Revista Eletrônica
Acervo Saúde
Electronic Journal Collection Health ISSN 2178-2091

Inteligência artificial na análise de eletrocardiogramas: avanços, desafios e aplicações clínicas

Artificial intelligence in electrocardiogramanalysis: advances, challenges, and clinical applications

Inteligencia artificial en el análisis de electrocardiogramas: avances, desafíos y aplicaciones clínicas

Alice Lana David Silva[1], André Kabbach Romano Guedes[2], David Lana Silva[2], Eduardo Gregório Chamlian[3].

RESUMO

Objetivo: Analisar, com base em publicações recentes (2015–2025), a eficácia da Inteligência Artificial (IA) na interpretação de eletrocardiogramas (ECGs) para fins diagnósticos. **Revisão bibliográfica:** Os estudos analisados demonstram que a IA pode transformar o ECG em uma ferramenta poderosa para triagem e predição, ao identificar padrões subclínicos que muitas vezes não são detectados por métodos convencionais. A incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais profundas tem aumentado significativamente a precisão e a agilidade na detecção de anormalidades cardíacas. Destaca se, ainda, a importância da alfabetização em inteligência artificial (IA) e machine learning (ML) por parte dos profissionais de saúde, visando sua implementação clínica segura e eficaz. Em muitos contextos, os modelos baseados em IA apresentaram desempenho comparável ou superior ao de especialistas humanos, ampliando a aplicabilidade do ECG em ambientes clínicos diversos. **Considerações finais:** Embora desafios como validação externa, privacidade de dados e interpretabilidade dos algoritmos ainda persistam, o uso da IA na análise de ECGs mostra grande potencial para melhorar o diagnóstico precoce, a estratificação de risco e a tomada de decisão em cardiologia preventiva.

Palavras-chave: Cardiologia, Eletrocardiograma, Sistemas inteligentes, Máquinas de aprendizagem extrema.

ABSTRACT

Objective: To evaluate, through recent bibliographic references (2015–2025), the effectiveness of Artificial Intelligence (AI) in the diagnostic interpretation of electrocardiograms (ECGs). **Literature review:** The evidence indicates that AI has the potential to transform the ECG into a powerful diagnostic and prognostic tool by detecting subtle, subclinical patterns that are often imperceptible to the human eye. Through deep learning and machine learning algorithms, AI can enhance the precision, speed, and scalability of ECG interpretation, contributing to earlier and more accurate diagnosis of a wide range of cardiovascular conditions. The review also emphasizes the importance of AI and machine learning literacy among healthcare professionals to ensure effective clinical adoption. Moreover, AI-augmented ECGs have demonstrated superior performance in some cases compared to conventional methods and even expert

[1] Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.
[2] Universidade Municipal de São Caetano do Sul, São Caetano do Sul – SP.

SUBMETIDO EM: 8/2025 | **ACEITO EM: 9/2025** | **PUBLICADO EM: 10/2025**

interpretation, highlighting their value in both acute and preventive settings. **Final considerations:** While the integration of AI into clinical practice still faces barriers such as model explainability, data security, and the need for external validation, its application in ECG analysis holds significant potential to improve cardiovascular care through early detection, personalized risk assessment, and efficient clinical decision-making.

Keywords: Cardiology, Electrocardiogram, Intelligent system, Extreme learning machines.

RESUMEN

Objetivo: Analizar, con base en publicaciones recientes (2015–2025), la eficacia de la Inteligencia Artificial (IA) en la interpretación de electrocardiogramas (ECG) con fines diagnósticos. **Revisión bibliográfica:** Los estudios revisados indican que la IA puede convertir el ECG en una herramienta eficaz para el cribado y la predicción, al identificar patrones subclínicos que suelen pasar desapercibidos mediante métodos convencionales. La incorporación de algoritmos de aprendizaje automático y redes neuronales profundas ha mejorado notablemente la precisión y velocidad en la detección de anomalías cardíacas. Asimismo, se resalta la importancia de la alfabetización en IA y aprendizaje automático por parte de los profesionales de la salud, para una implementación clínica segura y efectiva. En varios contextos, los modelos basados en IA han demostrado un rendimiento comparable o superior al de especialistas humanos, ampliando la aplicabilidad del ECG en diferentes entornos clínicos. **Consideraciones finales:** Aunque aún persisten desafíos como la validación externa, la privacidad de los datos y la interpretabilidad de los algoritmos, el uso de la IA en el análisis de ECGs presenta un gran potencial para mejorar el diagnóstico precoz, la estratificación de riesgos y la toma de decisiones en la cardiología preventiva.

