

Proyecto 1: Análisis de señales ECG y detección de arritmias

Juan Esteban Pineda Lopera*, Marly Alejandra Ortega†, Elisabeth Gómez Cano‡

*†‡Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

*jesteban.pineda1@udea.edu.co, †alejandra.ortega1@udea.edu.co, ‡elisabeth.gomezcano@udea.edu.co

I. RESUMEN

En este proyecto se analizó un conjunto de señales de electrocardiograma (ECG) para la detección y caracterización de arritmias cardíacas mediante el estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV). Se procesaron registros de ECG utilizando algoritmos de detección de picos R, seleccionándose el método de Hamilton por su mayor precisión. A partir de los intervalos NN obtenidos, se calcularon métricas en el dominio del tiempo y de la frecuencia empleando la librería *hrvanalysis*. Posteriormente, se realizaron comparaciones estadísticas entre diferentes tipos de ritmos, principalmente fibrilación auricular (AFIB) y taquicardia sinusal (ST), aplicando pruebas no paramétricas debido a la falta de normalidad en los datos. Los resultados evidenciaron diferencias significativas en los patrones de variabilidad de la frecuencia cardíaca, lo cual respalda el uso de HRV como herramienta no invasiva para la caracterización de arritmias.

II. ABSTRACT

In this project, a set of electrocardiogram (ECG) signals was analyzed for the detection and characterization of cardiac arrhythmias through heart rate variability (HRV) analysis. ECG records were processed using R-peak detection algorithms, selecting the Hamilton method due to its higher accuracy. From the derived NN intervals, time-domain and frequency-domain features were calculated using the *hrvanalysis* library. Subsequently, statistical comparisons between different rhythm types, mainly atrial fibrillation (AFIB) and sinus tachycardia (ST), were conducted using non-parametric tests due to non-normality of the data. The results revealed significant differences in HRV patterns, supporting the use of HRV analysis as a non-invasive tool for arrhythmia characterization.

III. INTRODUCCIÓN

La electrocardiografía es una prueba médica para el diagnóstico de patologías cardíacas, permitiendo la identificación de diferentes tipos de arritmias a partir del análisis de la actividad eléctrica del corazón. Entre las arritmias más relevantes se encuentran la fibrilación auricular, caracterizada por una actividad auricular desordenada, y la taquicardia sinusal, definida por un ritmo acelerado pero regular [1]. La detección de arritmias a través del procesamiento de señales ECG ha sido de mucho interés, esto, mediante el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca y el uso de algoritmos

de detección de picos R. Estos estudios, permiten identificar patrones característicos de diferentes ritmos y mejorar la precisión diagnóstica. En este estudio en concreto, se analizaron registros de ECG para extraer métricas de HRV y comparar su comportamiento entre las diferentes arritmias, se utilizaron métodos estadísticos no paramétricos para evaluar diferencias significativas.

IV. METODOLOGÍA

IV-A. Análisis 1

Para esta primer etapa, se utilizó la base de datos *Diagnostics.xlsx* con el fin de extraer información clínica de los pacientes, siendo el tipo de arritmia cardíaca la característica principal de interés. Los datos fueron importados empleando la librería *Pandas*, y se realizó un análisis centrado en las variables *Rhythm*, *Gender* y *PatientAge* de cada paciente. Se calcularon medidas estadísticas descriptivas como la media, la desviación estándar, los valores máximos y mínimos, y se agruparon los resultados según el tipo de arritmia dominante.

Para la elaboración de histogramas de frecuencia de arritmias, diagramas de caja, y gráficos de prevalencia de género y su relación con el tipo de arritmia, se emplearon las librerías *Seaborn* y *Matplotlib*. Posteriormente, los datos fueron filtrados para considerar únicamente pacientes en el rango de edad de 41 a 87 años, con el objetivo de reducir la variabilidad extrema y realizar un análisis más enfocado. Asimismo, se descartaron los registros correspondientes a arritmias con baja representación en la base de datos (SA, AT, AVNRT, SAAWR y AVRT) para mejorar la homogeneidad del conjunto de datos final. [2]

IV-B. Análisis 2:

Para la realización de esta parte se seleccionaron como arritmias la Fibrilación auricular (AF) y Taquicardia sinusal (ST). A partir de la base de datos, se seleccionaron los registros de ECG correspondientes a pacientes diagnosticados con fibrilación auricular (AFIB) y taquicardia sinusal (ST), extrayendo los nombres de los archivos desde la base de datos mediante un filtrado por la columna *Rhythm*. De estos, se seleccionaron 20 registros aleatorios de cada tipo de arritmia. Las señales de ECG fueron leídas utilizando la librería *Pandas*, considerando las 12 derivaciones estándares, y se graficaron las derivaciones I y II para una observación visual. Para la detección de los picos R, se emplearon dos métodos, *NeuroKit*

utilizando la función `nk.ecg_peaks()` sobre la derivación II con frecuencia de muestreo de 500 Hz y Detectores aplicando el algoritmo `detector.engzee_detector()`. Cada señal analizada fue representada gráficamente, indicando las posiciones detectadas de los picos R, permitiendo una comparación visual entre los dos métodos.

