

CAPÍTULO 4

O FUTURO DA CARDIOLOGIA INTERVENCIONISTA: DISPOSITIVOS INOVADORES

Eder Voltolini

RESUMO

A cardiologia intervencionista é uma das áreas da medicina que mais se beneficia do avanço tecnológico, com dispositivos e técnicas inovadoras capazes de transformar o diagnóstico, o tratamento e o acompanhamento das doenças cardiovasculares. As tecnologias atualmente disponíveis já representam um salto significativo em relação às abordagens tradicionais, mas é o desenvolvimento contínuo de novas soluções que promete revolucionar ainda mais esse campo. Entre as tecnologias já aplicadas, destacam-se os stents farmacológicos de última geração, que associam alta biocompatibilidade com liberação controlada de fármacos, reduzindo a reestenose coronariana. Mais recentemente, os stents bioabsorvíveis surgiram como uma alternativa promissora, permitindo a reabsorção completa da estrutura após cumprirem sua função, reduzindo complicações tardias. Outro avanço importante é a utilização de válvulas cardíacas transcaterter (TAVI e TMVI), que já são amplamente empregadas para tratamento minimamente invasivo de doenças valvares em pacientes de alto risco cirúrgico. Essas próteses evoluem continuamente, com materiais mais duráveis e sistemas de implantação cada vez mais precisos, muitas vezes guiados por inteligência artificial e softwares de modelagem tridimensional. A inteligência artificial, aliás, está no centro da revolução tecnológica da cardiologia intervencionista. Algoritmos avançados analisam grandes volumes de dados, identificam padrões sutis em imagens diagnósticas e oferecem suporte à decisão clínica em tempo real. Essa integração entre IA e plataformas de imagem, como tomografia de coerência óptica (OCT) e ultrassom intracoronário (IVUS), melhora a avaliação das lesões e a precisão do implante de dispositivos. Em desenvolvimento, sensores implantáveis e dispositivos de monitoramento remoto estão ganhando espaço. Esses sensores podem medir pressão arterial pulmonar, fluxo sanguíneo ou sinais elétricos em tempo real, permitindo ajustes terapêuticos personalizados antes que o paciente apresente sintomas graves. Essa tendência se conecta ao conceito de "cardiologia digital", que alia dispositivos conectados, monitoramento contínuo e análise preditiva. Outro campo promissor é a terapia genética e celular, que, associada a técnicas intervencionistas, pode futuramente reparar tecidos cardíacos danificados diretamente através de

cateteres. Assim, a cardiologia intervencionista caminha para uma era em que os procedimentos serão cada vez mais personalizados, guiados por inteligência artificial e baseados em tecnologias que antecipam complicações, promovendo intervenções mais seguras e eficazes. Esses avanços têm potencial para transformar não só a prática médica, mas também a qualidade e a expectativa de vida de milhões de pacientes em todo o mundo.

Palavras-chave: Cardiologia intervencionista. Procedimentos cardiovasculares. Stents farmacológicos. Tecnologias vestíveis. Telemedicina.

1. CONCEITOS DA CARDIOLOGIA INTERVENCIONISTA

Comprometida em desenvolver métodos minimamente invasivos para o diagnóstico e tratamento de vários problemas cardíacos, a cardiologia intervencionista atualmente se encontra na vanguarda da medicina cardiovascular, devido a avanços tecnológicos, introdução de novas técnicas e dedicação para conquistar melhores resultados para os pacientes. Principal causa mundial de morbidade e mortalidade, a doença arterial coronária (DAC) – e seus crescentes números – deu origem à cardiologia intervencionista na década de 1970. A invenção da angioplastia transluminal percutânea coronariana (PTCA), por Andreas Gruentzig, em 1977 deu início a uma nova era de tratamentos baseados em cateter para DAC. Ao inflar um cateter de balão em uma artéria coronária constrita para restaurar o fluxo sanguíneo, a PTCA abriu as portas para que avanços posteriores em procedimentos de revascularização coronária surgissem¹.

Desde que a PTCA foi introduzida, cardiologistas intervencionistas vêm aprimorando o tratamento de DAC. A versão contemporânea da PTCA, conhecida como intervenção coronária percutânea (ICP), corresponde a diversos métodos de redução da estenose da artéria coronária e melhora da perfusão miocárdica. Uma evolução significativa ocorreu com o desenvolvimento de stents coronários na década de 1990, o que diminuiu o risco de fechamento agudo da artéria após angioplastia e forneceu suporte mecânico à parede do vaso². Ao reduzir o perigo de reestenose e procedimentos de revascularização repetida, outras iterações – como stents liberadores de fármacos – melhoraram ainda mais os resultados³.

A cardiologia intervencionista inclui múltiplos tratamentos para doença cardíaca estrutural, além da ICP. Para pacientes com estenose aórtica grave, considerados de alto risco ou inadequados para substituição cirúrgica convencional da válvula, a substituição transcaterter da válvula aórtica (TAVR) se tornou uma terapia transformadora⁴. Da mesma forma, para pacientes com regurgitação mitral, os métodos de substituição transcaterter da válvula mitral, como o dispositivo MitraClip, fornecem uma opção menos invasiva à intervenção cirúrgica. Novas técnicas que têm o potencial de melhorar os resultados do paciente e a precisão do procedimento incluem ICP guiada por fisiologia e imagens intravasculares⁵.

Além disso, o planejamento do procedimento, a tomada de decisões e o cuidado pós-procedimento podem ser completamente transformados pela incorporação de inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquina em fluxos de trabalho intervencionistas⁶, reforçando que a cardiologia intervencionista é uma disciplina dinâmica e em desenvolvimento. Seus objetivos – de fornecer terapias seguras, eficientes e minimamente invasivas – permanecem mesmo diante das complexidades da cardiologia contemporânea.

2. TECNOLOGIAS AUXILIARES DISPONÍVEIS

2.1 Sistemas de realidade aumentada (RA) e realidade mista (RM)

Atualmente, os sistemas médicos de realidade aumentada (RA) e realidade mista (RM) representam tecnologias de ponta prontas para transformar o cenário da cardiologia intervencionista. Esses sistemas oferecem uma nova abordagem para visualizar a anatomia cardíaca complexa e orientar procedimentos em tempo real. Ao integrar perfeitamente várias modalidades de imagem, incluindo ultrassom, eletrocardiograma e ultrassom intravascular, eles fornecem aos clínicos visualizações de alta fidelidade e em tempo real da anatomia do paciente e orientação do procedimento. Por meio da sobreposição de imagens virtuais no ambiente físico, os sistemas de RA/RM aprimoram a consciência situacional e a eficiência do procedimento. Esses sistemas também são capazes de melhorar os resultados do procedimento, reduzir a dependência de monitores LCD padrão e minimizar as interrupções do procedimento. Consequentemente, esses sistemas têm o potencial de aumentar a visualização, a orientação do procedimento e a tomada de decisões na cardiologia intervencionista, promovendo o melhor atendimento e resultados do paciente^{7,8}.

Com a apresentação do Enhanced Interaction Electrophysiology Visualization and System (ELVIS), Avari Silva et al⁹ buscaram revolucionar a imagem intraprocedural em tempo real em laboratórios de eletrofisiologia (EP). Fusão do headset HoloLens e do software SentEP, o ELVIS fornece imagens digitais 3D de mapas eletroanatômicos e localizações de cateteres. Em um ensaio clínico, os pesquisadores testaram o ELVIS em relação ao sistema padrão, revelando uma maior precisão de navegação por meio de teste de postos sinalizados de Wilcoxon, que identificou um erro de $2,99 \pm 1,91$ mm para o ELVIS em comparação com $4,50 \pm 3,74$ mm para o sistema padrão. Com isso, o ELVIS demonstra potencialização das habilidades dos médicos e melhora dos resultados dos pacientes, significando um avanço na tecnologia de laboratório de EP.

