



Historia de la estimulación cardíaca eléctrica. Los marcapasos

History of Electric Cardiac Stimulation. Pacemakers

■ Jesús Rodríguez García

Resumen

Los marcapasos, pequeñas prótesis electrónicas, constituyen un procedimiento terapéutico de extraordinaria utilidad. En este artículo se revisan sus antecedentes históricos, sus fundamentos y aplicaciones, así como su evolución en el tiempo hasta llegar a convertirse en los auténticos prodigios tecnológicos y clínicos que hoy son.

Palabras clave

Estimulación cardíaca. Marcapasos.

Abstract

Pacemakers, small electronic prostheses, are an extraordinarily useful therapeutic measure. In this article their historical antecedents, fundamentals and applications are revised together with their evolution over the years until their transformation into the authentic technological and clinical prodigies we know today.

Key words

Cardiac stimulation. Pacemaker

■ Introducción

Según el Diccionario de la Real Academia, el término marcapaso o marcapasos (pues ambas acepciones son válidas), proviene de la palabra inglesa *pacemaker*, y denomina a un pequeño aparato electrónico que excita rítmicamente al corazón incapaz de contraerse por sí mismo.

El autor es cardiólogo. Jefe de la Unidad de Marcapasos. Hospital Universitario "12 de Octubre". Madrid (España).

Desde el punto de vista científico, un marcapasos es un dispositivo implantable que reúne los requisitos para ser considerado una prótesis activa y que consta de: a) un generador de impulsos, b) un cable destinado a la conducción de dichos impulsos, y c) un electrodo, que es la porción terminal del cable en contacto con el corazón, bien con su superficie interna (endocardio) o con la externa (epicardio).

Es la prótesis mas popular entre la población general¹ y son frecuentes las noticias en la prensa diaria que informan de personajes públicos (políticos, financieros, artistas, etcétera) a los que se ha implantado uno de estos aparatos. Su rápida incorporación a la vida activa ha transmitido la idea de la eficacia terapéutica de esta prótesis y, a la vez, ha restado importancia a la intervención que conlleva su implante.

El pasado mes de julio un periódico de tirada nacional publicaba una noticia referente a los fallos detectados en las unidades de un determinado modelo de marcapasos, fabricadas en España e implantadas, además de en nuestro país, en Argentina e India. Esta noticia generó en los pacientes portadores de marcapasos (de cualquier marca y modelo) una situación de alarma, que derivó en numerosas consultas a los centros hospitalarios que llevan a cabo sus implantaciones, dado que se estima en más de 100.000 el número de españoles que son portadores de este tipo de prótesis.

Desde el año 1962, en que se llevó a cabo el primer implante de un marcapasos en España, esta terapia se ha desarrollado de una forma vertiginosa y en la actualidad se realizan unas 21.000 implantaciones al año, de las cuales el 20% corresponden a recambios de generador, en su mayor parte por agotamiento de las baterías que constituyen su fuente de energía. Esto supone un nivel de implantes de unas 500 unidades por millón de habitantes y año, según datos obtenidos del Banco Nacional de Marcapasos, lo que sitúa a España en una zona media dentro del nivel de implantes en Europa, lejos de las 800 unidades por millón de Bélgica y Alemania, y de las bajas tasas de implantación de los países del Este.

La electroterapia

La estimulación cardíaca eléctrica es una de las múltiples aplicaciones terapéuticas de la electricidad en la medicina moderna.

Sabemos que el primer uso terapéutico de la electricidad se hizo aprovechando la electricidad generada por ciertos peces, como la anguila eléctrica, algunas especies de rayas y el pez torpedo, que utilizan esta energía como arma de defensa y ataque. Así, clásicamente se des-

¹La popularidad del marcapasos la demuestra el que un grupo de música rock, como es "Hombres G", incorpore a su repertorio una canción cuya letra dice: *Marta tiene un marcapasos/que le anima el corazón/ no tiene que darle cuerda/es automático...*

cribe el caso de un esclavo romano que al pisar por azar un pez torpedo durante un baño en el mar, tras sentir inicialmente un violento dolor en el pie, mejoró espectacularmente de los dolores de una artritis gotosa que crónicamente padecía. Esta curiosa terapia fue aconsejada por Scribonius Largus en su libro *Composiciones medicae* en el que, además, señalaba con precisión cómo debían realizarse las aplicaciones de este tipo de peces (1).

Poco después, Pedacius Dioscórides expuso el tratamiento del prolapso anal mediante la aplicación de un pez generador de descargas eléctricas en la región perianal, debiéndose, quizá, ese efecto beneficioso al espasmo del esfínter causado por la descarga eléctrica (2). Y más tarde, otros autores, como Avicena, también señalaron la eficacia de la ictioelectroterapia en el tratamiento de la migraña y la epilepsia.

No se dispuso de otra fuente de electricidad hasta el siglo XVIII en que Alessandro Volta descubrió la pila, lo que hizo proliferar las observaciones del efecto de la electricidad sobre todo tipo de materiales, plantas y animales.

