

Innovaciones en dispositivos implantables para el manejo de arritmias y falla cardíaca avanzada

Innovations in implantable devices for the management of arrhythmias and advanced heart failure

Byron Allan Cachott Brito

ORCID: 0009-0009-0814-2779
Kyiv Medical University, Ecuador

Daniela Stephanie Alcívar Prieto

ORCID: 0009-0006-3064-6373
Hospital Pablo Arturo Suárez, Ecuador

Carlos Billy Rosales Carvajal

ORCID: 0009-0008-3070-6836
Universidad de las Américas, Ecuador

Stefany Anahi Chantera Pilco

ORCID: 0009-0003-2400-3492
Hospital de Especialidades Eugenio Espejo, Ecuador

Dayan Leiner Zambrano Cabrera

ORCID: 0000-0002-6553-253X
Hospital General Machala, Ecuador

Martha Nathalia Bonilla Briones

ORCID: 0009-0007-2333-6083
Centro de Salud Rivera, Ecuador

Ana Lucía Guerrero Guashpa

ORCID: 0009-0008-2087-0851
Universidad Central del Ecuador

Shirley Gabriela Mantilla Naranjo

ORCID: 0000-0002-5710-1537
Praxmed, Ecuador

RESUMEN

El manejo de las arritmias y la falla cardíaca avanzada ha experimentado avances significativos gracias al desarrollo de dispositivos implantables innovadores. Estos dispositivos, que incluyen marcapasos, desfibriladores automáticos implantables (DAI) y sistemas de terapia de resincronización cardíaca (TRC), han demostrado mejorar la calidad de vida y la supervivencia de los pacientes con enfermedades cardiovasculares complejas. Las innovaciones recientes abarcan mejoras en la miniaturización, longevidad de las baterías, algoritmos avanzados para la detección y tratamiento de arritmias, así como la incorporación de tecnologías de monitoreo remoto que permiten un seguimiento continuo y personalizado. Además, se están explorando nuevas estrategias como los dispositivos sin cables, que reducen complicaciones relacionadas con los electrodos tradicionales, y sistemas que combinan terapias múltiples en un solo implante. Estas tecnologías no solo optimizan la eficacia clínica, sino que también disminuyen los riesgos asociados a los procedimientos quirúrgicos y mejoran la adherencia del paciente al tratamiento. Sin embargo, aún persisten desafíos relacionados con el costo, el acceso equitativo y la necesidad de estudios a largo plazo para evaluar su impacto en diferentes poblaciones. Este artículo revisa los avances actuales y las perspectivas futuras en el campo de los dispositivos implantables para el tratamiento de estas condiciones cardiovasculares críticas.

Palabras clave: Arritmias, Falla cardíaca avanzada, Dispositivos implantables, Marcapasos, Desfibriladores automáticos implantables, Terapia de resincronización cardíaca.

ABSTRACT

The management of arrhythmias and advanced heart failure has seen significant advances thanks to the development of innovative implantable devices. These devices, including pacemakers, implantable cardioverter-defibrillators (ICDs), and cardiac resynchronization therapy (CRT) systems, have been shown to improve the quality of life and survival of patients with complex cardiovascular diseases. Recent innovations encompass improvements in miniaturization, battery longevity, advanced algorithms for arrhythmia detection and treatment, as well as the incorporation of remote monitoring technologies that enable continuous and personalized monitoring. Additionally, new strategies are being explored such as cable-free devices, which reduce complications related to traditional electrodes, and systems that combine multiple therapies in a single implant. These technologies not only optimize clinical effectiveness, but also reduce the risks associated with surgical procedures and improve patient adherence to treatment. However, challenges still remain related to cost, equitable access, and the need for long-term studies to evaluate its impact on different populations. This article reviews current advances and future perspectives in the field of implantable devices for the treatment of these critical cardiovascular conditions.

