

Implicaciones cardiovasculares de la epilepsia: Monitoreo y comparación de ECG Cardiovascular Implications of epilepsy: ECG monitoring and comparison

G. Aguirre-Cruz ^a

^aÁrea Académica de Matemáticas y Física, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

Resumen

Este estudio examina las implicaciones cardiovasculares de la epilepsia mediante el análisis comparativo de electrocardiogramas (ECG) de pacientes con epilepsia, arritmias y normales. Utilizando bases de datos de PhysioNet, se analizaron los patrones en los picos R y las oscilaciones de frecuencia cardíaca. Los resultados mostraron que los ECG de pacientes con epilepsia presentaron cambios abruptos y amplitudes de picos R menores en comparación con los registros normales, mientras que los ECG con arritmias mostraron picos R notablemente altos. Estos hallazgos subrayan la importancia de analizar las variaciones en el ECG para comprender mejor la dinámica cardiovascular asociada con la epilepsia. Además, el estudio sugiere que la identificación de patrones pre-ictales en los datos ECG podría ofrecer una base para el desarrollo de métodos predictivos para ataques epilépticos mediante el uso de inteligencia artificial, mejorando así el manejo y prevención de complicaciones cardíacas en pacientes con epilepsia.

Palabras Clave: Electrocardiograma (ECG), variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV), post-ictal, arritmia, control sano.

Abstract

This study examines the cardiovascular implications of epilepsy by comparative analysis of electrocardiograms (ECGs) from patients with epilepsy, arrhythmias, and normals. Using PhysioNet databases, patterns in R peaks and heart rate oscillations were analyzed. The results showed that ECGs from patients with epilepsy presented abrupt changes and lower R peak amplitudes compared to normal recordings, whereas ECGs with arrhythmias showed remarkably high R peaks. These findings underline the importance of analyzing variations in the ECG to better understand the cardiovascular dynamics associated with epilepsy. Furthermore, the study suggests that identifying pre-ictal patterns in ECG data could offer a basis for developing predictive methods for epileptic seizures using artificial intelligence, thereby improving the management and prevention of cardiac complications in patients with epilepsy.

Keywords: Electrocardiogram (ECG), heart rate variability (HRV), post-ictal, arrhythmia, healthy control.

1. Introducción

La epilepsia es un trastorno neurológico crónico caracterizado por la aparición recurrente de convulsiones que pueden afectar diversas funciones del cerebro. Aunque el enfoque principal en el manejo de la epilepsia suele centrarse en el control de las crisis epilépticas, existe un creciente reconocimiento de que los pacientes con epilepsia también pueden enfrentar riesgos significativos para su salud cardiovascular. En particular, la relación entre epilepsia y anomalías cardíacas ha sido objeto de investigación debido a la preocupación sobre cómo las convulsiones pueden influir en la función cardíaca y, a su vez, cómo las alteraciones cardíacas pueden impactar en la gestión y pronóstico de la epilepsia.

Estudios recientes han demostrado que los pacientes con epilepsia, especialmente aquellos con epilepsia refractaria, tienen una mayor prevalencia de marcadores electrocardiográficos asociados con un riesgo aumentado de arritmias y eventos cardíacos adversos. La investigación sugiere que las crisis epilépticas pueden provocar cambios en la frecuencia cardíaca, la variabilidad del ritmo cardíaco y otros parámetros electrocardiográficos que podrían predisponer a los pacientes a episodios de taquicardia ictal o incluso a la muerte súbita relacionada con la epilepsia (SUDEP).

Diversos estudios han explorado la incidencia de estos fenómenos, destacando la importancia de la localización de las lesiones cerebrales, la duración de la epilepsia, y el impacto

*Autor para correspondencia:

Correo electrónico: ag376451@uaeh.edu.mx (Gael Aguirre-Cruz);

de los tratamientos antiepilépticos sobre la salud cardiovascular. Investigaciones como las de Almeida et al. (2010), Bagnall et al. (2016), y Lamberts et al. (2014) han aportado valiosos conocimientos sobre cómo las crisis pueden afectar el sistema cardiovascular, mientras que estudios como el de Pang et al. (2019) han mostrado la relación entre la inestabilidad eléctrica cardíaca y la epilepsia crónica.

A pesar de estos avances, la relación entre epilepsia y problemas cardíacos aún no está completamente comprendida. La identificación y manejo de estos riesgos requieren una evaluación integral de los pacientes epilépticos, considerando tanto los aspectos neurológicos como los cardíacos. Este trabajo pretende ofrecer una visión general de la literatura actual sobre este tema, resaltando los hallazgos clave y sugiriendo áreas para futuras investigaciones que podrían mejorar la comprensión y el manejo de la epilepsia en el contexto de la salud cardiovascular.

