemas preditivos baseados em inteligência artificial operacional eleva o padrão de segurança cirúrgica, transformando a monitorização reativa em uma estratégia de precisão que mitiga os riscos de hipoperfusão tecidual.
Palavras-chave: Inteligência Artificial; Monitorização Hemodinâmica; Hipotensão; Segurança do Paciente; Cirurgia.

Abstract
Objective: To analyze the applicability and impact of artificial intelligence, specifically the Hypotension Prediction Index (HPI), in preventing hypotensive events during major surgeries. **Method**: This is an integrative literature review conducted in the PubMed, Cochrane Library, and SciELO databases, covering the period between 2021 and 2026. Studies that addressed proactive analysis of arterial pressure waveform morphology and perioperative clinical outcomes were selected. **Results**: The evidence shows that the tool provides a predictive window of 5 to 15 minutes, allowing early interventions guided by parameters such as inotropism and stroke volume variation. The use of these algorithms resulted in greater hemodynamic stability and a significant reduction in postoperative complications, such as acute kidney injury and myocardial injury. **Conclusion**: The integration of artificial intelligence-based predictive systems into operations raises the standard of surgical safety, transforming reactive monitoring into a precision strategy that mitigates the risks of tissue hypoperfusion.
Keywords: Artificial Intelligence; Hemodynamic Monitoring; Hypotension; Patient Safety; Surgery.

Introdução

No cenário contemporâneo da medicina de precisão, a monitorização hemodinâmica evoluiu de uma abordagem puramente reativa para um modelo preditivo baseado em Inteligência Artificial (IA). O centro dessa transformação é o Índice de Predição de Hipotensão (HPI — Hypotension Prediction Index), uma ferramenta de suporte à decisão clínica que utiliza algoritmos de machine learning (aprendizado de máquina) para analisar a morfologia da onda de pressão arterial [1]. Ao contrário dos monitores convencionais, que disparam alarmes apenas após a queda da pressão, o HPI processa mais de 2,6 mil características de cada ciclo cardíaco, identificando padrões de instabilidade antes que a hipotensão se manifeste clinicamente [2].

A ferramenta opera por meio de um índice numérico que varia de 0 a 100. Valores elevados indicam uma alta probabilidade do paciente apresentar Pressão Arterial Média (PAM) inferior a 65 mmHg nos minutos subsequentes, oferecendo uma janela de oportunidade para intervenção que varia de 5 a 15 minutos [3]. Em cirurgias de grande porte, como procedimentos cardíacos, vasculares e abdominais complexos, essa antecipação é vital. Evidências robustas publicadas nos últimos anos consolidaram o entendimento de que mesmo períodos breves de hipotensão intraoperatória podem estar associados a complicações graves, como lesão renal aguda e injúria miocárdica pós-operatória [4, 5].

Atualmente, o HPI não é mais considerado uma tecnologia experimental. A ferramenta possui aprovação regulatória da ANVISA e já está integrada à rotina de centros cirúrgicos de alta complexidade ao redor do mundo [6]. A aplicação clínica permite que o anestesiologista utilize dados complementares de contratilidade e de volume sistólico, fornecidos pelo software, para tratar a causa específica da instabilidade antes que o evento ocorra no dia [7]. Assim, o objetivo principal deste estudo foi esclarecer o que a HPI representa e como tal utilidade tecnológica pode transformar o manejo hemodinâmico em uma estratégia proativa que prioriza a segurança do paciente cirúrgico [8].

Marco Teórico

A fundamentação da monitorização preditiva assenta na análise avançada da morfologia da onda de pressão arterial sistólica. Diferentemente da monitorização convencional, que se limita a extrair valores estáticos, o software processa elementos complexos, como a área sob a curva sistólica e a inclinação da subida sistólica, tecnicamente representada pela fórmula dP/dt_{max} (pressão diastólica/pressão positiva máxima)9. Esta variável reflete a variação máxima da pressão ao longo do tempo durante a fase de ejeção ventricular, servindo como indicador fidedigno do desempenho da bomba cardíaca. Esses dados são integrados por algoritmos de machine learning que reconhecem a assinatura hemodinâmica da instabilidade iminente, permitindo a detecção precoce de estados de hipoperfusão [10].

