



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

DIGITALIZACIÓN Y EXTRACCIÓN DE LA SEÑAL DE ECG DE REGISTROS IMPRESOS

Alumno: Juan Manuel Lorite Rodriguez

Tutor: Prof. D. Raúl Mata Campos

Depto.: Ingeniería de telecomunicaciones

Noviembre, 2023



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Linares

Grado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

**DIGITALIZACIÓN Y EXTRACCIÓN DE LA SEÑAL DE
ECG DE REGISTROS IMPRESOS**

Alumno: Juan Manuel Lorite Rodriguez

Tutor: Prof. D. Raúl Mata Campos

Noviembre.2023

Tabla de contenidos

1.	Resumen	1-6
2.	Abstract	2-7
3.	Introducción	3-8
4.	Objetivos	4-9
4.1	Objetivo general	4-9
5.	Metodología y fases de trabajo.....	5-10
5.1	Antecedentes	5-10
5.2	Historia de la evolución del electrocardiograma	5-13
5.3	Estado del arte	5-14
5.4	Planteamiento del problema	5-26
5.5	Marco teórico.....	5-28
5.6	Desarrollo de una Aplicación para la Digitalización de Electrocardiogramas	5-43
6.	Análisis, resultados y conclusiones	6-77
7.	Bibliografía	7-88
8.	Anexo A: Códigos Matlab.....	8-89

Ilustración 1:Ranking de las principales causas de muerte a nivel mundial en 2019[1].	5-12
Ilustración 2 Descripción de las cinco ondas electrocardiográficas básicas[4].....	5-14
Ilustración 3:Diagrama de flujo del proceso de digitalización de registros en papel de ECG(Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]	5-17
Ilustración 4:Imagen del electrocardiograma de entrada para probar el algoritmo propuesto en este artículo (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017) [5]	5-18
Ilustración 5:Señal digitalizada de salida del algoritmo propuesto en este artículo (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5].....	5-18
Ilustración 6:Diagrama de flujo de proceso de digitalización (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]	5-21
Ilustración 7:ECG Impreso (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5].....	5-21
Ilustración 8: ECG Digitalizado (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]	5-21
Ilustración 9: Imagen binarizada (Virgin & Baskar, 2018)[7].....	5-23
Ilustración 10: Extracción de características basadas en gradientes (Virgin & Baskar, 2018)[7].....	5-24
Ilustración 11:Rechazo de ruido (Virgin & Baskar, 2018)[7].....	5-25
Ilustración 12: Imagen fina digitalizada (Virgin & Baskar, 2018)[7].....	5-25
Ilustración 13:Diagrama de flujo del proceso de digitalización de la señal ECG	5-26
Ilustración 14:Anatomía del corazón[9]	5-30
Ilustración 15:Sistema de conducción cardíaco[10].....	5-31
Ilustración 16 Potencial cardíaco[11]	5-32
Ilustración 17 Electrocardiograma (ECG)[11]	5-34
Ilustración 18 Segmentación electrocardiograma[12].....	5-35
Ilustración 19 Derivaciones Precordiales[13].....	5-37
Ilustración 20 Derivación extremidades[14]	5-38
Ilustración 21 Derivación unipolar[15]	5-38
Ilustración 22 Extracción de la señal.....	5-40
Ilustración 23 Imagen binarizada	5-41
Ilustración 24 Segmentación de la señal[16].....	5-41
Ilustración 25 Extracción datos señal	5-42
Ilustración 26 Imagen digitalizada[16].....	5-43
Ilustración 27 ECG base de datos.....	5-44
Ilustración 28 Información ECG	5-45
Ilustración 29 Diagrama de flujo	5-45
Ilustración 30 Imagen ECG Centro Salud	5-46
Ilustración 31 Imagen ECG Base de Datos	5-47
Ilustración 32 Imagen reescalada a 1830 x 1300.....	5-48
Ilustración 33 Imagen Redimensionada por coordenadas	5-49
Ilustración 34 Imagen redimensionada por selección cursor.....	5-50
Ilustración 35 Imagen redimensionada.....	5-50
Ilustración 36 Imagen ecualizada	5-51
Ilustración 37 Imagen corrección gamma = 0.5	5-52
Ilustración 38 Imagen corregida a nivel de luminosidad.....	5-53
Ilustración 39 Imagen binarizada umbral 0.7	5-55
Ilustración 40 Imagen binarizada umbral Otsu.....	5-56

Ilustración 41 Imagen contornos grandes	5-57
Ilustración 42 Imagen contornos pequeños	5-58
Ilustración 43 Eliminar fondo por contornos.....	5-59
Ilustración 44 Elementos estructurales Matlab.....	5-60
Ilustración 45 Imagen Dilatada	5-60
Ilustración 46 Imagen erodida	5-61
Ilustración 47 Comparativa tamaño elemento estructural	5-62
Ilustración 48 Imagen cerrada iteración 1	5-63
Ilustración 49 Imagen resultado iteraciones	5-63
Ilustración 50 Separación señales.....	5-64
Ilustración 51 Método grupo investigación Frecuencia muestreo.....	5-66
Ilustración 52 Valores pixeles 1 en sondeos	5-66
Ilustración 53 Suma filas y columnas.....	5-68
Ilustración 54 Distancia entre cuadrículas en pixeles.....	5-68
Ilustración 55 Selección de región.....	5-69
Ilustración 56 Pasar imagen a vector.....	5-70
Ilustración 57 Señal 1 digitalizada	5-71
Ilustración 58 Señal 2 digitalizada	5-71
Ilustración 59 Señal 3 digitalizada	5-72
Ilustración 60 Señal 4 digitalizada	5-72
Ilustración 61 Menú APP.....	5-73
Ilustración 62 Cargar imagen	5-74
Ilustración 63 Imagen redimensionada.....	5-74
Ilustración 64 Imagen corregida la luz	5-75
Ilustración 65 Contorno grande imagen	5-75
Ilustración 66 Eliminado fondo por defecto	5-76
Ilustración 67 Frecuencia de muestreo	5-76
Ilustración 68 Vector 1D representado	5-77
Ilustración 69 ECG escaneado original	6-78
Ilustración 70 ECG digitalizado	6-78
Ilustración 71 Señal 1 2D	6-79
Ilustración 72 Señal 2 en 1D.....	6-79
Ilustración 73 Señal 2 2D	6-80
Ilustración 74 Señal 2 1D	6-80
Ilustración 75 Imagen 1D letras	6-80
Ilustración 76 Señal 3 2D	6-81
Ilustración 77 Señal 3 1D	6-81
Ilustración 78 Señal 4 2D	6-81
Ilustración 79 Señal 4 1D	6-82
Ilustración 80 Imagen original ejemplo 1	6-83
Ilustración 81 Imagen procesada ejemplo 1	6-83
Ilustración 82 Imagen 1D ejemplo 1	6-84
Ilustración 83 Imagen original ejemplo 2.....	6-84
Ilustración 84 Imagen procesada ejemplo 2	6-85
Ilustración 85 Imagen 1D ejemplo 2	6-85
<i>Ilustración 86 Imagen original Ejemplo 3</i>	<i>6-86</i>
Ilustración 87 Imagen procesada Ejemplo 3.....	6-86

Ilustración 88 Imagen señal 1D Ejemplo 3 6-87

1. Resumen

El objetivo de este TFG es evaluar técnicas de procesamiento de imágenes y señales para adquirir electrocardiogramas (ECG) digitales a partir de impresoras de ECG comerciales.

Al analizar el proceso de digitalización de un ECG impreso y su registro, ajuste de muestras de señales de ECG impresas y coincidencia espectral de estas señales, se identifican las ventajas del ECG digital sobre el ECG analógico, disponibilidad de herramientas automatizadas de diagnóstico de enfermedades del corazón. En este contexto, se propone un método para digitalizar el ECG impreso. Se utilizan varios mecanismos para leer imágenes, cambiar el tamaño y corregir la iluminación, detectar y reconocer contornos, eliminar el fondo, agrupar elementos pequeños para eliminar el ruido y las señales, y separar las señales.

Se utilizan técnicas de procesamiento de imágenes como eliminación de fondo, la binarización gaussiana, la segmentación de imágenes por región y la búsqueda de contornos en la imagen. Después de varias pruebas con ECG comerciales, los métodos anteriores se adaptaron satisfactoriamente para extraer señales de ECG de imágenes de ECG. Estas técnicas van a ser implementadas en el lenguaje de programación Matlab ya que es un lenguaje muy potente en procesado de imagen.

Al evaluar los métodos utilizados durante este estudio, se concluyó que es posible digitalizar la señal del electrocardiograma a partir de las muestras impresas generadas por el electrocardiógrafo. Este TFG contribuye a la transformación digital que apoya el desarrollo de sistemas más modernos y rápidos en beneficio de los pacientes con problemas cardiovasculares y los médicos involucrados en esta causa.

2. Abstract

The objective of this dissertation is to evaluate image and signal processing techniques for acquiring digital electrocardiograms (ECGs) from commercial ECG printers.

By analysing the process of digitising a printed ECG and its recording, sample fitting of printed ECG signals and spectral matching of these signals, the advantages of digital ECG over analogue ECG, availability of automated diagnostic tools for heart disease diagnosis, are identified. In this context, a method to digitise the printed ECG is proposed. Several mechanisms are used to read images, resize and correct illumination, detect and recognise contours, remove background, group small elements to remove noise and signals, and separate signals.

Image processing techniques such as background removal, Gaussian binarisation, image segmentation by region, and image contour search are used. After several tests with commercial ECGs, the above methods were successfully adapted to extract ECG signals from ECG images. These techniques will be implemented in the Matlab programming language as it is a very powerful image processing language.

By evaluating the methods used during this study, it was concluded that it is possible to digitise the ECG signal from the printed samples generated by the electrocardiograph. This TFG contributes to the digital transformation that supports the development of more modern and faster systems for the benefit of patients with cardiovascular problems and the physicians involved in this cause.

3. Introducción

El electrocardiograma (ECG) es una herramienta muy importante en el campo de la medicina para evaluar la salud del corazón. Tradicionalmente, los electrocardiógrafos comerciales producen trazados analógicos o impresos en papel, que luego son interpretados por un especialista en electrocardiografía. Sin embargo, la tecnología digital ha avanzado significativamente en los últimos años, y ha surgido la posibilidad de obtener ECG digital directamente a partir de señales eléctricas del corazón.

La digitalización del ECG tiene numerosas ventajas en comparación con el ECG tradicional, como, por ejemplo:

- Mayor precisión en la medición de la duración de los intervalos y segmentos cardíacos.
- Facilidad de almacenamiento y transferencia de los datos, lo que permite un acceso más rápido y fácil a la información del paciente.
- La posibilidad de realizar análisis más complejos y sofisticados de las señales, como la detección automática de arritmias o la identificación de patrones específicos de enfermedades cardíacas.

