

UMA REVISÃO DE LITERATURA: A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO AUXÍLIO DIAGNOSTICO DE ARRITMIAS ATRAVÉS DO ECG

Data de submissão: 11/11/2024

Data de aceite: 02/01/2025

Fernanda Celente Amorim

Discente da Universidade de Vassouras (UV), Vassouras, RJ, Brasil

Gabriela Ferreira Barbosa

Discente da Universidade de Vassouras (UV), Vassouras, RJ, Brasil

Diego Pena Desterro e Silva

Docente da Universidade de Vassouras (UV), Vassouras, RJ, Brasil

Virtual em Saúde (BVS) rendeu uma amostra final de 36 artigos. Os resultados indicam um progresso significativo em modelos de aprendizado profundo e abordagens híbridas, as quais combinam dados de ECG em tempo real com parâmetros clínicos. Alcançando alta precisão diagnóstica na detecção de arritmias complexas, como fibrilação atrial e a Síndrome de Brugada. Estudos demonstram que modelos de IA, particularmente redes neurais convolucionais, oferecem alta sensibilidade e especificidade na análise de ECG. Embora a heterogeneidade metodológica e as limitações de dados dificultem a aplicabilidade clínica. Além disso, os desafios de interpretabilidade e transparência limitam a clínica mais ampla, destacando a necessidade de metodologias padronizadas, conjuntos de dados maiores, mais heterogêneos e modelos de mais fácil implantação. Ferramentas de monitoramento de curto prazo, como dispositivos Holter de 2 horas, mostram-se promissoras para detecção eficiente das arritmias, enquanto abordagens multimodais que integram dados clínicos aumentam a precisão preditiva. Apesar desses avanços, a validação externa e os testes populacionais diversos continuam

RESUMO: Doenças cardiovasculares continuam sendo a principal causa de mortalidade no mundo, ressaltando a necessidade de abordagens inovadoras na detecção precoce e de um diagnóstico preciso. A inteligência artificial (IA) surgiu como uma ferramenta transformadora, fornecendo análise rápida e precisa de conjuntos de dados extensos, apoiando profissionais de saúde na tomada de decisões clínicas. Este estudo tem como objetivo analisar avanços recentes em diagnósticos de arritmia baseados em IA através do eletrocardiograma (ECG), por meio de uma revisão bibliográfica integrativa retrospectiva e transversal. Uma busca estruturada no PubMed e na Biblioteca

essenciais. Considerações éticas, incluindo privacidade do paciente e uso responsável de IA, são essenciais para dar suporte a uma integração sustentável na cardiologia. Embora os modelos de IA forneçam ferramentas promissoras para diagnósticos de arritmia, a transição da pesquisa para a prática clínica requer uma abordagem equilibrada que alinhe a inovação com a responsabilidade clínica e ética.

PALAVRAS-CHAVE: Inteligência Artificial; Diagnóstico; Arritmia; Cardiologia.

A LITERATURE REVIEW: ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AIDING DIAGNOSTIC ARRHYTHMIAS THROUGH ECG

ABSTRACT: Cardiovascular diseases remain the leading cause of mortality worldwide, highlighting the need for innovative approaches to early detection and accurate diagnosis. Artificial intelligence (AI) has emerged as a transformative tool, providing rapid and accurate analysis of large data sets, supporting healthcare professionals in clinical decision-making. This study aims to analyze recent advances in AI-based arrhythmia diagnostics using electrocardiogram (ECG) data, through a retrospective and cross-sectional integrative literature review. A structured search in PubMed and the Virtual Health Library (VHL) yielded a final sample of 36 articles. The results indicate significant progress in deep learning models and hybrid approaches, which combine real-time ECG data with clinical parameters, achieving high diagnostic accuracy in the detection of complex arrhythmias, such as atrial fibrillation and Brugada Syndrome. Studies demonstrate that AI models, particularly convolutional neural networks, offer high sensitivity and specificity in ECG analysis. Although methodological heterogeneity and data limitations hamper clinical applicability, interpretability and transparency challenges further limit broader clinical application, highlighting the need for standardized methodologies, larger, more heterogeneous datasets, and easier-to-deploy models. Short-term monitoring tools such as 2-hour Holter devices show promise for efficient arrhythmia detection, while multimodal approaches that integrate clinical data improve predictive accuracy. Despite these advances, external validation and diverse population testing remain essential. Ethical considerations, including patient privacy and responsible use of AI, are essential to support sustainable integration in cardiology. While AI models provide promising tools for arrhythmia diagnostics, the transition from research to clinical practice requires a balanced approach that aligns innovation with clinical and ethical responsibility.

INTRODUÇÃO

A doença cardiovascular continua sendo a principal causa de morte no mundo, demandando novas abordagens para detecção precoce e diagnósticos precisos (Sinha et al., 2024). A inteligência artificial (IA) tem se destacado como uma ferramenta transformadora, permitindo a análise rápida e precisa de grandes volumes de dados, auxiliando na tomada de decisão pelos profissionais de saúde (Muzammil et al., 2024). O eletrocardiograma (ECG) é um exame primordial na prática clínica. O método tradicional, baseado na leitura do formato das ondas, tem limitações na detecção de anomalias sutis e na correlação com dados clínicos (Pasero et al., 2023). Com o avanço da tecnologia, a análise que integra

dados clínicos, como pressão arterial e frequência cardíaca, tem mostrado melhores resultados no contexto das doenças cardiovasculares (Huang et al., 2024).

As tecnologias de IA, como deep learning (DL), Machine Learning (ML) e convolutional neural network (CNN), têm sido amplamente utilizadas, embora enfrentem desafios relacionados à quantidade e qualidade dos dados para treinamento dos algoritmos, que podem levar a diagnósticos incorretos se não forem adequadamente geridos (Muzammil et al., 2024). Além disso, questões éticas sobre privacidade e segurança dos dados representam obstáculos à implementação dessas tecnologias (Zhao et al., 2024).

Apesar dos desafios, a IA mostra-se promissora, especialmente no diagnóstico de arritmias. Algoritmos bem treinados podem identificar anomalias específicas, como intervalo QT curto, que podem passar despercebidas à análise humana (Park et al., 2024). A popularização dos smartwatches permite a monitorização cardíaca contínua e a identificação de eventos que, anteriormente, poderiam não ser percebidos (Ouyang et al., 2024). Contudo, é importante ressaltar que essas tecnologias não substituem o julgamento clínico dos médicos, mas visam aumentar a precisão diagnóstica e a segurança na tomada de decisão.