2. Antecedentes

Los electrocardiogramas (ECG) juegan un papel crucial en la comprensión de las implicaciones cardiovasculares de la epilepsia, particularmente en relación con el riesgo de muerte inesperada repentina en la epilepsia (SUDEP). Los pacientes con epilepsia a menudo exhiben varias anomalías de ECG, lo que puede ser indicativo de problemas cardíacos subyacentes que pueden contribuir a su mayor riesgo de mortalidad.

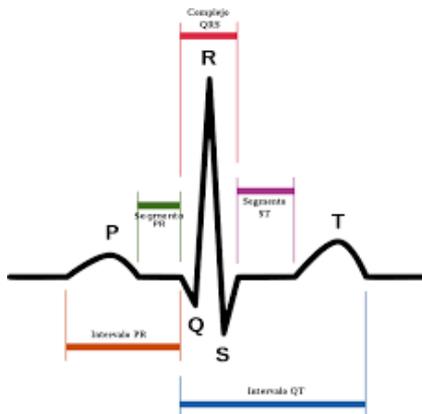


Figura 1: Adaptación de (Contributors, 2023b). ECG del corazón con ritmo sinusal normal.

La investigación indica que incluso los pacientes asintomáticos con epilepsia pueden experimentar cambios sutiles de ECG, como el aumento de las velocidades cardíacas y los intervalos QT prolongados, particularmente durante los eventos de convulsiones (Almeida *et al.*, 2010). El fenómeno de la taquicardia ictal, donde las velocidades cardíacas aumentan significativamente durante las convulsiones, se ha documentado en una proporción sustancial de pacientes, con estudios que muestran que aproximadamente el 82 % de los pacientes experimentan esta afección (Eggleston *et al.*, 2014). Esta taquicardia puede conducir a arritmias cardíacas graves, que se observan en hasta el 45 % de los pacientes con epilepsia refractaria (Standridge, 2010). Además, los intervalos QT prolongados y otras anomalías de repolarización se han relacionado con un mayor riesgo de eventos cardíacos, incluido SUDEP (Lamberts y Blom, 2014; Brotherstone *et al.*, 2010).

2.1. Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV)

La variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) es otra métrica importante derivada de ECG que se ha asociado con el riesgo de SUDEP. El HRV reducido se ha identificado como un biomarcador potencial para identificar a los pacientes con riesgo de SUDEP, lo que sugiere que la disfunción autonómica puede desempeñar un papel importante en las complicaciones cardiovasculares de la epilepsia (Sivathamboo *et al.*, 2021). En niños con epilepsia refractaria, se ha observado un HRV más bajo, lo que indica una diferencia de potencial en los mecanismos de regulación autónoma cardíaca en comparación con los adultos (Toth *et al.*, 2010). Además, se han encontrado mutaciones genéticas específicas relacionadas con el síndrome de QT largo (LQT) en pacientes con epilepsia, lo que complica aún más la relación entre la epilepsia y la salud cardíaca (Bagnall *et al.*, 2016).

2.2. Relación entre Epilepsia y Arritmias Cardíacas

La relación entre la epilepsia y las arritmias cardíacas es compleja y multifacética. Los estudios han demostrado que la inestabilidad eléctrica cardíaca, caracterizada por alternantes de onda T y otros cambios en el ECG, es frecuente en pacientes con epilepsia crónica (Pang y Verrier, 2019; Verrier y Pang, 2021). Estas alteraciones pueden exacerbarse mediante el uso de fármacos antiepilépticos (AED), que pueden tener efectos pro-arrítmicos (Sathyaprabha y Bhattacharyya, 2018). Además, la duración de la epilepsia se ha correlacionado con el empeoramiento de índices electrofisiológicos cardíacos, lo que sugiere una naturaleza progresiva de estos cambios con el tiempo (Chan y Yuen, 2021).

La epilepsia es un trastorno neurológico crónico caracterizado por la aparición recurrente de convulsiones que pueden afectar diversas funciones del cerebro. Aunque el enfoque principal en el manejo de la epilepsia suele centrarse en el control de las crisis epilépticas, existe un creciente reconocimiento de que los pacientes con epilepsia también pueden enfrentar riesgos significativos para su salud cardiovascular. En particular, la relación entre epilepsia y anomalías cardíacas ha sido objeto de investigación debido a la preocupación sobre cómo las convulsiones pueden influir en la función cardíaca y, a su vez, cómo las alteraciones cardíacas pueden impactar en la gestión y pronóstico de la epilepsia.