Palabras clave: Cardiología, Electrocardiograma, Sistemas inteligentes, Máquinas de aprendizaje extremo.

INTRODUÇÃO

Há cerca de 70 anos atrás, Arthur Samuel introduziu o termo Machine Learning (LM) para se referir à habilidade das máquinas em aprender a realizar tarefas complexas e aprimorar a performance dessas funções com base em experiência adicional (PAIXÃO GMM, et al., 2022). Essa abordagem foi inicialmente limitada por estar à frente de seu tempo, pois não havia dados e capacidade computacional disponíveis para sustentá-la. Hoje, com a explosão de dados digitais e o aumento significativo da capacidade de processamento para treinamento de redes neurais, a inteligência artificial (IA), é capaz de realizar tarefas de alta complexidade. No aprendizado supervisionado, em particular, define-se uma função de otimização cujo objetivo é encontrar, entre dados rotulados, o modelo que melhor representa a resposta ideal. Muitos modelos de Machine Learning são paramétricos**,** definindo uma função entre espaços de entrada e saída por meio de um conjunto fixo de parâmetros, independentemente do tamanho do conjunto de dados. Em redes neurais artificiais, cada “neurônio” corresponde a uma equação matemática com parâmetros ajustados durante o treinamento. Quando essas conexões se estendem por várias camadas, formam-se redes profundas. Nesses modelos, os parâmetros são combinados por meio de operações lineares e não lineares para produzir uma saída. Esse processo é otimizado iterativamente com dados rotulados, buscando minimizar a diferença entre as previsões e os valores reais. A etapa de aprendizado costuma demandar grandes volumes de dados e alta capacidade computacional, utilizando métodos de gradiente para ajustar os pesos até alcançar o mínimo erro (BROWN LEE J, 2020).

Após a fase de treinamento, os parâmetros da rede são ajustados e a função resultante se comporta como um modelo determinístico, capaz de generalizar para novas entradas desconhecidas. A capacidade computacional exigida para a inferência da rede treinada costuma ser reduzida, permitindo inclusive sua execução em dispositivos móveis, como smartphones (IGNATOV A, et al., 2018). Uma rede neural é composta por múltiplos nós (ou neurônios artificiais) organizados em camadas, conectados de forma dirigida. Cada nó aplica uma transformação matemática aos dados de entrada**,** geralmente composta por

uma operação linear seguida de uma função de ativação não linear, sendo os parâmetros ajustáveis (ABDAR M, et al., 2023). A informação flui de uma camada para a seguinte, permitindo que cada camada calcule uma representação intermediária dos dados até a produção da saída final. Esse modelo de propagação e aprendizado permite à rede extrair características complexas e realizar predições com alto grau de precisão.

A cardiologia tem passado por uma transformação digital impulsionada por big data, IA e tecnologias de monitoramento, exigindo dos profissionais domínio dessas ferramentas (BALADRÓN C, et al., 2021). A IA, por meio de algoritmos avançados, identifica padrões sutis não perceptíveis ao olho humano, aumentando a acurácia diagnóstica e possibilitando detecção precoce de anormalidades cardíacas. Diante desse cenário, essa revisão narrativa propõe uma análise reflexiva e crítica sobre a eficácia da IA na interpretação de ECGs baseados em pesquisas realizadas entre 2015 a 2025 com focona detecção e interpretação de alterações cardiovasculares.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A inteligência artificial e o eletrocardiograma

A IA tem ganhado destaque como um instrumento revolucionário no campo da saúde, especialmente na ajuda diagnóstica, otimização de tempo e na tomada de decisões voltada à cardiologia (SOMANI R, et al., 2021).

A combinação da IA com o ECG, um procedimento frequentemente usado para verificar a atividade elétrica do coração, tem cada vez mais demonstrado potencial para aprimorar a exatidão, agilidade e eficácia dos diagnósticos cardiológicos (TORRES F, et al., 2024). Os algoritmos de aprendizado profundo podem transformar o ECG em um exame de menor custo e amplamente disponível. Além disso, tem o potencial de converter o exame em um poderoso instrumento de triagem e previsão, capaz de detectar padrões subclínicos que podem não ser detectados em análises convencionais, como possíveis arritmias, infarto agudo do miocárdio (IAM) e disfunções sistólicas e diastólicas, (ATTIA ZI, et al., 2021).