La capacidad de realizar seguimientos a largo plazo del ECG, sin necesidad de que el paciente se someta a pruebas repetidas.

El objetivo central del presente estudio es explorar las técnicas de procesamiento de imágenes y señales para la obtención de un ECG digital a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos comerciales, con el fin de evaluar su utilidad en la evaluación del riesgo cardiovascular. Esto implica la digitalización de los trazados analógicos, mediante la aplicación de algoritmos de procesamiento de imágenes y señales que permiten convertir la información impresa en una señal digital

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

La señal de ECG suele estar impresa en papel y es evaluada posteriormente por personal sanitario. Es crucial lograr una digitalización precisa de esta señal para habilitar su procesamiento y análisis automatizados, lo que puede ser de gran ayuda en diagnósticos, transmisiones y más. La señal se presenta en diferentes tipos de papel, con diversas resoluciones, colores de tinta variados, orientación no alineada con los bordes del papel, arrugas y otros posibles defectos.

El objetivo del Trabajo de Fin de Grado (TFG) consiste en obtener una representación 1-D de esta señal de ECG a partir de los registros en papel o escaneados, empleando operaciones de procesamiento digital de imagen que permitan extraer la señal en condiciones óptimas para su posterior análisis. Es de especial importancia lograr la extracción precisa de la amplitud de la señal en cada punto temporal, de acuerdo con la frecuencia de muestreo.

5. Metodología y fases de trabajo

5.1 Antecedentes

El corazón, ubicado en el centro del tórax, es mucho más que un órgano del cuerpo humano estudiado por la ciencia médica. Es una fuente de inspiración para el arte lírico debido a su belleza. Este órgano es responsable de bombear sangre oxigenada y desoxigenada a través de una compleja red de cámaras, aurículas, ventrículos, tejido muscular, vasos, tubos y bombas. La sangre que transporta es una obra maestra de la coreografía celular, asegurando la circulación en todo el cuerpo.

Aunque pueda parecer un tema técnico, obtener electrocardiogramas digitales a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos tiene un propósito humano, que es proteger y preservar la vida. Según la Organización Mundial de la Salud (2019)[1], la cardiopatía isquémica es la principal causa de muerte en el mundo desde el año 2000, responsable del 16% del total de defunciones. Esta enfermedad se produce debido a la arterioesclerosis de los vasos sanguíneos que alimentan el corazón, especialmente las arterias coronarias. La acumulación de lípidos, células inflamatorias y el proceso de formación de colágeno lento hacen que los vasos sanguíneos se obstruyan, lo que lleva a infartos y necrosis de regiones importantes del corazón. Entender la enfermedad y buscar formas de prevenirla es crucial para proteger la salud humana.

La enfermedad conocida como cardiopatía isquémica es causada por la arterioesclerosis en los vasos sanguíneos que van hacia el corazón, especialmente en las arterias coronarias. La arterioesclerosis se produce por la acumulación de grasas, células inflamatorias y el proceso lento de formación de colágeno. Estas condiciones provocan la obstrucción de los vasos sanguíneos que alimentan el músculo del corazón, lo que lleva a la necrosis de regiones importantes del corazón y a la generación de infartos.

La Fundación Española del Corazón (2020) señala que la mayoría de estos casos podrían haber sido prevenidos con un equipo de monitoreo y prediagnóstico aplicado a cada paciente previamente a la llegada a un centro de atención en salud. A pesar de esto, los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas destacan la necesidad de prestar mayor atención a la prevención y el tratamiento de las enfermedades

cardiovasculares, como las cardiopatías isquémicas y los accidentes cerebrovasculares, en todas las regiones del mundo. Las cardiopatías continúan siendo la principal causa de mortalidad, tal como lo señala la Organización Mundial de la Salud (2019), donde la Región del Pacífico Occidental registra más de la mitad de los dos millones de muertes adicionales ocurridas por cardiopatías.[2]

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2023, las enfermedades cardiovasculares (ECV) continúan siendo la principal causa de muerte en todo el mundo, superando a las defunciones por conflictos bélicos, muertes violentas, accidentes de tráfico y otras enfermedades. Los datos más recientes indican que las enfermedades isquémicas, que son una forma común de enfermedad cardiovascular, siguen siendo un problema importante de salud pública en todo el mundo.[3]

En España, las enfermedades cardiovasculares también son la principal causa de mortalidad. Según los datos de la Sociedad Española de Cardiología, en 2021 se produjeron más de 120.000 muertes relacionadas con enfermedades cardiovasculares, lo que representa aproximadamente el 30% de todas las muertes registradas en el país.

Además, en España se han registrado importantes avances en la prevención y el tratamiento de las enfermedades cardiovasculares. En las últimas décadas, se han implementado programas de prevención y se han desarrollado nuevas terapias que han permitido reducir la tasa de mortalidad y mejorar la calidad de vida de las personas afectadas por estas enfermedades.

No obstante, todavía queda mucho por hacer. La prevención y el tratamiento temprano son fundamentales para evitar complicaciones graves y mejorar los resultados a largo plazo en las personas con enfermedades cardiovasculares. Por esta razón, es importante seguir trabajando en la promoción de hábitos saludables y en el acceso a tratamientos efectivos para todas las personas.

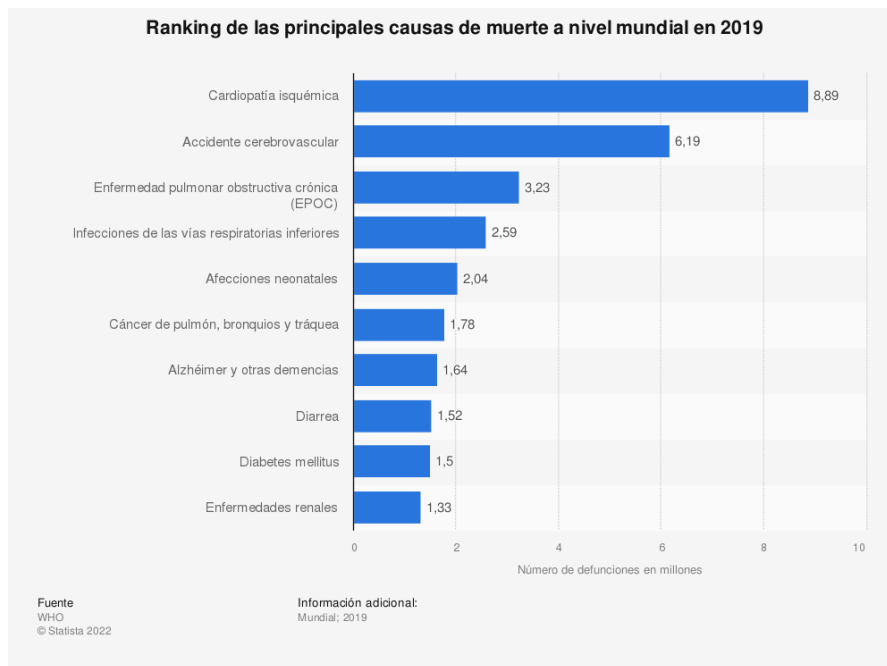


Ilustración 1: Ranking de las principales causas de muerte a nivel mundial en 2019[1]

Los exámenes clínicos son herramientas valiosas para los médicos, ya que les permiten evaluar el estado de salud de una persona y diagnosticar enfermedades. Estos exámenes pueden incluir análisis de sangre, orina y otros fluidos corporales, así como también pruebas de imagen, como radiografías, tomografías y resonancias magnéticas. Además, los médicos pueden realizar exámenes físicos, como la auscultación del corazón y los pulmones, la medición de la presión arterial y el examen de los reflejos.

Para lograr un diagnóstico preciso, los médicos también se apoyan en equipos especializados de diagnóstico. Estos equipos pueden incluir electrocardiógrafos, máquinas de rayos X, ecógrafos y otros dispositivos médicos. El electrocardiógrafo es uno de los instrumentos más útiles para la detección de problemas cardíacos. Este dispositivo funciona mediante la colocación de electrodos en el pecho del paciente, que luego captan y amplifican la actividad eléctrica del corazón. El registro resultante se conoce como trazado electrocardiógrafo.

El electrocardiograma (ECG) es un procedimiento común que se realiza con un electrocardiógrafo. El ECG fue inventado por el fisiólogo holandés Willem Einthoven y ha sido utilizado por los médicos desde principios del siglo XX. Durante un ECG, el paciente se acuesta en una camilla y se le coloca un conjunto de electrodos en el pecho, brazos y piernas. Estos electrodos registran la actividad eléctrica del corazón durante un

período de tiempo, normalmente entre 10 y 20 segundos. El resultado es una representación gráfica de la actividad eléctrica del corazón, que muestra las ondas de actividad eléctrica de las aurículas y los ventrículos.

El ECG es una herramienta valiosa para el diagnóstico de enfermedades cardíacas, ya que puede detectar anomalías en el ritmo del corazón y la fuerza del latido. También puede revelar información sobre el tamaño y la posición de las cámaras del corazón. Además, el ECG es un procedimiento seguro e indoloro que se puede realizar en la mayoría de los pacientes.

En la actualidad, la medicina está experimentando una transición hacia la digitalización de los registros médicos y los exámenes. Los electrocardiógrafos digitales están reemplazando gradualmente a los electrocardiógrafos analógicos, lo que permite una mayor precisión en la captura y el análisis de la actividad eléctrica del corazón. Además, la digitalización de los registros médicos permite una mejor comunicación y coordinación entre los médicos y los pacientes, lo que puede mejorar la calidad de la atención médica.

5.2 Historia de la evolución del electrocardiograma

Los electrocardiogramas (ECG) han experimentado una evolución significativa desde su invención a principios del siglo XX. Originalmente, los registros ECG se obtenían mediante la grabación en papel, lo que requería la conexión de un gran número de electrodos al paciente. A medida que la tecnología avanzaba, los dispositivos se volvían más portátiles y los registros ECG se digitalizaban.

Con el advenimiento de la informática, los electrocardiogramas comenzaron a ser analizados con software especializado, lo que permitió una mayor precisión en la interpretación de los resultados. Además, los dispositivos digitales permitieron la realización de electrocardiogramas en entornos no clínicos.

En la actualidad, los electrocardiógrafos son capaces de medir una amplia variedad de parámetros cardíacos, incluyendo el intervalo QT, la duración del complejo QRS y la amplitud de las ondas T. Los dispositivos más avanzados utilizan técnicas de procesamiento de señales para mejorar la calidad de la señal ECG, lo que permite una mayor precisión en la detección de arritmias cardíacas.