Estudios recientes han demostrado que los pacientes con epilepsia, especialmente aquellos con epilepsia refractaria, tienen una mayor prevalencia de marcadores electrocardiográficos asociados con un riesgo aumentado de arritmias y eventos cardíacos adversos. La investigación sugiere que las crisis epilépticas pueden provocar cambios en la frecuencia cardíaca, la variabilidad del ritmo cardíaco y otros parámetros electrocardiográficos que podrían predisponer a los pacientes a episodios de taquicardia ictal o incluso a la muerte súbita relacionada con la epilepsia (SUDEP).

El electrocardiograma (ECG) es una herramienta fundamental para evaluar la salud cardíaca, y la identificación de los picos R dentro de la forma de onda del ECG es esencial para diversos análisis, incluido el cálculo de la frecuencia cardíaca y la detección de arritmias. En un individuo sano, los picos R se observan típicamente a intervalos regulares, que corresponden a las contracciones rítmicas del corazón. La frecuencia cardíaca

promedio en un adulto sano varía de 60 a 100 latidos por minuto, lo que se traduce en aproximadamente 60 a 100 picos R por minuto, asumiendo un ritmo sinusal normal (Samad *et al.*, 2013; Cui y Zhang, 2020).

La detección de picos R (Fig. 1) es crucial para calcular el intervalo R-R, que es el tiempo entre picos R sucesivos. Este intervalo es un parámetro significativo para evaluar la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), una medida que refleja la actividad del sistema nervioso autónomo y la salud cardiovascular general (Cui y Zhang, 2020; Prince y Devinsky, 2012). En individuos sanos, los intervalos R-R presentan variabilidad debido a factores fisiológicos como la respiración y la actividad física, que se pueden cuantificar utilizando varios algoritmos diseñados para la detección de picos R (Qin y Yan, 2017; Deng y et al., 2023). Varios estudios han explorado los métodos para detectar con precisión los picos R en las señales de ECG. Por ejemplo, el algoritmo de Pan y Tompkins (Fig.2) es ampliamente reconocido por su eficacia para identificar complejos QRS, incluidos los picos R, en entornos ruidosos (Samad *et al.*, 2013; Qin y Yan, 2017). Además, se han desarrollado algoritmos avanzados que utilizan transformadas wavelet y umbrales adaptativos para mejorar la precisión de la detección, en particular en aplicaciones en tiempo real (Nguyen y Tran, 2022; Adeluyi y et al., 2012). Estos algoritmos son esenciales para garantizar que los picos R se identifiquen correctamente, lo que es fundamental para los análisis posteriores, como el cálculo de la frecuencia cardíaca y la detección de arritmias (Qin y Yan, 2017; Deng y et al., 2023).

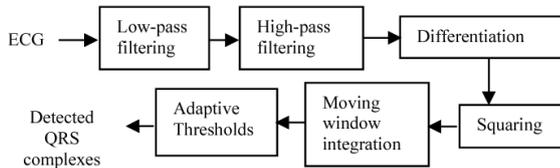


Figura 2: Adaptación de (Contributors, 2023a). Diagrama de bloques del algoritmo de Pan y Tompkins.

La cantidad de picos R detectados en un ECG saludable también puede variar en función de factores como la edad, el nivel de condición física y la presencia de cualquier condición de salud subyacente. Por ejemplo, durante el ejercicio, la frecuencia cardíaca aumenta, lo que lleva a una mayor frecuencia de picos R, mientras que en un estado de reposo, la frecuencia puede disminuir (Cui y Zhang, 2020). Además, los estudios han demostrado que la cantidad promedio de picos R detectados en un entorno controlado con sujetos sanos puede alcanzar más de 8619 picos R en múltiples registros, lo que indica la solidez de los algoritmos de detección (Zhang y et al., 2020).

A pesar de estos avances, la relación entre epilepsia y problemas cardíacos aún no está completamente comprendida. La identificación y manejo de estos riesgos requieren una evaluación integral de los pacientes epilépticos, considerando tanto los aspectos neurológicos como los cardíacos. Este trabajo pretende ofrecer una visión general de la literatura actual sobre este tema, resaltando los hallazgos clave y sugiriendo áreas para futuras investigaciones que podrían mejorar la comprensión y el manejo de la epilepsia en el contexto de la salud cardiovascular.

3. Bases de Datos

Las bases de datos a utilizar fueron extraídas de physionet.org (Goldberger *et al.*, 2000) y se incluyen las siguientes: Post-Ictal Heart Rate Oscillations in Partial Epilepsy, MIT-BIH Arrhythmia Database y Brno University of Technology ECG Quality Database (BUT QDB).