Visando explorar o impacto tecnologia RM nos resultados dos procedimentos em laboratórios de cateterismo cardíaco, Chahine et al¹⁰ integraram várias modalidades de imagem em um visor MR-HMD para avaliar 50 pacientes – sendo 33 deles submetidos a cateterismo cardíaco direito e

29 com uma CA diagnóstica – comparados a 232 pacientes no grupo de controle. Os resultados mostraram que a implementação do MR-HMD pode ser associada a um tempo de procedimento significativamente reduzido de 20 minutos vs. 25 minutos. Reforçando a eficiência processual aprimorada, os autores destacaram o potencial transformador do MR-HMD médico sem fio para orientação processual em tempo real.

Holland et al¹¹, por sua vez, mostraram pioneirismo com a apresentação de uma ferramenta de simulação de sangue de realidade virtual (RV), que visa auxiliar os médicos durante eventos cardíacos agudos. Ao simular a dinâmica do fluxo sanguíneo após o tratamento, a ferramenta fornece insights críticos inatingíveis por meio de imagens 2D convencionais. Ao aproveitar as tecnologias de RV e RM, a ferramenta aprimora a tomada de decisão, eliminando lacunas no gerenciamento de eventos cardiovasculares agudos. Explorando uma área diferente, Franson et al¹² revelaram um sistema de prova de conceito para visualização de RM on-line em tempo real de imagens de ressonância magnética cardíaca. Utilizando trajetórias radiais altamente subamostradas para aquisição rápida, o sistema permite renderizações de RM 3D em tempo real de imagens de ressonância magnética, promovendo avanços em intervenções guiadas por RM e tecnologias de imagem.

Para abordar o desafio do planejamento pré-procedimental na oclusão do apêndice atrial esquerdo (AAE), Pasquali et al¹³ usaram imagens de tomografia computadorizada (TC). Seu software inovador, apoiado em RM, facilita a visualização e o planejamento 3D em tempo real, agilizando o processo em várias morfologias do AAE. A análise morfológica dos modelos anatômicos holográficos foi aplicada com sucesso em quatro pacientes, independentemente de sua morfologia, sendo concluída em menos de 10 minutos. Os resultados do estudo, juntamente com as capacidades de colaboração remota do software, significam uma evolução no planejamento da oclusão do AAE, prometendo maior precisão e eficiência.

Expandindo ainda mais a aplicação da RM, Alonso-Felipe et al¹⁴ demonstraram a eficácia dos óculos de RM durante a canulação arterial femoral guiada por ultrassom em tempo real. O estudo reforça o potencial transformador dos sistemas de RM na melhoria da precisão do procedimento e na redução do tempo e dos custos da intervenção, abrindo caminho para a adoção mais ampla de procedimentos de cardiologia intervencionista. Salavitar et al¹⁵ avaliaram a conversão da angiografia rotacional 3D (3DRA) em modelos de RA para visualizar doenças cardíacas congênitas, utilizando o headset de RM Microsoft HoloLens 2 (HL2). O estudo destaca a viabilidade e os benefícios dos modelos de RA no aprimoramento da visualização e das capacidades educacionais no gerenciamento de doenças cardíacas congênitas, onde a visualização e a identificação de estruturas foram classificadas como “muito fáceis” em 81,1% da RA em comparação com 67,8% dos modelos computadorizados (MC).

2.2 Tecnologias vestíveis e monitoramento em tempo real

A integração de tecnologias vestíveis – relógios, pulseiras e óculos, por exemplo – e monitoramento em tempo real também é considerada um importante avanço, remodelando a dinâmica do atendimento ao paciente durante procedimentos cardiovasculares. Dispositivos vestíveis, equipados com sensores sofisticados, permitem rastrear e transmitir continuamente dados fisiológicos vitais em tempo real. Esse monitoramento em tempo real não apenas fornece insights imediatos sobre o estado cardiovascular de um paciente, mas também permite uma tomada de decisão rápida durante os procedimentos¹⁶⁻¹⁸.

Tecnologias vestíveis oferecem uma visão abrangente dos parâmetros fisiológicos do paciente, incluindo frequência cardíaca, pressão arterial e saturação de oxigênio, promovendo uma abordagem diferenciada e personalizada para intervenções cardiovasculares. Essa mudança de paradigma em direção ao monitoramento em tempo real não apenas aumenta a precisão das intervenções processuais, mas também desempenha um papel relevante na otimização dos resultados, contribuindo para o avanço da assistência médica cardiovascular. Tecnologias vestíveis também podem ser instrumentais para o monitoramento intraoperatório, permitindo o uso de sensores sem fio avançados para avaliar os principais indicadores fisiológicos em tempo real durante todo o processo cirúrgico. Essa capacidade aumenta ainda mais a eficácia geral e a segurança das intervenções cardiovasculares, garantindo uma compreensão abrangente da condição do paciente e facilitando a tomada de decisões informadas durante todo o procedimento¹⁶⁻¹⁸.

Exemplos de dispositivos vestíveis práticos são o Nexfin®, CNAP® ou T-line®, entre outros. Esses dispositivos são equipados com sensores avançados, capazes de monitorar com precisão parâmetros como frequência cardíaca, pressão arterial e saturação de oxigênio. O Nexfin®, especificamente, utiliza uma tecnologia de monitoramento não invasiva chamada Nexfin HD, que depende da pressão de pulso contínua para fornecer uma avaliação precisa e contínua do sistema cardiovascular, enquanto o CNAP® (Continuous Noninvasive Arterial Pressure) permite uma medição contínua e não invasiva da pressão arterial, usando uma técnica oscilométrica avançada para detectar variações na pressão arterial^{19,20}.

O T-line®, por sua vez, é um dispositivo inovador que mede a pressão arterial de forma contínua e não invasiva, fornecendo uma avaliação confiável em tempo real da função cardiovascular do paciente²¹. Durante um procedimento cardiovascular, o paciente pode usar o dispositivo, que monitora mudanças em tempo real nos sinais vitais. Além da imagem imediata das condições cardiovasculares do paciente, os médicos podem ter decisões intraoperatórias com base em dados atuais. Porém, estudos ainda serão necessários para validar completamente seu papel em procedimentos cardiovasculares^{22,23}.

2.3 Intervenções cardiovasculares de precisão e inteligência artificial

Diante da constante evolução das intervenções cardiovasculares, a aplicação da IA surge como um elemento essencial, revolucionando a precisão e a eficácia dos procedimentos. Oferece uma abordagem inovadora para avaliação de risco, detecção precoce de doenças e orientação na formulação de estratégias de intervenção personalizadas. Algoritmos orientados por IA, capazes de analisar conjuntos de dados extensos, tornam-se ferramentas indispensáveis para prever resultados de pacientes e auxiliar na tomada de decisões em tempo real durante intervenções cardiovasculares²⁴. Exemplos mostram a aplicação prática da IA em contextos processuais, mostrando seu papel na melhor compreensão das condições clínicas do paciente e na adaptação de terapias. Por exemplo, a IA pode desempenhar um papel crucial na definição de patologias-alvo, empregando algoritmos sofisticados para analisar dados médicos e identificar problemas cardiovasculares específicos com alta precisão²⁵.