METODOLOGIA

A presente pesquisa tem como objetivo analisar os avanços da Inteligência Artificial (IA) no auxílio ao diagnóstico de arritmias por meio do eletrocardiograma (ECG). Trata-se de um estudo retrospectivo e transversal, conduzido através de uma revisão de literatura integrativa. A escolha desta metodologia se justifica pela sua capacidade de sintetizar evidências de múltiplas fontes e permitir uma visão abrangente do tema investigado. Segundo Souza *et al.* (2010), a revisão integrativa é adequada para sumarizar pesquisas já realizadas, proporcionando uma visão geral do estado atual do conhecimento e possibilitando a inclusão de diferentes abordagens metodológicas, o que enriquece a análise.

As bases de dados consultadas foram a *National Library of Medicine* (PubMed) e a *Biblioteca Virtual em Saúde* (BVS). A busca foi realizada utilizando os descritores: “Artificial Intelligence”, “Diagnostic”, “Arrhythmia” e “Cardiology”, combinados através do operador booleano “AND”. O uso de descritores controlados e operadores booleanos, conforme sugerido por Higgins *et al.* (2021), garante que a busca seja direcionada e abrangente, maximizando a recuperação de estudos relevantes ao tema central.

CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Os critérios de inclusão foram definidos com o objetivo de selecionar estudos recentes e de qualidade. Foram incluídos artigos publicados no último ano, disponíveis nos idiomas inglês e português, e com acesso livre. A aplicação de critérios claros e bem definidos, conforme recomendado por Whittemore e Knafl (2005), é essencial para reduzir vieses e aumentar a validade dos resultados da revisão, garantindo que apenas estudos

diretamente relacionados ao diagnóstico de arritmias utilizando IA sejam considerados. Foram excluídos artigos duplicados, aqueles que utilizavam métodos diagnósticos diferentes do eletrocardiograma e não abordavam o diagnóstico de arritmias. Artigos que incluíram fatores genéticos foram excluídos, restando 36 artigos.

COLETA E FILTRAGEM DOS DADOS

A busca inicial resultou em um total de 579 artigos, sendo 559 da base *PubMed* e 20 da BVS. Desses, 133 artigos da *PubMed* foram publicados no último ano, dos quais 131 estavam disponíveis em inglês ou português. Após a aplicação do critério de acesso livre, restaram 77 artigos elegíveis. Na BVS, 5 artigos foram publicados no último ano, todos em português ou inglês e com acesso liberado. A triagem cuidadosa dos estudos selecionados, conforme sugerido por Polit e Beck (2017), foi essencial para garantir a validade dos dados e evitar a duplicidade de informações.

AMOSTRA FINAL

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, o processo de triagem resultou em uma amostra final de 36 artigos, que servem como base para a análise e discussão dos avanços da IA no diagnóstico de arritmias. A seleção rigorosa dos estudos, conforme as diretrizes metodológicas utilizadas, assegura que os resultados apresentados na revisão reflitam o estado atual da pesquisa na área.

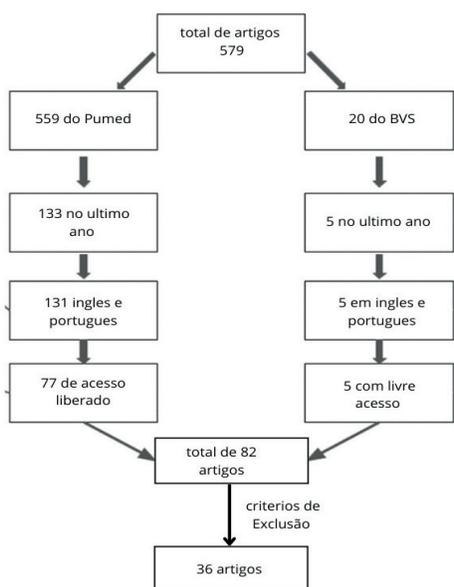


Figura 1. Fluxograma de identificação e seleção dos artigos selecionados nas bases de dados *PubMed* e BVS

Fonte: Elaboração própria (2024).

NOME	TIPO / AUTOR	RESULTADOS
Accuracy of Artificial Intelligence-Based Technologies for the Diagnosis of Atrial Fibrillation: A Systematic Review and Meta-Análises	Revisão sistemática e meta-análise / Manetas-Stavrakakis et al. (2023)	Métodos baseados em IA demonstraram alta sensibilidade e especificidade para detecção de FA. Mais pesquisas são necessárias para avaliar seu impacto nos resultados clínicos. Detecção precoce pode potencialmente reduzir eventos tromboembólicos associados a FA. A variabilidade em traçados não classificados sugere melhoria para IA.
An Artificial Intelligence Analysis of Electrocardiograms for the Clinical Diagnosis of Cardiovascular Diseases: A Narrative Review	Revisão narrativa /Constanzo et al. (2024)	A medicina moderna enfrenta o desafio de reconhecer e superar as limitações da IA, garantindo que os avanços tecnológicos possam ser usados de forma segura e eficaz para melhorar o diagnóstico e tratamento de doenças cardiovasculares. A integração cuidadosa da IA com a prática clínica pode transformar a abordagem diagnóstica, mas requer uma análise crítica contínua das suas limitações e impactos.
An improved method to detect arrhythmia using ensemble learning-based model in multi lead electrocardiogram (ECG)	Artigo Metodológico/ Original/ Mandala et al. (2024)	Os autores propõem uma nova abordagem de aprendizado de conjunto, utilizando o algoritmo Fine Tuned Boosting (FTBO), que permite a detecção de várias classes de arritmia com dados de ECG de múltiplas derivações. o método proposto alcançou alta sensibilidade e especificidade: 100% para Fibrilação Atrial, 99% para Contração Ventricular Prematura e quase 96% para Contração Atrial Prematura. O estudo conclui que a nova abordagem tem grande potencial para a detecção precoce de arritmias usando dados de ECG de múltiplas derivações.
Arrhythmia classification based on multi-feature multi-path parallel deep convolutional neural networks and improved focal loss	Artigo metodologia/ Original Ran et al.	Os autores propõem a aplicação de rede neural convolucional profunda para classificação de arritmias, usando o ECG. O foco principal é superar as similaridades dos batimentos normais e batimentos prematuros supraventriculares. O resultado do método supera os modelos anteriores, sendo uma abordagem promissora.
Artificial Intelligence ECG Analysis in Patients with Short QT Syndrome to Predict Life-Threatening Arrhythmic Events	Avaliação de desempenho / Pasero et al.	Estudo avalia a capacidade dos diferentes algoritmos da IA em discriminar pacientes com síndrome do QT curto que tiveram eventos arrítmicos documentados e os que não tiveram. Foram usadas redes neurais rasas e algoritmos de aprendizado profundo. A pesquisa demonstrou que a IA pode melhorar a estratificação do risco de arritmias em pacientes com SQTs. As redes neurais rasas se destacaram no desempenho, principalmente as que não desenvolveriam eventos letais.
Artificial Intelligence in Sports Medicine: Reshaping Electrocardiogram Analysis for Athlete Safety-A Narrative Review	Revisão Narrativa / Smaranda et al.	Narrativa sobre o impacto da IA no ECG durante o exame pré-Participação de atletas e como ela vem revolucionando a detecção e monitoramento contínuo da saúde cardiovascular no esporte. A IA proporciona diagnósticos rápidos, precisos e ajuda a prevenir eventos cardíacos graves durante a prática esportiva, como exemplo da morte súbita.

