

El electrocardiograma: historia y futuro

Durante la **última parte del siglo XIX**, gran parte de la investigación se centró en la **actividad eléctrica del corazón**, aunque algunos de los primeros investigadores desconocían la utilidad clínica del registro de dicha actividad.

Ya en 1911, **Augustus Waller**, pionero de la **electrocardiografía**, afirmó: *«No creo que la electrocardiografía tenga un uso muy extendido en el hospital. Como mucho, puede ser de utilidad ocasional para registrar alguna anomalía poco frecuente de la actividad cardíaca»*.

Sin embargo, tan solo años después, **el Premio Nobel de Medicina fue otorgado a Willem Einthoven**, quien transformó este curioso fenómeno fisiológico en un **dispositivo de registro clínico indispensable**.

Rudolf von Koelliker y Heinrich Müller fueron los primeros en descubrir, en **1856**, que **el corazón generaba electricidad**.

La primera grabación exitosa del ritmo eléctrico en el corazón humano parece haber sido realizada por

Alexander Muirhead en 1869-70, utilizando un registrador de sifón Thomson en el **Hospital St. Bartholomew de Londres**.

Este equipo fue diseñado originalmente para registrar señales que pasaban a través del cable transatlántico, que se había tendido en 1866.

Waller realizó su trabajo en el desarrollo de la electrocardiografía en el **Hospital St. Mary's de Paddington, Londres**.

Utilizó el **electrómetro capilar de Lipmann** para registrar las reacciones eléctricas del corazón humano.

El electrómetro es un instrumento histórico de alta sensibilidad inventado por el físico **Gabriel Lippmann en 1872-1873** para **detectar y medir pequeñas diferencias de potencial o descargas eléctricas**

En **1887**, **Waller** publicó el primer informe de una grabación de electricidad cardíaca en la superficie del cuerpo; llamó a la grabación "**cardiografía**".

Waller presentó su trabajo titulado "**Un estudio preliminar de 2000 electrocardiogramas**" ante la **Sociedad Fisiológica de Londres en 1917**.

Entre sus contribuciones se encontraban la **variabilidad del electrograma**, el concepto de **dipolo** que condujo al **mapeo isopotencial** y el concepto de **vector**.

Einthoven, nacido en 1860 en Java, Indias Orientales Neerlandesas (**actual Indonesia**), asistió a la **Facultad de Medicina de la Universidad de Utrecht**.

En **1887**, Einthoven estuvo presente en el **Congreso Internacional de Fisiología en Londres**, donde **observó a Waller** demostrando el uso del electrómetro capilar para registrar un “electrógrafo” del corazón.

Einthoven comenzó a explorar el uso del electrómetro capilar para registrar corrientes eléctricas minúsculas.

En **1895**, pudo detectar ondas reconocibles, a las que denominó “**P, Q, R, S y T**”.

Las limitaciones de los electrómetros capilares llevaron a Einthoven a diseñar un **galvanómetro de cuerda para registrar la actividad eléctrica cardíaca**.

Con su nueva técnica, estandarizó los trazados y formuló el **concepto del “triángulo de Einthoven”** relacionando matemáticamente las 3 derivaciones (*Derivación III = Derivación II – Derivación I*).

Describió bigeminismo, bloqueo cardíaco completo, onda P mitral, hipertrofia ventricular derecha e izquierda, fibrilación y aleteo auricular, onda U y ejemplos de diversas cardiopatías.

Johannes Bosscha, uno de los profesores de Einthoven, sugirió **utilizar las líneas telefónicas existentes para conectar el hospital con el laboratorio de fisiología de Einthoven.**

Esta idea aumentó la disponibilidad clínica del instrumento de Einthoven al permitir realizar estudios electrocardiográficos en pacientes hospitalizados.

En los diez años posteriores a los estudios clínicos de Einthoven con el galvanómetro de cuerda, **se comprendió el potencial de la electrocardiografía.**

Se reconocieron numerosas arritmias y, en **1910**, se identificaron las asociaciones entre la **inversión de**

la onda T, la angina de pecho y la arteriosclerosis.

El «padre de la electrocardiografía» fue galardonado con el Premio Nobel de Medicina en 1924.

Sus importantes contribuciones sentaron las bases de los grandes descubrimientos del siglo XX y de los avances posteriores en el campo de la cardiología.

El ECG es el registro acumulativo en la superficie corporal de la actividad eléctrica cardíaca, generada por los potenciales de acción de millones de cardiomiocitos.