Etapa experimental

Luigi Galvani había experimentado en 1791 el efecto de colocar un pez torpedo sobre los nervios, músculos y corazón de ranas muertas, comprobando que tras el paso de la corriente eléctrica se producía la contracción muscular. Y en su trabajo *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius*, establecía los fundamentos esenciales de la estimulación cardíaca eléctrica del corazón, describiendo sus experiencias con el corazón de rana (3).

En 1798, durante la Revolución Francesa, Bichat obtuvo autorización para estudiar los efectos de la electricidad en el cuerpo de guillotinado, y publicó su trabajo *Recherches Physiologiques sur la vie et la mort*, donde afirmaba que el corazón después de parado podía reiniciar su contracción mediante la aplicación directa de estímulos eléctricos (4).

En 1802, con un método aún más macabro, Nysten (5), empleando corazones procedentes de cadáveres recién inhumados, y que desenterraba de forma clandestina, comprobó que era posible producir contracciones en aquéllos mediante la aplicación de la electricidad generada por una pila voltaica.

Aldini, en 1803, en cadáveres de criminales ajusticiados por decapitación, describió cómo, por medio de la pila de Volta, obtenía contracciones del corazón; y en su obra, *Essai théorique et expérimental sur le galvanisme avec une série d'expériences* exponía la posibilidad de emplear la electricidad para la reanimación cardíaca, siendo el primero en utilizar un sistema de temporización para aplicar la corriente eléctrica durante cortos períodos de tiempo (pulsos) (6). Y años más tarde, en 1864, J. Althus conseguía la estimulación eléctrica del corazón de perros utilizando una aguja que insertaba a través de la pared torácica.

Etapa preclínica

En 1870, Steiner describió el caso de una paciente que, tras la aplicación de cloroformo, sufrió un síncope del que fue reanimada tras aplicarle corriente eléctrica a través de una aguja

insertada en el corazón. Y poco después, en un editorial del *British Medical Journal*, comunicaba dos casos en los que también había aplicado esta técnica de estimulación cardíaca percutánea con agujas-electrodos.

H. Von Ziemseen realizó en 1882 experiencias dirigidas a aumentar o disminuir la frecuencia cardíaca mediante estimulación cardíaca directa. Para ello, utilizó en sus estudios a una paciente, Caterine Serafín, que, a consecuencia de un defecto en el desarrollo de la pared torácica, tenía el corazón inmediatamente debajo de la piel.

En esta época se publicaron numerosos trabajos sobre las aplicaciones de la electricidad al tratamiento de diversas patologías, destacando el de J. A. MacWilliam en 1889 en el *British Medical Journal*; allí establecía que "la estimulación cardíaca artificial puede ser útil para provocar la actividad de un corazón detenido por una causa temporal", y llegaba a precisar que la parada debía ser en diástole, al tiempo que describía las características de la fibrilación ventricular en el mamífero.

Tras el citado artículo, la misma revista publicaba un editorial titulado: *La estimulación eléctrica del corazón en el hombre*, en el que se advertía sobre la posibilidad de producir fibrilación ventricular si se usaba incorrectamente la corriente eléctrica, por lo que proponía como técnica de estimulación cardíaca externa la colocación de una placa-electrodo sobre la región precordial y otra similar en la espalda.

Por entonces, Claude Bernard ya había iniciado las técnicas de cateterización cardíaca por vía venosa; y sería Floresco, en 1905, el primero en conseguir estimular tanto la aurícula como el ventrículo derecho de perros (7), mediante una cánula de vidrio que contenía electrodos de cobre o platino que introducía a través de la vena yugular externa.

Etapa Clínica

Durante un congreso médico celebrado en Sydney en septiembre de 1929, el anestesista Mark C. Lidwill describió su experiencia con un aparato portátil, inventado por él, que recibía la electricidad de una toma convencional de pared, y que, además, permitía controlar el voltaje y la frecuencia de la estimulación. Dicho dispositivo tenía dos electrodos: uno, que consistía en una almohadilla empapada en suero fisiológico, y que se aplicaba sobre la piel en el brazo izquierdo; y el otro, una aguja recubierta de aislante salvo en su punta, que se insertaba en el ventrículo.

Había utilizado este aparato en bebés nacidos muertos, en los que, tras el fracaso de la inyección intracardíaca de adrenalina, había conseguido la reanimación de uno de ellos. Tras diez minutos de estimulación eléctrica pudo suspenderla al comprobar que el corazón latía por sí mismo, recuperándose el niño sin secuelas. En su comunicación proponía el uso de su invento para resolver el paro cardíaco anestésico, así como en el paro por ahogamiento, intoxicación por gases y en algunos casos de muerte súbita (en el seno de difteria y en cardiopatías) (8).