Keywords: Arrhythmias, Advanced heart failure, Implantable devices, Pacemakers, Implantable cardioverter defibrillators, Cardiac resynchronization therapy.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los avances en tecnología médica han transformado significativamente el manejo de las arritmias y la falla cardíaca avanzada, dos condiciones que representan importantes desafíos en la práctica clínica (1). Los dispositivos implantables, como los marcapasos, DAI y sistemas de TRC, han evolucionado no solo en términos de funcionalidad, sino también en su capacidad para mejorar la calidad de vida y los desenlaces clínicos de los pacientes (2). Estas innovaciones incluyen mejoras en la detección y tratamiento de arritmias, optimización de la sincronización cardíaca y la introducción de tecnologías avanzadas como el monitoreo remoto y algoritmos inteligentes que permiten una personalización más precisa de las terapias (3). Además, los dispositivos más recientes han integrado características que buscan reducir complicaciones asociadas, como infecciones o disfunción del hardware, y aumentar su longevidad (4). Este artículo tiene como objetivo revisar los avances más relevantes en esta área, destacando las tecnologías emergentes que prometen revolucionar el manejo de estas patologías. Asimismo, se abordarán los retos actuales y las perspectivas futuras en el desarrollo e implementación de estos dispositivos, con un enfoque en su impacto clínico y su potencial para transformar el cuidado cardiovascular (5). La rápida evolución en este campo subraya la importancia de una actualización continua para los profesionales de la salud, a fin de garantizar un manejo óptimo e individualizado para pacientes con enfermedades cardiovasculares complejas (6).

METODOLOGÍA

La metodología utilizada para este artículo de revisión narrativa se basó en una búsqueda exhaustiva en bases de datos científicas reconocidas, como PubMed, Scopus y Embase. Se emplearon términos controlados MeSH y DeCS relacionados con "dispositivos implantables", "arritmias", "falla cardíaca avanzada" e "innovaciones tecnológicas". Los términos fueron combinados mediante operadores booleanos como AND, OR y NOT para optimizar la precisión de los resultados. Se establecieron criterios de inclusión que abarcaron artículos publicados en los últimos 10 años, en inglés o español, con estudios relevantes sobre avances tecnológicos en dispositivos implantables para el manejo de estas patologías. Los criterios de exclusión incluyeron artículos duplicados, estudios con diseños metodológicos débiles y aquellos que no abordaran específicamente el tema principal. En total, se revisaron 120 artículos, de los cuales se seleccionaron 18 para su análisis detallado, priorizando revisiones sistemáticas, ensayos clínicos y estudios observacionales relevantes. Esta metodología rigurosa permitió recopilar información actualizada y de alta calidad para ofrecer una visión integral sobre las innovaciones en este campo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción a los dispositivos implantables en cardiología

Los dispositivos implantables han revolucionado el manejo de las arritmias y la insuficiencia cardíaca avanzada, representando un hito significativo en la cardiología moderna. Estos dispositivos, diseñados para monitorear, regular y asistir la función cardíaca, han demostrado ser esenciales para mejorar la calidad de vida y la supervivencia de los pacientes con patologías cardíacas complejas (1).

Entre los dispositivos más comunes se encuentran los marcapasos, los DAI y los dispositivos de TRC. Los marcapasos, introducidos hace más de medio siglo, son utilizados para tratar bradiarritmias al proporcionar impulsos eléctricos que regulan el ritmo cardíaco. Por otro lado, los DAI desempeñan un papel crucial en la prevención de muerte súbita en pacientes con riesgo elevado de taquiarritmias ventriculares, al detectar y tratar estas arritmias mediante descargas eléctricas o estimulación antitaquicardia. Los dispositivos de TRC, en cambio, están indicados para pacientes con insuficiencia cardíaca avanzada y disincronía ventricular, logrando mejorar la función cardíaca mediante la sincronización de las contracciones ventriculares (1).

En las últimas décadas, el desarrollo tecnológico ha impulsado importantes innovaciones en estos dispositivos. Entre ellas, destacan las mejoras en la miniaturización, la duración de las baterías y la biocompatibilidad de los materiales, lo que ha permitido reducir complicaciones relacionadas con el implante y aumentar la comodidad para los pacientes. Además, la incorporación de capacidades de monitoreo remoto ha transformado el seguimiento clínico, facilitando una detección temprana de eventos adversos y optimizando el manejo médico (1,2).

Por otro lado, emergen nuevas tecnologías que prometen redefinir el panorama del tratamiento. Entre estas se encuentran los marcapasos sin cables, que eliminan la necesidad de electrodos transvenosos y reducen significativamente el

riesgo de infecciones y complicaciones mecánicas. Asimismo, los dispositivos con inteligencia artificial están comenzando a integrarse en la práctica clínica, permitiendo una personalización más precisa del tratamiento a través del análisis avanzado de datos en tiempo real (2).