IV-C. Análisis 3:

Antes de continuar con esta parte del proyecto, era necesario identificar cuál método funcionaba mejor para detectar los picos R en los datos. Para ayudar en esta elección, se realizó una gráfica que muestra cuántos picos detecta cada método, basada en el análisis realizado previamente.

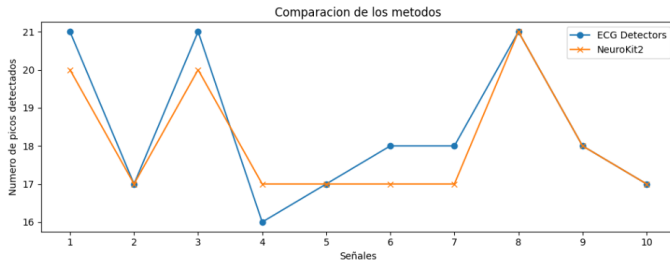


Figura 1: Comparación de métodos de detección de picos R.

Con base en los resultados anteriores, se determinó que el método más preciso para la detección de picos R es `ecg-detector`. A partir de esta selección, se tomaron los datos filtrados del Análisis 1, correspondientes a los tipos de señales AFIB, AFIB-SB, SR, ST y SVT. Estas señales se almacenaron en formato CSV, con una frecuencia de muestreo de 500 Hz.

Para cada registro, los picos R fueron detectados utilizando el algoritmo de Hamilton, adaptado a la frecuencia de muestreo mencionada. A partir de las posiciones temporales de los picos R, se calcularon los intervalos NN (intervalos entre latidos consecutivos) en milisegundos.

Posteriormente, se extrajeron características de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) en el dominio del tiempo, empleando la función `get_time_domain_features` de la librería `hrvanalysis`. Esta función permitió obtener métricas como la media y la mediana de los intervalos NN, la desviación estándar (SDNN), la raíz cuadrada de las diferencias sucesivas (RMSSD), los porcentajes de diferencias mayores a 20 y 50 ms (pNN20 y pNN50), y los coeficientes de variación (CVSD y CVNNI), entre otras.

Además del análisis en el dominio del tiempo, se realizó un estudio de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) en el dominio de la frecuencia. Para ello, se empleó la función `get_frequency_domain_features` de la librería `hrvanalysis`. Este análisis permitió obtener características espectrales clave, tales como la potencia en las bandas de muy baja frecuencia (VLF), baja frecuencia (LF) y alta frecuencia (HF), así como la relación LF/HF, que se utiliza como un indicador del balance entre los sistemas simpático y parasimpático. Estos resultados complementaron la información obtenida en el dominio del tiempo, ofreciendo una visión más completa de la HRV.

IV-D. Análisis 4

Se calcularon parámetros de la variabilidad de la frecuencia cardíaca a partir de los registros ECG que previamente se habían procesado, correspondientes a pacientes diagnosticados con fibrilación auricular (AFIB) y taquicardia sinusal (ST). Las métricas analizadas incluyeron variables en el dominio del tiempo, como el intervalo medio entre latidos normales, la desviación estándar, los porcentajes de variaciones significativas, etc. Para la exploración inicial se generaron diagramas de cajas agrupadas por tipo de ritmo, y luego se eliminaron los valores atípicos utilizando el rango intercuartílico, considerando solo los datos entre los percentiles 25 y 75. La normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad con la prueba de Levene. Debido a que ninguna de las métricas cumplieron estos supuestos, se utilizó la prueba de Mann-Whitney U para comparar las medianas entre grupos, y se calcularon los valores normalizados del estadístico U para evaluar la diferencia estadística entre cada uno de las métricas.