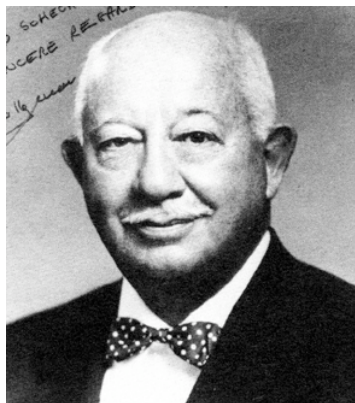


Figura 1. Albert S. Hyman, cardiólogo que utilizó por primera vez el término *artificial pacemaker* para designar un dispositivo de su invención dirigido a recuperar el paro cardíaco.

El invento y su fracaso

Basado en la experiencia de Lidwill, Albert S. Hyman, (coautor de un tratado de electrocardiografía y que ejercía como cardiólogo en Nueva York, donde gozaba de cierta reputación), comenzó a estudiar en 1930 la reanimación con inyecciones intracardiacas de adrenalina, sugiriendo que sus efectos dependían más de la punción del corazón por la aguja que del fármaco en sí.

Poco después, en la reanimación de pacientes que habían sufrido un paro cardíaco empleó un dispositivo al que denominó "marcapasos artificial", y que en esencia consistía en un generador eléctrico que producía estímulos de modo intermitente. Este generador magnético pesaba unos siete kilos, funcionaba mediante un mecanismo de muelles y resortes, y había que darle cuerda cada seis minutos. A él se conectaba una aguja-electrodo, que por vía transtorácica era avanzada hasta la aurícula derecha para estimular el

corazón, a la vez que otra aguja se introducía debajo de la piel. Aplicó este dispositivo a 43 pacientes, obteniendo éxito en catorce.

La publicación de estas experiencias (9) dio lugar a una campaña periodística exagerada en su contra, basada en que estas actividades de reanimación debían ser consideradas como actos sacrílegos, ya que en lo referente a la muerte del individuo se oponían a los designios de la Divina Providencia. Pocos meses antes, en 1931, y con Boris Karloff como monstruo, se había estrenado la película *Frankenstein*, que mostraba la reanimación de un cadáver por medio de descargas eléctricas, lo que probablemente influyó en el rechazo que encontraron las experiencias de Hyman. Éste, desanimado después de intentar convencer sin éxito a diversas empresas para que fabricaran su dispositivo, terminó cediendo la patente a la Armada de EEUU.

La oposición que Hyman encontró no se limitó a la prensa, sino que también fue corporativa, ya que en esa época los cardiólogos no tenían experiencia con dispositivos eléctricos e, incluso, utilizaban la electrocardiografía de forma limitada en la práctica diaria. Además, evitaban las técnicas cruentas y optaban siempre por la terapia farmacológica; postura explicable si se tiene en cuenta que por entonces la asistencia sanitaria no estaba concentrada en los hospitales, y el aparato de Hyman era considerado como una tecnología compleja sólo utilizable por personal muy especializado. (Poco después el cateterismo cardíaco despertaría una cautela similar).

Esta postura de los cardiólogos chocaba frontalmente con la idea expresada por su inventor que insistía en que el marcapasos "debía formar parte del instrumental de todo médico en su lucha final contra la muerte". Una afirmación que no debe hacernos considerar a Hyman

como un radical "iluminado", pues, aunque insistía en su eficacia en la reanimación del paro cardíaco derivado de la anestesia, la cirugía, los traumatismos y la bradicardia sinusal, desaconsejaba el uso del marcapasos en el paro cardíaco secundario a enfermedades infecciosas y procesos generalizados.

Pero, quizás existía otra razón para explicar el fracaso de Hyman y su dispositivo. Según Lowrance (10) esta razón residiría en la inoportunidad del invento. Para este autor, un nuevo dispositivo médico debe ser el producto de la combinación de una *oportunidad técnica* y una *necesidad médica*, y toda nueva tecnología debe ajustarse tanto al ideario de las instituciones médicas como a las costumbres de la época.

En el caso del marcapasos, existía la oportunidad técnica ya que se poseían los conocimientos fisiológicos suficientes como para comprender que un corazón que había cesado de latir podía ser reanimado, y que la estimulación con pulsos eléctricos podía reiniciar la actividad cardíaca. Pero, lo que no existía era la necesidad médica, ya que los cardiólogos, por un lado, no consideraban el paro cardíaco como un problema importante y no tenían ideas claras sobre los mecanismos de la muerte súbita de origen cardíaco; y, por otro, no consideraban solucionables el paro cardíaco ni la fibrilación ventricular.

Así lo demuestra el que White, autor del más afamado texto de Cardiología de la época, no dedicara en él más de media página a la fibrilación ventricular, a la que definía como "una alteración de poca importancia, hasta donde sabemos", y tratara el paro cardíaco con similar extensión.

Esto confirma el escaso interés de los especialistas en la estimulación cardíaca eléctrica temporal, a la que consideraban una técnica que no satisfacía ninguna necesidad médica.

Relegado a un uso experimental, un dispositivo de los utilizados por Hyman fue destruido en los laboratorios de Investigación de la compañía Siemens durante el bombardeo aliado de la ciudad de Dresden, en la Segunda Guerra Mundial.