3.1. Post-Ictal Heart Rate Oscillations in Partial Epilepsy

La base de datos Post-Ictal Heart Rate Oscillations in Partial Epilepsy estudia un patrón que se caracteriza por la aparición de oscilaciones transitorias pero prominentes en la frecuencia cardíaca de baja frecuencia (0,01 - 0,1 Hz) inmediatamente después de cinco de las 11 convulsiones registradas en cinco pacientes. Este hallazgo podría ser un marcador de inestabilidad neuroautónoma y, por lo tanto, tiene implicaciones potenciales para comprender las alteraciones en el control de la frecuencia cardíaca asociadas con convulsiones parciales (Al-Aweel *et al.*, 1999).

Los registros de ECG anotados utilizados en este estudio están disponibles para descarga. Cada registro incluye un archivo de encabezado (formato texto) con sufijo .hea, un archivo de señal (binario) con sufijo .dat, y un archivo de anotación (binario) con sufijo .ari. Estos archivos se pueden leer utilizando el software WFDB. Además, el archivo de texto times.seize indica los intervalos de las convulsiones en cada registro, determinados mediante EEG simultáneos (no disponibles en esta base de datos).

3.2. MIT-BIH Arrhythmia Database

La base de datos MIT-BIH Arrhythmia (Moody y Mark, 2001) contiene 48 fragmentos de registros de ECG ambulatorios de dos canales, con media hora de duración, obtenidos de 47 sujetos estudiados por el Laboratorio de Arritmias del BIH entre 1975 y 1979. De un conjunto de 4000 registros de ECG ambulatorios de 24 horas, se seleccionaron 23 al azar, correspondientes a una población mixta de pacientes hospitalizados (60 %) y ambulatorios (40 %) del Hospital Beth Israel de Boston. Los 25 registros restantes fueron elegidos específicamente para incluir arritmias menos comunes pero clínicamente significativas, que podrían estar subrepresentadas en una muestra aleatoria.

Los registros se digitalizaron a 360 muestras por segundo por canal, con una resolución de 11 bits en un rango de 10 mV. Al menos dos cardiólogos anotaron de forma independiente cada registro, y cualquier desacuerdo fue resuelto para crear las anotaciones de referencia legibles por computadora. La base de datos contiene aproximadamente 110,000 anotaciones.

Desde el lanzamiento de PhysioNet en 1999, se ha puesto a disposición aproximadamente la mitad de los registros y sus anotaciones de referencia de forma gratuita. Los 23 registros restantes, anteriormente disponibles solo en el CD-ROM del MIT-BIH, fueron publicados en febrero de 2005.

Más información sobre esta base de datos se encuentra en el directorio correspondiente de MIT-BIH Arrhythmia Database.

3.3. Brno University of Technology ECG Quality Database (BUT QDB)

La base de datos BUT QDB, creada por el equipo de cardiología del Departamento de Ingeniería Biomédica de la Universidad Tecnológica de Brno, está destinada a la evaluación de la calidad de las señales de ECG. Los datos consisten en 18 registros de ECG de una sola derivación, acompañados por datos de un acelerómetro de 3 ejes, obtenidos de 15 sujetos (9 mujeres y 6 hombres) de entre 21 y 83 años. Las grabaciones se realizaron entre agosto de 2018 y octubre de 2019 mientras los sujetos llevaban a cabo actividades cotidianas bajo condiciones de "vida libre". El ECG móvil y el acelerómetro usados (Bittium Faros 180) permitieron una frecuencia de muestreo de 1000 Hz para las señales de ECG y 100 Hz para las del acelerómetro. La duración mínima de las grabaciones fue de 24 horas (Nemcova *et al.*, 2020).

Se anotaron completamente tres de las señales en términos de calidad de señal de ECG. Las 15 señales restantes fueron anotadas en dos segmentos de 20 minutos de duración, y se añadieron cinco segmentos adicionales con mala calidad de señal. La calidad de la señal se clasificó de la siguiente manera:

Clase 1: todas las formas de onda significativas del ECG (ondas P y T, y complejo QRS) son claramente visibles y sus inicios y finales se pueden detectar de manera confiable.

Clase 2: el nivel de ruido aumenta, dificultando la detección confiable de los puntos significativos del ECG, pero se puede detectar el complejo QRS.

Clase 3: los complejos QRS no se detectan de forma confiable y la señal no es adecuada para análisis posteriores.

4. Comparaciones de ECG (Saludable - Post ictal - Arritmia)

Para el análisis de nuestros datos utilizaremos la interfaz recomendada por los artículos, el paquete de software WFDB, escrito en C, junto con un conjunto de nuevas especificaciones de archivos. Creado por George B. Moody en 1989 mientras trabajaba en el Laboratorio de Fisiología Computacional (LCP) de la División de Ciencias de la Salud y Tecnología de Harvard-MIT, George también creó PhysioNet, una plataforma que aloja muchas bases de datos, paquetes de software y recursos relacionados con WFDB.



Figura 3: ECG de un paciente sano.



Figura 4: ECG de un paciente con Arritmia.