V. RESULTADOS

V-A. Análisis 1

El tipo de arritmia más prevalente fue el ritmo sinusal con bradicardia (SB), seguido por el ritmo sinusal (SR), la fibrilación auricular (AFIB) y la taquicardia supraventricular (SVT). La figura 1 muestra la distribución de las diferentes arritmias:

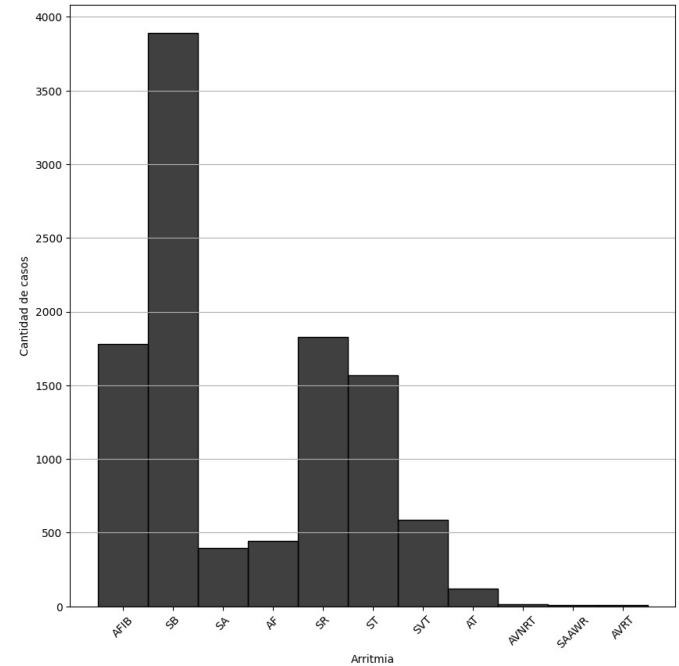


Figura 2: Histograma de frecuencia de tipos de arritmias en la población estudiada.

También se analizó para cada uno de los pacientes la distribución de edad para los diferentes tipos de arritmia mediante los diagramas de caja. Se observó que las arritmias

AFIB y AF se presentan en los pacientes con mayor edad, SB y SR aparecen en edades medias, mientras que la ST y SVT muestran un mayor rango de edades.

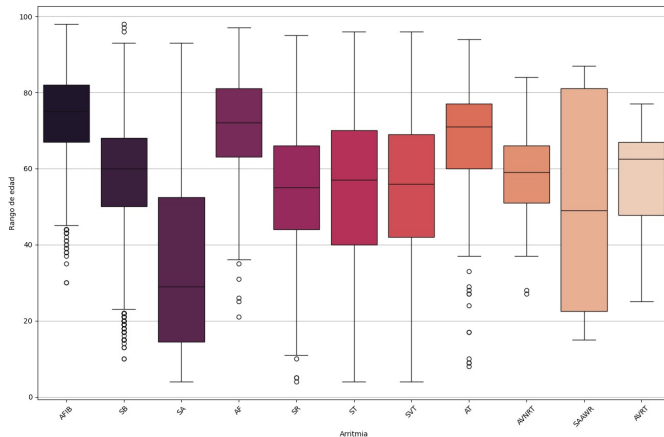


Figura 3: Diagrama de cajas de la distribución de edad de los pacientes según el tipo de arritmia

Los resultados mostraron que edad media de los pacientes fue de 59,18 años, con una desviación estandar de de 18,03 años, con una proporción de pacientes masculinos de 5956 y femeninos de 4690. La media de la frecuencia ventricular fue de 84,14 latidos por minuto, mientras que la duración promedio del intervalo QT corregido fue de 434 ms. De acuerdo al análisis de dispersión y prevalencia, se filtraron las edades entre 41 y 87 años, y se descartaron los tipos de arritmias con baja densidad de datos, que fueron SA, AT, AVNRT, SAAWR y AVRT, debido a que se priorizó el análisis en aquellas arritmias que contaban con más de 400 casos registrados.