Además, los electrocardiogramas modernos suelen incorporar características como la conectividad en línea y la integración con la nube, lo que permite a los médicos y a los pacientes acceder a los registros y análisis de los electrocardiogramas desde cualquier lugar y en cualquier momento.

Otras innovaciones incluyen la miniaturización de los dispositivos, lo que permite la realización de electrocardiogramas en entornos más desafiantes, como en el campo o en situaciones de emergencia. Los dispositivos más avanzados también pueden medir la variabilidad de la frecuencia cardíaca, lo que proporciona información sobre la función autonómica del corazón.

En resumen, los avances en tecnología han permitido una evolución significativa de los electrocardiogramas, desde la grabación en papel hasta la digitalización y el análisis computarizado. Los dispositivos más modernos ofrecen una mayor precisión en la medición de la actividad cardíaca y una mayor accesibilidad a través de la conectividad en línea y la integración con la nube. Estas mejoras tecnológicas continúan mejorando la atención médica y ayudando a prevenir enfermedades cardíacas.

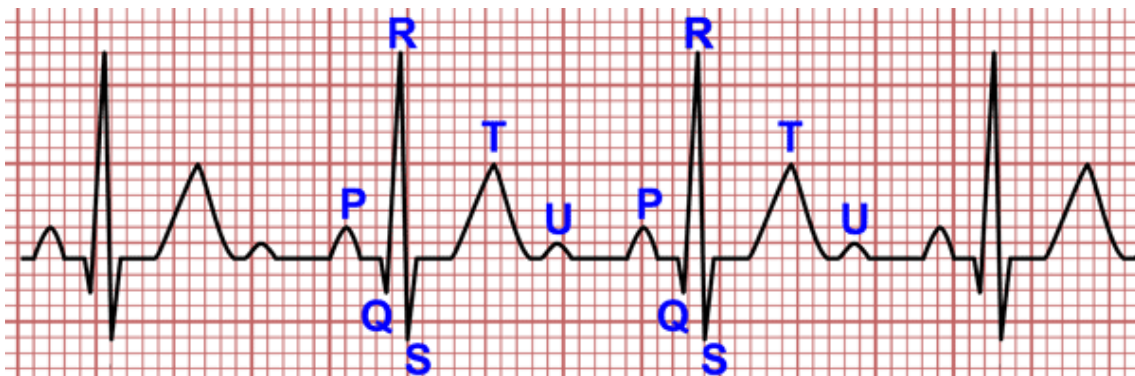


Ilustración 2 Descripción de las cinco ondas electrocardiográficas básicas[4]

5.3 Estado del arte

Las estadísticas mundiales sobre enfermedades cardíacas hacen evidente la necesidad de buscar servicios y exámenes que permitan prevenir y diagnosticar a tiempo este tipo de afecciones, especialmente algunas cardiopatías. Es vital indagar en la mejora de las técnicas aplicadas para obtener estos exámenes. En este sentido, la

presente tesis busca desarrollar métodos que permitan el diagnóstico precoz y la detección de enfermedades a través de la digitalización de electrocardiogramas.

El registro de las señales eléctricas del corazón a través de un electrocardiograma permite detectar problemas cardíacos y contribuir al control de la salud del corazón. En los últimos años se ha avanzado significativamente en el tema. La fuerza, los latidos y el ritmo cardíaco son signos de daño, enfermedad o funcionamiento normal de un corazón en estudio.

Es por ello que la atención oportuna de un paciente que realmente lo necesita es posible gracias al estudio y desarrollo de técnicas que permitan el diagnóstico temprano y la detección de enfermedades. En consecuencia, su tratamiento puede ser la diferencia entre la vida y la muerte. Por tanto, resulta fundamental implementar desarrollos tecnológicos que permitan el diseño de nuevos métodos y sistemas que mejoren los procesos existentes en determinadas áreas de trabajo, como la materialización en papel de electrocardiogramas a través de una señal digitalizada.

A través del estudio y análisis de las principales investigaciones realizadas en los últimos años, se ha indagado en los resultados que permiten implementar de una manera segura y eficaz un método para obtener electrocardiogramas digitales, a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos. Se han registrado los resultados de seis investigaciones publicadas en artículos científicos, entre ellas: el análisis del proceso de conversión de ECG registrado en papel a ECG basado en computador, procesamiento de imágenes de electrocardiograma (ECG) y extracción de información numérica, un novedoso método para la digitalización de registros en papel de ECG, conversión de una gráfica de ECG a formato digital, aprendizaje profundo para digitalizar registros de ECG en papel muy ruidoso y la digitalización de imágenes de ECG para la detección del síndrome de Bayés.

Para determinar la relevancia de estas investigaciones y el alcance de los resultados reseñados, también se analizaron varias publicaciones científicas contempladas en bases de datos bibliográficas. Además, se realizaron pruebas en dos voluntarios para la toma de muestras con un electrocardiógrafo suministrado por la universidad.

Teniendo en cuenta la importancia del electrocardiograma como un procedimiento de diagnóstico fundamental, las investigaciones buscan mejorarlo y, para

ello, descomponen y analizan cada uno de sus elementos. Si bien no es posible detallar minuciosamente cada uno de los estudios, se presentan los aspectos más relevantes y las principales conclusiones de los mismos.

Examen detallado del proceso de conversión de electrocardiogramas en papel a formato digital para su análisis en computadora

El método algorítmico de digitalización de señales de ECG, desarrollado por Tun, Win Khaing y Zaw Min en 2017[5], se enfoca en la eliminación de fondo como elemento central. Además, se requiere eliminar los caracteres y objetos pequeños presentes en la imagen para completar el sistema de digitalización. En el estudio, se emplea una operación morfológica para suprimir la cuadrícula de las imágenes de ECG escaneadas. El algoritmo tiene la capacidad de eliminar cualquier color, cuadrícula, fondo negro, carácter o ruido de la imagen.

El artículo subraya que existen varios procedimientos para mejorar la resolución de las imágenes y detallar objetos o superficies digitalizadas de señales grabadas en papel. La eliminación de antecedentes, la supresión de caracteres y objetos pequeños, y la conversión de forma de onda a señal 1-D son los elementos más determinantes. La eliminación de fondo y objetos pequeños es lo novedoso de este método complejo que perfecciona la digitalización de señales.

Se recomienda escanear la imagen de entrada con una resolución de 600 PPP para obtener una señal de ECG precisa y poder eliminar los caracteres y objetos pequeños. Si la imagen escaneada no tiene caracteres ni otros objetos que no son señales de ECG, no es necesario realizar el proceso de eliminación de caracteres y objetos pequeños. Para interpretar correctamente el valor de la señal obtenida, es necesario identificar el eje.

El algoritmo de extracción y eliminación de fondo de la imagen binaria original se determina mediante operaciones de imágenes morfológicas binarias, lo que permite obtener una imagen suavizada que solo contiene la forma de onda. La manipulación morfológica se utiliza para eliminar la cuadrícula de las imágenes de ECG escaneadas, y el algoritmo también tiene la capacidad de suprimir píxeles aislados, caracteres, ruido y cualquier otro color o fondo negro presentes en la imagen.

Algoritmo de digitalización

Para obtener una señal más clara y precisa en las tiras de ECG impresas en papel térmico, se utilizan técnicas de escaneo y optimización de imágenes. El proceso de eliminación de la cuadrícula se lleva a cabo mediante un umbral morfológico, el cual es establecido por el escáner de las imágenes de ECG. Además, para eliminar cualquier píxel aislado que pueda generar ruido en la señal, se utiliza un proceso de segmentación. Interpolando los valores de los píxeles, se obtiene la señal de ECG procesada, representada por un píxel de señal específico por columna. La Ilustración 2 resume los pasos algorítmicos generales del proceso descrito. Por otro lado, la Ilustración 3 muestra la imagen del electrocardiograma impreso de entrada y la Ilustración 4 representa el resultado de la señal digitalizada de salida. (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017).[5]

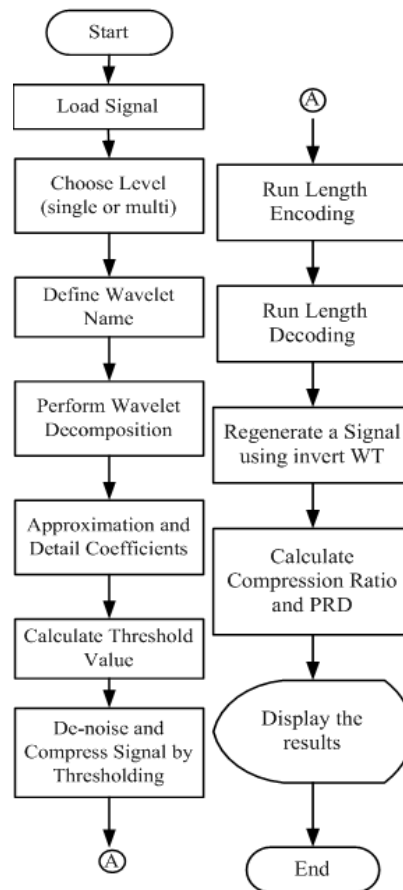


Ilustración 3: Diagrama de flujo del proceso de digitalización de registros en papel de ECG (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]

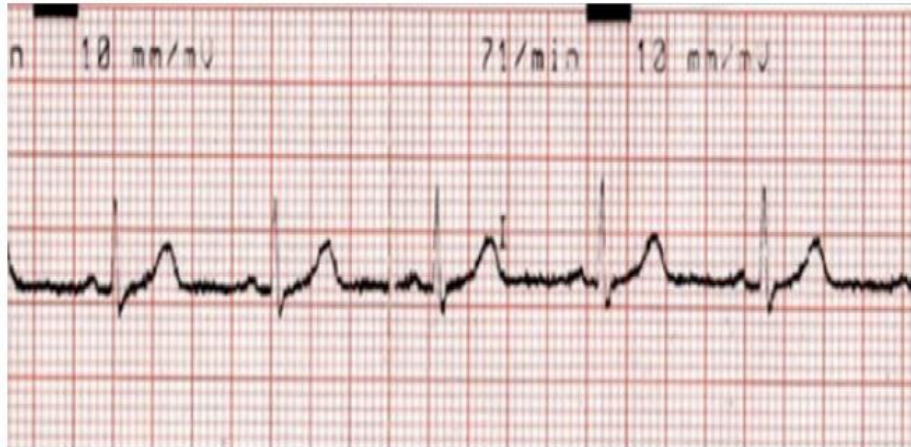


Ilustración 4: Imagen del electrocardiograma de entrada para probar el algoritmo propuesto en este artículo (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017) [5]