A acurácia na interpretação de ECG por médicos é limitada, com média de 54% antes do treinamento e até 74,9% entre cardiologistas (COOK DA, et al., 2020), evidenciando lacunas na leitura de traçados. Nesse cenário, Lee J, et al., (2025) demonstraram que o modelo de IA Echo Next superou especialistas na detecção de doenças cardíacas estruturais, com sensibilidade de 81% e especificidade de 74%. Breen CJ, et al. (2022) reforçam que a interpretação do ECG é desafiador, exigindo métodos de treinamento mais eficazes. Esses achados apontam para a importância de integrar tecnologias como a IA à formação médica tradicional, a fim de potencializar o diagnóstico.

Wu Z e Guo C (2025) destacam o potencial das técnicas de aprendizado profundo aplicadas ao ECG no diagnóstico de diversas doenças cardiovasculares, como arritmias, isquemia e disfunções ventriculares. Modelos baseados em redes neurais convolucionais e recorrentes demonstraram alta acurácia, superando, em alguns casos, a performance humana. No entanto, alertam para limitações quanto à generalização dos resultados, à falta de padronização de dados e à dificuldade de interpretação dos modelos. Destacam a importância do desenvolvimento de algoritmos mais explicáveis, da validação clínica em larga escala e a integração dessas técnicas na prática médica como instrumentos complementares ao raciocínio clínico.

Ansari Y, et al. (2023), em uma revisão sobre o uso de técnicas de aprendizado profundo na detecção e classificação de arritmias por meio de eletrocardiogramas, analisaram diferentes arquiteturas, como redes convolucionais, recorrentes e transformadoras, destacando modelos híbridos como os mais eficazes. O estudo mostrou que muitos algoritmos alcançam acurácia superior a 96%, mas também identificou desafios importantes, como o viés de dados, a falta de diversidade nos conjuntos de treinamento e a ausência de padronização nos processos de validação. A IA tende a ocupar papel central na cardiologia, contribuindo para diagnósticos mais precisos e intervenções mais eficazes. Entre suas aplicações com dados de ECG estão: interpretação de anormalidades, previsão de riscos com ou sem variáveis clínicas, monitoramento e processamento de sinais, diagnóstico de doenças não cardíacas, apoio terapêutico, integração com outras modalidades e otimização de custos.

Os avanços no uso de aprendizado de máquinas para a detecção de arritmias via eletrocardiograma têm sinalizado com resultados significativos em termos de acurácia e eficiência. No entanto, a consolidação desses modelos na prática clínica exige padronização metodológica, bases de dados mais representativas e validações rigorosas, garantindo que a IA seja utilizada de forma segura e complementar à avaliação médica tradicional.

A Inteligência artificial na disfunção sistólica do ventrículo esquerdo e cardiomiopatia hipertrófica

A disfunção sistólica do ventrículo esquerdo, frequentemente associada à insuficiência cardíaca, pode ocorrer de forma assintomática, dificultando sua detecção precoce. Embora a ecocardiografia seja o método padrão, a IA tem se mostrado promissora na identificação antecipada dessa condição através da análise automatizada de sinais clínicos e eletrocardiográficos (CHO J, et al., 2020). Modelos multimodais, como o "LVH fusion", que combinam ECG e ecocardiograma, demonstraram alta acurácia na detecção de hipertrofia ventricular esquerda (NARAYANAN HN, et al., 2023). Apesar do potencial diagnóstico e triagem, desafios como validação externa, transparência algorítmica e integração ética precisam ser superados.

Khunte A, et al., (2023) mostraram que algoritmos de IA conseguem detectar disfunção sistólica do ventrículo esquerdo não só com ECGs de 12 derivações, mas também com sinais de derivação única obtidos por smartwatches. O modelo apresentou alto desempenho (AUROC de 0,90) e manteve robustez mesmo com sinais ruidosos (AUROC de 0,87), indicando potencial para triagem precoce em ambientes ambulatoriais ou domiciliares. Esses resultados reforçam a viabilidade do uso de IA com dispositivos portáteis na cardiologia preventiva. De forma complementar, estudos demonstram que smartwatches com IA identificam insuficiência cardíaca com fração de ejeção reduzida com sensibilidade de 0,90, especificidade de 0,86, valor preditivo positivo de 0,26 e negativo de 0,99 (KWON JM, et al., 2020).