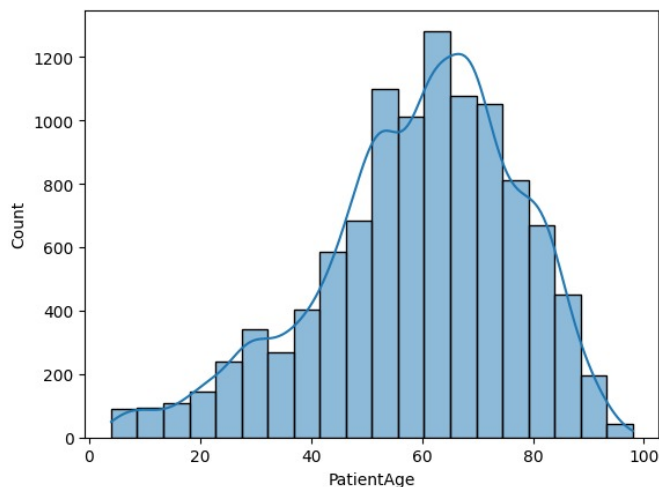


Figura 4: Histograma de frecuencia de la distribución de edad en los pacientes

V-B. Análisis 2

De las 20 señales de ECG correspondientes a AFIB y a ST, se observó que las señales de AFIB mostraron un patrón de ritmo irregular característico, mientras que las señales de ST, presentaron intervalos RR relativamente constantes. Los métodos de detección de picos R mostraron resultados variables, con NeuroKit, se obtuvo una detección robusta, pero en los registros de AFIB con alta irregularidad, algunos picos fueron omitidos o detectados incorrectamente, mientras que con Engzee Detector del paquete Detectors se logró identificar de manera más precisa los picos R en ambas clases de arritmias, especialmente en las señales de AFIB, gracias a su adaptación a variaciones rápidas en el ECG, este último dando como resultado una mejor capacidad de detección de picos R en ambos tipos de señal.

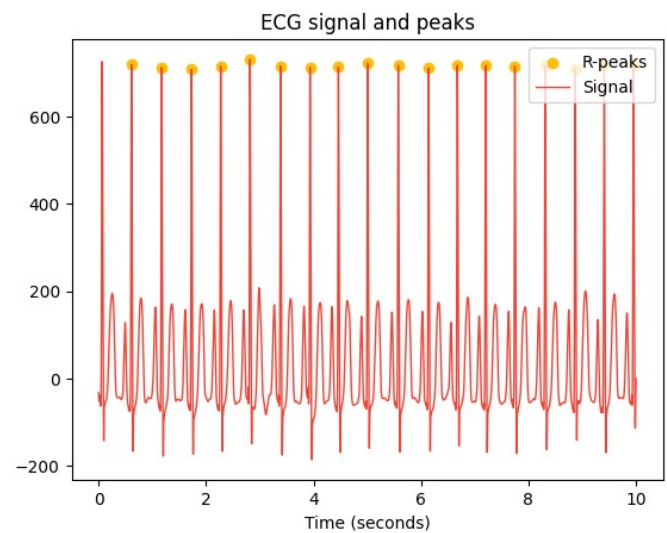


Figura 5: Detección de picos R utilizando NeuroKit en un registro de ECG de taquicardia sinusal (ST).

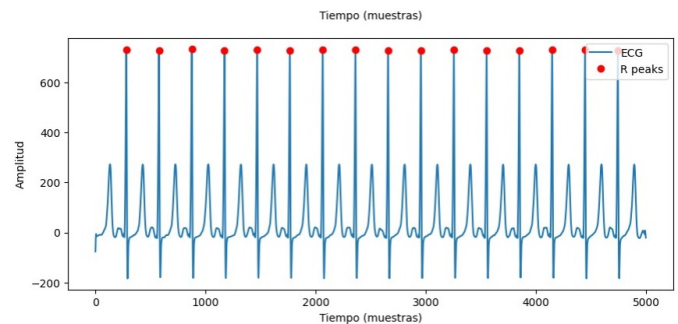


Figura 6: Detección de picos R utilizando el algoritmo Engzee de la librería Detectors en otra señal de ECG correspondiente a taquicardia sinusal (ST).

V-C. Análisis 3

Con la herramienta de la librería hrvanalysis se recolectaron las métricas necesarias. Aunque el análisis puede realizarse

sobre todas las señales, para esta demostración se eligieron 10 registros de forma representativa.

| mean_nni | sdnn | sdsd | nni_50 | pnni_50 | nni_20 | pnni_20 | rmssd | median_nni | range_nni |
|----------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|------------|-----------|
| 512.44 | 62.38 | 94.51 | 12 | 70.59 | 13 | 76.47 | 94.64 | 529.0 | 270.0 |
| 1097.25 | 167.98 | 146.44 | 4 | 57.14 | 6 | 85.71 | 162.31 | 1142.0 | 546.0 |
| 1036.89 | 266.19 | 258.18 | 1 | 12.50 | 2 | 25.00 | 277.05 | 1126.0 | 816.0 |
| 1063.78 | 26.50 | 34.97 | 2 | 25.00 | 5 | 62.50 | 35.20 | 1070.0 | 82.0 |
| 638.53 | 151.41 | 196.43 | 11 | 78.57 | 13 | 92.86 | 196.60 | 612.0 | 518.0 |
| 947.00 | 27.28 | 38.71 | 2 | 22.22 | 4 | 44.44 | 38.74 | 941.0 | 84.0 |