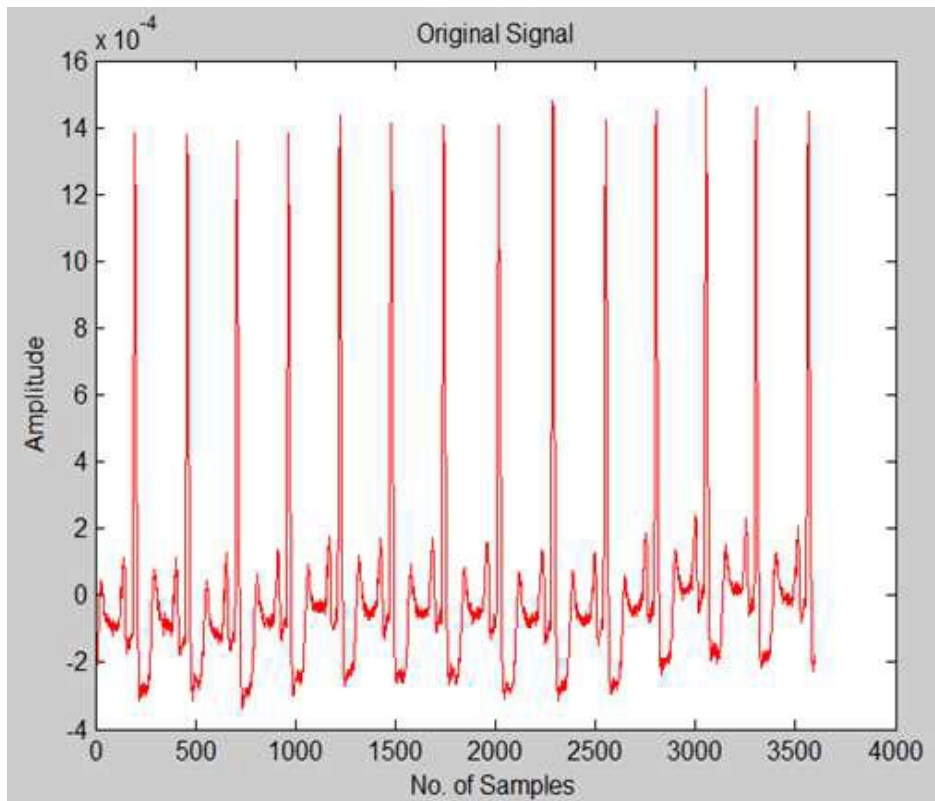


Ilustración 5: Señal digitalizada de salida del algoritmo propuesto en este artículo (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]

Extracción de información numérica a partir del procesamiento de imágenes de Electrocardiograma (ECG)

Un estudio de (Gurve et al., 2016)[6] presenta una técnica de procesamiento de imágenes de electrocardiograma (ECG) para eliminar el fondo y extraer información de señal numérica. La ventaja de este método es que es aplicable a imágenes de varios formatos, como BMP, JPG, TIF, GIF y PNG, conservando los bordes afilados y los picos presentes en la señal de ECG. Además, el proceso tiene muchas aplicaciones en tecnología informática, fotografía y procesamiento de imágenes.

El estudio de ECG se realiza en una cuadrícula de papel de cuadrados de 1 mm, cada cuadrado tiene una duración de 40 ms. Las líneas más gruesas corresponden a cuadros de 5 x 5 con una duración de 200 ms, y cinco de esos cuadros corresponden a un segundo. Para analizar los datos del ECG con precisión, se requiere un algoritmo que pueda leer y procesar las imágenes de ECG.

El algoritmo desarrollado en MATLAB permite la calibración en los ejes X e Y, eliminando las cuadrículas de fondo y extrayendo las coordenadas numéricas de los puntos individuales de la curva de ECG. Este algoritmo es especialmente útil para analizar la duración del segmento ST, que es una de las decisiones críticas del médico al interpretar un registro de ECG.

Los resultados del experimento realizado por (Tun, Win Khaing y Zaw Min, 2017)[5] muestran que el método propuesto para eliminar el ruido de cuadrícula en la imagen del gráfico de ECG produce resultados aceptables en diferentes niveles de fondo claro, moderado y oscuro. En resumen, la técnica propuesta para el procesamiento de imágenes de ECG y la extracción de información numérica es una herramienta valiosa para la interpretación precisa de los registros de ECG.

Extracción y digitalización de la señal ECG

En primer lugar, cabe destacar que el proceso de extracción y digitalización de la señal ECG es una tarea compleja debido a que la señal ECG es muy sensible y puede ser afectada por ruido y otros factores externos. Por esta razón, se requiere un preprocesamiento de la señal para eliminar cualquier ruido no deseado y mejorar la calidad de la señal.

En el artículo, se utilizan filtros digitales para preprocesar la señal ECG y eliminar el ruido. Los filtros digitales son una técnica comúnmente utilizada en el

procesamiento de señales para eliminar el ruido y mejorar la calidad de la señal. En este caso, se utilizan filtros pasa-bajos y pasa-altos para eliminar el ruido de alta y baja frecuencia respectivamente.

Una vez que la señal ha sido preprocesada, se utiliza la transformada de ondícula discreta para descomponer la señal en diferentes frecuencias y extraer las características importantes. La transformada de ondícula discreta es una técnica matemática utilizada para analizar señales y extraer características importantes. En este caso, se utiliza para identificar las características relevantes de la señal ECG, como el intervalo R-R y la amplitud de la onda T.

Posteriormente, se realiza la digitalización de la señal ECG utilizando la técnica de cuantificación de la amplitud y la técnica de muestreo de la señal. La cuantificación de la amplitud es un proceso mediante el cual se convierte la señal analógica en una señal digital utilizando un conjunto de valores discretos. Por otro lado, la técnica de muestreo de la señal se utiliza para tomar muestras de la señal analógica a intervalos regulares.

Finalmente, la señal ECG digital resultante se puede almacenar y procesar utilizando herramientas computacionales. Esta señal digital se puede utilizar para analizar la función cardíaca y detectar patrones anormales en la señal, lo que puede ser útil para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades cardíacas.

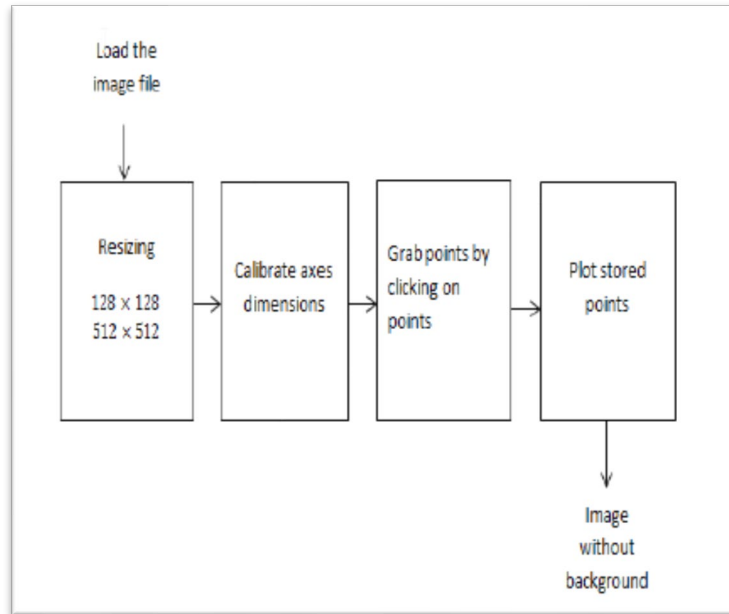


Ilustración 6: Diagrama de flujo de proceso de digitalización (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]



Ilustración 7: ECG Impreso (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]

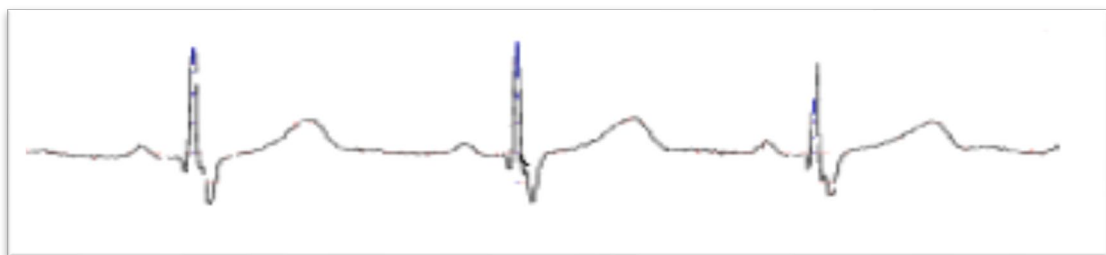


Ilustración 8: ECG Digitalizado (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)[5]

Método de Conversión de una gráfica de ECG a formato digital

La digitalización de señales biomédicas es una técnica cada vez más utilizada en la investigación médica y la atención al paciente, ya que permite una fácil manipulación de los datos, un procesamiento rápido y una mayor precisión en el análisis de las señales.

El uso del software MATLAB para la digitalización de señales ECG es una opción interesante, ya que este software es ampliamente utilizado en la investigación y la industria, y cuenta con numerosas herramientas de procesamiento de señales y análisis estadístico.

En cuanto al procesamiento de imágenes, el uso de filtros para reducir el ruido muscular y mejorar la claridad de la señal es una técnica común en el procesamiento de señales biomédicas. Los filtros digitales se utilizan para mejorar la relación señal-ruido y reducir los artefactos en las señales.

El papel de la imagen en la investigación médica es cada vez más relevante, ya que las imágenes médicas proporcionan información valiosa sobre la estructura y función del cuerpo humano. En este sentido, la propuesta de Virgin y Baskar de utilizar la impresión escaneada de ECG y aplicar métodos de calibración en pantalla es una técnica prometedora para mejorar la precisión en el análisis de las señales.[7]

Por último, es importante mencionar que el proceso de binarización de imágenes es una técnica esencial en la digitalización de señales biomédicas, ya que permite reducir el número de colores y simplificar el análisis de las imágenes. En general, el método propuesto por Virgin y Baskar es una contribución valiosa en el campo de la digitalización de señales ECG, que puede mejorar significativamente la precisión y la eficiencia en el análisis de las señales biomédicas.[7]



Ilustración 9: Imagen binarizada (Virgin & Baskar, 2018)[7]

En el proceso de binarización, se buscan varios objetivos importantes. En primer lugar, se busca obtener una secuencia de valores que correspondan a la amplitud de una serie de tiempo uniforme. Esto es esencial para la posterior digitalización y análisis de la señal.

Además, otro objetivo importante es pasar de una imagen de mapa biomédico a una señal digital. Esto permite una fácil manipulación y análisis de la señal, lo que puede ser de gran utilidad en la investigación y la atención médica.

La extracción de características también es un objetivo clave en el proceso de binarización. Esta técnica se basa en la identificación de gradientes en la imagen, que son vectores con magnitud y dirección. La magnitud del gradiente indica la fuerza del borde, mientras que la dirección es perpendicular a él.