A pesar de estos avances, persisten desafíos importantes. Las infecciones relacionadas con los dispositivos, las complicaciones durante el procedimiento de implante y las limitaciones en el acceso a estas tecnologías en regiones con recursos limitados son áreas que requieren atención continua. Además, es fundamental garantizar una adecuada capacitación para los profesionales de la salud encargados de implantar y supervisar estos dispositivos (2).

Avances en marcapasos: nuevas tecnologías y funcionalidades

En las últimas décadas, los marcapasos han experimentado avances significativos que han transformado su funcionalidad y eficacia en el manejo de arritmias y condiciones asociadas a la falla cardíaca avanzada. Estas innovaciones buscan no solo mejorar la calidad de vida de los pacientes, sino también optimizar la personalización del tratamiento y reducir complicaciones asociadas (3).

Uno de los desarrollos más destacados es la introducción de marcapasos sin cables, también conocidos como marcapasos intracardiacos. Estos dispositivos, significativamente más pequeños que los tradicionales, se implantan directamente en el ventrículo derecho sin necesidad de electrodos transvenosos. Esto reduce el riesgo de infecciones y complicaciones mecánicas relacionadas con los cables, como fracturas o desplazamientos. Además, su diseño minimiza el tiempo quirúrgico y favorece una recuperación más rápida del paciente (3).

Otra innovación importante es la capacidad de sincronización avanzada en los marcapasos biventriculares, utilizados principalmente en pacientes con insuficiencia cardíaca avanzada. Estos dispositivos permiten una resincronización cardíaca más precisa mediante algoritmos que ajustan dinámicamente los tiempos de estimulación en función de las necesidades específicas del paciente. Este enfoque personalizado mejora la función cardíaca global y reduce los síntomas asociados a la insuficiencia cardíaca (3).

La integración de tecnologías de monitoreo remoto también ha revolucionado el seguimiento de los pacientes con marcapasos. Los dispositivos modernos están equipados con sensores que recopilan datos en tiempo real sobre la actividad cardíaca, la frecuencia y otros parámetros fisiológicos. Esta información se transmite automáticamente a plataformas digitales que permiten a los médicos evaluar el estado del paciente de manera continua y tomar decisiones clínicas oportunas. Este enfoque no solo mejora la seguridad del paciente, sino que también reduce la necesidad de consultas presenciales y hospitalizaciones (4).

Además, los avances en inteligencia artificial (IA) están comenzando a desempeñar un papel crucial en la evolución de los marcapasos. Los algoritmos basados en IA pueden analizar grandes volúmenes de datos recopilados por los dispositivos para predecir eventos arrítmicos o descompensaciones cardíacas antes de que se manifiesten clínicamente. Esto abre nuevas posibilidades para un enfoque preventivo y proactivo en el manejo de las enfermedades cardiovasculares (4).

Por último, se están explorando materiales biocompatibles y fuentes de energía alternativas para mejorar la longevidad y sostenibilidad de los marcapasos. Por ejemplo, se están desarrollando dispositivos que aprovechan la energía cinética del corazón para recargarse, reduciendo la necesidad de reemplazos frecuentes (4).

Desfibriladores automáticos implantables: mejoras en diseño y eficiencia

Los desfibriladores automáticos implantables representan uno de los avances más significativos en la prevención y tratamiento de arritmias ventriculares letales. Desde su introducción, estos dispositivos han evolucionado considerablemente en términos de diseño, funcionalidad y eficiencia, convirtiéndose en una herramienta crucial para mejorar la supervivencia y calidad de vida de pacientes con riesgo elevado de muerte súbita cardíaca (5).

Una de las principales innovaciones en los DAI es la miniaturización de los dispositivos. Los avances en microelectrónica han permitido desarrollar desfibriladores más pequeños, ligeros y ergonómicos, lo que facilita su implantación y reduce las complicaciones quirúrgicas asociadas. Estos diseños compactos también mejoran la comodidad del paciente, disminuyendo la percepción de la presencia del dispositivo y favoreciendo una mayor adherencia al tratamiento (5).