Artificial intelligence-enhanced electrocardiography for accurate diagnosis and management of cardiovascular diseases	Revisão narrativa/ Muzammil et al (2024)	O texto explora como a IA no ECG está revolucionando o diagnóstico de doenças cardiovasculares. Discute sobre o viés sistemático relacionado a dados demográficos sub-representados, falta de diversidade no conjunto de dados prejudica a generalização dos modelos. O uso responsável e cuidadoso da IA, considerando suas limitações, tem potencial de melhorar diagnósticos e resultados.
Artificial-intelligence-based risk prediction and mechanism discovery for atrial fibrillation using heart beat-to-beat intervals	Artigo Original / Lin et al.	Criação de um modelo de deep learning para prever risco de FA usando apenas o Intervalo de batimentos durante ritmo sinusal. O modelo teve bom desempenho em conjunto com dados públicos internos e externos. Descoberto que o desequilíbrio autonômico está associado a todos os fatores de risco. O modelo previu efetivamente o risco de FA. #estudo financiado pelo Nacional key R&D.
Atrial Fibrillation Detection with Single-Lead Electrocardiogram Based on Temporal Convolutional Network-ResNet	Artigo Original / Zhao et al	O estudo integra as estruturas de rede convolucional temporal e rede residual (ResNet) para classificar efetivamente a FA pelo ECG de derivação única. O modelo demonstrou sucesso significativo para detecção, com uma taxa de 97% de precisão.
AttBiLFNet: A novel hybrid network for accurate and efficient arrhythmia detection in imbalanced ECG signals	Artigo Original / Efe e Yavsan	Foi proposto um modelo híbrido, AttBiLFNet, para detecção precisa de arritmias em sinais ECG. Ele integra uma rede bidirecional - Long Short - Term Memory com uma rede neural convolucional. Modelo sugeriu precisão de 99,55%. Evidências empíricas mostraram que o AttBiLFNet superou outros métodos em termos de precisão e eficiência computacional. O modelo introduzido serve como uma ferramenta confiável para a identificação oportuna de arritmias.
Cardiac Arrhythmia Classification Using Advanced Deep Learning Techniques on Digitized ECG Datasets	Artigo Original/ Sattar et al.	Comparam modelos de DI, CNN, rede de memória a curto prazo(LSTM) e um modelo de aprendizado autos supervisionado. O modelo de CNN atingiu a maior precisão, usar a forma digitalizada ECG ao invés de imagens permite usar o modelo diretamente da máquina de ECG, monitoramento em tempo real.
Cardiologist-level interpretable knowledge-fused deep neural network for automatic arrhythmia diagnosis	Artigo Original/ Jin et al.	Modelo proposto, DL, comparando o desempenho de cardiologista e outros 6 modelos de DL. O modelo superou os médicos, demonstrando sua eficácia. O que facilita e agiliza o diagnóstico clínico.

<p>Clinical Applications, Methodology, and Scientific Reporting of Electrocardiogram Deep-Learning Models: A Systematic Review</p>	<p>Revisão Sistemática / Avula et al</p>	<p>O objetivo foi mapear o estado atual desses modelos e examinar as práticas metodológicas no relato científico dos estudos. identificou 44 manuscritos que descrevem 53 modelos de aprendizado profundo de ECG clinicamente relevantes. A identificação de cardiomiopatias foi a mais comum (26%), seguida pela detecção de arritmias (17%). No entanto, o estudo destaca variações significativas nos métodos de relato científico. Embora 75% das publicações incluíssem diagramas de arquitetura dos modelos, apenas 23% forneciam informações completas para permitir a reprodução dos modelos. A análise de saliência, que ajuda a interpretar os resultados dos modelos, foi realizada em menos da metade das publicações (46%). Além disso, apenas 34% dos modelos foram testados em coortes de validação externa, e menos de 12% disponibilizaram o código-fonte ou os recursos necessários para a implementação por outros grupos.</p> <p>A conclusão do estudo aponta para a necessidade de aderir a diretrizes padronizadas de relato científico para melhorar a transparência, reprodutibilidade e validação dos modelos de aprendizado profundo em ECG, visando facilitar a adoção clínica e promover inovações no campo.</p>
<p>Continuous Atrial Fibrillation Monitoring From Photoplethysmography: Comparison Between Supervised Deep Learning and Heuristic Signal Processing</p>	<p>Artigo Original / Antiperovitch et al (2024)</p>	<p>Este estudo comparou dois métodos de monitoramento contínuo de fibrilação atrial (FA) usando sinais de fotopletismografia (PPG) em pacientes vivendo livremente: um modelo heurístico de processamento de sinal (SP) e uma rede neural profunda convolucional (DNN). Ideia de comparar o desempenho no contexto de monitoramento contínuo. As DNNs demonstram desempenho tão bom quanto os modelos SP, mas com a vantagem de classificar um volume muito maior de dados, tornando-se uma ferramenta promissora para monitoramento contínuo de PPG. O que pode ser útil no monitoramento para FA.</p>
<p>Deep learning unmasks the ECG signature of Brugada syndrome</p>	<p>Artigo Original/ Melo et al.</p>	<p>Elaboramos um algoritmo de aprendizado de máquina que extrai, alinha e classifica formas de onda de ECG para a presença de Síndrome de Brugada. Bloqueador de canal de sódio pode revelar características do ECG previamente ocultas, porém, seu uso traz riscos pró-arrítmicos fatais. Este algoritmo tem sucesso sem o uso do fármaco, com uma precisão de 88,4%.</p>
<p>Deep learning-based multimodal fusion of the surface ECG and clinical features in prediction of atrial fibrillation recurrence following catheter ablation</p>	<p>Artigo Original/ Qiu et al</p>	<p>Um algoritmo para prever a recorrência de FA após ablação por radiofrequência combinado com ECG e com características clínicas e aproveitou o DL para identificar pacientes com maior risco de recorrência. Resultados: usando apenas o ECG, a sensibilidade foi de 75,5% e especificidade de 61,1% e combinando com as características clínicas, a sensibilidade subiu para 81,1% e a especificidade para 81,7%. O que indica que a combinação de dados melhora significativamente a capacidade preditiva do modelo.</p>