En general, el proceso de binarización es esencial en la digitalización de señales biomédicas y puede proporcionar una base sólida para el análisis y la interpretación de los datos.

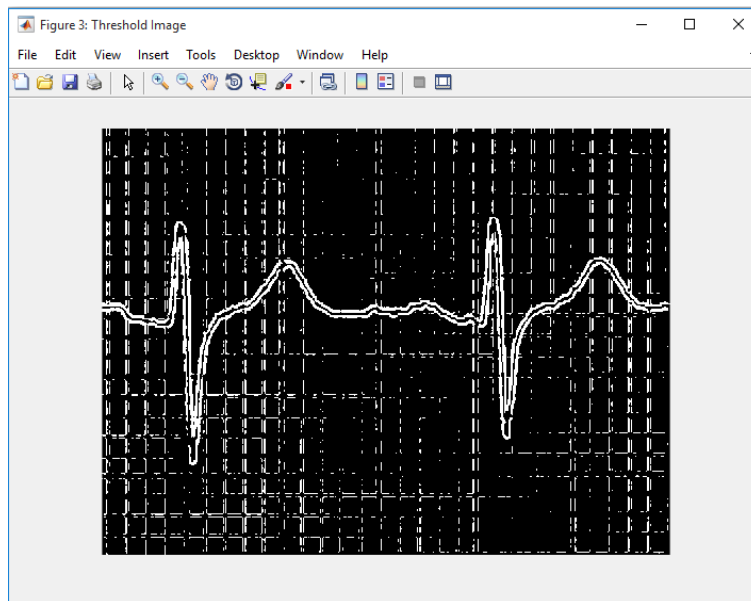


Ilustración 10: Extracción de características basadas en gradientes (Virgin & Baskar, 2018)[7]

Una vez que se ha completado el proceso de binarización, es importante abordar el problema del ruido en la imagen. Eliminar el ruido es fundamental para obtener una señal de ECG limpia y precisa, que pueda ser analizada y utilizada en diagnósticos y tratamientos.

Para lograr esto, se utiliza una técnica conocida como escaneo vertical. En este proceso, se busca identificar los píxeles negros en la imagen y comprobar si están rodeados de píxeles blancos de fondo. Si es así, se considera que estos píxeles negros son ruido y se eliminan de la imagen. El resultado es una imagen más limpia y libre de ruido, que se puede utilizar para el análisis de la señal.

Es importante destacar que la eliminación del ruido en la señal de ECG puede mejorar significativamente la precisión del diagnóstico y la efectividad del tratamiento. Por lo tanto, la técnica de escaneo vertical y la eliminación del ruido son aspectos críticos del procesamiento de señales biomédicas.

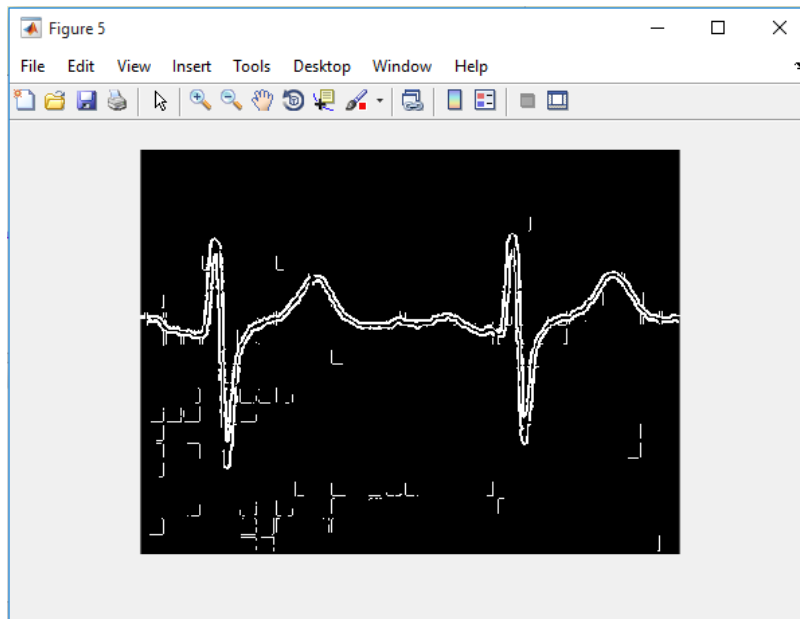


Ilustración 11: Rechazo de ruido (Virgin & Baskar, 2018)[7]

En este momento del análisis, es crucial enfocarse en la disminución de la imagen, dado que el grosor representa una redundancia de datos en el ámbito de las series de tiempo, y luego avanzar en la etapa de adelgazamiento de las imágenes binarias. Como resultado, se consigue la señal digital en formato .dat, lo que se ilustra en la figura 12

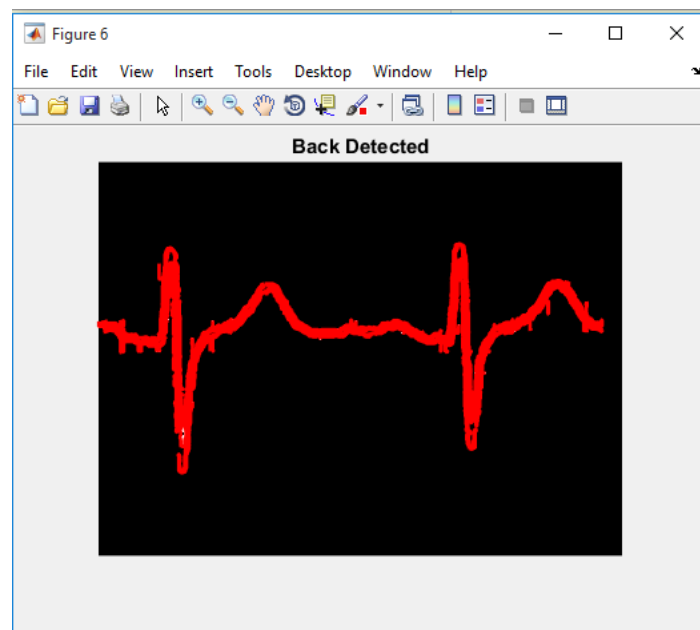


Ilustración 12: Imagen fina digitalizada (Virgin & Baskar, 2018)[7]

El diagrama del proceso de digitalización lo podemos observar en la ilustración 13

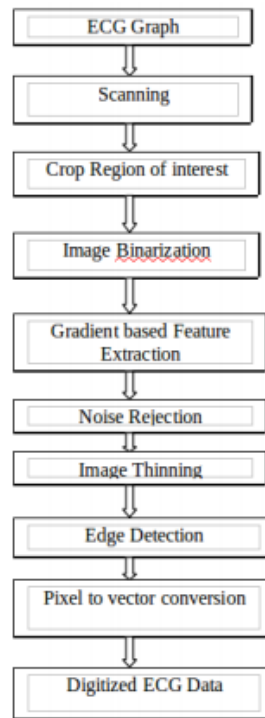


Ilustración 13:Diagrama de flujo del proceso de digitalización de la señal ECG

5.4 Planteamiento del problema

Las enfermedades cardíacas causan millones de muertes en todo el mundo y representan el 16% de las muertes, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2019. El diagnóstico temprano es fundamental para salvar vidas y mejorar la calidad de vida de las personas que padecen deficiencias cardíacas. Por lo tanto, el electrocardiograma (ECG o EKG) es una herramienta esencial para diagnosticar enfermedades cardíacas, sus daños y los efectos de los medicamentos en el corazón. Además de medir el ritmo y la regularidad de los latidos, el ECG proporciona información sobre el tamaño y la posición de las aurículas y los ventrículos. Se necesitan diferentes tipos de electrodos para realizar el examen, según la derivación. Después de amplificar los electrodos en el tórax, se obtiene un registro de las descargas eléctricas en forma de ECG.[3]

Actualmente, existen muchas patologías cardíacas registradas en papel mediante electrocardiógrafos. Estos registros son difíciles de analizar mediante patrones

estadísticos, ya que solo se tiene la imagen impresa en el papel. Si los registros estuvieran disponibles en formato digital, sería posible realizar un reconocimiento automático de patrones asociados a un estado cardíaco específico. Sin embargo, según la literatura científica y las listas de referencias bibliográficas, no hay mucha información sobre estudios comparativos entre el ECG digital y el ECG analógico o tradicional. La novedad de la digitalización puede explicar en parte esta falta de información.

Al principio, se utilizaron imágenes de los brazos y la pierna izquierda para registrar la actividad eléctrica del cuerpo. El desarrollo de las tres derivaciones unipolares de las extremidades (aVR, aVL y aVF) condujo a un aumento notable en el trazado. Por último, las seis derivaciones precordiales, también denominadas monopolares, se introdujeron desde V1 a V6, desempeñando un papel crucial en el diagnóstico topográfico. Estos cables permiten visualizar la actividad eléctrica del corazón desde los planos anterior, lateral y posterior, entre otros puntos de vista.

Como es evidente, la base original de la tecnología de ECG digital fue el muestreo de la señal de ECG obtenida mediante electrodos de superficie corporal. La tecnología digital requiere la adquisición de "muestras" de información a intervalos regulares, mientras que la tecnología analógica captura información continuamente.

El electrocardiograma (ECG) es una herramienta básica para detectar diversas enfermedades cardíacas. Puede detectar enfermedades de las arterias coronarias, desequilibrios en los niveles de electrolitos en sangre y taquicardia y bradicardia, que se caracterizan por frecuencia cardíaca anormalmente rápida o lenta. Además, el ECG revela, entre otras cosas, anomalías congénitas del músculo cardíaco, agrandamiento del corazón, problemas con las válvulas cardíacas y diversos tipos de arritmias cardíacas.[8]

Para estas detecciones se utiliza un dispositivo especial llamado electrocardiógrafo. Este dispositivo es fundamental porque registra las señales eléctricas del corazón. Su funcionamiento se basa en componentes clave como un galvanómetro, un sistema de amplificación y un mecanismo de registro en papel cuadriculado. El alto grado de automatización del electrocardiógrafo garantiza una excelente calidad de los registros producidos, proporcionando información importante para evaluar la salud del corazón.

Respecto a los estudios realizados, se puede decir que las ventajas del ECG digital frente al ECG analógico radican en su capacidad para reducir o eliminar variaciones latido a latido y en la capacidad de registrar hasta 8 canales de información simultáneamente. En tales situaciones, el proceso de diagnóstico se simplifica enormemente.

Además, las capacidades de almacenamiento, acceso remoto y transmisión remota de la información adquirida para su posterior interpretación hacen del ECG digital una herramienta ideal para respaldar el diagnóstico basado en ECG.