El reinvento y su éxito

Paul M. Zoll, que como cardiólogo incluido en el equipo quirúrgico de Dwight E. Harken había servido en el Ejército estadounidense en la II Guerra Mundial, observó la gran excitabilidad del corazón durante las intervenciones para extraer fragmentos de proyectiles alojados en su seno, y cómo reaccionaba con salvas de extrasístoles ante el menor contacto con el instrumental o cualquier maniobra. De ahí que se planteara: ¿siendo el corazón tan excitable, podía evitarse su detención si era estimulado adecuadamente?

Basándose en los trabajos de Hyman, y convencido del error de estimular la aurícula, inició una serie de experiencias en animales, utilizando un estimulador empleado en los laboratorios de fisiología que le prestó la Facultad de Medicina de Harvard. Aplicando como electrodos un cable introducido en el esófago y una placa colocada en la región precordial, estudió

la excitabilidad cardíaca en función de diferentes amplitudes y duraciones del impulso eléctrico. Posteriormente sustituyó estos electrodos por agujas subcutáneas y, finalmente, empleó dos parches externos aplicados a ambos lados de la región precordial.

En 1952, en el Beth Israel Hospital de Boston (11), Zoll comunicaba sus resultados, concluyendo que la enfermedad de Stokes-Adams (cuya mortalidad pese al tratamiento farmacológico era por entonces muy elevada) podía ser tratada con éxito, y cómo desaparecían las crisis sincopales mediante la estimulación cardíaca eléctrica.

En 1954, una pequeña empresa (Electrodyne) fabricaba la primera versión comercial del dispositivo de Zoll, que obtuvo una rápida y creciente aceptación.

En contraste con el rechazo encontrado por Hyman, este dispositivo comenzó a utilizarse en muchos hospitales, especialmente en los docentes, en los que simultáneamente se estaban desarrollando las técnicas de exploración cruenta y la cirugía cardíaca.

Además, desde 1930 los conocimientos científicos sobre la fibrilación ventricular y las crisis de Stokes-Adams habían progresado. Así, en el campo de la fibrilación ventricular, Beck había conseguido en 1947 la reanimación de un joven tras toracotomía, masaje cardíaco y la aplicación de una descarga de corriente alterna para yugular la fibrilación ventricular (12). En 1941, Parkinson (13), al analizar los electrocardiogramas de pacientes con crisis de Stokes-Adams comprobaba que el 50 % de ellos sufrían paro ventricular por bloqueo, mientras que el resto presentaba taquiarritmias como causa del síncope. Observaba que estos últimos tenían peor pronóstico y en ellos no estaba indicado el uso de adrenalina, mientras que en los primeros podía ser eficaz la estimulación eléctrica por medio del aparato diseñado por Zoll.

Por otra parte, la cirugía cardíaca con hipotermia y la difusión de las técnicas de desfibrilación y estimulación eléctrica del corazón, encontraron en la época posbélica un ambiente favorable para la creación de centros hospitalarios, donde equipos especializados pudieron desarrollar programas de investigación sobre nuevas tecnologías, cuidados posquirúrgicos y atención especializada de enfermería. Esta favorable situación era consecuencia de la ley denominada "*Hospital Survey and Construction Act*" (Acta Hill-Burton), promulgada en 1946, que también influiría en la dotación de numerosas becas y fondos públicos para la investigación.

El año 1958 fue el más prolífico en lo referente al desarrollo de la estimulación cardíaca eléctrica. El día ocho de octubre de ese año, en el Instituto Karolinska de Estocolmo, tuvo lugar la que clásicamente se considera como la primera implantación de un marcapasos. La intervención fue realizada por el cirujano cardíaco Ake Senning, con la colaboración técnica de R. Elmquist (14), ingeniero de la compañía Elema-Schonander.

El dispositivo, de forma circular, era totalmente implantable y disponía de dos transistores de silicio y de una batería de níquel-cadmio recargable por medio de un sistema de inducción externo. Tenía un tamaño aceptable (55 mm de diámetro y 15 mm de grosor) y dos electrodos suturables al epicardio. Este primer marcapasos fue hecho totalmente a mano y sus dimensiones venían dadas porque, encapsulado en *Araldite* (una resina epoxy que fabricaba Ciba-Geigy),

su molde había sido una cajita de cera abrillantadora para zapatos *British Kiwi*, de esas medidas. Este primigenio marcapasos emitía impulsos de 2 voltios y 1,5 milisegundos de duración.

El paciente receptor, Arne Larsson, de 43 años, sufría un bloqueo cardíaco secundario a una miocarditis vírica y llevaba meses ingresado por síncope recurrentes.

Su esposa, Else-Marie Larsson, informada de los trabajos experimentales en perros que se desarrollaban en el Hospital Karolinska, contactó con Senning y Elmquist, a los que persuadió para emplear el dispositivo en su marido, cuya situación era crítica.

Aunque este primer marcapasos se paró bruscamente a las tres horas de implantado, probablemente por haber sufrido algún daño con el electrocauterio durante la intervención para su implante, pudo ser sustituido por otra unidad similar, que también falló a la semana por "fractura" de uno de los cables. En Noviembre de 1961, Senning intervino de nuevo al paciente para implantarle un modelo Elema 137 que, igualmente, fue preciso sustituir en enero de 1962.