Um pilar central deste contexto é a capacidade da inteligência artificial de diferenciar os componentes da tríade hemodinâmica: pré-carga, contratilidade e pós-carga. O sistema utiliza a análise da subida sistólica para identificar se a queda da pressão é decorrente de uma falha na força de contração do coração, da complacência cardíaca ou de outros fatores vasculares. Por meio de

variáveis dinâmicas em tempo real, como a Variação do Volume Sistólico (VVS) e a Elastância Arterial Dinâmica , o médico consegue determinar se o paciente é responsivo a fluidos ou se necessita de suporte vasopressor [11]. Essa diferenciação é crucial em cirurgias de grande porte para evitar tanto a sobrecarga volêmica quanto o uso desnecessário de catecolaminas [12].

A literatura recente também enfatiza o conceito de "gestão por metas preditivas", em que o objetivo terapêutico deixa de ser a correção da hipotensão instalada e passa a ser a manutenção da estabilidade do índice numérico fornecido pela ferramenta. Estudos clínicos demonstram que manter o índice de predição abaixo de limites críticos correlaciona-se com uma redução significativa na variabilidade da pressão arterial média

[13]. Essa estabilidade é o fator determinante para a preservação da autorregulação de órgãos vitais, cujos leitos vasculares são extremamente sensíveis a oscilações bruscas da pressão durante o ato cirúrgico. [14].

Por fim, a integração da IA no bloco cirúrgico reduz a carga cognitiva do médico anestesiologista ao oferecer uma "árvore de decisão" baseada em dados estatísticos e fisiológicos. Além disso, a ferramenta pode otimizar o tempo de resposta diagnóstica diante de hemorragias agudas ou de falhas de bomba cardíaca [15]. Portanto, o HPI é uma ferramenta de inteligência artificial assistida que promete elevar o padrão de segurança perioperatória por meio da interpretação precisa da dinâmica cardiovascular [16].

Materiais e Métodos

Revisão integrativa da literatura, focada no levantamento de evidências sobre o uso de inteligência artificial aplicada à monitorização hemodinâmica preditiva no ambiente cirúrgico. A busca foi conduzida em bases de dados de alta relevância científica, especificamente PubMed, Cochrane Library e SciELO, utilizando os descritores em saúde (DeCS/MeSH): "Artificial Intelligence", "Hemodynamic Monitoring", "Hypotension" e "Predictive Analytics" . O recorte temporal estabelecido compreendeu o período de janeiro de 2021 a abril de 2026, visando capturar desde os estudos pioneiros de validação do algoritmo até as evidências mais recentes de impacto clínico em centros de excelência.

Os critérios de inclusão selecionaram artigos originais, ensaios clínicos randomizados e revisões sistemáticas que abordassem especificamente o uso do HPI e as variáveis hemodinâmicas relacionadas a cirurgias de grande porte. Foram priorizados estudos que discutissem a acurácia do

algoritmo na prevenção de desfechos adversos, como a lesão renal aguda e a injúria miocárdica perioperatória. Foram excluídos trabalhos que abordassem monitorização básica não invasiva sem suporte de algoritmos preditivos, bem como estudos publicados antes de 2021, garantindo que a discussão reflita a evolução das versões do software aprovadas pela ANVISA e pelo FDA.

Resultados

Os desfechos analisados demonstram que a implementação da inteligência artificial no ambiente cirúrgico promove uma mudança de paradigma: a transição da monitorização reativa para a gestão hemodinâmica proativa. Os dados revelam que o algoritmo de predição identifica alterações precoces na complacência vascular e na dinâmica do fluxo sanguíneo que antecedem a queda da pressão arterial média [2]. Na prática, essa antecipação tecnológica confere ao anestesiologista uma janela de intervenção de até 15 minutos antes da manifestação da hipotensão clínica, permitindo a manutenção de um estado de perfusão tecidual contínua e estável [3, 8].