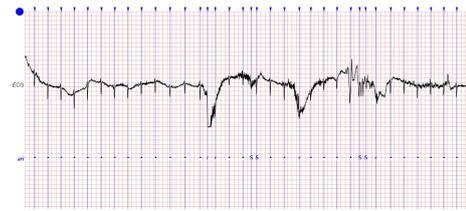


Figura 5: ECG de un paciente con epilepsia.

Podemos observar que en el ECG de una persona con arritmia (Fig. 4), los picos R son significativamente altos en comparación con otros patrones. En un ECG normal (Fig. 3), los picos R se encuentran en un rango intermedio. En el caso de un paciente con epilepsia (Fig. 5), los picos R presentan cambios muy abruptos, además de ser considerablemente más bajos. Esto concuerda con lo descrito en la literatura, donde se menciona que los pulsos bajos pueden generarse en ciertas condiciones patológicas, como la bradicardia, que se caracteriza por una frecuencia cardíaca anormalmente baja, generalmente por debajo de 60 latidos por minuto en un adulto.

Las principales diferencias entre los tres tipos de ECG radican en la frecuencia y regularidad de los picos R y en la presencia de bradicardia o arritmias en los casos patológicos. En contraste, el ECG normal presenta un patrón predecible y estable. Las similitudes entre ellos se encuentran en la estructura general del complejo QRS, que sigue representando la contracción ventricular en todos los casos, aunque de manera alterada en las situaciones patológicas.

Sin embargo, al analizar el electrocardiograma del paciente con epilepsia después del ataque y compararlo con el ECG del paciente con arritmia, podemos apreciar que, al menos en nuestras muestras, las proporciones de los picos R del paciente con epilepsia son notablemente menores. Esto podría deberse a las características particulares de nuestro paciente o bien podría representar un patrón común en este tipo de casos. Dado que las oscilaciones post-ictales (PICO) tienden a reducir la frecuencia cardíaca y generar alteraciones en la amplitud de los picos, es posible que este fenómeno esté influyendo en los resultados observados.

Por lo tanto, vale la pena profundizar en el análisis de esta diferencia, ya que podría ofrecer una mayor comprensión de los cambios autonómicos que ocurren tras una convulsión epiléptica. Estudios adicionales con un mayor número de muestras podrían determinar si este comportamiento se repite de forma consistente y si puede utilizarse como un marcador característico de la actividad cardíaca post-ictal en pacientes con epilepsia.



Figura 6: Segmento de ECG de un paciente con Arritmia.

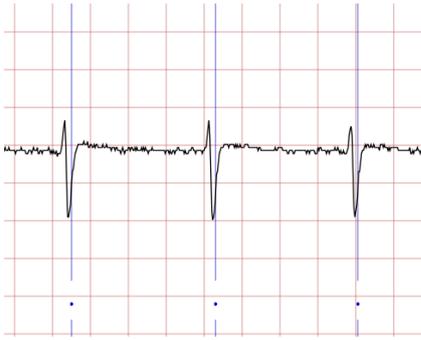


Figura 7: Segmento de ECG de un paciente con epilepsia (Post ictal).

5. Resultados

En este estudio, se analizaron electrocardiogramas (ECG) de tres tipos de situaciones clínicas: pacientes con arritmia, pacientes sanos y pacientes con epilepsia post-ictal (después de un ataque). Los resultados revelaron diferencias notables en las características de los picos R y la frecuencia cardíaca entre estas condiciones.

Arritmias: En los pacientes con arritmia, observamos picos R inusualmente altos en comparación con los ECG de individuos sanos (Fig. 6). Este comportamiento puede deberse a la irregularidad en los impulsos eléctricos que controlan los latidos del corazón, lo que genera tanto picos R elevados como una variabilidad significativa en los intervalos RR. La amplitud y frecuencia de los picos R son característicamente erráticas, lo que coincide con la definición de arritmia en la literatura, donde el ritmo cardíaco es desorganizado o irregular.

ECG Normal: En los pacientes sanos, los picos R mostraron una amplitud y frecuencia regulares. Los intervalos entre cada latido y los picos R se mantienen dentro de los rangos esperados, indicando un ritmo cardíaco normal y fisiológicamente adecuado.

Epilepsia Post-Ictal: Los pacientes con epilepsia (Fig. 7) mostraron cambios abruptos en los picos R después del ataque, con una reducción en la amplitud de estos picos en comparación con los casos de arritmia o ECG normales. Este comportamiento es consistente con los hallazgos de la literatura sobre oscilaciones de la frecuencia cardíaca post-ictales (PICO), que indican una inestabilidad neuroautonómica, con cambios significativos en la actividad simpática y parasimpática del sistema nervioso autónomo. La disminución en la amplitud de los picos R puede reflejar una reducción en la excitabilidad cardíaca tras la convulsión, con posibles pulsos bajos, también conocidos como bradicardia.