Con motivo de III Congreso Europeo de Estimulación Cardíaca, celebrado en Torremolinos en 1985, Arne Larsson visitó España como invitado de honor. Y fallecería en Estocolmo en diciembre del 2001, a los 86 años, por enfermedad no cardíaca (15). A lo largo de su vida precisó 23 recambios de generador y cinco cambios de cables.

También en 1958, Seymour Furman (16), en el hospital Montefiori de Nueva York, desarrolló una técnica de estimulación cardíaca mediante un catéter intravenoso progresado hasta el ventrículo derecho, conectado por un cable a un marcapasos dispuesto en un carrito que permitía la deambulación del paciente.

La primera implantación de un marcapasos definitivo en América, (segunda en el mundo) se realizó el 3 de febrero de 1960 en Uruguay por Roberto Rubio y Orestes Frianda, falleciendo el paciente nueve meses después por infección de la herida quirúrgica (17).

El primer marcapasos totalmente implantable, con las baterías incorporadas, fue implantado ese mismo año por Chardack y Greatbach (18).

El primer marcapasos implantado en España (un modelo Electrodyne PR14, con cable epicárdico) hizo el número 51 de las efectuadas en el mundo, y se llevó a cabo en 1962 por el cirujano cardíaco E. García Ortiz, en el Hospital de la Cruz Roja de Madrid. El caso se comunicó a la Revista Española de Cardiología, y citado con tal consideración en un editorial de la misma revista (19).

La siguiente publicación en este mismo medio, ya en 1968, correspondió a seis implantaciones realizadas en la Escuela de Enfermedades del Tórax, por entonces centro de referencia para la intervenciones de la naciente cirugía cardíaca española (20).

Desarrollo de las fuentes de energía

Una vez comprobada la eficacia de los impulsos eléctricos para obtener la activación y contracción de las cámaras cardíacas, y establecida la intensidad y duración de estos impulsos, fue

necesario desarrollar sistemas capaces de producir o almacenar la energía precisa para esa función. Los primeros marcapasos disponían de baterías producidas por la empresa Mallory, cuyo modelo RM-1 utilizaba pilas de óxido de zinc-mercurio, que habían sido empleadas con éxito en equipos electrónicos como los intercomunicadores *walkie-talkies* de la II Guerra Mundial, audífonos, relojes, etcétera. Su duración se estimaba entre doce y dieciséis meses, y estas baterías fueron las utilizadas en las primeras unidades diseñadas por Chardack y Greatbatch.

La otra opción, las baterías recargables de níquel-cadmio por medio de bobinas de inducción y radiofrecuencia a través de la piel, utilizando un cargador manejado por el propio paciente, fue abandonada en la década de los 70 ante el desarrollo de las baterías de litio, de menor tamaño y una mayor duración (unos diez años) (21).

De acuerdo con las orientaciones del plan norteamericano de *Átomos para la Paz*, y dentro del programa *Numec* para la utilización de la energía atómica con fines no bélicos, se inició el desarrollo de fuentes de energía para marcapasos, que empleaban una tableta de plutonio-238 herméticamente incluida en una cápsula doble de tantalio y platino. En Europa, la empresa Alcatel fabricó, bajo el asesoramiento de la Agencia Nuclear Francesa, una batería con ese isótopo incorporado a los circuitos de un marcapasos, y cuyo prototipo se implantó en 1972 con la denominación de *Gipsy I* (22).

Sin embargo, este tipo de energía tuvo que ser abandonada por los problemas que evidenció su uso clínico (leucopenias, erosiones en la piel, etcétera), unidos a los derivados del hecho de que, al tratarse de una fuente radiactiva, obligaba a su recuperación una vez fallecido el paciente.

La larga duración de las baterías de litio, unida a la reducción del consumo interno de los circuitos del generador y a la posibilidad de ajustar la energía del impulso de forma no invasora (programabilidad), permite actualmente obtener una vida útil del generador entre diez y doce años.

Estimular y detectar

Cuando el médico comunica a un paciente la necesidad de implantarle un marcapasos, con frecuencia recibe de algún familiar que pasa por "entendido", la siguiente pregunta: "¿Será de demanda?". Podemos decir que hoy esa pregunta equivaldría a preguntar al adquirir un televisor: "¿Será en color?".

Los primeros generadores sólo eran capaces de emitir impulsos de forma rítmica, lo que en el caso de pacientes con ritmo propio (aunque lento) daba lugar a la presencia de dos ritmos simultáneos (el propio, o intrínseco, y el estimulado) que competían en la dirección del ritmo cardíaco. Ello en ocasiones podía dar lugar, si el impulso eléctrico se producía en un período vulnerable, a la aparición de arritmias e, incluso, fibrilación ventricular.