Development and Validation of a Real-Time Service Model for Noise Removal and Arrhythmia Classification Using Electrocardiogram Signals	Artigo Original/ Park et al.	Este estudo se concentrou no desenvolvimento de um novo modelo de aprendizado profundo para a detecção precisa de arritmias a partir de dados de ECG capturados por dispositivos vestíveis, utilizando uma combinação de redes adversárias generativas (GANs) e redes residuais (ResNet). A ideia principal foi resolver o desafio de dados ruidosos frequentemente capturados por esses dispositivos e melhorar a precisão da detecção de arritmias. O modelo de GAN conseguiu melhorar a relação sinal-ruído (SNR) em mais de 30 dB, resultando em sinais de ECG muito mais claros. O modelo de ResNet, após a remoção de ruído, alcançou uma pontuação F1 impressionante de 99,10% ao classificar diferentes tipos de arritmias em dados refinados. O modelo tem potencial para ser implementado em dispositivos vestíveis, oferecendo monitoramento contínuo, notificação imediata ao paciente e facilitando uma resposta médica rápida e oportuna.
Dynamic electrocardiogram changes are a novel risk marker for sudden cardiac death	Artigo Original/ Pham et al.	Este estudo explorou a relevância da remodelação dinâmica do ECG como um marcador de risco para morte súbita cardíaca (MSC). O objetivo foi avaliar se a progressão de anormalidades no ECG ao longo do tempo pode melhorar a previsão do risco de MSC. A remodelação foi medida por pontuação de risco elétrico cumulativa. Encontrado um aumento significativo da pontuação de risco ao longo do tempo nos casos de MSC em comparação com os controles. Uma melhora na previsão de risco de MSC com a inclusão da remodelação em modelos multivariados.
Dynamic prediction of malignant ventricular arrhythmias using neural networks in patients with an implantable cardioverter-defibrillator	Artigo Original/ Kolk et al.	Investiga uma abordagem dinâmica para a estratificação de risco de arritmias ventriculares malignas (AVMs) em pacientes com cardioversor-desfibrilador implantável (CDI). Os pesquisadores desenvolveram e validaram um modelo dinâmico de aprendizado de máquina (ML) e redes neurais capazes de prever o risco com base em eletrocardiogramas (ECGs) longitudinais. Foram utilizados autocodificadores variacionais (VAEs). As análises mostraram que mudanças dinâmicas nas representações latentes de ECG, especialmente aquelas relacionadas à morfologia da onda T, foram as mais importantes para as previsões do modelo. O uso de modelos dinâmicos de aprendizado de máquina e redes neurais baseadas em ECGs longitudinais permitiu a criação de previsões personalizadas e atualizadas de AVMs, superando modelos estáticos.
ECG-only explainable deep learning algorithm predicts the risk for malignant ventricular arrhythmia in phospholamban cardiomyopathy	Estudo Original/ Van de Leur et al.	Estudo investiga se o Algoritmo consegue prever o risco de portadores da variante p.(Arg14del) de fosfolambam (PLN) correm o risco de desenvolver arritmia ventricular maligna (AVM) com base somente em dados ECG. O algoritmo foi um sucesso, prevendo com precisão e estratificação mais eficiente dos pacientes.
Electrocardiographic deep learning for predicting post-procedural mortality: a model development and validation study	Retrospectivo de coorte Ouyang et al.(2023) /	Avaliação de risco pré-operatórias utilizando o DL através do ECG para prever mortalidade no pós-operatório. Algoritmo demonstrou melhor previsão de mortalidade pós-operatória.

Erroneous electrocardiographic interpretations and its clinical implications	Retrospectivo descritivo/ Shaik et al. (2023)	Análise dos ECGs interpretados por algoritmos no departamento de emergência para avaliar erros de interpretação e seu impacto clínico.
Generalising electrocardiogram detection and delineation: training convolutional neural networks with synthetic data augmentation	Estudo Descritivo/ Jimenez-Perez et al.	Desenvolvimento e validação de algoritmo de aprendizado de máquina supervisionada para ECG. O estudo incluiu a criação de dados sintéticos para treinamento do modelo. O modelo alcança F1 de 99,3%, superando as abordagens anteriores. A abordagem se destaca pela capacidade de generalizar os diferentes cenários médicos. Tornando uma ferramenta promissora.
Identification of Brugada syndrome based on P-wave features: an artificial intelligence-based approach	Observacional retrospectivo. Zanchi et al./	Desenvolvimento de um algoritmo capaz de identificar a síndrome de Brugada com base nas características da onda P extraídas de ECG pré-existentes. Desenvolvimento e validação de modelo preditivo.
Identification of recurrent atrial fibrillation using natural language processing applied to electronic health records	Retrospectivo observacional / Zheng et al.	Desenvolvimento e aplicação de um Processamento de Linguagem natural (PNL) que identifica FA em pacientes que iniciaram terapias de controle do ritmo, utilizando registros eletrônicos de saúde. Quando comparado com a abordagem baseada em código sozinha, o algoritmo identificou significativamente mais pacientes com FA. Permite a avaliação da eficácia do tratamento de terapias da FA.
Improved diagnostic performance of insertable cardiac monitors by an artificial intelligence-based algorithm	Artigo Original/ Crespin et al.	Com o aumento do uso de monitores cardíacos inseríveis, ocorre uma alta taxa de falso-positivo. O estudo avaliou o desempenho de um analisador de ECG baseado em IA, visando reduzir os falsos-positivos sem comprometer a sensibilidade do dispositivo. Foi selecionado um único episódio anormal por paciente. A IA reclassificou 76% dos FP como normais e confirmou 98% dos episódios anormais. A especificidade foi de 76% e a sensibilidade de 98%. Reduzindo os diagnósticos de FP mantendo a sensibilidade. Reduzindo a carga de trabalho dos profissionais da saúde.
Innovative approaches to atrial fibrillation prediction: should polygenic scores and machine learning be implemented in clinical practice?	Revisão sistemática Petzl et al.	A previsão e triagem da FA vêm tendo grande relevância clínica devido ao potencial de prevenção de eventos adversos graves. Esta revisão examina as evidências atuais sobre o uso de aprendizado profundo (deep learning) e escores de risco poligênico na previsão de FA incidente, destacando o potencial de implementação dessas tecnologias na prática clínica, bem como as limitações e áreas que requerem melhorias.
International avaliação of an artificial intelligence-powered electrocardiogram model detecting acute coronary occlusion myocardial infarction	Artigo Original/ Herman et al.	Este estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de inteligência artificial (IA) para detectar infarto do miocárdio com oclusão (OMI) aguda em eletrocardiogramas (ECGs) de 12 derivações e compará-lo com os critérios tradicionais de infarto com elevação do segmento ST (STEMI) e especialistas em ECG. A IA demonstrou um desempenho semelhante ao dos especialistas, superou os critérios de STEMI.