| cvstd | cvnni | mean_hr | max_hr | min_hr | std_hr | Cantidad_R_Peaks | Archivo | Ritmo |
|--------|--------|---------|--------|--------|--------|------------------|----------------------------|-------|
| 0.1847 | 0.1217 | 119.04 | 173.41 | 97.40 | 16.80 | 19 | MUSE_20180113_171329_27000 | AFIB |
| 0.1479 | 0.1531 | 56.31 | 86.21 | 48.31 | 11.44 | 9 | MUSE_20180112_073319_29000 | SB |
| 0.2672 | 0.2567 | 67.72 | 182.93 | 52.45 | 40.74 | 10 | MUSE_20180113_121940_44000 | SB |
| 0.0331 | 0.0249 | 56.43 | 58.82 | 54.45 | 1.34 | 10 | MUSE_20180112_120347_79000 | SB |
| 0.3079 | 0.2371 | 99.09 | 140.85 | 63.56 | 22.89 | 16 | MUSE_20180114_075026_69000 | AFIB |
| 0.0409 | 0.0288 | 63.40 | 65.65 | 60.12 | 1.71 | 11 | MUSE_20180209_172046_21000 | SR |

Cuadro 1. Características de HRV extraídas de 10 registros seleccionados.

Con el análisis en el dominio de la frecuencia se bajaron las mismas señales utilizadas en el análisis en el dominio del tiempo. Para ilustrar los resultados obtenidos, se presenta a continuación un ejemplo de una de las señales analizadas. Este ejemplo permite visualizar los principales parámetros espectrales que se pueden extraer utilizando la función `get_frequency_domain_features` de la librería `hrvanalysis`. Los parámetros obtenidos incluyen la potencia en baja frecuencia (LF), alta frecuencia (HF), la razón LF/HF, las unidades normalizadas de baja y alta frecuencia (LFnu y HFnu), la potencia total (Total Power) y la potencia en muy baja frecuencia (VLF), como se muestra en la Tabla.

| LF (ms ²) | HF (ms ²) | LF/HF | LFnu (%) | HFnu (%) | Total Power (ms ²) | VLF (ms ²) |
|-----------------------|-----------------------|----------|----------|----------|--------------------------------|------------------------|
| 323.10694 | 571.793255 | 0.565077 | 36.10536 | 63.89464 | 931.033657 | 36.133462 |

Cuadro 1. Parámetros espectrales obtenidos del análisis de HRV en el dominio de la frecuencia.

V-D. Análisis 4

Todos los valores p de la prueba de Shapiro-Wilk fueron menores al umbral $\alpha = 0,05$, por lo que se rechaza la hipótesis nula en todos los casos y se descarta normalidad en la distribución de los datos. Resultados muy similares se evidencian en la prueba de Levene, ya que al comparar homocedasticidad entre ambas cardiopatías para cada uno de las métricas, todas resultaron ser heterocedásticas, exceptuando al NN150.

A continuación, la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney arrojó diferencias significativas en las medianas de toda las métricas. Los resultados normalizados del estadístico U para cada métrica se presentan en la Figura 7.