5.5 Marco teórico

A continuación, se explicará algunos de los conceptos teóricos más importantes relacionados con la salud, para poder llegar a comprender mejor muchos aspectos técnicos de salud sobre los electrocardiogramas.

En este estudio se analizan pacientes con posibles afecciones cardíacas en las arterias coronarias, por lo tanto, en este subapartado se explicarán la anatomía y el funcionamiento básico del corazón, el sistema de irrigación cardíaca a través de las arterias coronarias y el papel que desempeña el sistema nervioso en el control de la frecuencia cardíaca, además de una breve introducción sobre que es el sistema circulatorio.

El corazón

El corazón desempeña la función de impulsar la sangre mediante contracciones rítmicas, asegurando así su distribución por todo el cuerpo a través de los vasos sanguíneos. La sangre transporta los nutrientes esenciales necesarios para las funciones metabólicas del organismo, además de cumplir con otras importantes tareas.[9]

El corazón, un órgano vital en el sistema circulatorio, desempeña muchas otras funciones cruciales, además de ser el principal motor de la circulación sanguínea. Entre estas funciones, se incluye la regulación de la temperatura corporal y el transporte de los excedentes metabólicos, contribuyendo así a mantener un ambiente homeostático en el organismo.

Desde el punto de vista anatómico, el corazón consta de tres capas distintas. La capa más externa es el pericardio, una membrana que cumple un papel protector al

resguardar el corazón y permitir su movimiento durante las contracciones cardíacas. Justo debajo del pericardio se encuentra el miocardio, el músculo cardíaco en sí, formado por células musculares especializadas que posibilitan la transmisión del impulso eléctrico a lo largo del corazón, desencadenando las contracciones cardíacas que bombean la sangre. La capa interna es el endocardio, que entra en contacto directo con la sangre que fluye a través del corazón, asegurando una superficie interna adecuada para la circulación (Espinosa).

En términos de su estructura interna, el corazón se divide en cuatro cavidades musculares: dos aurículas en la parte superior y dos ventrículos en la parte inferior. Estas cavidades se separan en la zona izquierda y derecha por un tabique. Además, el corazón está equipado con cuatro válvulas cardíacas esenciales que garantizan un flujo sanguíneo unidireccional. Las válvulas ubicadas entre las aurículas y los ventrículos se conocen como válvulas auriculoventriculares, mientras que las válvulas semilunares impiden el reflujo de la sangre desde las arterias hacia los ventrículos, contribuyendo al funcionamiento eficaz del corazón.

El sistema circulatorio, esencial para el funcionamiento del organismo, se inicia en el corazón, donde se lleva a cabo un proceso altamente coordinado. Este proceso, conocido como ciclo cardíaco, se desarrolla en diversas etapas.

El circuito sanguíneo comienza en las aurículas, que son las cámaras encargadas de recibir la sangre de las venas y transmitirla a los ventrículos. Las válvulas auriculoventriculares, específicamente la tricúspide en el lado derecho del corazón y la válvula mitral en el izquierdo, regulan el flujo de sangre entre las aurículas y los ventrículos, asegurando que fluya en la dirección correcta.

Una vez en los ventrículos, el músculo cardíaco se contrae con fuerza para bombear la sangre hacia las arterias, que desempeñan un papel crucial en la distribución de la sangre oxigenada y rica en nutrientes por todo el cuerpo. Las válvulas pulmonar y aórtica evitan el reflujo de sangre desde los ventrículos hacia la arteria pulmonar y la aorta, respectivamente.

Un aspecto importante a destacar es la organización del sistema circulatorio en dos lados distintos del corazón. El lado derecho del corazón bombea la sangre hacia los pulmones, donde se oxigena, mientras que el lado izquierdo la bombea al resto del organismo para suministrar oxígeno y nutrientes a todas las células. Debido a la

necesidad de impulsar la sangre a través de todo el cuerpo, el músculo cardíaco en el lado izquierdo está más desarrollado y requiere una mayor potencia. Este proceso garantiza el suministro constante de sangre y oxígeno a todas las partes del cuerpo, manteniendo la vitalidad y el funcionamiento adecuado de los tejidos y órganos.

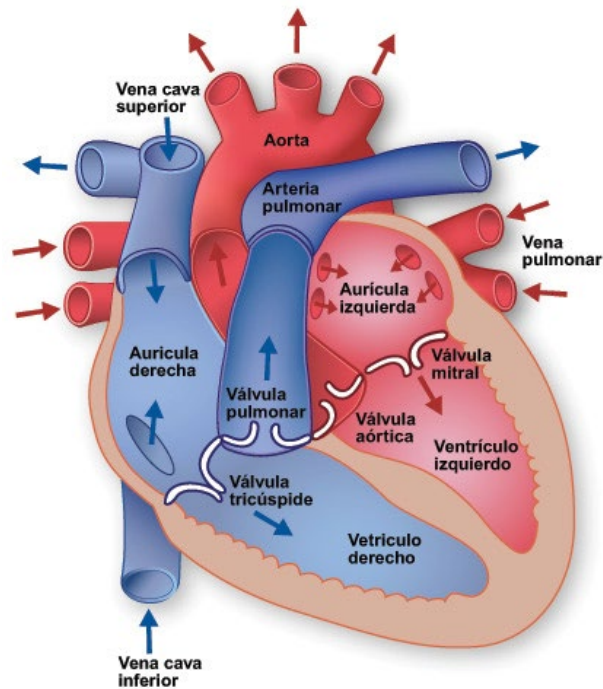


Ilustración 14: Anatomía del corazón[9]

Sistema de conducción

El sistema de conducción del corazón desencadena las contracciones rítmicas del miocardio, lo que, a su vez, permite la eficiente distribución de sangre por todo el cuerpo. Este proceso se inicia con la despolarización de las células cardíacas, causada por la variación en el potencial de membrana. La despolarización se lleva a cabo mediante el transporte de iones de potasio, sodio y calcio a través de la membrana celular. Lo que es fundamental es que esta despolarización se propaga de célula a célula, asegurando un flujo eléctrico continuo a lo largo del tejido miocárdico.

Para llevar a cabo esta propagación del impulso eléctrico de manera eficaz, el corazón cuenta con un sistema de conducción especializado compuesto por células que presentan un umbral de excitabilidad más bajo que las células miocárdicas comunes. Este sistema de conducción comienza en el nodo sinusal (SA), ubicado cerca de la entrada de la vena cava en la aurícula derecha. El nodo SA inicia y regula la frecuencia

de los impulsos eléctricos, y esta frecuencia puede ser influenciada por el sistema nervioso autónomo, específicamente por los nervios vago y simpático. Por lo general, la frecuencia de los impulsos del nodo SA varía entre 60 y 100 estímulos por minuto, lo que establece el ritmo cardíaco basal.[10]

El impulso eléctrico que proviene del nodo SA se propaga a través de tres conductos hacia las aurículas y finalmente llega al nodo auriculoventricular (AV). En el AV, se produce un breve retraso en la señal eléctrica, lo que permite que la contracción de las aurículas preceda a la de los ventrículos. A continuación, el impulso eléctrico avanza hacia el haz de His, que es un conducto que se ramifica hacia los dos ventrículos. Estas ramificaciones se dividen en una red de fibras de Purkinje que se encargan de estimular los ventrículos casi de manera simultánea. Esta estimulación coordinada y sincronizada es fundamental, ya que es lo que finalmente provoca la contracción de los ventrículos, asegurando que la sangre sea expulsada con la fuerza necesaria para su distribución a través de las arterias a todo el cuerpo.

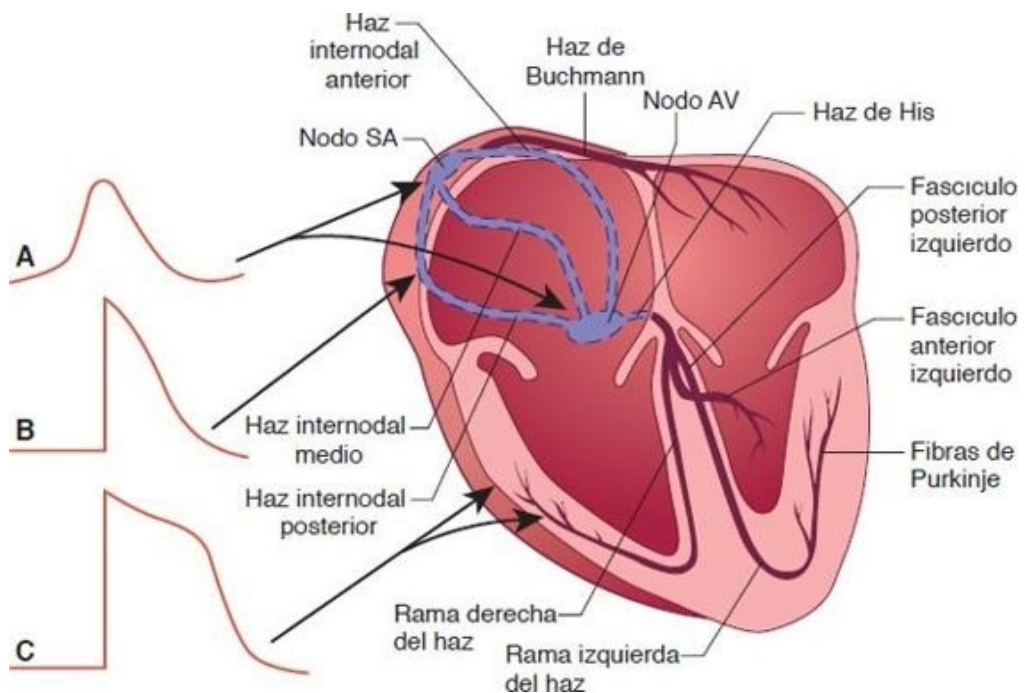


Ilustración 15: Sistema de conducción cardíaco[10]

Potencial cardiaco

Después de analizar el movimiento del corazón, es esencial abordar el potencial cardiaco, un fenómeno generado por células autorríticas que desempeñan un papel crucial en la función cardíaca. Estas células tienen la capacidad de iniciar y transmitir potenciales de acción a través de ondas de despolarización, lo que les permite autorregularse eléctricamente. Como resultado, provocan una inversión de la carga eléctrica, haciendo que el interior de la célula sea positivo en comparación con el exterior durante la fase de despolarización. Posteriormente, las células se repolarizan, restableciendo la diferencia de carga eléctrica, de manera que el interior vuelve a ser negativo en relación con el exterior. Este ciclo de cambios eléctricos en las células cardíacas contribuye a la sincronización y contracción del músculo cardíaco y culmina en una fase de relajación esencial para el correcto funcionamiento del corazón.