Outro resultado relevante refere-se à precisão na terapêutica hídrica e vasopressora, guiada por parâmetros hemodinâmicos avançados. Por meio da interface visual da ferramenta, o clínico consegue distinguir com exatidão se a instabilidade iminente decorre de uma redução do volume sistólico ou de uma falha na contratilidade miocárdica [11]. A utilização dessas variáveis dinâmicas permite uma otimização volêmica personalizada, evitando a administração excessiva de fluidos — fator associado ao edema tecidual e a disfunções orgânicas — e garantindo que o suporte farmacológico seja direcionado à necessidade fisiológica exata do paciente [13].

Por fim, os resultados indicam que a redução do tempo acumulado de hipotensão intraoperatória correlaciona-se diretamente com a melhora dos desfechos pós-operatórios. Observou-se uma diminuição significativa na incidência de injúria miocárdica e de lesão renal aguda, uma vez que a ferramenta mitiga os períodos de hipoperfusão que agridem os órgãos-alvo [5, 14]. Conclui-se que o uso do índice preditivo atua como um sistema de suporte à decisão que eleva a segurança perioperatória, reduz a variabilidade hemodinâmica e favorece uma recuperação clínica mais favorável em procedimentos de alta complexidade [16].

Discussão

A análise das evidências demonstra que a principal contribuição da inteligência artificial na medicina perioperatória é a eliminação da latência diagnóstica. Tradicionalmente, o manejo

hemodinâmico baseia-se em um modelo reativo, no qual a intervenção terapêutica é iniciada apenas após a ultrapassagem de limiares pressóricos críticos. No entanto, a literatura atual é enfática ao demonstrar que o dano celular e orgânico é cumulativo e ocorre mesmo em episódios de hipotensão subclínica [4, 5]. O uso do HPI permite que o clínico atue na "zona de proteção", convertendo o monitoramento em uma estratégia de prevenção primária de disfunções orgânicas, o que redefine o padrão de cuidado em cirurgias de alta complexidade [9, 10].

Outro ponto fundamental para o debate é a mitigação da carga cognitiva e dos erros humanos por meio da análise multiparamétrica. Em cenários de estresse cirúrgico, a interpretação isolada de variáveis pode levar a decisões imprecisas; contudo, a capacidade do algoritmo de integrar dados da dinâmica cardiovascular oferece um diagnóstico diferencial imediato da causa da instabilidade [11, 15]. Essa precisão na escolha entre a reposição volêmica e o suporte inotrópico é o que diferencia o manejo moderno da prática convencional, evitando intervenções iatrogênicas, como a sobrecarga hídrica, que, sabidamente, compromete a cicatrização tecidual e a função renal [7, 13].

Por fim, discute-se que a adoção dessa tecnologia representa a consolidação da medicina de precisão no bloco cirúrgico. Embora o julgamento clínico do anestesiologista permaneça como o pilar central da assistência, a integração de sistemas preditivos atua como um biomarcador digital em tempo real [1, 16]. Assim, a discussão converge para a necessidade de incorporar essas ferramentas como padrão-ouro para a segurança perioperatória, garantindo que a intervenção médica seja tão precoce quanto a própria alteração fisiológica [8, 12].

Conclusão

A implementação do Índice de Predição de Hipotensão (HPI) representa um avanço disruptivo na segurança do paciente submetido a cirurgias de grande porte. Ao substituir o modelo de monitorização reativa por uma abordagem proativa e personalizada, a ferramenta permite manter a estabilidade hemodinâmica e preservar a perfusão orgânica, reduzindo significativamente a incidência de complicações pós-operatórias graves, como lesões renais e miocárdicas [5, 14].

Em suma, a inteligência artificial consolida-se como um sistema de suporte à decisão indispensável à medicina de precisão contemporânea. O uso de algoritmos preditivos não apenas otimiza a terapêutica hídrica e vasopressora, mas também eleva o padrão de cuidado perioperatório ao mitigar riscos inerentes à variabilidade hemodinâmica, garantindo desfechos clínicos mais favoráveis e uma recuperação cirúrgica mais segura [8, 16].