Cho J, et al. (2020) destacam avanços significativos no uso de IA aplicada ao eletrocardiograma, com ênfase na viabilidade de dispositivos vestíveis para detecção precoce de disfunção sistólica do ventrículo esquerdo. Ressaltam que algoritmos de IA são capazes de interpretar sinais de ECG de derivação única, obtidos por smartwatches, com alto grau de precisão, contribuindo para a triagem de pacientes assintomáticos. Essa abordagem tem potencial para prevenir a progressão irreversível da doença e reduzir a mortalidade, ao possibilitar intervenções clínicas em estágios iniciais.

Siontis KC, et al. (2024) mostraram que um algoritmo de IA aplicado ao ECG de 12 derivações detectou cardiomiopatia hipertrófica (CMH) com alta precisão (AUC 0,922; sensibilidade 82,8%; especificidade 87,7%), mantendo desempenho consistente entre diferentes populações. Ko WY, et al. (2020) reforçam que redes neurais profundas podem identificar CMH mesmo na ausência de sinais típicos no ECG. Como alternativa à ecocardiografia, que tem maior custo e tempo de execução, a IA no ECG oferece uma forma eficaz e não invasiva de rastreamento, superando limitações dos métodos tradicionais.

Um algoritmo de IA criado por equipe da Mayo Clinic, utilizando ECGs de aproximadamente 2.500 pessoas com HCM e aproximadamente 51.000 controles, demonstrou alta acurácia (AUC de 0.95). Essa descoberta se assemelhava quando restrita a ECGs que atendiam aos critérios tradicionais de LVH ou aos que apresentavam ECGs aparentemente normais (KO WY, et al., 2020). O desempenho robusto deste modelo, especialmente em pacientes mais jovens e independentemente do status mutacional, destaca seu potencial para ampla utilização no rastreamento de HCM. O alto valor negativo preditivo (VPN) indica que este instrumento pode ser útil para orientar a avaliação de HCM em larga escala (KO WY, et al., 2020).

A IA pode identificar com precisão a presença de hipertrofia ventricular esquerda a partir de um ECG. Um algoritmo de IA criado a partir de 21.000 pessoas com dados de ECG e ecocardiografia combinados mostrou uma maior sensibilidade para a mesma especificidade, em comparação ao ECG realizado por um cardiologista (LIU CW, et al., 2023).

Estudos da Mayo Clinic conduzidos por Noseworthy PA, et al. (2020) mostraram que algoritmos de IA conseguem identificar pacientes com fibrilação atrial (FA) paroxística, mesmo em ritmo sinusal, condição geralmente difícil de detectar clinicamente. Utilizando 600 mil ECGs e redes neurais profundas, a IA alcançou acurácia de 79% e coeficiente de correlação de 0,87 ao identificar alterações subclínicas durante episódios ativos.

Christopoulos G, et al. (2020) avaliaram o uso de algoritmos de IA para prever FA em pacientes com ECG em ritmo sinusal. Com dados do Mayo Clinic Study of Aging, o modelo previu com alta acurácia a ocorrência de FA até um mês antes do diagnóstico. A IA teve desempenho semelhante ao escore CHARGE-AF na predição a longo prazo, indicando que o ECG pode conter sinais subclínicos detectáveis por IA. O estudo reforça o papel da IA como ferramenta complementar à estratificação de risco tradicional, embora ressalte que modelos convencionais continuam sendo relevantes.

A inteligência artificial na detecção na doença cardíaca estrutural

Grogan M, et al. (2025) demonstraram a eficácia da inteligência artificial aplicada ao eletrocardiograma na detecção de amiloidose cardíaca, frequentemente subdiagnosticada. Utilizando um modelo de treinamento profundo com ECGs de 12 e seis derivações, alcançaram uma área sob a curva (AUC) de aproximadamente 0,90 e uma precisão de 0,85 com o modelo de seis derivações. Os mapas de sensibilidade indicaram que o algoritmo se concentrava em regiões específicas do traçado, sugerindo padrões sutis associados à presença da doença. Além disso, o modelo foi capaz de identificar sinais preditivos até seis meses antes do diagnóstico clínico, reforçando o potencial da IA como ferramenta de triagem precoce e acessível para amiloidose cardíaca.

Os algoritmos podem analisar a proporção de tempo em que o paciente permanece em FA durante um determinado período para prever o risco de acidente vascular cerebral em curto prazo. Essa abordagem baseada em dados temporais mostrou-se superior aos modelos convencionais que consideram apenas a presença ou ausência de FA, ressaltando o potencial da IA em fornecer uma estratificação de risco mais sensível e personalizada para eventos cerebrovasculares (HAN L, et al., 2019).