A diferencia de las neuronas, los cardiomiocitos están conectados formando un **sincitio**, donde la **activación de una célula activa las células adyacentes**, lo que da lugar a la propagación del frente de onda y a **la generación coordinada de corriente eléctrica.**

A nivel celular, los miocitos individuales generan potenciales de acción mediante la **actividad cuidadosamente regulada de canales de membrana, a menudo específicos para iones, que crean corrientes que se propagan de célula**

a célula a través de poros formados por proteínas específicas.

Los múltiples y complejos mecanismos homeostáticos implicados en la generación del ECG permiten que sirva como una **huella dactilar de identificación única para cada individuo**, que funcione como un **detector precoz de enfermedades** y que, **potencialmente, revolucione los exámenes médicos y la monitorización remota.**

El potencial de esta prueba era prácticamente inimaginable cuando se creó a principios del siglo XX.

Desde finales del siglo XIX se sabía que el corazón al latir produce corrientes eléctricas.

Sin embargo, los instrumentos disponibles, como el electrómetro capilar utilizado por Waller, carecían de la sensibilidad necesaria para detectar adecuadamente señales eléctricas del orden de los milivoltios.

Einthoven, médico y fisiólogo neerlandés, ideó un **galvanómetro de cuerda**, en el que la presencia de una corriente eléctrica desvía un filamento situado entre imanes, para inventar el primer

electrocardiograma (ECG) práctico en 1903, por el que posteriormente recibió el Premio Nobel.

Reconoció las características de la señal y les asignó los nombres que aún se utilizan hoy en día: **onda P, complejo QRS y onda T.**

El ECG proporcionó una forma de medir y diagnosticar objetivamente las enfermedades cardíacas, más allá de los signos y síntomas, y finalmente dio origen a un nuevo campo: la cardiología.

Durante las décadas siguientes, un número creciente de observaciones vincularon características de la señal electrocardiográfica, denominadas por humanos, con enfermedades cardíacas y no cardíacas, como **isquemia, arritmias, alteraciones electrolíticas, enfermedad hepática y otras**, con variaciones en la sensibilidad y especificidad para cada enfermedad, en parte en función de su impacto en la actividad eléctrica cardíaca.

Con el desarrollo de una mayor sutileza y sofisticación en estas observaciones, el campo de la electrocardiografía y, con él, la cardiología, crecieron.

El ECG se convirtió en fundamental para el diagnóstico de afecciones críticas como el infarto agudo de miocardio, la fibrilación auricular (FA) y la taquicardia ventricular.

A medida que la cardiología maduró y se introdujeron nuevas tecnologías como la ecocardiografía, se desarrolló una **comprensión más profunda de las relaciones entre las características de la señal electrocardiográfica y las anomalías estructurales** (por ejemplo, **hipertrofia, lesiones valvulares**), así como las ventajas y limitaciones de estas características para el diagnóstico.

Se describió un número creciente de **criterios y reglas electrocardiográficas**, definidos por asociaciones empíricas entre el ECG y las enfermedades, para que el médico los tuviera presentes y pudiera identificarlas.

En la **década de 1970**, estas reglas basadas en características se codificaron en máquinas de electrocardiografía para **generar informes de diagnóstico como ayuda clínica**.

Si bien existe debate sobre la precisión y confiabilidad de estos sistemas de lectura electrocardiográfica basados en características,

representaron la **cúspide de las lecturas computarizadas**, hasta que se desarrollaron enfoques recientes basados en **aprendizaje automático**, que ahora están listos para **transformar la eficacia clínica del ECG y los flujos de trabajo clínicos**.

El **aprendizaje automático** se ha utilizado para **entrenar redes neuronales profundas**, una serie de ecuaciones matemáticas construidas para imitar la corteza cerebral humana, donde cada neurona está representada por una ecuación no lineal que, como una neurona, puede "descargarse" según su entrada.

Grandes conjuntos de datos etiquetados han entrenado **redes que identifican patrones electrocardiográficos sutiles y no lineales**, potencialmente en segmentos electrocardiográficos no nombrados que no se utilizan en el análisis de características tradicional, para permitir **3 capacidades amplias**:

(1) realizar tareas que realizan los humanos, como la **clasificación de ritmos**, pero a gran escala,

(2) superar las capacidades humanas al **identificar afecciones** (por ejemplo, disfunción

ventricular) que no son reconocidas de manera confiable por lectores humanos expertos, y

(3) identificar individuos con alto riesgo de desarrollar enfermedades aún no detectadas con pruebas estándar.