Este análisis a grosso modo nos motivó a hacer un análisis utilizando la interfaz analyzer (Rodríguez-Torres *et al.*, 2024) basada en python, la cuál nos permitió realizar mapas de Poincaré para un análisis más preciso.

5.1. Comparación de mapas de Poincaré

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las personas sana, con epilepsia y con arritmia, basados en el análisis de los mapas de Poincaré:

5.2. Persona sana

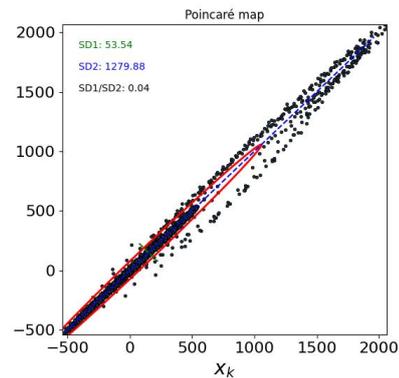


Figura 8: Mapa de Poincaré obtenido del análisis del ECG de un paciente saludable.

- SD1: 53.54 ms
- SD2: 1279.88 ms
- Relación SD1/SD2: 0.04
- Elipse: Uniforme

Para la persona sana, los valores elevados de SD1 y SD2 indican una mayor variabilidad de la frecuencia cardíaca, lo cual es un signo de buen funcionamiento del sistema nervioso autónomo. La elipse uniforme refleja una distribución simétrica y bien balanceada de los intervalos RR, lo que sugiere una regulación cardíaca robusta y flexible. La baja relación SD1/SD2 (0.04) indica que el componente de corto plazo de la variabilidad (SD1) es pequeño en comparación con el de largo plazo (SD2), lo cual es normal en personas sanas con un ritmo cardíaco estable.

5.3. Persona con epilepsia

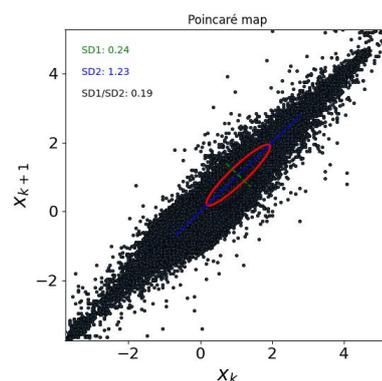


Figura 9: Mapa de Poincaré obtenido del análisis del ECG de un paciente con epilepsia.

- SD1: 0.24 ms
- SD2: 1.23 ms
- Relación SD1/SD2: 0.19
- Elipse: Dispersa

En el caso de la persona con epilepsia, tanto SD1 como SD2 son considerablemente más bajos que en la persona sana. Esto refleja una reducción drástica en la variabilidad de la frecuencia cardíaca, lo cual puede estar relacionado con una disfunción del sistema nervioso autónomo, algo que a menudo se observa en personas con epilepsia, especialmente durante episodios de crisis. La elipse dispersa indica una distribución más caótica o menos coherente de los intervalos RR, lo que refleja una mayor inestabilidad en la regulación del ritmo cardíaco. La relación SD1/SD2 es mayor (0.19) que en la persona sana, lo que sugiere que, aunque la variabilidad total es baja, hay más irregularidades en la regulación de corto plazo.

5.4. Persona con arritmia

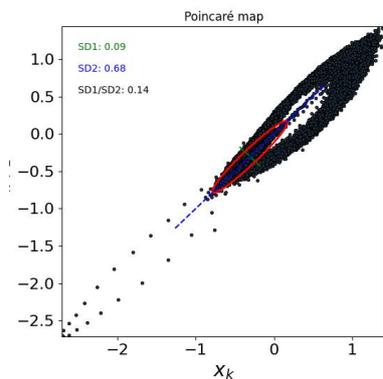


Figura 10: Mapa de Poincaré obtenido del análisis del ECG de un paciente con arritmia.

- SD1: 0.09 ms
- SD2: 0.68 ms
- Relación SD1/SD2: 0.14
- Elipse: Dispersa

Para la persona con arritmia, los valores de SD1 y SD2 son extremadamente bajos, lo que refleja una variabilidad muy reducida en la señal del electrocardiograma (ECG). Esto es un signo característico de arritmias, donde el control autónomo sobre el ritmo cardíaco está significativamente alterado. Al igual que en el caso de la persona con epilepsia, la elipse dispersa refleja una distribución incoherente de los intervalos RR, lo que sugiere inestabilidad en la regulación del ritmo cardíaco. La relación SD1/SD2 es de 0.14, lo que sugiere que la regulación de corto plazo está aún más comprometida en esta persona. A continuación presentamos una recopilación de los resultados obtenidos:

- **Persona sana:** Alta variabilidad en la frecuencia cardíaca, con una distribución estable de los intervalos RR, lo que indica un sistema cardíaco saludable.
- **Persona con epilepsia:** Reducción significativa de la variabilidad cardíaca y una distribución menos regular, lo que sugiere alteraciones en el control autónomo del corazón.