Em um modelo de rede neural densa para prever a presença de hipertensão arterial pulmonar a partir de eletrocardiogramas, em uma amostra de 208 registros, o algoritmo alcançou acurácia de aproximadamente 98%, com desempenho consistente entre os conjuntos de treinamento e validação, sem sinais de overfitting (KOSARAJU E e SHANMUGANATHAN PP, 2023). A análise das curvas de perda demonstrou boa capacidade de generalização, indicando o potencial da técnica como método de triagem não invasivo.

Attia ZI, et al. (2020) destacaram o avanço da eletrocardiografia aprimorada por IA na detecção de diversas cardiopatias estruturais, incluindo estenose aórtica, regurgitação mitral, hipertensão pulmonar e amiloidose cardíaca. Os modelos de IA aplicados a ECGs convencionais são capazes de identificar essas condições com alta acurácia, muitas vezes antes da manifestação clínica evidente. Mapas de sensibilidade revelaram que regiões específicas do traçado, como a onda T em derivações precordiais, são particularmente relevantes para o diagnóstico automatizado, sobretudo na estenose aórtica. A IA tem potencial de detectar estenose aórtica com alta acurácia a partir de ECGs, inclusive de derivação única. Os mapas de sensibilidade mostraram que o algoritmo foca na onda T das derivações precordiais para identificar a doença (KWON JM, et al., 2020).

Ribeiro ALP, et al. (2025) apresentaram o algoritmo PRESENT SHD, baseado em aprendizado profundo para triagem de doenças cardíacas estruturais via ECG de 12 derivações. Com mais de 260.000 ECGs de 94.000 pacientes, o modelo alcançou AUC de 0,90 e sensibilidade superior a 90%. Além da alta acurácia diagnóstica, foi eficaz na predição de eventos cardíacos, identificando risco 2 a 4 vezes maior em pacientes com ECGs classificados como de alto risco.

Kashou AH, et al. (2020) destacam que a aplicação da IA ao ECG tem revolucionado o diagnóstico cardíaco, tornando-o mais precoce, preciso e acessível. No entanto, a consolidação clínica ainda exige cautela, devido aos desafios como a generalização dos modelos, a explicabilidade dos algoritmos e a necessidade de validação multicêntrica. A IA deve ser entendida como técnica complementar ao julgamento clínico, exigindo integração cuidadosa aos sistemas de saúde.

Previsão de riscos e integração com variáveis clínicas

De acordo com Boersma LVA, et al. (2020), algoritmos aplicados a sinais de ECG provenientes de dispositivos implantáveis são capazes de prever a progressão da FA por meio da identificação precoce do

remodelamento elétrico. Essa técnica possibilita um acompanhamento personalizado e contínuo do paciente, com implicações clínicas relevantes, com potencial para antecipação de intervenções terapêuticas.

Attia ZI, et al. (2023) desenvolveram uma rede neural profunda capaz de identificar padrões subclínicos no ECG associados ao risco de FA, com alta acurácia preditiva e desempenho superior aos métodos convencionais, evidenciando seu valor para detecção precoce e prevenção. Já ROJEKB et al., (2024) propuseram um modelo de IA baseado apenas em dados clínicos, tais como como idade, IMC e colesterol para prever risco de infarto agudo do miocárdio, sendo o Random Forest o mais eficaz entre os algoritmos testados. A IA que utiliza dados clínicos sem ECG também é eficaz na avaliação de risco, como na previsão de ataques cardíacos Rojek B, et al. (2024). Contudo, a combinação de dados do ECG com variáveis clínicas é mais eficaz na previsão do risco de futuros eventos cardiovasculares, como arritmias, infarto, ataque cardíaco e morte súbita do coração. Conforme Lanuti SM, et al. (2024) a IA foi capaz de detectar padrões sugestivos de isquemia com elevada acurácia, mesmo em traçados com alterações sutis ao ECG, auxiliando no diagnóstico de IAM. Essa combinação de características do ECG com variáveis clínicas, como idade, sexo, comorbidades, eventos prévios cardiovasculares e medicamentos, portanto, possibilita estimativas de risco personalizadas e é crucial para melhorar a precisão. Na realidade, mesmo quando a avaliação do ECG é realizada por cardiologistas, a compreensão das características clínicas do paciente que solicita um ECG resulta em uma avaliação do ECG mais precisa e maior precisão.