Machine learning of electrophysiological signals for the prediction of ventricular arrhythmias: systematic review and examination of heterogeneity between studies.	Revisão sistemática. /Kolk et al.	la com ML e DL para previsões personalizadas de eventos arrítmicos pelo ECG. Os modelos de ML e DL mostraram uma boa previsão de Arritmias ventriculares e eventos de morte subida. Porém, a heterogeneidade dos estudos, principalmente pelos pequenos conjuntos de dados, compromete a generalização dos resultados.
Mapping of Neuro-Cardiac Electrophysiology: Interlinking Epilepsy and Arrhythmia	Revisão/ Senapati et al.	Mapeamento da eletrofisiologia neurocardíaca no manejo das epilepsias e arritmias. Discutem também os desafios e limitações como qualidade de dados, dificuldade de interpretar modelos preditivos, questões éticas. # questões éticas.
Model for classification of heart failure severity in patients with hypertrophic cardiomyopathy using a deep neural network algorithm with a 12-lead electrocardiogram	Artigo Original/ Togo et al. *	O estudo busca avaliar a aplicação de métodos de aprendizado profundo (DL) para identificar a gravidade da insuficiência cardíaca (IC) em pacientes com cardiomiopatia hipertrofica (HCM), com base em anormalidades no eletrocardiograma (ECG). Pacientes de IC foram classificados com base na NYHA e nos níveis de pró BNP e Kansas City Cardiomyopathy Questionnaire (KCCQ)-12. O modelo atingiu 0,745 media e precisão de 0,750 para a classificação da IC, com resultados semelhantes para o KCCQ-12. Revelaram que QRS foram intensamente destacados no caso de IC leve a moderada, enquanto os graves tiveram uma maior variabilidade. O algoritmo demonstrou potencial para auxílio adicional.
Navigating the Future of Cardiac Diagnostics: Insights From Artificial Neural Networks	Revisão /Sinha et al.	Redes neurais artificiais (RNAs) são capazes de aprender padrões complexos, oferecendo análises preditivas e melhorando a identificação de riscos cardiovasculares, possibilitando intervenções rápidas. A integração dessas redes com dispositivos versáteis e telemedicina pode criar um ecossistema de saúde conectado, permitindo o monitoramento contínuo e abrangente.
Scalable Approach to Consumer Wearable Postmarket Surveillance: Development and Validation Study	Artigo Original / Yoo et al.	O artigo visa demonstrar a eficácia de uma nova abordagem de vigilância baseada em EHR para monitorar e diagnosticar FA, usando dados gerados por wearables de consumo, o que pode ter implicações significativas para a prática clínica e o manejo de pacientes.
The diagnostic efficiency of artificial intelligence based 2 hours Holter monitoring in premature ventricular and supraventricular contractions detection	Estudo de Coorte/Huang et al.	Holter de derivação única de 2h baseado em IA para aprimorar a detecção dessas arritmias(contrações ventriculares e supraventriculares prematuras). Os pacientes usaram simultaneamente o holter de 24h e o de 2h comparando a eficiência dos dois métodos. O n 170 pacientes. Valor preditivo negativo foi de 96,35%. Sensibilidade de 76%, especificidade de 95,65%.
Validation of an automated artificial intelligence system for 12-lead ECG interpretation	Artigo Original/ Herman et al.	Apesar dos avanços na interpretação computadorizada do eletrocardiograma (CIE), sua precisão continua inferior à dos médicos. Este estudo avaliou o desempenho diagnóstico de um sistema de ECG alimentado por inteligência artificial (IA) e comparou seu desempenho ao CIE de última geração. O Algoritmo de 6 redes neurais profundas. O desempenho superou o CIE.

Tabela 1 – Amostra da pesquisa.

Fonte: Acervo dos autores com base nas pesquisas (2024)

RESULTADOS

Conforme a tabela (1) foram apresentados avanços importantes com ênfase em modelos de aprendizado profundo e abordagens híbridas. Estudos recentes indicam que a IA aplicada a ECGs proporciona uma acurácia elevada na detecção de arritmias complexas, como a fibrilação atrial (FA) e a síndrome de Brugada. O modelo desenvolvido por Antiperovitch et al. (2024), comparando redes neurais profundas com métodos heurísticos, evidenciou um aumento significativo na precisão da detecção de FA, enquanto estudos como o de Lin et al. (2024) ampliaram o uso de IA para análise de intervalos de batimento cardíaco com foco na predição de risco.

Diversas revisões sistemáticas, incluindo Avula et al. (2023) e Kolk et al. (2024), discutem a heterogeneidade metodológica entre estudos e sugerem que o desenvolvimento de metodologias padronizadas e conjuntos de dados robustos é essencial para uma validação clínica eficaz. Isso é apoiado por análises mais amplas, como as de Costanzo et al. (2024), que identificaram que modelos de aprendizado profundo apresentam melhor desempenho quando combinados com técnicas de aumento de dados sintéticos, conforme abordado por Jimenez-Perez et al. (2024).