- **Persona con arritmia:** Variabilidad extremadamente baja y una distribución caótica de los intervalos RR, lo que es característico de una disfunción grave en la regulación del ritmo cardíaco.

El análisis de los mapas de Poincaré muestra que la reducción en la variabilidad (SD1 y SD2) y una elipse dispersa están asociadas con condiciones patológicas como epilepsia y arritmia (Fig. 9 y Fig. 10), mientras que la persona sana presenta una variabilidad cardíaca alta con una elipse más estable (Fig. 8).

5.5. Importancia del Análisis de Datos

El análisis detallado de estos resultados es crucial por varias razones:

Mejora del Diagnóstico: La comparación entre ECGs de pacientes con diferentes condiciones (arritmias, epilepsia, y ritmo normal) proporciona información valiosa para mejorar el diagnóstico diferencial. Las características específicas de los picos R y las oscilaciones en la frecuencia cardíaca pueden ayudar a los médicos a identificar de manera más precisa qué tipo de alteración está presente en cada paciente.

Identificación de Patrones Post-Ictales: Los cambios en los picos R y la aparición de oscilaciones de baja frecuencia tras un ataque epiléptico sugieren que el ECG post-ictal puede ser un marcador útil para detectar inestabilidades neuroautónomas. Estos datos podrían ser fundamentales para monitorear el riesgo de complicaciones cardíacas en pacientes con epilepsia, como el riesgo de muerte súbita por epilepsia (SUDEP), que está asociado a alteraciones en la regulación cardíaca después de una convulsión.

5.6. Predicción de Ataques Epilépticos a Través del ECG Pre-Ictal

Uno de los aspectos más prometedores de este tipo de análisis es la posibilidad de predecir ataques epilépticos mediante la identificación de patrones en el ECG pre-ictal. En la fase pre-ictal (antes de la convulsión), se han observado sutiles cambios en la actividad cardíaca, como un aumento en la frecuencia cardíaca o la aparición de oscilaciones atípicas. Estos cambios, aunque discretos, podrían servir como indicadores de alerta temprana.

La monitorización continua del ECG y el desarrollo de algoritmos que identifiquen patrones específicos podrían permitir la predicción de ataques epilépticos antes de que ocurran, lo que ofrecería a los pacientes la oportunidad de tomar medidas preventivas. Por ejemplo, un aumento repentino en la frecuencia cardíaca o la aparición de oscilaciones de baja frecuencia podría activar alarmas en dispositivos portátiles de monitoreo, como relojes inteligentes, lo que daría al paciente tiempo para buscar un entorno seguro o tomar medicación preventiva.

6. Discusión

El uso de la inteligencia artificial (IA) en la predicción de ataques epilépticos implica el desarrollo de un sistema de monitoreo continuo que emplea algoritmos de aprendizaje profundo (deep learning). Este sistema tiene la capacidad de analizar, en

tiempo real, las señales de electroencefalografía (EEG) y electrocardiografía (ECG) de los pacientes, permitiendo así identificar patrones asociados con la aparición de crisis.

Para llevar a cabo este proyecto, es fundamental colaborar estrechamente con hospitales y centros de investigación. Estas instituciones ofrecen acceso a grandes bases de datos de ECG correspondientes a pacientes con epilepsia, arritmias y ritmos cardíacos normales, proporcionando información valiosa para entrenar y validar los modelos de IA.

Además, resulta esencial incrementar tanto la diversidad como el tamaño de las muestras utilizadas en el desarrollo del sistema. Esto incluye asegurarse de que los datos representen una amplia variedad de tipos de epilepsia y arritmias, con el objetivo de garantizar que el modelo sea lo suficientemente robusto y generalizable para atender a diferentes casos y poblaciones.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos destacan diferencias importantes entre los ECG de pacientes con arritmia, epilepsia post-ictal y pacientes sanos. Estos hallazgos subrayan la importancia del análisis detallado de las características de los picos R y las oscilaciones de la frecuencia cardíaca, no solo para el diagnóstico preciso, sino también para la prevención de complicaciones graves. La posibilidad de predecir ataques epilépticos mediante el análisis del ECG pre-ictal abre una nueva puerta en el manejo de la epilepsia, proporcionando a los pacientes una herramienta para mejorar su calidad de vida.