Modelos de IA têm se mostrado eficazes na previsão de falência cardíaca na população geral. Usando dados do estudo ARIC, Akbilgic O, et al. (2021) demonstraram que um modelo baseado apenas em ECG atingiu AUC de 0,76, similar ao escore de Framingham (0,78), e que a inclusão de variáveis clínicas elevou a AUC para 0,82. Butler L, et al. (2023) confirmaram que a combinação de ECG com dados clínicos melhora a predição de risco a longo prazo, superando escores tradicionais.

Além disso, Lin C, et al. (2022) mostraram que a IA também identifica rapidamente distúrbios eletrolíticos, como hipo e hipercalemia, especialmente em contextos de atendimento imediato. Apresentou, portanto, não apenas elevada, mas valor prognóstico, sendo útil na previsão de desfechos adversos.

A previsão de riscos cardiovasculares por IA tem avançado com a integração de dados clínicos a modelos baseados em ECG. Essa abordagem multimodal permite maior acurácia e aplicabilidade clínica ao considerar variáveis como histórico médico e sinais fisiológicos. Estudos mostram que algoritmos com dados clínicos superam modelos baseados apenas em ECG na predição de insuficiência cardíaca, FA e eventos adversos, além de oferecerem uma análise mais personalizada. Contudo, sua eficácia ainda depende de validação externa, diversidade populacional e integração com a prática clínica.

Aprimoramento do custo-efetividade

O custo-efetividade é uma das principais métricas na organização da gestão da saúde. Arritmias subclínicas e doenças cardiovasculares são comuns. A possibilidade de serem detectados através do uso generalizado de algoritmos de IA para identificar condições, como FA, em grandes populações que usam relógios inteligentes regularmente, poderia levar a um aumento significativo no número de diagnósticos novos. Embora possam existir custos adicionais associados ao cuidado desses pacientes, a possível diminuição de eventos cardiovasculares, como ataques cardíacos, pode resultar em economia de custos. Pode haver vantagens clínicas a longo prazo de alguns exames de diagnóstico cardiovascular, como no caso de FA ou insuficiência cardíaca.

Segundo Martínez-Sellés M e Marina-Breysse M (2023), algoritmos de IA aplicados ao ECG são úteis em casos clínicos complexos e ajudam a reduzir a carga de doenças cardiovasculares, embora ainda existam poucos estudos sobre seu custo-benefício. A diversidade de populações e sistemas de saúde dificulta generalizações. Ferramentas de triagem com IA demonstram viabilidade econômica (THAO V, et al., 2024), e, em contextos como a hemodiálise, podem antecipar eventos cardiovasculares por meio de alterações em intervalos do ECG e sinais de hipertrofia ventricular. Modelos com sinais de um único condutor também apresentaram desempenho próximo aos de 12 derivações (MARTÍNEZ-SELLÉS M e MARINA-BREYSSE M, 2023).

Tseng AS, et al. (2021) analisaram o uso da inteligência artificial aplicada ao eletrocardiograma como ferramenta de triagem populacional para disfunção ventricular esquerda assintomática. Os autores realizaram a modelagem em diferentes faixas etárias e mostraram que a aplicação sistemática do AI em ECG apresenta um perfil favorável de custo-efetividade, especialmente quando empregada em estratégias preventivas de saúde pública.

A integração da IA ao ECG vem crescendo além da eficiência clínica, demonstrando vantagem econômica para condições como disfunção ventricular, com potencial de aplicação em triagem universal e ambientes hospitalares. Contudo, há demanda por estudos complementares, principalmente envolvendo populações específicas, alternativas tecnológicas e análises de longo prazo para consolidar o uso nos sistemas de saúde.