Essa abordagem direcionada permite intervenções mais precisas e eficientes, melhorando os resultados. Por meio de análise avançada de imagens e processamento de dados em tempo real, a IA, por exemplo, auxilia os cirurgiões a navegar por estruturas anatômicas complexas durante procedimentos cardiovasculares. Tecnologias como a Cydar Medical utilizam algoritmos de IA para aprimorar a tomada de decisões intraoperatórias, fornecendo aos cirurgiões insights e orientações detalhadas para navegação ideal dentro do sistema cardiovascular. Isso não apenas aumenta a precisão geral da intervenção, mas também contribui para uma experiência cirúrgica mais segura e eficiente²⁶.

Porém, o uso de IA em procedimentos cardiovasculares também apresenta desafios éticos e práticos que não podem ser ignorados. Embora tenha grande potencial para melhorar abordagens de tratamento personalizadas, eficientes e preditivas, sua implementação requer consideração cuidadosa de vários fatores. Atualmente, o uso de IA não tem a capacidade de levar em conta certas complexidades inerentes aos procedimentos cardiovasculares, como mudanças na anatomia aorto-iliaca causadas por guias rígidos. Essa limitação ressalta a importância de desenvolver protocolos e diretrizes robustos para garantir sua integração responsável na prática clínica²⁷.

À medida que as tecnologias de IA avançam, há uma necessidade urgente de estruturas regulatórias claras para seu uso em procedimentos cardiovasculares. Considerações éticas sobre consentimento do paciente, privacidade de dados e transparência algorítmica devem ser abordadas para garantir a segurança e a confiança do paciente. Além disso, desafios práticos, como integrar algoritmos de IA em fluxos de trabalho existentes e validar decisões orientadas por IA, exigem processos completos de avaliação e validação. Apesar desses desafios, a adoção de IA em procedimentos

cardiovasculares representa um marco significativo na evolução das práticas médicas no campo²⁷.

Ao aproveitar as capacidades analíticas e previsões da IA, os médicos podem potencialmente otimizar estratégias de tratamento, melhorar os resultados e avançar na compreensão das doenças cardiovasculares. Mas, perceber esses benefícios requer esforços colaborativos entre médicos, pesquisadores, tecnólogos e formuladores de políticas para integrar a IA de forma responsável e ética. O Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) está envolvido no enfrentamento dos desafios e no avanço do campo da IA em intervenções cardiovasculares²⁸.

Suas iniciativas correspondem ao desenvolvimento de padrões e diretrizes para o uso responsável de algoritmos de IA em ambientes de saúde, promovendo colaborações interdisciplinares entre profissionais de saúde e especialistas em IA e fomentando discussões sobre considerações éticas de sua implementação. Ao se envolver com organizações como o IEEE, as instituições de saúde podem aproveitar a expertise coletiva para garantir a integração segura e eficaz de tecnologias de IA em procedimentos cardiovasculares, beneficiando o atendimento e os resultados dos pacientes²⁸.

2.4 Procedimentos minimamente invasivos e tecnologias robóticas

O advento de materiais inovadores facilitou o desenvolvimento de instrumentos menores e mais precisos, permitindo procedimentos menos invasivos e com tempos de recuperação acelerados (25, 26). Porém, é importante abordar as limitações associadas à cirurgia robótica, principalmente no contexto de procedimentos vasculares. As tecnologias robóticas ampliaram ainda mais as capacidades das intervenções cardiovasculares, oferecendo maior precisão e destreza aos profissionais de saúde. Ao alavancar a assistência robótica, os procedimentos podem ser realizados com maior precisão, permitindo manobras complexas que antes eram desafiadoras com as abordagens tradicionais^{29,30}.

A integração de técnicas minimamente invasivas e tecnologias robóticas não apenas minimiza o impacto físico nos pacientes, mas também contribui para melhores resultados de procedimentos e segurança para profissionais de saúde^{31,32}. No âmbito dos procedimentos minimamente invasivos, por exemplo, a introdução do sistema cirúrgico da Vinci revolucionou cirurgias como a de revascularização do miocárdio (CABG) e o reparo da válvula mitral. Os braços robóticos do sistema, controlados por um cirurgião, fornecem precisão inigualável na navegação por espaços apertados, aumentando o sucesso geral desses procedimentos³³.

No campo das intervenções cardiovasculares, tecnologias robóticas deram origem a soluções inovadoras, especialmente em procedimentos endovasculares. O desenvolvimento dos atuais sistemas robóticos endovasculares representa um avanço significativo, fornecendo ferramentas avançadas para intervenções precisas e controladas. O sistema de cateter

robótico Hansen Sensei exemplifica a integração de tecnologias robóticas em intervenções baseadas em cateter. Este sistema permite movimentos altamente precisos e controlados durante procedimentos como ablação por cateter para arritmias, reduzindo a margem de erro e melhorando os resultados do paciente³⁴.

Outro exemplo é o sistema robótico CorPath GRX, projetado para uso em procedimentos endovasculares, como intervenções coronárias percutâneas (ICP). Este sistema permite o controle remoto assistido por robótica de fios-guia e cateteres, permitindo movimentos complexos com maior precisão. O CorPath GRX visa aprimorar as capacidades dos cardiologistas intervencionistas durante intervenções endovasculares, levando a melhores resultados para os pacientes³⁵. Da mesma forma, o sistema robótico Magellan oferece assistência robótica avançada na navegação de anatomia vascular complexa durante procedimentos endovasculares. Com seu cateter robótico e controle de fio-guia, o sistema fornece precisão e controle aprimorados, especialmente em territórios vasculares desafiadores. Esta tecnologia exemplifica a evolução contínua dos sistemas robóticos endovasculares, mostrando seu potencial para redefinir o cenário das intervenções cardiovasculares³⁴.

Embora o progresso da robótica endovascular possa ser lento, esses sistemas prometem otimizar ainda mais a precisão do procedimento, minimizar a invasividade e, finalmente, contribuir para avanços no atendimento ao paciente no âmbito das intervenções cardiovasculares. No entanto, é essencial abordar as limitações e os desafios associados à integração de tecnologias robóticas na cirurgia vascular para garantir seu uso seguro e eficaz na prática clínica³¹.

2.5 Impressão 3D e procedimentos cardiovasculares específicos

A aplicação da tecnologia de impressão 3D no campo cardiovascular representa um salto transformador na medicina personalizada e intervenções terapêuticas. Esta tecnologia inovadora permite fabricar com precisão modelos anatômicos específicos do paciente, oferecendo aos clínicos ferramentas para planejamento pré-operatório, educação médica e comunicação com os pacientes³⁶. Porém, é importante reconhecer as limitações e desafios atuais associados à tecnologia de impressão 3D em aplicações cardiovasculares. A bioimpressão, por exemplo, ainda não foi amplamente utilizada na área cardiovascular devido a vários fatores. A tecnologia ainda é limitada principalmente em construções de tecidos projetados com estruturas complexas, hierárquicas e biocompatíveis, incluindo stents, válvulas protéticas e enxertos vasculares adaptados às anatomias individuais do paciente³⁷.

Existem vários desafios que dificultam a transição desses implantes para aplicações clínicas, e a engenharia de tecidos cardíacos continua sendo uma área de pesquisa com vários problemas não resolvidos. Apesar dessas limitações, a principal aplicação da impressão 3D no campo cardiovascular

atualmente está em treinamento e planejamento. Embora a impressão 3D permita a criação de modelos anatômicos que fornecem insights valiosos, vale a pena notar que a maioria dos modelos atuais são estáticos e podem não representar totalmente a natureza dinâmica dos tecidos patológicos ou normais. Mas, à medida que a tecnologia de impressão 3D continua a avançar, sua integração no campo cardiovascular é muito promissora para melhorar os resultados por meio de abordagens personalizadas de medicina de precisão^{36,37}. Além disso, a impressão 3D abriu caminho para a biofabricação, permitindo a geração de construções de tecidos com propriedades biomiméticas para uso potencial na medicina regenerativa³⁸.