Além disso, a revisão identificou o sucesso de modelos híbridos que integram dados clínicos e de ECG em tempo real, conforme demonstrado por estudiosos como Crespín et al. (2023), que relataram melhorias na precisão diagnóstica de dispositivos implantáveis para monitoramento cardíaco. Sistemas como o AttBiLFNet de Efe e Yavsan (2024), que empregam redes neurais para detecção de arritmias em sinais de ECG desequilibrados, mostraram-se promissores na identificação de arritmias ventriculares.

Em relação à eficácia preditiva, o estudo de Herman et al. (2024) sobre a validação de sistemas automatizados de ECG de 12 derivações e os resultados de Huang et al. (2024) com o monitoramento Holter de 2 horas indicam que a IA oferece não só uma alternativa viável, mas também mais eficiente em termos de tempo de monitoramento e sensibilidade diagnóstica. As taxas de sensibilidade e especificidade relatadas em monitoramento contínuo confirmam a aplicabilidade desses modelos em cenários de alto risco.

Entretanto, a revisão também destacou desafios, como a necessidade de maior generalização dos modelos de IA, conforme abordado por autores como Petzl et al. (2024) e Melo et al. (2023), e uma maior transparência nas abordagens, como sugerido por Sinha et al. (2024). Essas limitações indicam a necessidade de validações externas rigorosas e padronizações no desenvolvimento de modelos de IA para assegurar sua aplicabilidade clínica.

DISCUSSÃO

A aplicação de inteligência artificial (IA) no diagnóstico e monitoramento de arritmias cardíacas representa um avanço significativo na cardiologia digital, mas também apresenta

desafios consideráveis. A análise dos estudos revisados revelou um futuro promissor, especialmente na detecção e no monitoramento contínuo de arritmias complexas, como a fibrilação atrial (FA) e as arritmias ventriculares. Estudos como o de Antiperovitch et al. (2024), que compara redes neurais profundas a métodos heurísticos, demonstraram que modelos de aprendizado profundo podem superar abordagens tradicionais, oferecendo maior acurácia e potencial de aplicação prática em dispositivos de monitoramento portátil. Essa descoberta se alinha ao crescente interesse no uso de IA para melhorar a acessibilidade e precisão no diagnóstico de arritmias.

A precisão diagnóstica alcançada com abordagens baseadas em IA, como as discutidas por Costanzo et al. (2024) e Kolk et al. (2024), tem sido impactada positivamente pelo uso de redes neurais convolucionais, que podem detectar e interpretar sinais de ECG com alta sensibilidade e especificidade. No entanto, há uma notável heterogeneidade metodológica entre os estudos, o que sugere que a padronização de protocolos de treinamento e a criação de bases de dados mais diversas e representativas seriam essenciais. De modo a reduzir o viés dos modelos e melhorar sua aplicabilidade clínica, conforme mencionado por Avula et al. (2023) e Herman et al. (2024).

Embora os estudos revelem que modelos de IA, como o AttBiLFNet de Efe e Yavsan (2024), apresentam alta eficácia na identificação de arritmias em sinais desequilibrados, os desafios da generalização permanecem evidentes. Estes desafios são reforçados por autores como Sinha et al. (2024), que apontam a falta de transparência e interpretabilidade dos modelos de IA como um obstáculo para a aceitação clínica mais ampla. A necessidade de metodologias explicáveis e de uma interpretação que acompanhe a precisão dos diagnósticos gerados é crucial para o uso responsável da IA nas emergências e hospitais.

Os benefícios potenciais do uso de IA no monitoramento de curto prazo, como no estudo de Huang et al. (2024) com o Holter de 2 horas, são promissores, uma vez que esses dispositivos proporcionam diagnósticos rápidos e convenientes, mantendo níveis elevados de acurácia. Esse método permite um monitoramento menos invasivo e pode reduzir o tempo necessário para a detecção de anomalias, facilitando a adesão dos pacientes e tornando o processo mais eficiente. No entanto, sua implementação prática depende de estudos futuros que possam validar esses achados em larga escala e em populações mais diversas.

O uso de dados clínicos adicionais integrados aos algoritmos de IA, como observado nos estudos de Crespin et al. (2023) e Jimenez-Perez et al. (2024), enfatiza a importância de uma abordagem multimodal. Ao combinar sinais de ECG com informações clínicas, os modelos de IA se mostram mais robustos na detecção e previsão de arritmias, melhorando o valor diagnóstico e preditivo de cada exame. Contudo, isso exige um desenvolvimento tecnológico contínuo para garantir que essas ferramentas multimodais sejam economicamente viáveis e integráveis ao fluxo de trabalho clínico.

A implementação desses avanços em IA também demanda uma discussão ética e

prática em torno da segurança, privacidade e uso ético dos dados dos pacientes. Autores como Petzl et al. (2024) destacam que o uso de IA para a predição de eventos arrítmicos deve ser acompanhado por regulamentações que protejam as informações dos pacientes e assegurem o uso responsável da tecnologia, evitando dependência excessiva de sistemas automatizados.

LIMITAÇÕES E DIREÇÕES FUTURAS

Apesar dos avanços, a revisão revela uma limitação na aplicabilidade desses modelos de IA fora dos ambientes controlados de pesquisa. Muitos modelos revisados necessitam de validações externas mais rigorosas e de testes em amostras populacionais diversificadas para confirmar sua aplicabilidade clínica em larga escala. Direções futuras devem focar no desenvolvimento de bases de dados mais inclusivas e representativas, no aprimoramento da interpretabilidade dos modelos e na criação de diretrizes padronizadas que facilitem a integração da IA em práticas clínicas.

Em conclusão, embora os modelos de IA estejam proporcionando novas perspectivas para o diagnóstico de arritmias e para o monitoramento cardíaco, a transição para a prática clínica ainda requer considerações cuidadosas em termos de eficácia, segurança e aplicabilidade prática. Os estudos revisados apontam para um potencial considerável de IA na cardiologia, mas reforçam a necessidade de uma abordagem equilibrada que integre inovação com responsabilidade clínica e ética.