Pero, en 1963, Castellanos, Lemberg y Berkovits (23) diseñaron un generador que incluía un amplificador y un sistema de filtros dirigidos a facilitar el reconocimiento de la pequeña señal

eléctrica de la actividad cardíaca intrínseca. Este gran avance supuso incorporar a los marcapasos una nueva función: la capacidad de reconocer los latidos procedentes del corazón y ante ellos no emitir impulsos eléctricos. Este marcapasos fue denominado "a demanda", término que ha trascendido a la población general.

La sincronización del ciclo cardíaco

El corazón es, en esencia, un músculo hueco que alberga cuatro cavidades, dos aurículas y dos ventrículos, separadas por un sistema valvular. Las aurículas son cámaras dirigidas a recibir el flujo sanguíneo, y con su contracción, una vez abierta la válvula auriculoventricular correspondiente, proceder al llenado de los ventrículos, que son cámaras de presión y expulsión.

Cuando se estimula eléctricamente el ventrículo de forma aislada, se altera la sincronía fisiológica, lo que supone una reducción del rendimiento o gasto cardíaco. Esto fue evidenciado por Samet, que comparó en pacientes con conducción auriculoventricular conservada la estimulación ventricular con la estimulación auricular a la misma frecuencia (24).

Ese mismo año, 1965, Nathan implantó el primer marcapasos auricular (25) y en 1969, de nuevo Berkovits, Lemberg y Castellanos presentaron el primer marcapasos bifocal (26), que precisaba dos cables, uno situado en la aurícula y otro en el ventrículo y respetaba la secuencia de contracción auriculoventricular.

Los marcapasos "inteligentes"

Tras la aparición del transistor, los marcapasos incorporaron esta tecnología, lo que permitió reducir su tamaño y a la vez incrementar su duración por reducción del consumo interno. Posteriormente, la aplicación de circuitos híbridos semi-integrados e integrados y de la tecnología C-MOS en los generadores, permitió progresar en la reducción del consumo y tamaño de los mismos.

En la actualidad la tecnología de los marcapasos se basa en circuitos integrados y microprocesadores, cada vez con mayor capacidad de memoria. Además, en algunos casos es posible ampliar las funciones disponibles de uno ya implantado, por medio de telemetría y descarga de un nuevo software.

Los automatismos

El corazón cumple la función de impulsar y bombear la sangre a través del sistema circulatorio. La cantidad de sangre que impulsa en un minuto es el resultado de multiplicar la can-

tividad evacuada en cada latido por el número de latidos en ese período, cantidad que recibe la denominación de gasto cardíaco y se expresa en litros por minuto.

Cuando la actividad física u otras situaciones precisan de un mayor *gasto cardíaco*, éste se incrementa aumentando tanto el volumen de sangre impulsada en cada contracción o latido (volumen sistólico), como el número de latidos (frecuencia del pulso). La contribución al aumento del gasto cardíaco derivada del aumento de la frecuencia del pulso es muchísimo mayor que la originada por el aumento del volumen sistólico, ya que este último se incrementa fundamentalmente a expensas de un mayor llenado de las cavidades cardíacas. Este mecanismo, además de su capacidad limitada, conduce a la dilatación de tales cavidades y, a la larga, al deterioro de la capacidad de contracción.

En las primeras unidades de marcapasos la frecuencia de estimulación era fija, lo que suponía la pérdida de gran parte de la capacidad fisiológica de aumentar el gasto cardíaco para adecuarlo a las necesidades del organismo, y con ello una limitación más o menos acusada de su actividad física (y, por lo tanto, una pérdida significativa de calidad de vida).

Aunque algunos modelos de marcapasos permitían establecer de forma no invasora una frecuencia de estimulación específica para cada paciente, este parámetro permanecía estable salvo nueva programación. Al iniciarse la década de los 70, el principal avance en el desarrollo de los marcapasos fue la capacidad de variar de forma automática la frecuencia de estimulación para adaptarla a las necesidades del individuo.

La regulación automática de la frecuencia de emisión de los impulsos eléctricos y, por lo tanto, de la frecuencia cardíaca de los pacientes con marcapasos, se hacía en función de la información enviada por un sensor con capacidad para detectar y medir una determinada señal biológica que se incorporaba a la estructura del generador de impulsos o al cable. Las señales biológicas que se han utilizado para regular la frecuencia de estimulación cardíaca han sido el movimiento corporal, la temperatura sanguínea, el pH sanguíneo, la saturación de oxígeno, la frecuencia y amplitud de los movimientos respiratorios, la duración del intervalo QT, etcétera.

Dado que no hay un sensor idóneo, ya que todos tienen algún inconveniente (lentitud de respuesta, falta de especificidad, falta de proporcionalidad...) para regular su frecuencia, los marcapasos actuales emplean combinaciones de dos sensores, cuyas características se complementan; y en muchos casos la información proporcionada por los mismos se compara y valida para perfeccionarla y evitar respuestas inadecuadas.