2.6 Bioengenharia e medicina regenerativa

A bioengenharia e a medicina regenerativa surgiram como fronteiras dinâmicas no campo cardiovascular, oferecendo estratégias inovadoras para enfrentar os desafios das doenças cardíacas. As soluções de bioengenharia aproveitam uma abordagem multidisciplinar, integrando princípios da engenharia, biologia e ciência dos materiais para projetar e desenvolver terapias cardiovasculares avançadas³⁹. Na medicina regenerativa, o foco está em aproveitar o potencial regenerativo inerente do corpo ou introduzir materiais exógenos para reparar tecidos cardíacos danificados. Terapias com células-tronco, engenharia de tecidos e o desenvolvimento de andaimes biomiméticos estão na vanguarda das intervenções regenerativas⁴⁰.

Essas abordagens visam não apenas restaurar a estrutura e a função do coração, mas também estimular processos naturais de cura. A combinação sinérgica de princípios de bioengenharia e medicina regenerativa promete criar tratamentos de última geração, indo além do gerenciamento de sintomas para abordar as causas raízes das doenças cardiovasculares, abrindo caminho para a regeneração cardíaca e melhores resultados para os pacientes⁴¹.

2.7 Novos materiais

A junção de novos materiais e robótica gerou avanços revolucionários no campo cardiovascular, prometendo soluções inovadoras para diagnóstico, intervenção e cuidados pós-operatórios. O desenvolvimento e a integração de novos materiais, como polímeros biocompatíveis e ligas com memória de forma, oferecem oportunidades para projetar dispositivos cardiovasculares com durabilidade aprimorada e propriedades biomecânicas personalizadas. Esses materiais desempenham um papel relevante na fabricação de stents, enxertos e outros dispositivos implantáveis, garantindo desempenho e biocompatibilidade ideais⁴².

Stents coronários feitos com materiais inovadores, por exemplo, oferecem maior resistência e durabilidade em comparação aos convencionais, reduzindo o risco de complicações no longo prazo. Devido à flexibilidade e resiliência dos polímeros biocompatíveis, essas novas gerações de stents podem se adaptar melhor às variações na anatomia

vascular, fornecendo suporte eficaz e duradouro às artérias coronárias. Entre os mais promissores estão os chamados stents eluidores de genes (GES) e sensores de autorrelato integrados. GES utilizam stents como transportadores para a entrega localizada de genes terapêuticos, superando potencialmente as limitações da terapia genética tradicional. Estudos demonstraram o transporte preciso de genes plasmídeos como GFP e VEGF por meio de stents bioabsorvíveis, oferecendo novas vias terapêuticas para o tratamento de lesões vasculares⁴³.

Válvulas cardíacas artificiais, desenvolvidas com polímeros biocompatíveis avançados, exibem melhor adaptabilidade e maior resistência ao desgaste em comparação aos dispositivos convencionais. Essas características permitem que as válvulas funcionem de forma mais eficiente no longo prazo, reduzindo o risco de deterioração e melhorando a qualidade de vida de pacientes com doenças da válvula cardíaca. Abordagens inovadoras também estão sendo exploradas, podendo levar a válvulas cardíacas bioprotéticas com inflamação e trombose reduzidas, como a utilização de porcos geneticamente modificados sem o antígeno Gal para prevenir a calcificação. Esses porcos, conhecidos como porcos com gene knockout alfa 1, 3-galactosiltransferase (GTKO), podem oferecer soluções promissoras⁴⁴.

Enxertos vasculares e endovasculares feitos de materiais biocompatíveis e duráveis, por sua vez, são importantes para atender à crescente demanda por substituições adequadas em pacientes com doenças cardiovasculares. Pesquisadores fizeram avanços significativos no desenvolvimento de vasos sanguíneos artificiais, gerando avanços significativos na engenharia de tecidos e ciência de materiais^{45,46}.

Buscando similares da complexa estrutura dos vasos sanguíneos naturais, pesquisadores utilizaram técnicas avançadas de fabricação, como eletrofiliação, separação de fases induzida termicamente, microfluídica, formação por estiramento e tecelagem de tecidos. Essas técnicas permitem a criação de estruturas multicamadas que se assemelham muito às artérias nativas, melhorando a funcionalidade e o desempenho dos vasos sanguíneos artificiais. Por exemplo, o uso da impressão 3D permite a produção de estruturas complexas, enquanto o uso de revestimentos de superfície naturais em materiais sintéticos se mostrou promissor na melhoria das propriedades biológicas dos enxertos vasculares⁴⁷.

Os materiais são essenciais para o design e desempenho de vasos sanguíneos artificiais. A combinação ideal de polímeros sintéticos e materiais naturais é essencial para maximizar seus benefícios, incluindo biocompatibilidade, antitrombogenicidade e taxa de permeabilidade a longo prazo. Pesquisadores estão explorando várias abordagens, incluindo a sintetização de novos materiais, a combinação de vários materiais e a alterações das propriedades dos materiais por meio de processos químicos⁴⁸.

Além disso, a incorporação de revestimentos de superfície naturais em materiais sintéticos tem se mostrado promissora na melhoria das

propriedades biológicas dos enxertos vasculares. Apesar do progresso, os vasos sanguíneos artificiais atuais continuam a enfrentar desafios para atingir taxas de permeabilidade a longo prazo. Estratégias de otimização, incluindo modificação genética e tecnologia de exossomos, estão sendo exploradas para melhorar o desempenho e a longevidade desses enxertos. Métodos que promovem a endotelização e controlam a taxa de degradação de materiais degradáveis também estão sob investigação para melhorar a integração do enxerto e a funcionalidade a longo prazo. O futuro do desenvolvimento de vasos sanguíneos artificiais está na integração de células e materiais para construir enxertos funcionais. Técnicas como impressão 3D, cultura dinâmica e enxertos montados em células têm se mostrado promissoras e justificam uma investigação mais aprofundada⁴⁹.

2.8 Redução da exposição à radiação ionizante

Uma consideração importante na evolução das intervenções cardiovasculares é o esforço em reduzir a exposição do paciente e do profissional de saúde à radiação ionizante durante os procedimentos. O uso de tecnologias avançadas de imagem e o aprimoramento das metodologias existentes foram essenciais para atingir esse objetivo. Ao aproveitar modalidades de imagem de última geração, como fluoroscopia e angiografia, os médicos agora podem obter visualizações de alta qualidade e em tempo real do sistema cardiovascular com doses de radiação significativamente reduzidas^{50,51}. A integração de novas técnicas de blindagem e protocolos de redução de radiação também desempenhou um papel fundamental na redução do tempo de exposição. A blindagem de chumbo e os sistemas avançados de colimação, combinados com protocolos de imagem otimizados, contribuem para uma administração mais focada e controlada de radiação durante os procedimentos⁵².

Essas inovações não apenas protegem a saúde dos pacientes e dos profissionais de saúde, mas também se alinham com iniciativas mais amplas para aumentar a segurança e a sustentabilidade das intervenções cardiovasculares. Para melhorar a implementação eficaz dessas técnicas, programas de treinamento e simulação são necessários. Educar profissionais de saúde sobre o uso adequado de tecnologias de redução de radiação e garantir proficiência em métodos alternativos de imagem por meio de simulação pode melhorar significativamente as medidas de segurança e otimizar o atendimento ao paciente no campo de intervenções cardiovasculares^{53,54}.