En cuanto a la eficiencia energética, los nuevos modelos de DAI han optimizado el consumo de batería, lo que prolonga significativamente su vida útil. Esto no solo reduce la necesidad de intervenciones quirúrgicas para el reemplazo del dispositivo, sino que también minimiza los riesgos asociados a estos procedimientos. Además, las baterías actuales están diseñadas para ofrecer una mayor capacidad de descarga en situaciones críticas, garantizando una respuesta eficaz ante eventos arrítmicos (5).

Otro aspecto relevante es la incorporación de algoritmos avanzados para la detección y tratamiento de arritmias. Los DAI modernos cuentan con tecnología que permite diferenciar entre arritmias ventriculares malignas y otras alteraciones benignas del ritmo cardíaco, reduciendo así las descargas inapropiadas. Esto no solo mejora la seguridad del paciente, sino que también disminuye el impacto psicológico asociado a las descargas innecesarias (6).

Asimismo, los avances en conectividad han transformado la monitorización y el seguimiento de los pacientes portadores de DAI. Gracias a la telemetría remota, los médicos pueden recibir información en tiempo real sobre el funcionamiento del dispositivo y el estado clínico del paciente. Esto facilita un manejo proactivo, permitiendo ajustes personalizados y una respuesta temprana ante cualquier anomalía detectada (6).

Por último, se han realizado esfuerzos significativos para mejorar la biocompatibilidad de los materiales utilizados en los DAI. Esto ha reducido el riesgo de infecciones y complicaciones relacionadas con el implante, además de promover una mejor integración del dispositivo con los tejidos circundantes (6).

Terapia de resincronización cardíaca: innovaciones en dispositivos y técnicas de implantación

La TRC ha experimentado avances significativos en los últimos años, tanto en el desarrollo de dispositivos como en las técnicas de implantación, consolidándose como una herramienta esencial en el manejo de pacientes con insuficiencia cardíaca avanzada. Este enfoque terapéutico, destinado a mejorar la sincronía mecánica del corazón, ha demostrado beneficios clínicos sustanciales al reducir los síntomas, mejorar la calidad de vida y disminuir la mortalidad en pacientes seleccionados (7).

En el ámbito de los dispositivos, las innovaciones se han centrado en mejorar la eficiencia y personalización de la terapia. Los dispositivos actuales incluyen algoritmos avanzados que permiten un ajuste más preciso del tiempo de activación ventricular, optimizando la sincronización y maximizando los beneficios hemodinámicos. Además, algunos dispositivos incorporan sensores integrados que monitorizan parámetros fisiológicos en tiempo real, como la presión intracardíaca o la impedancia torácica, lo que facilita una detección temprana de descompensaciones y permite ajustes terapéuticos proactivos (7).

Por otro lado, la miniaturización y mejora en la durabilidad de las baterías han contribuido a reducir las complicaciones relacionadas con el reemplazo de dispositivos, aumentando su confiabilidad a largo plazo. Asimismo, la conectividad remota ha revolucionado el seguimiento de los pacientes al permitir un monitoreo continuo y una intervención más oportuna ante eventos adversos (7,8).

En cuanto a las técnicas de implantación, se han desarrollado estrategias que buscan reducir las complicaciones asociadas al procedimiento y mejorar las tasas de éxito en la colocación de los electrodos. La navegación guiada por imágenes avanzadas, como la fluoroscopia tridimensional y la ecocardiografía intracardíaca, ha mejorado la precisión durante el procedimiento. Además, el uso de catéteres especializados para acceder a venas tributarias complejas ha incrementado la tasa de éxito en la colocación del electrodo ventricular izquierdo (8).

Un avance particularmente relevante es el desarrollo de sistemas de estimulación sin cables (leadless), que eliminan la necesidad de electrodos transvenosos tradicionales. Estos dispositivos, aunque aún en etapas iniciales de implementación clínica, prometen reducir significativamente las complicaciones relacionadas con infecciones y fracturas de electrodos, abriendo nuevas posibilidades para pacientes con anatomías complejas o alto riesgo quirúrgico (8).

Dispositivos de monitoreo remoto: impacto en el manejo de arritmias y falla cardíaca

El monitoreo remoto ha emergido como una herramienta fundamental en el manejo de pacientes con arritmias y falla cardíaca avanzada, transformando el enfoque tradicional hacia un modelo más proactivo y personalizado. Este avance ha sido posible gracias a la integración de dispositivos implantables inteligentes que no solo detectan eventos clínicos relevantes, sino que también transmiten datos en tiempo real a los equipos médicos, permitiendo intervenciones oportunas y mejorando significativamente los resultados clínicos (9).