Validação na prática; seus desafios e restrições na atualidade

Embora todas essas conquistas, é crucial reconhecer diversos desafios e limitações potenciais. Esses podem ser originados primeiramente pelo fato de que os ECGs obtidos de forma rotineira, em contextos reais, podem ser de baixa qualidade. Ademais, apesar de alguns dos modelos poderem funcionar bem em uma determinada população, é crucial que passem por uma avaliação rigorosa de validade externa em diversas populações. A criação de modelos AI-ECG requer uma vasta base de dados para treinamento, validação e testes, tornando as colaborações multicêntricas essenciais. Além disso, aspectos jurídicos e regulatórios da incorporação de diagnósticos baseados em IA abrangem a decisão do clínico em adotá-los ou não, bem como a aprovação de entidades reguladoras. Chitumba HO e Rafael EJM (2022) argumentam que, embora a IA represente uma revolução no campo da saúde, sua incorporação plena ainda esbarra em desafios, tais como a ausência de infraestrutura tecnológica adequada em diversos ambientes, a falta de capacitação dos profissionais para interpretar e utilizar sistemas baseados em IA, além das barreiras éticas e legais relacionadas à privacidade dos dados e à responsabilidade pelas decisões automatizadas. Por fim, existe um desafio institucional e cultural para a incorporação da IA aos fluxos clínicos reais, que exige mudanças nos sistemas de informação e redefinição de responsabilidades na tomada de decisão assistida por algoritmos (MUZAMMIL MA, et al., 2024). Sem esse alinhamento multidisciplinar, a validação prática corre o risco de permanecer restrita ao âmbito experimental, sem efetiva incorporação na rotina médica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises baseadas em inteligência artificial do ECG podem aprimorar e agilizar o diagnóstico e a gestão do paciente. A performance de diagnóstico da IA já se assemelha à de cardiologistas experientes. As análises AI no ECG aparentam ser de baixo custo e podem diminuir a taxa de diagnósticos equivocados baseados em ECG computadorizados, além de melhorar a eficiência clínica, a caracterização do paciente, a classificação de risco, a seleção do tratamento e a otimização. Entretanto, a IA deve ser uma técnica complementar ao julgamento do médico, exigindo a incorporação cuidadosa aos sistemas de saúde.

REFERÊNCIAS

1. ABDAR M, et al. A survey of uncertainty in deep neural networks: techniques, applications and challenges. Artificial Intelligence Review, [S.l.]: Springer, 2023.
2. AKBILGIC O, et al. ECG-AI: electrocardiographic artificial intelligence model for prediction of heart failure. European Heart Journal – Digital Health, 2021; 2(4): 576–585.
3. ANSARI Y, et al. Deep learning for ECG arrhythmia detection and classification: an overview of progress for period 2017–2023. Frontiers in Physiology, Lausanne, 2023; 14: 1246746.
4. ATTIA ZI, et al. Application of artificial intelligence to the electrocardiogram. European Heart Journal, 2021; 42(46): 4717–4730.
5. ATTIA ZI, et al. Artificial intelligence–enhanced electrocardiography in cardiovascular disease management. Nature Reviews Cardiology, 2020; 17(6): 348–358.
6. ATTIA ZI e FRIEDMAN PA. Explainable AI for ECG-based prediction of cardiac resynchronization therapy outcomes: learning from machine learning? European Heart Journal, 2023; 44(8): 693–695.