Além de técnicas tradicionais como fluoroscopia e angiografia, alternativas promissoras surgiram para reduzir a exposição à radiação durante procedimentos endovasculares. Essas alternativas oferecem modalidades avançadas de imagem que oferecem orientação precisa e detalhada durante os procedimentos, ao mesmo tempo em que garantem menor exposição à radiação ionizante. Uma dessas alternativas é o ultrassom intravascular (IVUS), uma técnica que usa ultrassom para obter imagens de

alta resolução de estruturas vasculares de dentro dos vasos sanguíneos. O IVUS fornece uma visão detalhada das paredes vasculares e placas ateroscleróticas, permitindo uma avaliação preciso do estado da patologia e orientem os procedimentos com mais segurança^{55,56}.

Outra alternativa promissora é a angiografia por ressonância magnética (ARM), que usa campos magnéticos e ondas de rádio para gerar imagens detalhadas dos vasos sanguíneos sem o uso de radiação ionizante⁵⁷. A ARM fornece uma visualização clara das estruturas vasculares e permite uma avaliação precisa do fluxo sanguíneo, contribuindo para o planejamento e a execução segura de procedimentos endovasculares. A tecnologia Fiber Optic RealShape (FORS) é outra alternativa inovadora para reduzir a exposição à radiação durante procedimentos cardiovasculares. A tecnologia usa fibra óptica para gerar imagens tridimensionais de estruturas vasculares, permitindo que os cirurgiões visualizem a morfologia e a posição dos vasos em tempo real sem o uso de raios X ionizantes. A abordagem FORS oferece orientação precisa e detalhada durante os procedimentos, minimizando o risco de exposição à radiação para pacientes e profissionais de saúde⁵⁸.

3. ATENDIMENTO CADA VEZ MAIS PERSONALIZADO

Outro aspecto significativo do design da cardiologia intervencionista está na área de diagnósticos que, devido aos avanços nas tecnologias de saúde digital, está migrando para técnicas não invasivas que não são apenas mais seguras, mas também fornecem resultados mais precisos e oportunos. Ferramentas de diagnóstico alimentadas por IA podem analisar uma variedade de dados de exames de sangue, diagnósticos de imagem e dados biométricos em tempo real para fornecer uma imagem abrangente do estado de saúde de um indivíduo⁵⁹. Soenksen et al⁶⁰, por exemplo, propuseram uma estrutura holística de IA na medicina projetada para abordar tarefas clínicas e operacionais usando incorporações geradas por IA derivadas de informações multimodais do paciente. Isso inclui dados tabulares, informações de prontuários de pacientes de séries temporais, relatórios médicos e dados de imagem.

O campo terapêutico da cardiologia também está passando por uma mudança de paradigma com a integração de tecnologias de saúde digital. A abordagem tradicional de tratamento único está sendo substituída por uma estratégia mais personalizada. Com o monitoramento contínuo da saúde, os planos de tratamento podem ser ajustados em tempo real com base na resposta do paciente, maximizando assim os benefícios terapêuticos e minimizando os efeitos adversos. Além das tecnologias disponíveis, outros conceitos tecnológicos contribuem para o desenvolvimento da cardiologia intervencionista⁵⁹.

3.1 Digitalômica

É definida como um conceito interdisciplinar inovador que combina análises ômicas interdisciplinares – como genômica, proteômica, radiômica e metabolômica –, em que dados ativos, passivos, de imagem de ultrassom e radiologia e genômicos, além de registros eletrônicos de saúde, dados laboratoriais e biológicos e dados físicos de dados pessoais de saúde, são sintetizados para entender de forma abrangente e completa o histórico e os riscos personalizados do paciente. A digitalômica aborda limitações em dados genômicos usando dispositivos digitais e biossensores para coleta contínua de dados, permitindo uma captura dinâmica de dados biomédicos, diferentemente dos dados tradicionais de ponto único registrados em ambientes de saúde⁶¹.

Tanto para pacientes existentes quanto indivíduos saudáveis, os wearables podem fornecer uma fonte contínua de dados biométricos, facilitando a correlação e a compatibilidade efetivas com dados de check-up de saúde, respectivamente. Esses dados podem ajudar a estabelecer parâmetros biométricos normais, intervalos de desvio permitidos e rastrear flutuações de condições ambientais, levando a diagnósticos e intervenções mais precisos. O Project Baseline Health Study, do Google, e o UK Biobank são exemplos dessas iniciativas^{62,63}.

Shen et al⁶¹ desenvolveram uma estratégia de microamostragem multiômica frequente e densa, juntamente com dados biométricos de dispositivos vestíveis para traçar o perfil de mudanças na saúde associadas ao estilo de vida. Esta estrutura analítica inovadora, dinâmica e abrangente tem o potencial de preencher as lacunas das atuais informações fisiológicas, biológicas e clínicas intermitentes. A incorporação de dados biométricos da vida diária na estrutura acadêmica ajuda a superar as limitações dos dados médicos existentes e da análise ômica centrada no genoma. Esta integração aprofunda a compreensão biológica, oferece novos insights sobre valores e intervalos humanos normais, esclarece conceitos e mecanismos de doenças e oferece suporte a agrupamentos precisos para medicina de precisão e modelos de pacientes estendidos para medicina de precisão.

Ferramentas de avaliação e diagnóstico baseadas em IA estão aprimorando o potencial de rastrear descobertas com alta precisão, auxiliando o diagnóstico precoce e suporte, independentemente da localização do paciente ou ambiente de saúde. Este avanço não só permite a detecção e intervenção precoce de doenças, aumentando assim a taxa de sucesso do diagnóstico e tratamento, mas também supera as restrições geográficas e a escassez de recursos de saúde. Como resultado, o acesso à saúde melhora, tornando o diagnóstico viável mesmo em áreas remotas e carentes de assistência médica. Essas abordagens estão mudando de um reconhecimento de padrão tradicional de uma anormalidade e uma descoberta para uma avaliação expandida usando os recursos de processamento de dados da IA⁶⁴.

A IA, por exemplo, se destaca na análise de grandes quantidades de dados em planos vetoriais multidimensionais, permitindo identificar certos

padrões ou correlações e oferecendo o potencial de realizar uma estratificação totalmente diferente da classificação tradicional de doenças. Espera-se que esse desenvolvimento estimule as abordagens médicas mais personalizadas. Ao estratificar os pacientes com base nas características, dados de exames e dados ômicos, é possível desenvolver modelos humanos artificiais precisos, que forneçam planos de tratamento ou terapias ideais para cada paciente. Isso vai além de uma base de fator único, potencialmente vinculando-se a uma abordagem de medicina de precisão altamente avançada⁶⁵.

Neste cenário, as características únicas de cada paciente são resumidas em alguns modelos conhecidos como “gêmeo digital”, resultando em estratégias de tratamento mais direcionadas e eficazes. Para pacientes com cardiomiopatia arritmogênica, por exemplo, um modelo de gêmeo digital foi criado para prever a progressão do dano miocárdico com base em dados ecocardiográficos longitudinais⁶⁶. Este modelo foi validado para demonstrar mudanças regionais progressivas na contratilidade miocárdica, complacência e atraso de ativação em pacientes com cardiomiopatia arritmogênica, independentemente da idade de início⁶⁷.

3.2 Intervenção digital

Trata-se de uma abordagem que busca individualizar e otimizar intervenções a partir de um modelo de paciente baseado em digitalômica, com rastreamento oportuno de pacientes recebendo intervenção otimizada. Ele aproveita o poder da tecnologia de saúde digital e IA para revolucionar o atendimento. A intervenção digital aproveita o poder dos dados e as ferramentas digitais para prever, prevenir, gerenciar e tratar doenças. Esta abordagem é especialmente influente em cardiologia, onde as intervenções podem melhorar a prevenção, o diagnóstico e a terapêutica⁶⁵.