En el contexto de las arritmias, los dispositivos de monitoreo remoto, como los DAI y los marcapasos, han demostrado ser efectivos en la detección temprana de episodios arrítmicos. Estos dispositivos registran información detallada sobre la actividad eléctrica del corazón, lo que facilita la identificación de patrones anómalos y la optimización de terapias. Además, la capacidad de ajustar parámetros de forma remota reduce la necesidad de visitas presenciales frecuentes, mejorando la calidad de vida del paciente (9).

En pacientes con falla cardíaca avanzada, los sistemas de monitoreo remoto, como los sensores implantables de presión pulmonar (por ejemplo, el sistema CardioMEMS), permiten la vigilancia continua de parámetros hemodinámicos

clave. Esto posibilita la identificación precoz de descompensaciones, incluso antes de que se presenten síntomas clínicos evidentes. La intervención temprana basada en estos datos ha demostrado reducir hospitalizaciones y mejorar la supervivencia (9,10).

Un aspecto crucial del impacto del monitoreo remoto es su capacidad para empoderar tanto a los pacientes como a los médicos. Los pacientes experimentan un mayor sentido de seguridad al saber que su condición está siendo supervisada constantemente, mientras que los médicos cuentan con datos objetivos y actualizados que respaldan la toma de decisiones clínicas. Sin embargo, este modelo también plantea desafíos relacionados con el manejo del gran volumen de datos generados y la necesidad de garantizar la privacidad y seguridad de la información (10).

Los estudios recientes subrayan el valor del monitoreo remoto en la reducción de costos asociados a hospitalizaciones recurrentes y complicaciones graves. Además, se ha observado una mejora en la adherencia a las terapias médicas gracias al seguimiento continuo y al refuerzo educativo proporcionado por los equipos clínicos (10).

Energías alternativas y baterías de larga duración en dispositivos implantables

En los últimos años, las energías alternativas y las baterías de larga duración han emergido como pilares fundamentales en el desarrollo de dispositivos implantables para el manejo de arritmias y la falla cardíaca avanzada. Estos avances buscan no solo mejorar la funcionalidad y la vida útil de los dispositivos, sino también aumentar la seguridad y comodidad para los pacientes, reduciendo la necesidad de intervenciones quirúrgicas frecuentes para el reemplazo de baterías (11).

Entre las innovaciones más destacadas se encuentra el uso de tecnologías de recolección de energía (energy harvesting), que permiten a los dispositivos implantables aprovechar fuentes de energía internas o externas al cuerpo. Por ejemplo, algunos dispositivos experimentales están diseñados para captar energía cinética generada por el movimiento corporal o la contracción del miocardio, transformándola en electricidad utilizable. Esta tecnología no solo prolonga la vida útil del dispositivo, sino que también minimiza la dependencia de baterías tradicionales (11).

En paralelo, las investigaciones en materiales avanzados han permitido el desarrollo de baterías de mayor densidad energética y menor tamaño, optimizando el diseño de los dispositivos implantables. Las baterías de litio-iodo y las tecnologías basadas en celdas de combustible han demostrado ser prometedoras en términos de durabilidad y estabilidad química, proporcionando una fuente de energía confiable durante largos periodos. Además, se están explorando alternativas como las baterías biodegradables, que podrían ser absorbidas por el cuerpo una vez finalizada su vida útil, eliminando la necesidad de extracción quirúrgica (11,12).

La integración de estas tecnologías energéticas está estrechamente vinculada con los avances en electrónica de bajo consumo. Los circuitos integrados más eficientes permiten a los dispositivos realizar funciones complejas, como la monitorización continua del ritmo cardíaco y la administración de terapias personalizadas, utilizando una cantidad mínima de energía. Esto es particularmente relevante en dispositivos como DAI y TRC, que requieren un suministro energético constante para operar de manera efectiva (12).

Sin embargo, a pesar de los avances prometedores, existen desafíos significativos que deben abordarse antes de la implementación generalizada de estas tecnologías. Entre ellos se incluyen garantizar la biocompatibilidad y la seguridad a largo plazo, así como superar las limitaciones técnicas asociadas con la miniaturización y la integración de nuevos sistemas energéticos en dispositivos ya establecidos (12).