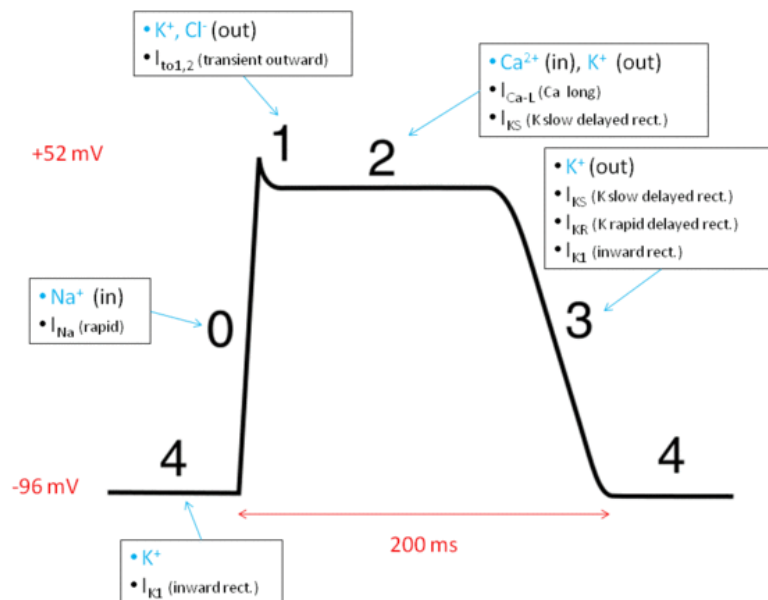


Ilustración 16 Potencial cardiaco[11]

Generación de un electrocardiograma (ECG)

El estudio del comportamiento del corazón se logra mediante el análisis de las diferencias de potencial y la naturaleza eléctrica de las señales que orquestan sus movimientos. Estos voltajes se pueden capturar desde varios puntos en la superficie del cuerpo a través de los electrocardiogramas, que registran gráficamente las corrientes que fluyen a través del corazón. Estos registros son de gran utilidad, ya que proporcionan información crucial sobre diversos aspectos cardíacos, como la orientación anatómica del corazón, el tamaño relativo de sus cámaras, trastornos en el ritmo y la conducción, la presencia y evolución de isquemias, así como la alteración de los electrolitos.

El paso de los potenciales de acción a través de las células cardíacas da lugar a la generación de diversas formas de onda. Estas formas de onda, cuando se suman entre sí, crean una representación gráfica conocida como electrocardiograma (ECG). El ECG es una herramienta esencial en la evaluación de la salud cardíaca, proporcionando a los médicos y especialistas en cardiología una visión detallada de la actividad eléctrica del corazón y permitiendo la detección temprana de posibles problemas cardíacos.

Interpretación de un electrocardiograma (ECG)

El estudio del comportamiento del corazón se logra mediante el análisis de las diferencias de potencial y la naturaleza eléctrica de las señales que orquestan sus movimientos. Estos voltajes se pueden capturar desde varios puntos en la superficie del cuerpo a través de los electrocardiogramas (ECG), que registran gráficamente las corrientes que fluyen a través del corazón. Los ECG son herramientas fundamentales en la evaluación de la salud cardíaca, ya que proporcionan información crucial sobre diversos aspectos del corazón. Esto incluye detalles como la orientación anatómica del corazón, el tamaño relativo de sus cámaras, trastornos en el ritmo y la conducción, la presencia y evolución de isquemias, así como la alteración de los electrolitos.

El paso de los potenciales de acción a través de las células cardíacas da lugar a la generación de diversas formas de onda. Estas formas de onda, cuando se suman entre sí, crean una representación gráfica conocida como electrocardiograma (ECG). El ECG es una herramienta esencial en la evaluación de la salud cardíaca, proporcionando a los médicos y especialistas en cardiología una visión detallada de la actividad eléctrica del corazón y permitiendo la detección temprana de posibles problemas cardíacos.

Además, es importante destacar que los ECG no solo son útiles en el diagnóstico, sino que también son cruciales en la monitorización de pacientes, tanto en entornos hospitalarios como en la atención domiciliaria. El monitoreo continuo a través de ECG permite detectar cambios sutiles en la actividad eléctrica del corazón, lo que es esencial para la prevención y el tratamiento de afecciones cardíacas.

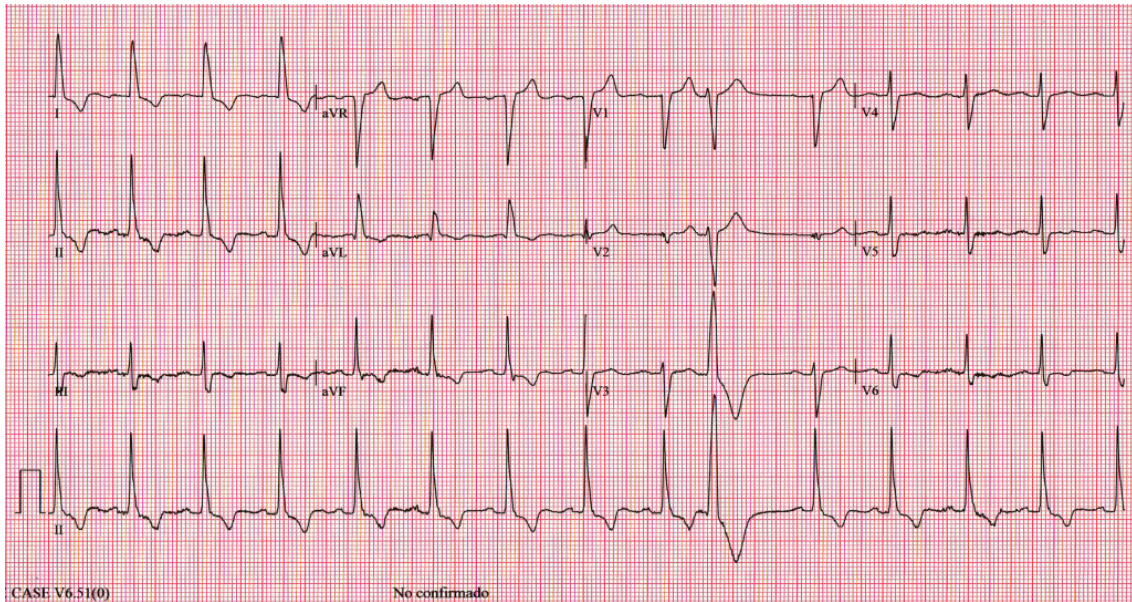


Ilustración 17 Electrocardiograma (ECG)[11]

Periodo ECG

Las ondas P, que se representan como una línea recta entre el punto más bajo y el más alto, nos proporcionan información valiosa sobre el tiempo entre los latidos del corazón. Por otro lado, la onda T, que marca el final de cada latido cardíaco, suele ser un pequeño latido perceptible después del latido principal. La consistencia en el tiempo transcurrido entre estas ondas es crucial; cualquier variabilidad podría indicar una irregularidad en el ritmo cardíaco.

Es esencial tener en cuenta que la onda P no debe superar los 0,25 mV (equivalentes a 2,5 mm de altura) y no debe durar más de 0,11 segundos en un adulto. Además, suele tener una forma redondeada. Cuando estos criterios no se cumplen, es posible que se estén señalando diferentes anomalías, como un agrandamiento auricular causado por una estenosis e insuficiencia mitral o por una hipertensión arterial.

Los pacientes que padecen hipertensión arterial pueden beneficiarse del uso de un tensiómetro digital para llevar un seguimiento preciso de su presión arterial, lo que evita la necesidad de visitar al médico o a la farmacia de manera frecuente.

La onda T también es un componente crítico del ECG. Debe tener una forma positiva, es decir, convexa, con una longitud aproximada de 3 mm. Cualquier desviación de estas características puede indicar diversas condiciones, como alteraciones en el nivel de potasio si se presenta de forma puntiaguda, problemas de origen isquémico si es cóncava y problemas en la repolarización si se aplanada.

Para calcular la frecuencia cardíaca, busca en el ECG el punto más alto conocido como "R", cuenta el número de cuadros grandes entre dos de estos puntos y divide el resultado entre 300. Por ejemplo, si hay 4 cuadros grandes entre dos picos, tu ritmo cardíaco será de 75 latidos por minuto ($300/4=75$). En caso de que no puedas detectar picos idénticos en el ECG, selecciona 30 cuadros grandes (equivalentes a 6 segundos), localiza el número de complejos QRS (representación gráfica de la despolarización de los ventrículos del corazón) en ese trazo, y multiplica el número de complejos QRS por 10. Este resultado aproximado te dará la frecuencia cardíaca. Por ejemplo, si detectas 6 complejos QRS, tu ritmo cardíaco será de 60 latidos por minuto ($6 \times 10 = 60$).

En condiciones de reposo, se considera que un ritmo cardíaco normal se encuentra en el rango de 60 a 100 latidos por minuto. Por debajo de esta cifra, se clasifica como bradicardia, y por encima, como taquicardia.

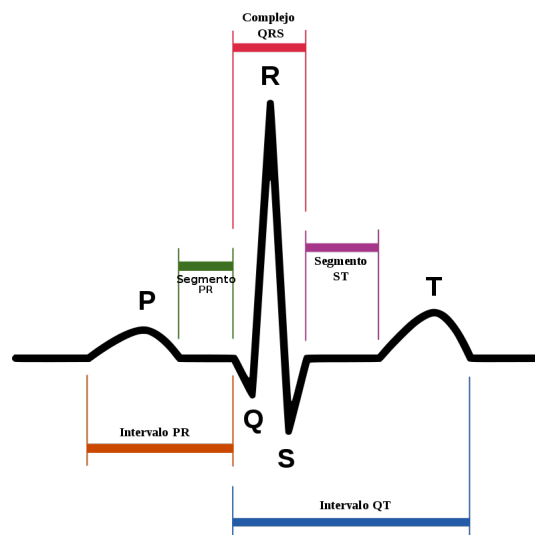


Ilustración 18 Segmentación electrocardiograma[12]

Intervalos y segmentos del ECG

Onda P: La "Onda P" constituye la primera señal de activación hacia las aurículas en el electrocardiograma (ECG), y su duración no supera los 100 ms. Su voltaje típicamente se encuentra por debajo de los 2,5 mV. En la mayoría de los casos, esta onda representa el inicio de la actividad eléctrica en el corazón y se considera un indicador clave en la lectura del ECG.

Intervalo PR: El "Intervalo PR" refleja el retraso fisiológico que ocurre en el nodo auriculoventricular, marcando un período de inactividad eléctrica. Su duración generalmente se sitúa entre los 120 y 200 ms. Este intervalo es fundamental, ya que

indica la pausa necesaria para que la señal eléctrica se desplace de las aurículas a los ventrículos, permitiendo una coordinación precisa del latido cardíaco.