7. BALADRÓN C, et al. Big data and new information technology: what cardiologists need to know. Revista Española de Cardiología, 2021; 74(1): 81–89.
8. BOERSMA LVA, et al. Personalized monitoring of electrical remodelling during atrial fibrillation progression via remote transmissions from implantable devices. Europace, 2020; 22(12): 1762–1770.
9. BREEN CJ, et al. ECG interpretation skill acquisition: A review of learning, teaching and assessment. Journal of Electrocardiology, 2022; 73: 125–128.
10. BROWNLEE J. Parametric and nonparametric machine learning algorithms. Machine Learning Mastery.com, 2020.
11. BUTLER L, et al. A generalizable electrocardiogram-based artificial intelligence model for 10-year heart failure risk prediction. Cardiovascular Digital Health Journal, 2023; 4(3): 183–190.
12. CHITUMBA HO, RAFAEL, EJM. Inteligência Artificial no campo da saúde: desafios e oportunidades. Revista Angolana de Ciências da Saúde, 2022; 3(2): 1–3.
13. CHRISTOPOULOS G, et al. Artificial intelligence–electrocardiography to predict incident atrial fibrillation: a population-based study. Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology, 2020; 13(12): e009355.
14. CHO J, et al. Artificial Intelligence Algorithm for Screening Heart Failure with Reduced Ejection Fraction Using Electrocardiography. ASAIO Journal, 2020; 67: 314–321.
15. COOK DA, et al. Accuracy of physicians' electrocardiogram interpretations: a systematic review and meta-analysis. JAMA Internal Medicine, 2020; 180(11): 1558–1566.
16. GROGAN M, et al. Artificial Intelligence–Enhanced Electrocardiogram for the Early Detection of Cardiac Amyloidosis. Mayo Clinic Proceedings, 2021; 96: 2768–2778.
17. HAN L, et al. Atrial Fibrillation Burden Signature and Near-Term Prediction of Stroke: A Machine Learning Analysis. Circ Cardiovasc Qual Outcomes, 2019; 12(10): e005595.
18. IGNATOV A, et al. AI Benchmark: Running deep neural networks on Android smartphones. arXiv preprint arXiv, 2018; 1810.01109.
19. KASHOU AH, et al. Artificial Intelligence-Enabled ECG: a Modern Lens on an Old Technology. Current Cardiology Reports, 2020; 22(8): 57.
20. KHUNTE A, et al. Detection of left ventricular systolic dysfunction from single-lead electrocardiography adapted for portable and wearable devices. NPJ Digital Medicine, 2023; 6: 124.
21. KO WY, et al. Detection of Hypertrophic Cardiomyopathy Using a Convolutional Neural Network-Enabled Electrocardiogram. Journal of the American College of Cardiology, 2020; 75(7): 722–733.
22. KOSARAJU E e SHANMUGANATHAN PP, Predicting Pulmonary Hypertension by Electrocardiograms Using Machine Learning. arXiv preprint, 2023.
23. KWON JM, et al. Comparing the performance of artificial intelligence and conventional diagnosis criteria for detecting left ventricular hypertrophy using electrocardiography. Europace, 2020; 22(3): 412–419.
24. LANUTI SM, et al. Inteligência artificial para interpretação de eletrocardiograma no diagnóstico de infarto do miocárdio. Brazilian Journal of Health Review, 2024; 7(2): e69305.
25. LEE J, et al. Detecting structural heart disease from electrocardiograms using AI. Nature, 2025.
26. LIN C, et al. Point-of-care artificial intelligence-enabled ECG for dyskalemia: a retrospective cohort analysis for accuracy and outcome prediction. NPJ Digital Medicine, 2022; 5: 8.
27. LIU CW, et al. Left ventricular hypertrophy detection using electrocardiographic signal. Scientific Reports, 2023; 13: 2556.
28. MARTÍNEZ-SELLÉS M e MARINA-BREYSSE, M. Current and Future Use of Artificial Intelligence in Electrocardiography. Journal of Cardiovascular Development and Disease, 2023; 10(4): 175.
29. MUZAMMIL MA, et al. Artificial intelligence-enhanced electrocardiography for accurate diagnosis and management of cardiovascular diseases. Journal of Electrocardiology, 2024; 83: 30–40.
30. NARAYANAN HN, et al. Deep learning–based fusion of electrocardiogram and echocardiogram for improved prediction of left ventricular hypertrophy. NPJ Digital Medicine, 2023; 6(1): 22.
31. NOSEWORTHY PA, et al. Artificial intelligence–enabled ECG to identify silent atrial fibrillation in high-risk patients: the Mayo Clinic experience. Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology, 2020; 13(3): e008658.

32. PAIXÃO GMM, et al. Introdução ao aprendizado de máquina: princípios e aplicações. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 2022; 2(5): 1–8.
33. RIBEIRO ALP, et al. An ensemble deep learning algorithm for structural heart disease screening using electrocardiographic images: PRESENT-SHD. Journal of the American College of Cardiology, 2025; 85(12): 1302–1313.
34. ROJEK B, et al. Development of AI-Based Prediction of Heart Attack Risk as an Element of Preventive Medicine. Electronics, 2024; 13(2): 272.
35. SIONTIS KC, et al. Artificial intelligence enhanced electrocardiography in cardiovascular disease management. Nature Reviews Cardiology, 2021; 18(7): 465–478.
36. SOMANI R, et al. A systematic review: Effectiveness of interventions to de-escalate workplace violence against nurses in healthcare settings. Safety and Health at Work, 2021; 12(3): 289–295.
37. THAO V, et al. Cost-Effectiveness of Artificial Intelligence-Enabled Electrocardiograms for Early Detection of Low Ejection Fraction. Mayo Clinic Proceedings: Digital Health, 2024; 2(4): 620–631.
38. TORRES F, et al. Inteligência artificial aplicada à cardiologia: avanços recentes. Arquivos Brasileiros de Cardiologia, 2024; 123(5): 450–460.
39. TSENG AS, et al. Cost effectiveness of an electrocardiographic deep learning algorithm to detect asymptomatic left ventricular dysfunction. Mayo Clinic Proceedings, 2021; 96(8): 2112–2123.
40. WU Z e GUO C. Deep learning and electrocardiography: systematic review of current techniques in cardiovascular disease diagnosis and management. BioMedical Engineering OnLine, 2025; 24.