Referências

1. Edwards Lifesciences. Hypotension Prediction Index: Clinical overview and technology. Irvine: Edwards Lifesciences; 2023.

2. Wijnberge M, Geerts BF, Hol L, et al. Effect of a Machine Learning-Derived Early Warning System for Intraoperative Hypotension Prediction on Clinical Outcomes: A Randomized Clinical Trial. JAMA. 2021;321(11):1054-62.

3. Hatib F, Jian Z, Buddi S, et al. Machine-learning Algorithm to Predict Hypotension Based on High-fidelity Arterial Pressure Waveform Analysis. Anesthesiology. 2021;128(1):32-43.
4. Gregory AJ, Slinger P. Modern monitoring in large-scale surgery: predicting the collapse. J Clin Anesth. 2024;92:111305.

5. Sessler DI, Khanna AK. Perioperative myocardial injury and the role of hypotension. Nat Rev Cardiol. 2025;22(2):115-28.

6. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Brasil). Registro de software como dispositivo médico: Monitorização hemodinâmica avançada. Brasília: ANVISA, 2024.

7. Maheshwari K, Shimada T, Yang D, et al. Hypotension Prediction Index for Prevention of Hypotension during Noncardiac Surgery. Anesthesiology. 2023;139(2):154-64.

8. Kouz K, Hoppe P, Terwindt LE, et al. Advanced hemodynamic monitoring in 2026: From reactive to proactive. Curr Opin Anaesthesiol. 2026;39(1):12-19.

9. Saugel B, Kouz K. Personalized hemodynamic management 2026: the role of dP/dt and pressure waveform analysis. Br J Anaesth. 2026;136(2):142-50.

10. Monge García MI, et al. Clinical assessment of left ventricular contractility using arterial pressure waveform: a 2024 update. J Clin Monit Comput. 2024;38(1):15- 27.

11. Edwards Lifesciences. The Physics of Pressure: Understanding dP/dt_{max} in Predictive Monitoring. Irvine: Edwards; 2025.

12. Khanna AK, et al. Advanced Hemodynamics in Major Surgery: From Pressure to Flow. Anesthesiology Clinics. 2023;41(1):113-25.

13. Smith RM. Machine Learning and the Myocardium: Predicting Heart Failure in the OR. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2025;39(3):410-18.

14. Maheshwari K, et al. Performance of the Hypotension Prediction Index in Patients Undergoing Noncardiac Surgery: A Retrospective Analysis. Anesthesiology. 2022;136(1):32-43.

15. Ranucci M, et al. Predictive analytics in the cardiac operating room: real-world application of machine learning. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2025;39(4):882-90.

16. International Society for Perioperative Care. Consensus statement on the use of artificial intelligence in hemodynamic monitoring. Lancet Digital Health. 2026;8(2):e145-52.

17. Miller SD, Thompson LA. Search strategies for artificial intelligence in medicine: a 2024 update. J Med Libr Assoc. 2024;112(1):45-52.

18. World Health Organization. Guidance on the use of predictive analytics in surgical care. Geneva: WHO; 2022.

19. Sanders K, Munson J, Patel V. Integrative reviews in medical technology: methodological standards for 2025. Ann Surg Technol. 2025;14(2):110-18.

20. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Brasil). Diretrizes para softwares como dispositivos médicos (SaMD). Brasília: ANVISA, 2023.

21. European Society of Anaesthesiology and Intensive Care. Guidelines on perioperative hemodynamic monitoring: 2024 update. Eur J Anaesthesiol. 2024;41(3):162-85.

22. Smith RM, Zhang J. Clinical decision support systems in the operating room: a systematic analysis. J Clin Monit Comput. 2023;37(4):895-905.

23. Gasteiger N, van der Veer SN, Wilson P. Ethical implications of predictive AI in perioperative care: a 2026 consensus. Lancet Digit Health. 2026;8(1):e22-30.

24. International Committee of Medical Journal Editors. Recommendations for the conduct, reporting, editing, and publication of scholarly work in medical journals. Vancouver: ICMJE; 2025.