3.3 Intervenções personalizadas por meio da saúde digital

Registros médicos eletrônicos (EMR), análise de genoma e proteoma, juntamente com dispositivos vestíveis, estão contribuindo para uma vasta quantidade de dados capazes de revolucionar a assistência médica. As alternativas para estratégias de tratamento otimizadas não param apenas em variações crescentes iniciais. Com dados coletados ao longo do tempo de dispositivos, é possível implementar um sistema de circuito fechado que otimiza o tratamento, oferecendo vários padrões de tratamento ajustados. Essa quantidade de dados permite estratificar os pacientes com base em vários parâmetros de saúde⁶⁸.

A composição genômica, o estilo de vida e outros fatores de saúde individuais podem influenciar significativamente como elas respondem ao tratamento. Ao considerar esses fatores, é possível personalizar estratégias de tratamento para cada paciente, melhorando a eficácia do tratamento e potencialmente reduzindo os efeitos colaterais. É importante notar que a eficácia dessa abordagem não é sobre verificar a validade do ajuste

individual, mas sobre questionar o resultado desse design de tratamento como um todo. Por meio dessa abordagem, pode-se validar se o ajuste apropriado pode ser alcançado⁶⁸.

O monitoramento contínuo dos níveis de açúcar no sangue e a implementação de um sistema de circuito fechado para dosagem de insulina, por exemplo, já demonstraram uma redução nos níveis de hemoglobina glicada A1c. Observar flutuações em vários parâmetros permitirá, futuramente, ajustar e otimizar de forma mais detalhada. Quando o sistema de circuito fechado é aplicado em intervenções de cardiologia, dispositivos de monitoramento contínuo e sistemas de administração terapêutica trabalham em conjunto, acionados por algoritmos inteligentes⁶⁹.

No gerenciamento de insuficiência cardíaca, por exemplo, um sistema de circuito fechado pode consistir em um dispositivo vestível que monitora continuamente parâmetros-chave, como frequência cardíaca, pressão arterial e nível de atividade. Ele alimenta um algoritmo acionado por IA que detecta quaisquer desvios da norma, sinalizando deterioração potencial. O sistema pode então responder ajustando a dosagem de medicação do paciente ou enviando alertas ao paciente e seu provedor de saúde, facilitando a intervenção imediata. O impacto dos sistemas de circuito fechado no campo médico é profundo⁷⁰.

Esses sistemas não só permitem o planejamento do tratamento com base na estratificação do paciente, mas também ajustes individuais em tempo real, resultando em um padrão infinito de intervenções terapêuticas otimizadas. Isso melhoraria os resultados e reduziria as hospitalizações. Além disso, eles capacitam os pacientes, fornecem insights acionáveis sobre seu estado de saúde e permitem que eles assumam um papel ativo em seus próprios cuidados^{69,70}.

3.4 Terapêutica digital

Software de dispositivo regulamentado, voltado para o tratamento de doenças, a terapêutica digital (DTx) oferece uma nova abordagem para a assistência médica após intervenções cirúrgicas e de medicina interna. Uma característica fundamental da DTx é o envolvimento ativo dos pacientes, exigindo mudança de comportamento. Isso requer a incorporação de design de aplicativo, princípios de terapia cognitivo-comportamental e gamificação para manter o envolvimento do usuário. Uma abordagem tão abrangente exige colaboração em diversos campos e um ambiente de suporte para essas interações. Além disso, a DTx exige uma mudança na mentalidade dos provedores de assistência médica⁷⁰.

Ao contrário das prescrições tradicionais, nas quais os pacientes são os únicos responsáveis pela adesão à medicação, a DTx exige que os provedores de assistência médica auxiliem ativamente os pacientes durante toda a sua jornada de tratamento. Aproveitando dados digitais, os provedores de assistência médica e os pacientes contribuem conjuntamente para a terapia, promovendo um ambiente de tratamento colaborativo. A DTx também

contribui para promover a medicina personalizada, combinando correção médica, design envolvente e suporte contínuo. Ela pode remodelar as metodologias de tratamento e melhorar os resultados dos pacientes, mudando o cenário da assistência médica^{70,71}.

3.5 IA e telessaúde

Os métodos tradicionais de diagnóstico, especialmente exames físicos e técnicas de imagem, dependem das habilidades individuais dos provedores de assistência médica. Isso tornou desafiador fornecer o mesmo nível de assistência médica a todos e em todos os lugares. Porém, as técnicas de diagnóstico automático baseadas em IA estão superando essas limitações, oferecendo a oportunidade para qualquer pessoa receber o mesmo nível de assistência médica em qualquer lugar⁷³. Por exemplo, os avanços em aplicações de IA em campos como radiologia e ecocardiografia abriram caminho para assistência médica padronizada e de alta qualidade⁷⁴.

A automação dessas tarefas e o avanço da telessaúde permitiram que os provedores de assistência médica economizassem tempo tradicionalmente gasto nessas tarefas. Isso permite que eles mudem para tarefas recentes ou humanísticas, como comunicação de risco com pacientes, explicação de condições e tarefas baseadas em empatia. Além disso, a telessaúde permite que os pacientes consultem os provedores de assistência médica remotamente, independentemente de sua localização. A otimização diligente dos resultados terapêuticos individuais não apenas confere benefícios pessoais à saúde, mas também gera um impacto considerável no bem-estar social, manifestando um equilíbrio harmonioso entre a prestação eficaz de assistência médica e a eficiência econômica⁷⁵.

REFERÊNCIAS

1. Gruentzig AR, Senning A, Siegenthaler WE. Nonoperative dilatation of coronary-artery stenosis: percutaneous transluminal coronary angioplasty. *N Engl J Med.* 1979;301(2):61-68.
2. Serruys PW, de Jaegere P, Kiemeneij F, et al. A comparison of balloon-expandable-stent implantation with balloon angioplasty in patients with coronary artery disease. *N Engl J Med.* 1994;331(8):489-495.
3. Stone GW, Moses JW, Ellis SG, et al. Safety and efficacy of sirolimus- and paclitaxel-eluting coronary stents. *N Engl J Med.* 2007;356(10):998-1008.
4. Smith CR, Leon MB, Mack MJ, et al. Transcatheter versus surgical aortic-valve replacement in high-risk patients. *N Engl J Med.* 2011;364(23):2187-2198.