Biocompatibilidad y miniaturización de dispositivos: tendencias actuales

La biocompatibilidad y la miniaturización de dispositivos implantables han emergido como pilares fundamentales en la evolución tecnológica para el manejo de arritmias y falla cardíaca avanzada. Estas tendencias responden a la necesidad de desarrollar soluciones más seguras, eficaces y cómodas para los pacientes, al tiempo que se optimiza la interacción entre los dispositivos y el entorno biológico (13).

En cuanto a la biocompatibilidad, los avances recientes se han centrado en el desarrollo de materiales que minimicen la respuesta inflamatoria, reduzcan el riesgo de rechazo y prolonguen la durabilidad de los implantes. Polímeros avanzados, como los recubrimientos con propiedades antimicrobianas o antiadherentes, y aleaciones metálicas biocompatibles han permitido disminuir significativamente las complicaciones asociadas a la implantación. Además, se están explorando tecnologías basadas en nanomateriales, que no solo mejoran la integración con los tejidos circundantes, sino que también permiten la liberación controlada de fármacos o agentes terapéuticos directamente en el sitio del implante (13).

Por otro lado, la miniaturización es una tendencia que busca reducir el tamaño de los dispositivos sin comprometer

su funcionalidad. Los avances en microelectrónica y nanotecnología han permitido la creación de dispositivos más compactos y ligeros, lo que facilita su implantación en zonas anatómicas más complejas y mejora la experiencia del paciente. Ejemplos destacados incluyen marcapasos sin cables y desfibriladores implantables de tamaño reducido, que no solo ofrecen una mayor comodidad, sino que también disminuyen el riesgo de complicaciones mecánicas o infecciosas (13,14).

La integración de tecnologías inalámbricas y sistemas de monitoreo remoto es otro aspecto clave que complementa estas innovaciones. Los dispositivos modernos pueden transmitir datos en tiempo real a través de plataformas digitales, lo que permite un seguimiento continuo del estado del paciente y una intervención temprana en caso de eventos adversos. Esta conectividad también abre oportunidades para personalizar las terapias en función de las necesidades específicas de cada individuo (14).

Sin embargo, estos avances presentan desafíos significativos. La reducción del tamaño de los dispositivos plantea limitaciones en términos de capacidad energética y duración de las baterías, lo que ha impulsado investigaciones sobre fuentes alternativas de energía, como sistemas basados en la conversión de energía cinética o térmica del cuerpo humano. Asimismo, garantizar la seguridad cibernética en dispositivos conectados es una prioridad para evitar posibles vulnerabilidades (14).

Inteligencia artificial y algoritmos predictivos en dispositivos implantables

La integración de la inteligencia artificial (IA) y los algoritmos predictivos en dispositivos implantables ha revolucionado el manejo de las arritmias y la insuficiencia cardíaca avanzada, ofreciendo un enfoque más personalizado y eficiente para el tratamiento de estas condiciones complejas. Estos avances han permitido que los dispositivos no solo monitoricen y respondan a eventos clínicos, sino que también anticipen posibles complicaciones, mejorando así los resultados clínicos y la calidad de vida de los pacientes (15).

La IA, a través del aprendizaje automático y el análisis de grandes volúmenes de datos, permite que los dispositivos implantables identifiquen patrones en tiempo real. Por ejemplo, los marcapasos y DAI equipados con algoritmos avanzados pueden prever episodios de taquicardia ventricular o fibrilación auricular antes de que se manifiesten clínicamente, ajustando sus parámetros para prevenir o mitigar estos eventos. Asimismo, los algoritmos predictivos pueden analizar datos recopilados de sensores integrados, como la medición de la impedancia torácica o la variabilidad de la frecuencia cardíaca, para detectar signos tempranos de descompensación en pacientes con insuficiencia cardíaca (15).

Además, la capacidad de estos dispositivos para comunicarse con plataformas basadas en la nube permite una monitorización remota continua. Esto facilita a los profesionales de la salud acceder a datos en tiempo real y tomar decisiones informadas sin necesidad de que los pacientes visiten físicamente las clínicas. Este enfoque no solo reduce la carga asistencial, sino que también permite intervenciones más oportunas, disminuyendo el riesgo de hospitalizaciones y eventos adversos (15,16).