El mecanismo por el cual el **ECG de inteligencia artificial (IA)** realiza estas tareas predictivas no está confirmado, pero probablemente **refleja el impacto de la enfermedad en los canales iónicos**, lo que resulta en cambios electrocardiográficos sutiles que **preceden a las anomalías detectables por estudios de imágenes como la ecocardiografía.**

Se sabe desde hace tiempo que **la isquemia en el ECG precede a las anomalías ecocardiográficas del movimiento de la pared.**

Los ECG con IA se han desarrollado para **detectar eficazmente la disfunción ventricular izquierda, la presencia de FA a partir de un registro electrocardiográfico durante el ritmo sinusal, estenosis aórtica, hipertensión pulmonar, cirrosis, miocardiopatía hipertrófica e hiperpotasemia, entre otras afecciones.**

Debido a que se basa en software, el ECG con IA se ha probado de forma rápida y económica en flujos de trabajo clínicos.

En el **estudio EAGLE** (*ECG AI-Guided Screening for Low Ejection Fraction*), **22 640 adultos** fueron reclutados en ≈ 8 meses durante la pandemia utilizando un **diseño aleatorizado por conglomerados**.

En el grupo de intervención, cuando los médicos de atención primaria solicitaban ECG de rutina, los resultados del análisis de IA se presentaban a los médicos; en el grupo de control, los resultados no se divulgaban.

La disponibilidad del resultado electrocardiográfico de IA aumentó el nuevo diagnóstico de disfunción ventricular izquierda en un tercio.

Se observó una práctica de máxima competencia, ya que los enfermeros practicantes y los asistentes médicos tenían el **doble de probabilidades de seguir la recomendación de IA** y, por lo tanto, hacer el diagnóstico, reconociendo que sus paneles eran menos complejos.

Para probar si un ECG de un dispositivo portátil recopilado en entornos no médicos sería suficiente para el análisis de IA, Attia et al, trabajando con el Centro de Salud Digital de la Clínica Mayo, crearon una aplicación (app) para **permitir la recopilación de registros electrocardiográficos del Apple Watch y reentrenaron la red de 12 derivaciones para clasificar los ECG del reloj.**

Un único coordinador de estudio a tiempo parcial inscribió digitalmente a **2544 sujetos de 46 estados y 11 países y transmitió >125 000 ECG en ≈6 meses.**

Los ECG del reloj identificaron disfunción ventricular izquierda con un área bajo la curva de 0,89

Los ECG digitales previamente adquiridos y almacenados también se han utilizado para identificar enfermedades en personas que no se sabía que las padecían.

En el **estudio BEAGLE** (*Batch Enrollment for AI-Guided Intervention to Lower Neurologic Events in Unrecognized AF*), **669 032 pacientes sin FA conocida y con una puntuación de riesgo CHADSVASC elevada para accidente cerebrovascular** con ECG registrados en el pasado (1 de enero de 2017–30 de junio de 2021) fueron

examinados por computadora con un **algoritmo electrocardiográfico de IA para detectar FA a partir de un registro electrocardiográfico durante ritmo sinusal** y se les invitó a participar en el estudio que incluía el uso de un monitor portátil durante un mes.

Aquellos pacientes con un ECG de IA positivo para FA silenciosa tuvieron una probabilidad 5 veces mayor de detección de FA al mes.

También se ha demostrado que **el ECG de IA refleja el efecto terapéutico de los fármacos.**

Tison et al. demostraron que **las puntuaciones electrocardiográficas de IA detectaron eficazmente la miocardiopatía hipertrófica, se asociaron con el gradiente de salida y los niveles de NT-proBNP** (péptido natriurético tipo B N-terminal) y **disminuyeron en respuesta a la terapia con mevacamten.**

En resumen, el ECG ha evolucionado **desde una detección primitiva de la actividad eléctrica cardíaca hasta una prueba sofisticada para detectar enfermedades ocultas, predecir enfermedades incipientes y monitorizar el efecto terapéutico.**

Se ha vuelto económico, omnipresente, integrado en los flujos de trabajo clínicos y disponible en entornos no médicos.

Su papel como herramienta indispensable para los profesionales de la salud está destinado a seguir creciendo, incluso después de 100 años.

* The Electrocardiogram at 100 Years: History and Future

Paul A. Friedman, MD <https://orcid.org/0000-0001-5052-2948>
friedman.paul@mayo.edu [AUTHOR INFO & AFFILIATIONS](#)

Circulation Volume 149, Number 6

<https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.123.065489>

** Mehta NJ, Khan IA. Cardiology's 10 greatest discoveries of the 20th century. Tex Heart Inst J. 2002;29(3):164-71. PMID: 12224718; PMCID: PMC124754.