5. Feldman T, Foster E, Glower DD, et al. Percutaneous repair or surgery for mitral regurgitation. *N Engl J Med*. 2011;364(15):1395-1406.
6. Kotronias RA, Kwok CS, George S, et al. Robotically-assisted percutaneous coronary intervention: a systematic review and meta-analysis. *EuroIntervention*. 2020;16(7):527-534.
7. Chahine J, Mascarenhas L, George SA, Bartos J, Yannopoulos D, Raveendran G, et al. Effects of a mixed-reality headset on procedural outcomes in the cardiac catheterization laboratory. *Cardiovasc Revascularization Med*. 2022;45:3-8.
8. Bloom D, Catherall D, Miller N, Southworth MK, Glatz AC, Silva JR, et al. Use of a mixed reality system for navigational mapping during cardiac electrophysiological testing does not prolong case duration: a subanalysis from the cardiac augmented reality study. *Cardiovasc Digit Health J*. 2023;4:111-7.
9. Avari Silva JN, Southworth MK, Blume WM, Andrews C, Van Hare GF, Dalal AS, et al. First-in-human use of a mixed reality display during cardiac ablation procedures. *JACC Clin Electrophysiol*. 2020;6:1023-5.
10. Chahine J, Mascarenhas L, George SA, Bartos J, Yannopoulos D, Raveendran G, et al. Effects of a mixed-reality headset on procedural outcomes in the cardiac catheterization laboratory. *Cardiovasc Revascularization Med*. 2022;45:3-8.
11. Holland MI, Pop SR, John NW. VR Cardiovascular blood simulation as decision support for the future cyber hospital. In: *Proceedings of the 2017 International Conference on Cyberworlds (CW)*; 2017 Sep 20-22; Chester, UK. p. 233-6.
12. Franson D, Dupuis A, Gulani V, Griswold M, Seiberlich N. A system for real-time, online mixed-reality visualization of cardiac magnetic resonance images. *J Imaging*. 2021;7(12):274.
13. Pasquali M, Fusini L, Italiano G, Maltagliati A, Tamborini G, Penso M, et al. Feasibility study of a mixed reality tool for real 3D visualization and planning of left atrial appendage occlusion. *J Cardiovasc Comput Tomogr*. 2022;16:460-2.
14. Alonso-Felipe M, Aguiar-Pérez JM, Pérez-Juárez MÁ, Baladrón C, Peral-Oliveira J, Amat-Santos IJ. Application of mixed reality to ultrasound-guided femoral arterial cannulation during real-time practice in cardiac interventions. *J Healthc Inform Res*. 2023;7:527-41.

15. Salavitabar A, Zampi JD, Thomas C, Zanaboni D, Les A, Lowery R, et al. Augmented reality visualization of 3D rotational angiography in congenital heart disease: a comparative study to standard computer visualization. *Pediatr Cardiol*. 2023.
16. Prieto-Avalos G, Cruz-Ramos NA, Alor-Hernández G, Sánchez-Cervantes JL, Rodríguez-Mazahua L, Guarneros-Nolasco LR. Wearable devices for physical monitoring of heart: a review. *Biosensors (Basel)*. 2022;12(5):292.
17. Guk K, Han G, Lim J, Jeong K, Kang T, Lim EK, et al. Evolution of wearable devices with real-time disease monitoring for personalized healthcare. *Nanomaterials (Basel)*. 2019;9(6):813.
18. Haleem A, Javaid M, Singh RP, Suman R. Telemedicine for healthcare: capabilities, features, barriers, and applications. *Sens Int*. 2021;2:100117.
19. Aritürk C, Açıl M, Ulugöl H, Ustalar Özgen ZS, Ökten EM, Dağdelen S, et al. Is the Nexfin finger cuff method for cardiac output measurement reliable during coronary artery bypass grafting? A prospective comparison with the echocardiography and FloTrac/vigileo methods. *Turk J Med Sci*. 2016;46:291–5.
20. Biais M, Vidil L, Rouillet S, Masson F, Quinart A, Revel P, et al. Continuous noninvasive arterial pressure measurement: evaluation of CNAPTM device during vascular surgery. *Ann Fr Anesth Reanim*. 2010;29(7–8):530–5.
21. Stenglova A, Benes J. Continuous non-invasive arterial pressure assessment during surgery to improve outcome. *Front Med*. 2017;4:202.
22. Fischer MO, Coucoravas J, Truong J, Zhu L, Gérard JL, Hanouz JL, et al. Assessment of changes in cardiac index and fluid responsiveness: a comparison of Nexfin and transpulmonary thermodilution. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2013;57(6):704–12.
23. Weiss E, Gayat E, Dumans-Nizard V, Le Guen M, Fischler M. Use of the NexfinTM device to detect acute arterial pressure variations during anaesthesia induction. *Br J Anaesth*. 2014;113(1):52–60.
24. Jonas R, Earls J, Marques H, Chang HJ, Choi JH, Doh JH, et al. Relationship of age, atherosclerosis and angiographic stenosis using artificial intelligence. *Open Heart*. 2021;8(2):e001832.

25. Gala D, Behl H, Shah M, Makaryus AN. The role of artificial intelligence in improving patient outcomes and future of healthcare delivery in cardiology: a narrative review of the literature. *Healthcare*. 2024;12(4):481.
26. Bailey CJ, Edwards JB, Giarelli M, Zwiebel B, Grundy L, Shames M. Cloud-based fusion imaging improves operative metrics during fenestrated endovascular aneurysm repair. *J Vasc Surg*. 2023;77(2):366–73.
27. Cobianchi L, Verde JM, Loftus TJ, Piccolo D, Dal Mas F, Mascagni P, et al. Artificial intelligence and surgery: ethical dilemmas and open issues. *J Am Coll Surg*. 2022;235(2):268–75.
28. Gala D, Behl H, Shah M, Makaryus AN. The role of artificial intelligence in improving patient outcomes and future of healthcare delivery in cardiology: a narrative review of the literature. *Healthcare*. 2024;12(4):481.
29. Kappetein AP, Head SJ, G  n  reux P, Piazza N, van Mieghem NM, Blackstone EH, et al. Updated standardized endpoint definitions for transcatheter aortic valve implantation: the valve academic research consortium-2 consensus document. *Eur Heart J*. 2012;33(19):2403–18.
30. Thourani VH, Kodali S, Makkar RR, Herrmann HC, Williams M, Babaliaros V, et al. Transcatheter aortic valve replacement versus surgical valve replacement in intermediate-risk patients: a propensity score analysis. *Lancet*. 2016;387(10034):2218–25.
31. Chakravarti J, Rao SV. Robotic assisted percutaneous coronary intervention: hype or hope? *J Am Heart Assoc*. 2019;8(13):e012743.
32. Lemos PA, Franken M, Mariani J, Pitta FG, Oliveira FA, Cunha-Lima G, et al. Use of robotic assistance to reduce proximity and air-sharing during percutaneous cardiovascular intervention. *Future Cardiol*. 2021;17(5):865–73.
33. Cerny S, Oosterlinck W, Onan B, Singh S, Segers P, Bolcal C, et al. Robotic cardiac surgery in Europe: status 2020. *Front Cardiovasc Med*. 2022;8:827515.
34. Najafi G, Kreiser K, Abdelaziz MEMK, Hamady MS. Current state of robotics in interventional radiology. *Cardiovasc Intervent Radiol*. 2023;46(5):549–61.
35. H  ner JD, R  ber L, Moro C, Losdat S, Windecker S. Robotic-assisted percutaneous coronary intervention: experience in Switzerland. *Front Cardiovasc Med*. 2023;10:1294930.