CONCLUSÃO

A aplicação de inteligência artificial (IA) no diagnóstico e monitoramento de arritmias via eletrocardiograma (ECG) representa uma inovação promissora na cardiologia moderna, com potencial para aprimorar a acurácia e a eficiência dos diagnósticos. Esta revisão de literatura destaca avanços significativos em modelos de aprendizado profundo e híbridos que permitem a identificação de arritmias complexas, como a fibrilação atrial e arritmias ventriculares, com alta sensibilidade e especificidade. A integração de dados clínicos adicionais, aliada ao uso de redes neurais convolucionais e outras técnicas de IA, sugere que uma abordagem multimodal pode ampliar a capacidade diagnóstica dos algoritmos e oferecer uma análise mais robusta e personalizada para os pacientes.

No entanto, desafios importantes permanecem, incluindo a necessidade de padronização metodológica, maior representatividade nos conjuntos de dados e transparência nos modelos. A generalização dos resultados e a interpretabilidade dos algoritmos são fatores essenciais para uma aplicação clínica eficaz, o que demanda estudos adicionais em populações diversas e validações externas rigorosas. Além disso, questões éticas e regulamentares relacionadas à segurança e privacidade dos dados dos pacientes devem ser abordadas para garantir o uso responsável da IA em ambientes de saúde.

Em síntese, embora a IA ofereça novas perspectivas para o diagnóstico de arritmias e monitoramento cardíaco, a transição dessas tecnologias para a prática clínica exige uma abordagem cautelosa e balanceada, que promova a inovação sem comprometer a segurança e a responsabilidade clínica. A implementação bem-sucedida da IA em cardiologia dependerá de uma colaboração contínua entre pesquisadores, profissionais de saúde e regulamentadores, com foco na criação de soluções tecnológicas que atendam às necessidades clínicas e éticas da prática médica moderna.

REFERÊNCIAS

ANTIPEROVITCH, Pavel; MORTARA, David; BARRIOS, Joshua; *et al.* Continuous Atrial Fibrillation Monitoring From Photoplethysmography: Comparison Between Supervised Deep Learning and Heuristic Signal Processing. **JACC. Clinical electrophysiology**, v. 10, n. 2, p. 334–345, 2024.

AVULA, Vennela; WU, Katherine C.; CARRICK, Richard T. Clinical Applications, Methodology, and Scientific Reporting of Electrocardiogram Deep-Learning Models: A Systematic Review. **JACC. Advances**, v. 2, n. 10, p. 100686, 2023.

COSTANZO, Assunta Di; SPACCAROTELLA, Carmen Anna Maria; ESPOSITO, Giovanni; *et al.* An Artificial Intelligence Analysis of Electrocardiograms for the Clinical Diagnosis of Cardiovascular Diseases: A Narrative Review. **Journal of Clinical Medicine**, v. 13, n. 4, p. 1033, 2024.

CRESPIN, Eliot; ROSIER, Arnaud; IBNOUHSEIN, Issam; *et al.* Improved diagnostic performance of insertable cardiac monitors by an artificial intelligence-based algorithm. **Europace: European Pacing, Arrhythmias, and Cardiac Electrophysiology: Journal of the Working Groups on Cardiac Pacing, Arrhythmias, and Cardiac Cellular Electrophysiology of the European Society of Cardiology**, v. 26, n. 1, p. euad375, 2023.

EFE, Enes; YAVSAN, Emrehan. AttBiLFNet: A novel hybrid network for accurate and efficient arrhythmia detection in imbalanced ECG signals. **Mathematical biosciences and engineering: MBE**, v. 21, n. 4, p. 5863–5880, 2024.

HERMAN, Robert; DEMOLDER, Anthony; VAVRIK, Boris; *et al.* Validation of an automated artificial intelligence system for 12lead ECG interpretation. **Journal of Electrocardiology**, v. 82, p. 147–154, 2024.

HERMAN, Robert; MEYERS, Harvey Pendell; SMITH, Stephen W.; *et al.* International evaluation of an artificial intelligence-powered electrocardiogram model detecting acute coronary occlusion myocardial infarction. **European Heart Journal. Digital Health**, v. 5, n. 2, p. 123–133, 2024.

HUANG, Qiong; FAN, Yuansheng; WANG, Jialin; *et al.* The diagnostic efficiency of artificial intelligence based 2 hours Holter monitoring in premature ventricular and supraventricular contractions detection. **Clinical Cardiology**, v. 47, n. 4, p. e24266, 2024.

JIMENEZ-PEREZ, Guillermo; ACOSTA, Juan; ALCÁINE, Alejandro; *et al.* Generalising electrocardiogram detection and delineation: training convolutional neural networks with synthetic data augmentation. **Frontiers in Cardiovascular Medicine**, v. 11, p. 1341786, 2024.

JIN, Yanrui; LI, Zhiyuan; WANG, Mengxiao; *et al.* Cardiologist-level interpretable knowledge-fused deep neural network for automatic arrhythmia diagnosis. **Communications Medicine**, v. 4, n. 1, p. 31, 2024.

KOLK, Maarten Z. H.; DEB, Brototo; RUIPÉREZ-CAMPILLO, Samuel; *et al.* Machine learning of electrophysiological signals for the prediction of ventricular arrhythmias: systematic review and examination of heterogeneity between studies. **EBioMedicine**, p. 104462–104462, 2023.

KOLK, Maarten Z. H.; RUIPÉREZ-CAMPILLO, Samuel; ALVAREZ-FLOREZ, Laura; *et al.* Dynamic prediction of malignant ventricular arrhythmias using neural networks in patients with an implantable cardioverter-defibrillator. **EBioMedicine**, v. 99, p. 104937, 2024.

LIN, Fan; ZHANG, Peng; CHEN, Yuting; *et al.* Artificial-intelligence-based risk prediction and mechanism discovery for atrial fibrillation using heart beat-to-beat intervals. **Med (New York, N.Y.)**, v. 5, n. 5, p. 414–431.e5, 2024.

LUO, Qiushi; ZHU, Hongling; ZHU, Jiabing; *et al.* Artificial intelligence-enabled 8-lead ECG detection of atrial septal defect among adults: a novel diagnostic tool. **Frontiers in Cardiovascular Medicine**, v. 10, p. 1279324, 2023.

MANDALA, Satria; RIZAL, Ardian; ADIWIJAYA, null; *et al.* An improved method to detect arrhythmia using ensemble learning-based model in multi lead electrocardiogram (ECG). **PLoS One**, v. 19, n. 4, p. e0297551, 2024.