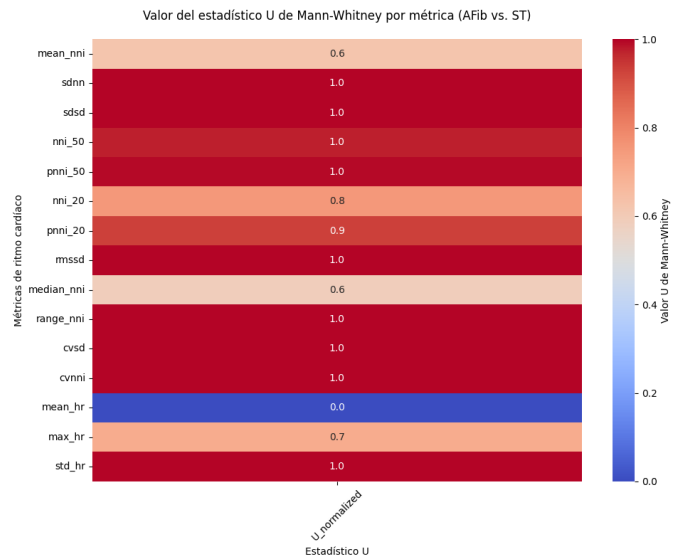


Figura 7: Valor del estadístico U normalizado para cada una de las métricas

VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

VI-A. Análisis 1

Los resultados obtenidos muestran que el ritmo sinusal con bradicardia (SB) fue la arritmia más relevante en la base de datos analizada, esto no concuerda con la literatura donde se muestra que la fibrilación auricular es el tipo más frecuente de arritmia que se produce cuando las señales eléctricas hacen que los ventrículos tiemblen en lugar de bombear normalmente. Cuando los ventrículos no bombean sangre al cuerpo, puede ocurrir un paro cardíaco súbito y la muerte en cuestión de minutos. [3]. Se observó que la fibrilación auricular (AF) se presentó predominantemente en pacientes de mayor edad, con edades medias superiores a los 70 años. Este hallazgo es consistente con estudios epidemiológicos previos, donde la fibrilación auricular es un trastorno que aparece a todas las edades, pero que es muy frecuente entre los ancianos, en los que la prevalencia va creciendo desde alrededor del 1 % en los menores de 60 años a más del 10 % en los mayores de 85 años. [4]

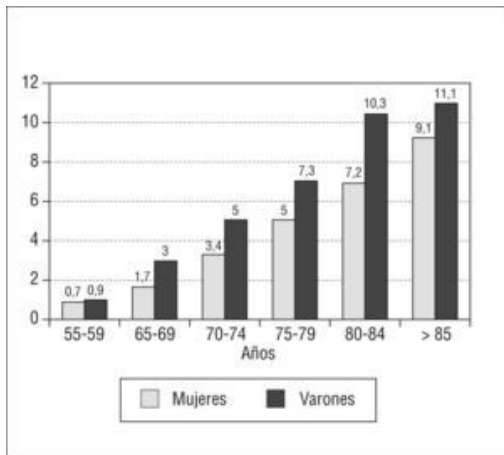


Figura 8: Prevalencia de fibrilación auricular según edad y sexo [4]

Respecto a las arritmias SB y SR, su aparición fue más común en pacientes de edad media (alrededor de los 50-60 años). Esto es esperable, ya que alteraciones en el nodo sinusal como la bradicardia pueden estar asociadas tanto a cambios fisiológicos relacionados con el envejecimiento como a condiciones clínicas específicas [5] [6]. La distribución por género mostró una mayor prevalencia de casos en hombres (55%), lo cual se ha documentado en la literatura médica, donde se reporta que las arritmias que tienen mayor prevalencia en hombres son: auriculoventricular, fibrilación auricular, fibrilación ventricular, etc. Mientras que en mujeres prevalecen enfermedad del nódulo sinusal, la taquicardia sinusal inapropiada, la taquicardia supraventricular intranoda, etc [7].

VI-B. Análisis 2

Los resultados obtenidos son coherentes con las características clínicas reportadas en la literatura para las arritmias seleccionadas. En el caso de la fibrilación auricular (AFIB), se observó un patrón desorganizado en la actividad eléctrica auricular, caracterizado por la ausencia de ondas P definidas y la presencia de ondas fibrilatorias [8]. Esta irregularidad en los intervalos RR dificultó la detección precisa de los picos R, particularmente para métodos basados en umbrales fijos.

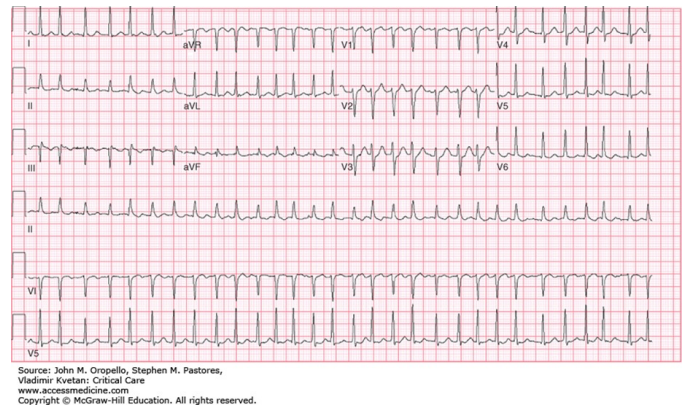


Figura 9: EKG de 12 canales que muestra fibrilación auricular con un ritmo ventricular rápido (179lpm). Se evidencia la ausencia de ondas P claras y un ritmo irregularmente irregular.