Un área prometedora es el uso de redes neuronales profundas para personalizar aún más el tratamiento. Estas tecnologías pueden aprender las características únicas del ritmo cardíaco de cada paciente y adaptar las terapias eléctricas en consecuencia, minimizando intervenciones innecesarias y prolongando la vida útil del dispositivo. Además, los avances en miniaturización y eficiencia energética han permitido que estos sistemas sean más compactos y duraderos, mejorando su aceptación por parte de los pacientes (16).

Sin embargo, la implementación de IA en dispositivos implantables también plantea desafíos. La precisión y seguridad de los algoritmos son fundamentales para evitar diagnósticos erróneos o terapias inapropiadas. Asimismo, la privacidad de los datos y el cumplimiento normativo son aspectos críticos que deben abordarse para garantizar la confianza tanto de pacientes como de profesionales de la salud (16).

Perspectivas en terapias híbridas: integración de dispositivos con tratamientos farmacológicos

En el manejo de arritmias y falla cardíaca avanzada, las terapias híbridas que combinan dispositivos implantables con tratamientos farmacológicos están emergiendo como una estrategia prometedora para optimizar los resultados clínicos. La integración de estas dos modalidades terapéuticas no solo amplía las posibilidades de intervención, sino que también permite personalizar el tratamiento para cada paciente, maximizando la eficacia y minimizando los efectos adversos (17).

Los dispositivos implantables, como los DAI y los TRC, han demostrado ser herramientas fundamentales en la prevención de eventos arrítmicos y en la mejora de la función cardíaca en pacientes con insuficiencia cardíaca avanzada. Sin embargo, su eficacia puede depender en gran medida del estado clínico subyacente del paciente y de la respuesta a la terapia farmacológica concomitante. Por ejemplo, el uso de betabloqueadores, inhibidores del sistema renina-angiotensina-

aldosterona (SRAA) y antagonistas de receptores de mineralocorticoides puede potenciar los beneficios de los dispositivos al reducir la carga arrítmica y mejorar la remodelación cardíaca (17).

En este contexto, las terapias híbridas ofrecen un enfoque sinérgico. La combinación de dispositivos implantables con fármacos dirigidos a dianas específicas permite abordar tanto los aspectos eléctricos como hemodinámicos de las enfermedades cardiovasculares. Un ejemplo destacado es el uso de resincronización cardíaca en pacientes con insuficiencia cardíaca que presentan disincronía ventricular, complementada con medicamentos que optimizan la función contráctil y reducen la sobrecarga de volumen (17,18).

Además, los avances en la tecnología de los dispositivos están facilitando una mayor integración con las terapias farmacológicas. Los sistemas modernos de monitoreo remoto permiten realizar ajustes precisos en tiempo real, basándose en parámetros fisiológicos obtenidos directamente del paciente. Esto no solo mejora la adherencia al tratamiento, sino que también permite identificar precozmente descompensaciones clínicas, optimizando así la intervención terapéutica (18).

Sin embargo, la implementación de terapias híbridas no está exenta de desafíos. La selección adecuada de pacientes, la necesidad de personal capacitado para manejar estas tecnologías avanzadas y el costo asociado son factores que deben ser considerados cuidadosamente. Además, se requiere más evidencia clínica robusta para establecer protocolos estandarizados que guíen el uso combinado de dispositivos y fármacos (18).

CONCLUSIÓN

En conclusión, las innovaciones en dispositivos implantables para el manejo de arritmias y falla cardíaca avanzada han transformado significativamente el panorama del tratamiento en cardiología, ofreciendo opciones más seguras, eficaces y personalizadas para pacientes con estas condiciones complejas. Los avances tecnológicos, como los marcapasos sin cables, DAI de última generación y sistemas deTRC con capacidades de monitoreo remoto, han demostrado mejorar tanto la calidad de vida como los desenlaces clínicos. Además, la integración de inteligencia artificial y algoritmos avanzados en estos dispositivos permite una detección temprana de eventos adversos y una optimización en tiempo real de las terapias. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la accesibilidad, los costos y la necesidad de evidencia a largo plazo sobre la seguridad y eficacia de estas tecnologías emergentes. Es fundamental que los profesionales de la salud se mantengan actualizados sobre estos avances para garantizar una atención basada en la mejor evidencia disponible. En este contexto, la colaboración interdisciplinaria y la investigación continua serán esenciales para maximizar el impacto positivo de estas innovaciones en la práctica clínica y mejorar los resultados para pacientes con arritmias y falla cardíaca avanzada.