MANETAS-STAVRAKAKIS, Nikolaos; SOTIROPOULOU, Ioanna Myrto; PARASKEVAS, Themistoklis; *et al.* Accuracy of Artificial Intelligence-Based Technologies for the Diagnosis of Atrial Fibrillation: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Journal of Clinical Medicine**, v. 12, n. 20, p. 6576, 2023.

MELO, Luke; CICONTE, Giuseppe; CHRISTY, Ashton; *et al.* Deep learning unmasks the ECG signature of Brugada syndrome. **PNAS nexus**, v. 2, n. 11, p. pgad327, 2023.

MUZAMMIL, Muhammad Ali; JAVID, Saman; AFRIDI, Azra Khan; *et al.* Artificial intelligence-enhanced electrocardiography for accurate diagnosis and management of cardiovascular diseases. **Journal of Electrocardiology**, v. 83, p. 30–40, 2024.

OUYANG, David; THEURER, John; STEIN, Nathan R.; *et al.* Electrocardiographic deep learning for predicting post-procedural mortality: a model development and validation study. **The Lancet. Digital Health**, v. 6, n. 1, p. e70–e78, 2024.

PARK, Yeonjae; PARK, You Hyun; JEONG, Hoyeon; *et al.* Development and Validation of a Real-Time Service Model for Noise Removal and Arrhythmia Classification Using Electrocardiogram Signals. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 24, n. 16, p. 5222, 2024.

PASERO, Eros; GAITA, Fiorenzo; RANDAZZO, Vincenzo; *et al.* Artificial Intelligence ECG Analysis in Patients with Short QT Syndrome to Predict Life-Threatening Arrhythmic Events. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 23, n. 21, p. 8900, 2023.

PETZL, Adrian M.; JABBOUR, Gilbert; CADRIN-TOURIGNY, Julia; *et al.* Innovative approaches to atrial fibrillation prediction: should polygenic scores and machine learning be implemented in clinical practice? **Europace: European Pacing, Arrhythmias, and Cardiac Electrophysiology: Journal of the Working Groups on Cardiac Pacing, Arrhythmias, and Cardiac Cellular Electrophysiology of the European Society of Cardiology**, v. 26, n. 8, p. euae201, 2024.

PHAM, Hoang Nhat; HOLMSTROM, Lauri; CHUGH, Harpriya; *et al.* Dynamic electrocardiogram changes are a novel risk marker for sudden cardiac death. **European Heart Journal**, v. 45, n. 10, p. 809–819, 2024.

- QIU, Yue; GUO, Hongcheng; WANG, Shixin; *et al.* Deep learning-based multimodal fusion of the surface ECG and clinical features in prediction of atrial fibrillation recurrence following catheter ablation. **BMC medical informatics and decision making**, v. 24, n. 1, p. 225, 2024.
- RAN, Zhongnan; JIANG, Mingfeng; LI, Yang; *et al.* Arrhythmia classification based on multi-feature multi-path parallel deep convolutional neural networks and improved focal loss. **Mathematical biosciences and engineering: MBE**, v. 21, n. 4, p. 5521–5535, 2024.
- SATTAR, Shoaib; MUMTAZ, Rafia; QADIR, Mamoona; *et al.* Cardiac Arrhythmia Classification Using Advanced Deep Learning Techniques on Digitized ECG Datasets. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 24, n. 8, p. 2484, 2024.
- SENAPATI, Sidhartha G.; BHANUSHALI, Aditi K.; LAHORI, Simmy; *et al.* Mapping of Neuro-Cardiac Electrophysiology: Interlinking Epilepsy and Arrhythmia. **Journal of Cardiovascular Development and Disease**, v. 10, n. 10, p. 433, 2023.
- SHAIK, Ayesha; PATEL, Nirav; ALVAREZ, Chikezie; *et al.* Erroneous electrocardiographic interpretations and its clinical implications. **Journal of Cardiovascular Electrophysiology**, v. 34, n. 7, p. 1515–1522, 2023.
- SINHA, Tanya; GODUGU, Swathi; BOKHARI, Syed Faqeer Hussain. Navigating the Future of Cardiac Diagnostics: Insights From Artificial Neural Networks. **Cureus**, v. 16, n. 2, p. e54011, 2024.
- SMARANDA, Alina Maria; DRĂGOIU, Teodora Simina; CARAMOCI, Adela; *et al.* Artificial Intelligence in Sports Medicine: Reshaping Electrocardiogram Analysis for Athlete Safety-A Narrative Review. **Sports (Basel, Switzerland)**, v. 12, n. 6, p. 144, 2024.
- TOGO, Sanshiro; SUGIURA, Yuki; SUZUKI, Sayumi; *et al.* Model for classification of heart failure severity in patients with hypertrophic cardiomyopathy using a deep neural network algorithm with a 12-lead electrocardiogram. **Open Heart**, v. 10, n. 2, p. e002414, 2023.
- VAN DE LEUR, Rutger R.; DE BROUWER, Remco; BLEIJENDAAL, Hidde; *et al.* ECG-only explainable deep learning algorithm predicts the risk for malignant ventricular arrhythmia in phospholamban cardiomyopathy. **Heart Rhythm**, v. 21, n. 7, p. 1102–1112, 2024.
- YOO, Richard M.; VIGGIANO, Ben T.; PUNDI, Krishna N.; *et al.* Scalable Approach to Consumer Wearable Postmarket Surveillance: Development and Validation Study. **JMIR medical informatics**, v. 12, p. e51171, 2024.
- ZANCHI, Beatrice; FARACI, Francesca Dalia; GHARAVIRI, Ali; *et al.* Identification of Brugada syndrome based on P-wave features: an artificial intelligence-based approach. **Europace: European Pacing, Arrhythmias, and Cardiac Electrophysiology: Journal of the Working Groups on Cardiac Pacing, Arrhythmias, and Cardiac Cellular Electrophysiology of the European Society of Cardiology**, v. 25, n. 11, p. euad334, 2023.
- ZHAO, Xiangyu; ZHOU, Rong; NING, Li; *et al.* Atrial Fibrillation Detection with Single-Lead Electrocardiogram Based on Temporal Convolutional Network-ResNet. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 24, n. 2, p. 398, 2024.
- ZHENG, Chengyi; LEE, Ming-Sum; BANSAL, Nisha; *et al.* Identification of recurrent atrial fibrillation using natural language processing applied to electronic health records. **European Heart Journal. Quality of Care & Clinical Outcomes**, v. 10, n. 1, p. 77–88, 2024.