Por otro lado, la taquicardia sinusal (ST) presentó un ritmo más regular, con frecuencias ventriculares elevadas pero constantes, lo que facilitó una identificación más precisa de los picos R mediante ambos métodos de detección utilizados. Este comportamiento es consistente con la fisiopatología de la taquicardia sinusal, donde el impulso eléctrico se origina de manera ordenada en el nodo sinoauricular [9].

Adicionalmente, considerando que en la fibrilación auricular se han asociado valores elevados de entropía en los intervalos RR [10], se plantea como trabajo futuro la aplicación de medidas de complejidad, tales como la función `entropy_sample()` disponible en la librería NeuroKit [?], con el objetivo de caracterizar cuantitativamente la irregularidad de las señales de ECG y mejorar la clasificación automática de las arritmias.

VI-C. Análisis 3

En el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) en el dominio del tiempo, se calcularon parámetros como la media de los intervalos NN (mean- nni), la desviación estándar de los intervalos NN (SDNN), la raíz cuadrada de las diferencias sucesivas (RMSSD) y los porcentajes de intervalos que difieren más de 20 ms (pNN20) y 50 ms (pNN50), entre otros. Los resultados obtenidos evidencian diferencias importantes entre los tipos de ritmos analizados (AFIB, SB, SR y ST). Se observó que las señales de fibrilación auricular (AFIB) presentaron valores de SDNN y RMSSD elevados (por ejemplo, 62.38 ms y 94.63 ms en un caso representativo), lo cual es consistente con la elevada variabilidad característica de esta arritmia [11]. Asimismo, los ritmos de bradicardia sinusal (SB) mostraron valores de mean- nni más elevados (por ejemplo, 1097 ms), reflejando intervalos RR más prolongados debido a la frecuencia cardíaca más baja, fenómeno previamente descrito en la literatura. El porcentaje de diferencias mayores a 50 ms (pNN50) también fue superior en registros de sujetos con ritmos irregulares (como AFIB y SB), apoyando la hipótesis de una mayor dispersión de los intervalos en presencia de disfunción del control autonómico. Estos hallazgos respaldan la utilidad de los parámetros de

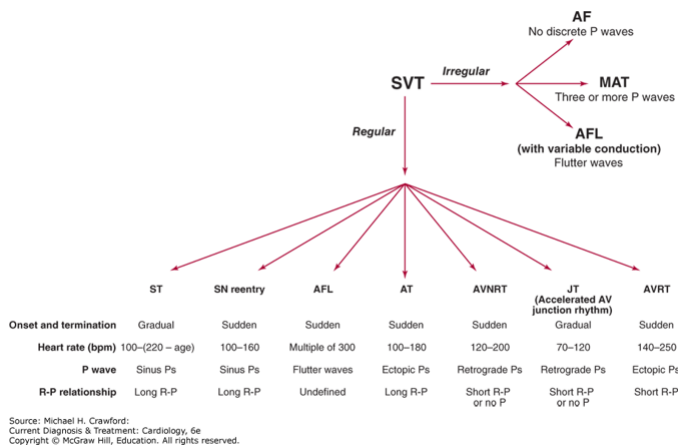


Figura 10: Clasificación de algunas cardiopatías importantes.

dominio del tiempo para distinguir entre patrones de ritmo normal y alteraciones como fibrilación auricular y bradicardia [12]. El análisis en el dominio de la frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV) proporciona información clave sobre el funcionamiento del sistema nervioso autónomo, descomponiendo la señal ECG en componentes espectrales asociados a la actividad simpática y parasimpática. Variables como la energía en la banda de baja frecuencia (LF), alta frecuencia (HF), su relación (LF/HF ratio) y la potencia total permiten evaluar el balance autonómico y detectar alteraciones en la modulación cardíaca [13].

VI-D. Análisis 4

Se evidencia cómo las métricas relacionadas con la variabilidad presentaron un valor del estadístico U bastante significativo: La desviación estándar de los intervalos RR normalizados (SDNN) y la desviación estándar de diferencias sucesivas (SDSD) son métricas que hablan de los componentes cíclicos de la señal. Algo similar ocurre con NN50 y pNN50, que hablan de cómo intervalos RR normalizados varían en más de 50 ms con intervalos adyacentes, y que también puede tomarse como una medida de irregularidad en el ritmo cardíaco. CVSD contiene información sobre la diferencia cuadrática media de restas sucesivas (RMSSD), que es la principal medida de variabilidad en el ritmo cardíaco.