Un ejemplo permite exponer con mayor claridad el funcionamiento simultáneo de un dispositivo con doble sensor. Así, si un paciente que lleva implantado un marcapasos con dos sensores, (uno de actividad y el otro de volumen respiratorio), viaja sentado en un medio de transporte sometido a movimientos (traqueteo de un tren), el sensor de movimiento indicará que hay que aumentar la frecuencia de estimulación cardíaca; pero este incremento no se producirá, ya que esa información no coincidirá con la correspondiente al volumen respiratorio, (al estar en reposo no se ha incrementado) evitándose así un aumento inapropiado de la frecuencia de estimulación.

En la actualidad, esta capacidad de autorregular la frecuencia cardíaca está incluida en la práctica totalidad de modelos y debe ser aplicada a todos los pacientes.

De forma progresiva, y paralelamente al desarrollo creciente de la microinformática, se han ido incorporando nuevas capacidades a los generadores, que hoy ya incluyen telemetría, funciones diagnósticas y automatismos para regular sus condiciones o parámetros de funcionamiento.

Precisamente, una de las funciones más útiles de los nuevos generadores reside en su capacidad de comprobar la adecuada "captura ventricular" por el impulso eléctrico, y regular su voltaje para, con los oportunos márgenes de seguridad, evitar el derroche de energía. Esta función fue incorporada por primera vez por la compañía Saint Jude Medical, con el nombre de Autocapture, y se basa en la medida por el generador de la respuesta evocada.

Por último, los generadores actuales son capaces, además, de: a) reconocer determinadas arritmias, b) actuar frente a ellas de una forma programada; y c) almacenar, también de forma automática, los registros de los electrogramas auriculares y ventriculares, para que el médico confirme su origen y la adecuada actuación del marcapasos (27).

También existen sistemas automáticos para regular la capacidad de detección de las señales cardíacas y evitar fenómenos de detección inadecuada de interferencias, tan numerosas hoy en nuestra sociedad (telefonía móvil, sistemas antihurto, onda corta, antenas, etcétera).

Las nuevas indicaciones

Los cables de marcapasos se sitúan habitualmente en la aurícula y ventrículo derechos, iniciándose ahí la activación y difundiéndose a continuación a la aurícula y ventrículo izquierdos. Ello conlleva un retraso eléctrico y mecánico de la activación de las cavidades izquierdas, en comparación con la activación normal del corazón.

Al conocer mejor los efectos hemodinámicos derivados de esta secuencia anómala, se ha utilizado la estimulación eléctrica como tratamiento de determinadas cardiopatías en las que es deseable alterar la secuencia normal de activación del corazón.

Tal es el caso de la miocardiopatía hipertrófica obstructiva, una enfermedad del músculo cardíaco caracterizada por la obstrucción al flujo en el tracto de salida del ventrículo izquierdo (provocada por la contracción del tabique interventricular y de la pared libre del ventrículo izquierdo anómalamente hipertróficos). En este caso, la estimulación eléctrica del ventrículo derecho, al provocar un retraso y alteración de la activación del septo y pared libre del ventrículo izquierdo, reduce la obstrucción.

Por lo tanto, esa puede ser una indicación para implantar un marcapasos, persiguiéndose con la estimulación eléctrica provocar un retraso y una asincronía en la activación del ventrículo izquierdo dirigida a alterar la hemodinámica y mejorar el funcionalismo cardíaco de estos pacientes (28).

En el lado opuesto se halla la denominada “*terapia de resincronización cardíaca*” (29), que se emplea en pacientes con miocardiopatía dilatada en situación de insuficiencia cardíaca grave y sin respuesta al tratamiento farmacológico (muchos de ellos en situación de pre-trasplante cardíaco), y que presentan en el electrocardiograma un retraso en la activación del ventrículo izquierdo (bloqueo completo de rama izquierda). Esta terapia, como su nombre indica, se basa en obtener una sincronización adecuada tanto de las aurículas como de ambos ventrículos, en especial del ventrículo izquierdo, lo que aumenta el gasto cardíaco, muy reducido en estos pacientes. Con este fin se emplean los llamados *marcapasos tricamerales* o *biventriculares*, que disponen de tres cables destinados a estimular la aurícula derecha y, tras un retraso regulable, ambos ventrículos de forma simultánea.

El eslabón débil de la cadena y los futuros desarrollos

La resistencia de una cadena a la tracción sobre sus extremos viene determinada por la de su eslabón más débil. Este principio es aplicado por los técnicos para determinar la seguridad de cualquier sistema, como, por ejemplo, las medidas de protección antirrobo de un domicilio. En el caso de los marcapasos, el eslabón o elemento más débil es el cable-electrodo, como confirman las estadísticas que señalan que, en la inmensa mayoría de los casos, los fallos en la estimulación imputables al marcapasos derivan del deterioro del cable (rotura del aislante, fractura del conductor, etcétera). Conviene tener en cuenta que ese cable se ve sometido a continuos movimientos, derivados de la contracción cardíaca, y que, además, está en contacto con la sangre y los tejidos, que actúan sobre sus componentes.