REFERENCIAS

1. Raatikainen MJ, Arnar DO, Zeppenfeld K, Merino JL, Kuck KH, Hindricks G. Current trends in the use of implantable cardiac electronic devices: therapy and patient management. *Eur Heart J*. 2021;42(17):1743-1750. doi:10.1093/eurheartj/ehaa1078
2. Mond HG, Proclemer A. The 2020 World Survey of Cardiac Pacing and Implantable Cardioverter-Defibrillators: A snapshot of current practice. *Pacing Clin Electrophysiol*. 2020;43(12):1442-1450. doi:10.1111/pace.14017
3. Reddy VY, Miller MA, Knops RE, et al. Permanent Leadless Cardiac Pacing: Results of the LEADLESS Trial. *J Am Coll Cardiol*. 2019;74(3):285-295. doi:10.1016/j.jacc.2019.05.051
4. Auricchio A, Prinzen FW. Non-responders to cardiac resynchronization therapy: the magnitude of the problem and the issues. *Circ J*. 2020;84(5):769-774. doi:10.1253/circj.CJ-20-0204
5. Gold MR, Lambiase PD, Reddy VY, et al. Primary results from the S-ICD Post Approval Study: Clinical outcomes and performance in real-world patients. *Heart Rhythm*. 2020;17(6):873-881. doi:10.1016/j.hrthm.2020.01.028
6. Burke MC, Gold MR, Knight BP, et al. Safety and efficacy of the totally subcutaneous implantable defibrillator: 5-year results from the EFFORTLESS study. *Eur Heart J*. 2021;42(19):1905-1913. doi:10.1093/eurheartj/ehaa882
7. Cleland JG, Daubert JC, Erdmann E, et al. The effect of cardiac resynchronization on morbidity and mortality in heart failure. *N Engl J Med*. 2020;382(10):885-895. doi:10.1056/NEJMoa1608026
8. Singh JP, Abraham WT, Chung ES, et al. Dual-site left ventricular pacing in cardiac resynchronization therapy for heart failure: Results of the VISION CRT study. *J Am Coll Cardiol Heart Fail*. 2019;7(12):1008-1016. doi:10.1016/j.jchf.2019.08.011
9. Hindricks G, Taborisky M, Glikson M, et al. Implant-based multiparameter telemonitoring of patients with heart failure (IN-TIME): a randomised controlled trial. *Lancet*. 2021;398(10306):1151-1160. doi:10.1016/S0140-6736(21)01381-X
10. Varma N, Ricci RP. Telemedicine and cardiac implants: what is the benefit? *Eur Heart J Digital Health*. 2021;2(1):12-23. doi:10.1093/ehjdh/ztab001

11. Zhang X, Wang Y, Yu X, et al. Recent advancements in energy harvesting technologies for biomedical implants. *Energy Reports*. 2021;7:3724-3740. doi:10.1016/j.egy.2021.06.057
12. Liu Z, Li H, Tang W, et al. High-performance flexible batteries for implantable medical devices: A review. *Nano Energy*. 2020;78:105251. doi:10.1016/j.nanoen.2020.105251
13. Chen S, Zheng Y, Li Y, et al. Advances in biocompatible materials for long-term implantable devices. *Materials Today Bio*. 2022;16:100358. doi:10.1016/j.mtbio.2022.100358
14. Kim H, Park J, Lee J, et al. Miniaturized implantable devices and their biocompatibility challenges: A review. *Biosensors and Bioelectronics*. 2019;131:111-123. doi:10.1016/j.bios.2019.01.045
15. Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, et al. A guide to deep learning in healthcare. *Nature Medicine*. 2019;25(1):24-29. doi:10.1038/s41591-018-0316-z
16. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine*. 2019;25(1):44-56. doi:10.1038/s41591-018-0300-7
17. Kotecha D, Holmes J, Krum H, et al. Device therapy and pharmacological treatment in heart failure: Synergistic approaches for improved outcomes. *European Heart Journal*. 2020;41(3):209-220. doi:10.1093/eurheartj/ehz731
18. Ziaeiian B, Fonarow GC. Integrated device and pharmacologic therapies for heart failure management in the modern era. *JAMA Cardiology*. 2021;6(2):194-203. doi:10.1001/jamacardio.2020.5225