36. Giannopoulos AA, Mitsouras D, Yoo SJ, Liu PP, Chatzizisis YS, Rybicki FJ. Applications of 3D printing in cardiovascular diseases. *Nat Rev Cardiol*. 2016;13(12):701–18.
37. Bartel T, Rivard A, Jimenez A, Mestres CA, Müller S. Medical three-dimensional printing opens up new opportunities in cardiology and cardiac surgery. *Eur Heart J*. 2018;39(15):1246–54.
38. Liu N, Ye X, Yao B, Zhao M, Wu P, Liu G, et al. Advances in 3D bioprinting technology for cardiac tissue engineering and regeneration. *Bioact Mater*. 2021;6(5):1388–401.
39. Chingale M, Zhu D, Cheng K, Huang K. Bioengineering technologies for cardiac regenerative medicine. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9:681705.
40. Augustine R, Dan P, Hasan A, Khalaf IM, Prasad P, Ghosal K, et al. Stem cell-based approaches in cardiac tissue engineering: controlling the microenvironment for autologous cells. *Biomed Pharmacother*. 2021;138:111425.
41. Häneke T, Sahara M. Progress in bioengineering strategies for heart regenerative medicine. *Int J Mol Sci*. 2022;23(7):3482.
42. Toh HW, Toong DWY, Ng JCK, Ow V, Lu S, Tan LP, et al. Polymer blends and polymer composites for cardiovascular implants. *Eur Polym J*. 2021;146:110249.
43. Patel S, Patel KB, Patel Z, Konat A, Patel A, Doshi JS, et al. Evolving coronary stent technologies - A glimpse into the future. *Cureus*. 2023;15(3):e35651.
44. Kumar T, Singh A, Thakre S, Acharya S, Shukla S, Kumar S. Scientific evolution of artificial heart valves: a narrative review. *Cureus*. 2023;15(7):e42131.
45. Fang S, Ellman DG, Andersen DC. Review: tissue engineering of small-diameter vascular grafts and their in vivo evaluation in large animals and humans. *Cells*. 2021;10(3):713.
46. De Donato G, Pasqui E, Panzano C, Brancaccio B, Grottola G, Galzerano G, et al. The polymer-based technology in the endovascular treatment of abdominal aortic aneurysms. *Polymers (Basel)*. 2021;13(8):1196.

47. Lee H, Jang TS, Han G, Kim HW, Jung HD. Freeform 3D printing of vascularized tissues: challenges and strategies. *J Tissue Eng.* 2021;12:204173142110572.
48. Reddy MSB, Ponnammma D, Choudhary R, Sadasivuni KK. A comparative review of natural and synthetic biopolymer composite scaffolds. *Polymers (Basel).* 2021;13(7):1105.
49. Tan W, Boodagh P, Selvakumar PP, Keyser S. Strategies to counteract adverse remodeling of vascular graft: a 3D view of current graft innovations. *Front Bioeng Biotechnol.* 2023;10:1097334.
50. Vento V, Soler R, Fabre D, Gavit L, Majus E, Brenot P, et al. Optimizing imaging and reducing radiation exposure during complex aortic endovascular procedures. *J Cardiovasc Surg (Torino).* 2019;60(1):41–53.
51. Keshavarz-Motamed Z, Del Alamo JC, Bluestein D, Edelman ER, Wentzel JJ. Editorial: novel methods to advance diagnostic and treatment value of medical imaging for cardiovascular disease. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:987326.
52. Dixon SR, Rabah M, Emerson S, Schultz C, Madder RD. A novel catheterization laboratory radiation shielding system: results of pre-clinical testing. *Cardiovasc Revasc Med.* 2022;36:51–5.
53. Vento V, Cercenelli L, Mascoli C, Gallitto E, Ancetti S, Faggioli G, et al. The role of simulation in boosting the learning curve in EVAR procedures. *J Surg Educ.* 2018;75(2):534–40.
54. Debucquois A, Vento V, Neumann N, Mertz L, Lejay A, Rouby AF, et al. X-ray exposure time in dedicated academic simulation programs is realistic to patient procedures. *EJVES Vasc Forum.* 2022;55:5–8.
55. Mukherjee D, White CJ. Role of IVUS imaging during arterial and venous lower extremity interventions. *JACC Cardiovasc Interv.* 2022;15(15):1579–81.
56. Cho H, Kang SJ, Min HS, Lee JG, Kim WJ, Kang SH, et al. Intravascular ultrasound-based deep learning for plaque characterization in coronary artery disease. *Atherosclerosis.* 2021;324:69–75.
57. Abdelaziz MEMK, Tian L, Hamady M, Yang GZ, Temelkuran B. X-ray to MR: the progress of flexible instruments for endovascular navigation. *Prog Biomed Eng.* 2021;3(3):032004.

58. Modarai B, Haulon S, Ainsbury E, Böckler D, Vano-Carruana E, Dawson J, et al. Editor's choice – European Society for Vascular Surgery (ESVS) 2023 clinical practice guidelines on radiation safety. *Eur J Vasc Endovasc Surg*. 2023;65(2):171–222.
59. Huang J-D, Wang J, Ramsey E, Leavey G, Chico TJA, Condell J. Applying artificial intelligence to wearable sensor data to diagnose and predict cardiovascular disease: a review. *Sensors (Basel)* 2022;22:8002.
60. Soenksen L, Ma Y, Zeng C, Boussioux L, Villalobos Carballo K, et al. Integrated multimodal artificial intelligence framework for healthcare applications. *NPJ Digit Med* 2022;5:149.
61. Shen X, Kellogg R, Panyard DJ, Bararpour N, Castillo KE, Lee-McMullen B, et al. Multiomics microsampling for the profiling of lifestyle-associated changes in health. *Nat Biomed Eng* 2023.
62. Arges K, Assimes T, Bajaj V, Balu S, Bashir MR, Beskow L, et al. The Project Baseline Health Study: a step towards a broader mission to map human health. *NPJ Digit Med* 2020;3:84.
63. Strain T, Wijndaele K, Dempsey PC, Sharp SJ, Pearce M, Jeon J, et al. Wearable-device measured physical activity and future health risk. *Nat Med* 2020;26:1385–91.
64. Taniguchi H, Takata T, Takechi M, Furukawa A, Iwasawa J, Kawamura A, et al. Explainable artificial intelligence model for diagnosis of atrial fibrillation using Holter electrocardiogram waveforms. *Int Heart J* 2021;62:534–9.
65. Kagiya N, Shrestha S, Farjo PD, Sengupta PP. Artificial intelligence: practical primer for clinical research in cardiovascular disease. *J Am Heart Assoc* 2019;8: e012788.
66. van Osta N, Kirkels FP, van Loon T, Koopsen T, Lyon A, Meiburg R, et al. Uncertainty quantification of regional cardiac tissue properties in arrhythmogenic cardiomyopathy using adaptive multiple importance sampling. *Front Physiol* 2021;12:738926.
67. Kirkels FP, van Osta N, Rootwelt-Norberg C, Chivulescu M, van Loon T, Aabel EW, et al. Monitoring of myocardial involvement in early arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy across the age spectrum. *J Am Coll Cardiol* 2023;82:785–97.
68. Dinh-Le C, Chuang R, Chokshi S, Mann D. Wearable health technology and electronic health record integration: scoping review and future directions. *JMIR Mhealth Uhealth* 2019;7:e12861.

69. Ware J, Allen JM, Boughton CK, Wilinska ME, Hartnell S, Thankamony A, et al. Randomized trial of closed-loop control in very young children with type 1 diabetes. *N Engl J Med* 2022;386:209–19.
70. Ottaviani MM, Vallone F, Micera S, Recchia FA. Closed-loop vagus nerve stimulation for the treatment of cardiovascular diseases: state of the art and future directions. *Front Cardiovasc Med* 2022;9:866957.
71. Nomura A. Digital health, digital medicine, and digital therapeutics in cardiology: current evidence and future perspective in Japan. *Hypertens Res* 2023;46:2126–34.
72. Kario K, Nomura A, Harada N, Okura A, Nakagawa K, Tanigawa T, et al. Efficacy of a digital therapeutics system in the management of essential hypertension: the HERB-DH1 pivotal trial. *Eur Heart J* 2021;42:4111–22.
73. Rodriguez JA, Shachar C, Bates DW. Digital inclusion as health care – supporting health care equity with digital-infrastructure initiatives. *N Engl J Med* 2022;386:1101–3.
74. Dey D, Slomka PJ, Leeson P, Comaniciu D, Shrestha S, Sengupta PP, et al. Artificial intelligence in cardiovascular imaging: JACC state-of-the-art review. *J Am Coll Cardiol* 2019;73:1317–35.