Hace algunos años, varios modelos de cables presentaron un proceso acelerado de degradación del aislante, fabricado en todos ellos con un tipo específico de poliuretano. Una vez implantado, tal aislante sufría un proceso de oxidación por las peroxidasas producidas por los macrófagos, que formaban parte de la reacción ante el cuerpo extraño que este poliuretano suponía para el organismo. El fallo de este tipo de cables obligó a numerosas intervenciones para sustituirlos. Por este motivo, la industria dirige sus esfuerzos al diseño y desarrollo de nuevos cables, cada vez de menor diámetro, más resistentes y, además, biocompatibles.

Pero, tal vez en un futuro no lejano sea posible estimular el corazón prescindiendo del cable, el eslabón débil en la cadena de la estimulación cardíaca. Si ello se llegara a producir no será una sorpresa...

Bibliografía

1. Schechter DC. Origins of electrotherapy. Part I. NY State J Med. 1971; 71: 997.
2. Kellaway P. The part played by electric fish in the early history of bioelectricity and electrotherapy. Bull Hist Med. 1946; 20:112.

3. Galvani L. De viribus electricitatis in motu musculari commentarius. Bologna Instit. Scient. 1771.
4. Bichat XS. Recherches physiologiques sur la vie et la mort. Paris: Bronsson, Gabon & Cie. 1800.
5. Nysten PH. Expériences sur le Coeur et les autres parties d'un homme décapité le 14 Brumaire. Paris, Levrault, 1802.
6. Aldini J. Essai théorique et expérimental sur le galvanisme avec une série d'expériences. Paris. Fournier, 1804.
7. Floresco N. Rappel a la vie par l'excitation directe du Coeur. J Physiol Pathol Ger. 1905; 7: 797.
8. Mond HG, Sloman JG, Edwards RH. The first pacemaker. PACE 1982; 5: 278
9. Hyman AS. Resuscitation de stopped heart by intracardial therapy. II Experimental use of an artificial pacemaker. Arch Intern Med. 1932; 50:238.
10. Lowrance WW: Summarizing reflections. En Ekelman KB (ed). New Medical Devices: Invention, development and use. Washington DC, National Academy Press, 1988: 164.
11. Zoll PM: Resuscitation of the heart in ventricular standstill by external electric stimulation. N Eng J Med. 1952; 247: 768.
12. Beck CS, Pritchard WH, Feil HS. Ventricular fibrillation of long duration abolished by electric schok. JAMA. 1947; 135: 985.
13. Parkinson J, Papp C, Evans W. The electrocardiogram of the Stokes-Adams attack. Br Heart J. 1941; 3: 171.
14. Elmquist R, Senning A. Implantable pacemaker for the heart. En: Smyth CN. Ed. Medical Electronics. Springfield, Illinois. Charles C. Thomas, 1960, pag 250.
15. Ryden L, Schüller H, Larsson B. Obituary Arne Larsson. PACE. 2002; 25: 521.
16. Furman S, Schwedel JB. An intracardiac pacemaker for Stokes-Adams seizure s. N Engl J Med. 1959; 261: 943.
17. Frianda O. The first pacemaker implant in America. PACE. 1988; 11: 1234.
18. Chardack WM, Gage AA, Greatbach W. A transistorized self-contained, implantable pacemaker for thr long-term correction of complete heart block. Surgery. 1960; 48:463.
19. Silvestre García J, Rodríguez García J, Ledesma García C. La estimulación cardiaca permanente y el grupo de Trabajo de Marcapasos. Rev Esp Cardiol. 1990; 43: Suplemento 2.
20. Castro Fariñas E, Pescador L: Tratamiento del síndrome de Morgagni-Stokes-Adams por medio de un marcapasos de implantación permanente. Rev Esp Cardiol. 1963; 16: 32.
21. Master K, Doty RL, Van der Velden R: Baterías químicas para los marcapasos cardiacos. Estudios Técnicos 1977, 2: 14.
22. Roldán Pascual T. Un breve paseo por la historia. Cuadernos Técnicos 1997; 1: 3.
23. Castellanos A, Lemberg L, Berkovits BV. The "demand pacemaker": a new instrument for the treatment of AV conduction disturbances. Inter Am Coll of Cardiol. Meeting. Montreal. 1964.
24. Samet P, Bernstein WH, Nathan DA: Atrial contribution to cardiac output in complete heart block. Am J Cardiol. 1965; 16:1.
25. Keller JW, Nathan DA, Center S: An implantable synchronous cardiac pacemaker. 15 th annual conference Eng. November 1962.
26. Berkovits BV, Castellanos A, Lemberg L. Bifocal demand pacing. Circulation 1969, 39: 44.
27. Rodríguez García J, Coma Samartin R, Tello de Meneses R. Indicaciones y modos de estimulación en los noventa. Rev Esp Cardiol. Puesta al día.: Arritmias Cardiacas. 1995, Pág 131.
28. Rodríguez García J, Coma Samartin R, Tascón Pérez J et al. Estimulación cardiaca eléctrica en las miocardiopatías. Monocardio. 1996; 45: 58.
29. Cazeau S, Leclercq C, Lavergne T et al. Effects of multisite biventricular pacing in patients with heart failure and intraventricular conduction delay. N Engl J Med. 2001; 344: 873.