Como se evidencia en la Figura 10 [9], la diferencia primordial entre la AFIB y la ST es la regularidad del ciclo cardíaco, siendo la primera irregular y la segunda regular, por lo que es de esperar que las métricas de variabilidad sean de relevancia al momento de diferenciarlas. Por otra parte, la ST se caracteriza por la taquicardia o ritmo cardíaco elevado aún en estado de reposo, oscilando entre 100 y 220 latidos por minuto (lpm) menos la edad del sujeto [9]; similarmente, la AFIB entrega un ritmo, además de irregular, acelerado, que puede oscilar entre los 100 y 175 lpm, lo que explica que la métrica de ritmo cardíaco medio sea la de menor relevancia [14]. Es relevante notar, sin embargo, que el ritmo cardíaco máximo es una métrica con una relevancia media.

REFERENCIAS

- [1] M. MSD. (2024) Ecocardiografía y otros procedimientos con ultrasonidos. Accedido: abril 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.msmanuals.com/es/hogar/trastornos-del-coraz%C3%B3n-y-los-vasos-sangu%C3%ADneos/diagn%C3%B3stico-de-las-enfermedades-cardiovasculares/ecocardiograf%C3%ADa-y-otros-procedimientos-con-ultrasonidos>
- [2] Chapman University and Shaoxing People's Hospital. "Chapman ecg database," 2018, accessed: 2025-04-26. [Online]. Available: <https://figshare.com/collections/ChapmanECG/4560497/1>
- [3] National Heart, Lung, and Blood Institute. (2023) Tipos de arritmias. [Online]. Available: <https://www.nhlbi.nih.gov/es/salud/arritmias/tipos>
- [4] R. M. Holgado and M. R. Graneli, "Fibrilación auricular en el anciano," *Revista Española de Geriatría y Gerontología*, vol. 43, no. 5, pp. 268–275, 2008, consultado el 27 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-espanola-geriatria-gerontologia-124-articulo-fibrilacion-auricular-el-anciano>
- [5] A. Sevilla. (2023) ¿qué es la arritmia sinusal? Accedido: abril 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.arritmiasvilla.es/noticias/que-es-arritmia-sinusal>
- [6] H. U. L. Paz. (2023) Síndrome de brugada. Accedido: abril 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.cardiopatiascongenitaslapaz.com/desde-el-palpito/sindrome-de-brugada/>
- [7] Óscar Bernal and C. Moro, "Arritmias cardíacas en la mujer," *Revista Española de Cardiología*, vol. 59, pp. 609–618, 2006. [Online]. Available: <https://www.revespcardiol.org/es-arritmias-cardiacas-mujer-articulo-13089748>
- [8] L. Goldman and A. Schafer, "Goldman-cecil medicine," <https://accessmedicine-mhmedical-com.udea.lookproxy.com/content.aspx?sectionid=143517105&bookid=1944#143934934>, 2016, consultado el 27 de abril de 2025.
- [9] J. M. Pines and B. J. O'Leary, "Fibrilación auricular," in *Harrison. Principios de Medicina Interna*, 21st ed., J. L. Jameson, A. S. Fauci, D. L. Kasper, S. L. Hauser, D. L. Longo, and J. Loscalzo, Eds. McGraw Hill, 2022, consultado el 27 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?sectionid=275245922&bookid=3304#275245939>
- [10] D. E. Lake and J. R. Moorman, "Accurate estimation of entropy in the presence of noise and limited data," 2018, accessed: 2025-04-26. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5871726/>
- [11] R. E. Kleiger, P. K. Stein, and J. T. B. Jr., "Heart rate variability: Measurement and clinical utility," *Annals of Noninvasive Electrocardiology*, vol. 10, no. 1, pp. 88–101, 2005, consultado el 27 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6932537/>
- [12] F. Shaffer and J. P. Ginsberg, "An overview of heart rate variability metrics and norms," *Frontiers in Public Health*, vol. 5, p. 258, 2017, consultado el 27 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29034226/>
- [13] R. Tiwari, R. Kumar, S. Malik, T. Raj, and P. Kumar, "Analysis of heart rate variability and implication of different factors on heart rate variability," *Current Cardiology Reviews*, vol. 17, no. 5, p. e160721189770, 2021, consultado el 27 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8950456/>
- [14] Mayo Clinic, "Fibrilación auricular: Síntomas y causas," 2023, consultado el 27 de abril de 2025. [Online]. Available: <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/atrial-fibrillation/symptoms-causes/syc-20350624>