Agradecimientos

Agradezco a la Dra. Erika Elizabeth Rodríguez Torres y al cuerpo académico en sistemas dinámicos por su apoyo y guía durante la realización de este trabajo.

Referencias

- Adeluyi, A. y et al. (2012). Adaptive qrs detection using multi-resolution analysis. *Computers in Biology and Medicine*, 42(3):253–263.
- Al-Aweel, I. C., Krishnamurthy, K. B., Hausdorff, J. M., Mietus, J. E., Ives, J. R., Blum, A. S., Schomer, D. L., y Goldberger, A. L. (1999). Post-ictal heart rate oscillations in partial epilepsy. *Neurology*, 53(7):1590–1592.
- Almeida, N., Rehder, R., y et al. (2010). Cardiovascular changes during epileptic seizures. *Epilepsia*, 51(9):1579–1586.
- Bagnall, R. D., Crompton, D. E., y et al. (2016). Genetic risk factors for sudden unexpected death in epilepsy: a systematic review. *Neurology*, 86(7):524–531.
- Brotherstone, R., Vesey, P., y et al. (2010). The qt interval in epilepsy patients revisited. *Seizure*, 19(8):522–526.
- Chan, K. Y. y Yuen, A. W. C. (2021). Cardiovascular complications in epilepsy: a long-term follow-up study. *Seizure*, 90(1):23–28.
- Contributors, R. (2023a). Pan and tompkins algorithm image. Accedido: 2024-09-27.
- Contributors, W. (2023b). Imagen de un electrocardiograma. Accedido: 2024-09-27.
- Cui, Y. y Zhang, H. (2020). Heart rate variability analysis based on ecg signals in normal and stressed conditions. *Journal of Biomedical Informatics*, 108(1):103–112.
- Deng, J. y et al. (2023). Wavelet-based ecg signal analysis and qrs detection in wearable devices. *Sensors*, 23(1):255–261.
- Eggleston, K., Hainline, B., y et al. (2014). Ictal tachycardia: its prevalence and significance in epilepsy. *Epilepsy Research*, 108(1):30–36.
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Glass, L., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Mark, R. G., Mietus, J. E., Moody, G. B., Peng, C.-K., y Stanley, H. E. (2000). Physiobank, physiotoolkit, and physionet: Components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation [Online]*, 101(23):e215–e220.
- Lamberts, R. y Blom, M. (2014). Sudden unexpected death in epilepsy and cardiac arrhythmias. *Epilepsia*, 55(1):e89–e92.
- Moody, G. B. y Mark, R. G. (2001). The impact of the mit-bih arrhythmia database. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 20(3):45–50.
- Nemcova, A., Smisek, R., Opravilová, K., Vitek, M., Smital, L., y Maršánová, L. (2020). Brno university of technology ecg quality database (but qdb) (version 1.0.0).
- Nguyen, T. T. y Tran, D. C. (2022). Machine learning-based ecg classification for qrs detection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 69(1):103177.
- Pang, A. y Verrier, R. L. (2019). Heart rate variability and cardiac electrical instability in epilepsy. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 36(6):485–492.
- Prince, E. y Devinsky, O. (2012). Autonomic dysfunction in epilepsy and its clinical relevance. *Epilepsy Behavior*, 25(4):472–476.
- Qin, L. y Yan, P. (2017). Real-time qrs detection using adaptive threshold and wavelet transform. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64(9):2345–2355.
- Rodríguez-Torres, E. E., Azpeitia-Cruz, M. F., Escamilla-Muñoz, J., y Vázquez-Mendoza, I. (2024). Analyzing respiratory sinus arrhythmia: A markov chain approach with hypertensive patients and arachnophobic individuals. *Muscles*, 3(2):177–188.
- Samad, Z., Yousuf, A., y et al. (2013). Detection of qrs complexes using wavelet transform. *Biomedical Signal Processing and Control*, 8(6):636–645.
- Sathyaprabha, T. y Bhattacharyya, R. (2018). Antiepileptic drugs and cardiac arrhythmias: A clinical review. *Seizure*, 60(1):33–38.
- Sivathamboo, S., Gleadle, E. M., y et al. (2021). Heart rate variability and sudep: a biomarker for risk assessment? *Epilepsia*, 62(6):1215–1224.
- Standridge, S. M. (2010). Sudden unexpected death in epilepsy and the role of the heart. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 77(2):54–62.
- Toth, M., Fogarasi, A., y et al. (2010). Decreased heart rate variability in children with epilepsy. *Seizure*, 19(7):403–408.
- Verrier, R. L. y Pang, A. (2021). Cardiac arrhythmias in epilepsy. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 32(9):2359–2371.
- Zhang, H. y et al. (2020). Effect of frequency band selection on heart rate variability analysis in healthy subjects. *Journal of Medical Systems*, 44(1):45.