Complejo QRS: El "Complejo QRS" es el punto donde la señal de activación llega a ambos ventrículos. Su duración típica varía entre 80 y 100 ms. Este complejo es la característica distintiva en un trazado electrocardiográfico, y su apariencia se utiliza para identificar diferentes patrones de actividad eléctrica en el corazón.

Segmento ST: El "Segmento ST" se extiende desde el final del complejo QRS hasta el comienzo de la onda T. Representa una fase crítica en el ciclo cardíaco y, en algunas situaciones clínicas, puede experimentar cambios significativos, lo que es de interés para la evaluación de la función cardíaca.

Onda T: La "Onda T" surge al final del segmento ST y corresponde a la repolarización ventricular, que es el proceso en el que las células cardíacas se preparan para un nuevo ciclo de contracción. La forma y la amplitud de la onda T también son indicadores importantes para evaluar la salud del corazón.

Intervalo QT: Además de representar la despolarización y repolarización ventricular, el "Intervalo QT" se extiende desde el inicio del complejo QRS hasta el final de la onda T. Su duración oscila típicamente entre 320 y 400 ms. Cambios en la duración de este intervalo pueden estar asociados con trastornos cardíacos y deben ser cuidadosamente evaluados en la interpretación del ECG.

Registros

La adquisición de registros de un trazado electrocardiográfico ECG es un procedimiento médico común utilizado para evaluar la actividad eléctrica del corazón. Como mencionaste, para realizar un ECG, se requiere conectar una serie de electrodos al cuerpo, que se conocen como derivaciones. Estos electrodos son esenciales para capturar y registrar los niveles eléctricos producidos por la actividad cardíaca.

Derivaciones

Las derivaciones en el contexto del electrocardiograma ECG son fundamentales para obtener una representación gráfica de la actividad eléctrica del corazón. Son como "ventanas" que permiten observar la actividad eléctrica cardíaca desde diferentes ángulos o perspectivas, lo que proporciona información valiosa para el diagnóstico de problemas cardíacos y la evaluación de la función cardíaca:

1. **Derivaciones Precordiales:** Estas derivaciones se colocan en el pecho del paciente y se utilizan para observar la actividad eléctrica en la región anterior del corazón. En un ECG estándar, se usan seis derivaciones precordiales etiquetadas como V1, V2, V3, V4, V5 y V6. Cada una de estas derivaciones se coloca en una ubicación específica en el pecho, lo que permite evaluar diferentes regiones del corazón. Por ejemplo, V1 y V2 se ubican cerca del esternón, mientras que V4, V5 y V6 se colocan en la línea axilar anterior izquierda.

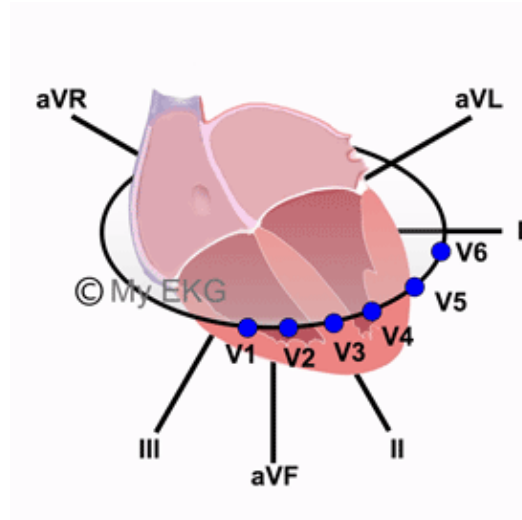


Ilustración 19 Derivaciones Precordiales[13]

2. **Derivaciones de Extremidades:** Las derivaciones de extremidades se obtienen colocando electrodos en los brazos y las piernas del paciente. Estas derivaciones, etiquetadas como DI, DII y DIII, proporcionan información sobre la actividad eléctrica en los diferentes ejes del corazón. DI se forma entre el brazo derecho y el brazo izquierdo, DII entre el brazo derecho y la pierna izquierda, y DIII entre el brazo izquierdo y la pierna izquierda. Estas derivaciones son particularmente útiles para evaluar la dirección y la magnitud de la actividad eléctrica cardíaca.

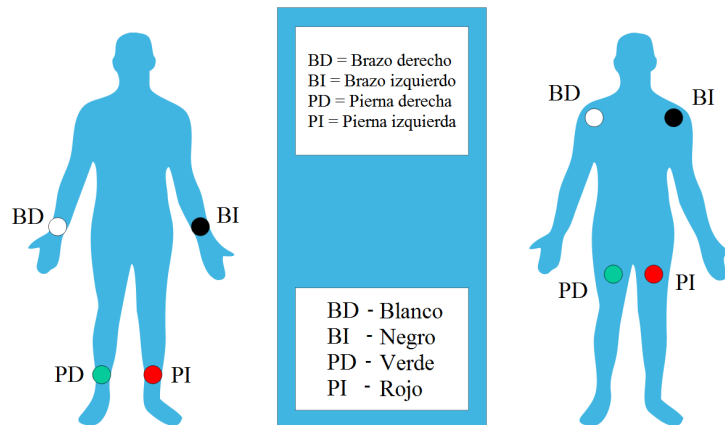


Ilustración 20 Derivación extremidades[14]

3. **Derivaciones Unipolares:** Además de las derivaciones mencionadas, existen derivaciones unipolares o aumentadas (aVR, aVL y aVF), que se obtienen usando una combinación de los electrodos de extremidades. Estas derivaciones ofrecen información adicional sobre la actividad eléctrica y son útiles para diagnosticar ciertos problemas cardíacos.

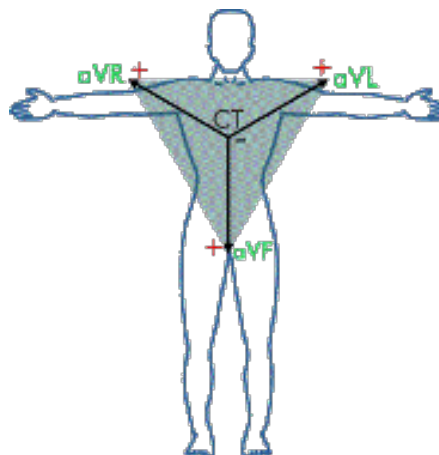


Ilustración 21 Derivación unipolar[15]

4. **Derivaciones de Miembros Derechos:** En algunos casos, se pueden utilizar derivaciones de miembros derechos (VR, VL, VF) para evaluar la actividad eléctrica en la región de la aurícula derecha. Estas derivaciones proporcionan información sobre trastornos específicos, como el bloqueo de rama derecha.
5. **Derivaciones Posteriores:** En situaciones donde se sospecha un infarto de miocardio en la parte posterior del corazón, se pueden utilizar derivaciones posteriores (V7, V8, V9) que se colocan en la espalda del paciente. Estas

derivaciones permiten observar la actividad eléctrica en la región posterior del corazón.

Procesados imágenes aplicables a la digitalización de ECG

Digitalizar un electrocardiograma (ECG) implica convertir la señal analógica producida por un ECG impreso en papel a un formato digital que pueda almacenarse, procesarse y evaluarse en una computadora u otro dispositivo electrónico. Para lograr este objetivo, se pueden utilizar diferentes métodos de procesamiento de imágenes, y la elección exacta del método depende de la calidad del ECG impreso, la disponibilidad de hardware y software y los requisitos especiales para la digitalización.

A continuación, se proporciona una breve descripción sobre los procesados de imagen que se aplicaran en este proyecto:

Preprocesamiento

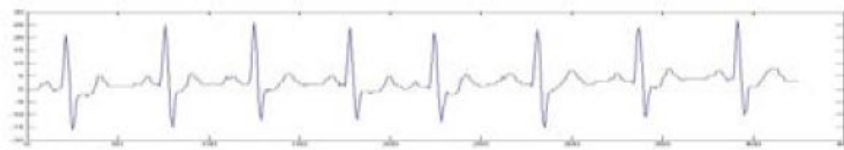
Son los procesamientos que vamos a aplicar a las imágenes de manera previa a la extracción del vector 1D con la señal. Los preprocesamientos más conocidos son la eliminación de ruido, la corrección de la luminosidad o mejorando el contraste.

- **Eliminación de ruido:** Es el proceso de reducir o eliminar defectos visuales no deseados en una imagen. Los métodos más comunes a la hora de eliminar ruido de las imágenes son, aplicar filtro suavizado gaussiano, filtro de mediana, filtro de Wiener.
- **Mejora del contraste:** Para este preprocesamiento se tienen varias técnicas. Una de ellas es, la técnica de ajuste de contraste lineal que es una estrategia sencilla y eficaz para mejorar el contraste de la imagen. Esto redistribuye linealmente los niveles de intensidad de los píxeles de la imagen, aumentando o disminuyendo la diferencia entre los niveles de intensidad. Otra técnica utilizada para mejorar el contraste es la ecualización del histograma ya que es un procedimiento que reorganiza las intensidades de los píxeles en una imagen de manera que queden equitativamente distribuidas a lo largo de todo el espectro de intensidades.
- **Normalización de resolución y tamaño:** Se refiere a la acción de modificar las dimensiones de la imagen y el nivel de detalle en ella. Esta tarea es crucial para garantizar que todas las imágenes tengan dimensiones consistentes y una resolución adecuada, lo cual simplifica los procesos de análisis y procesamiento subsiguientes.

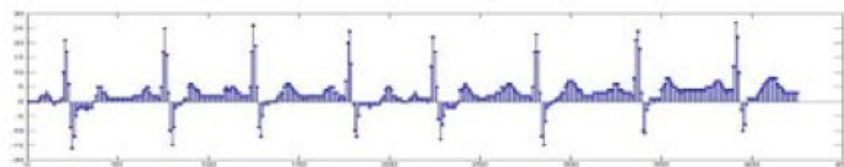
- **Delimitación de zonas de interés:** Se trata de la búsqueda de la identificación y segmentación de las áreas fundamentales de la imagen que albergan datos significativos, tales como las ondas del ECG y las líneas de referencia. Los métodos más conocidos para este preprocesamiento son detección de bordes, delimitaciones de las regiones de interés, eliminación de elementos no deseados.



a



b



c

Ilustración 22 Extracción de la señal

Umbralización (binarización)

El umbral convierte la imagen en escala de grises en una imagen binaria y separa los píxeles en dos categorías: una que representa el ECG y la otra que representa el fondo blanco del papel. Este paso simplifica la detección de ondas ECG. Para ello tendremos que obtener o definir un umbral el cual determina el nivel de intensidad de color gris se considera un pixel como parte de la señal o como parte del fondo blanco (cuadrículas). El resultado que obtenemos finalmente al aplicar este procesado es una imagen binaria.

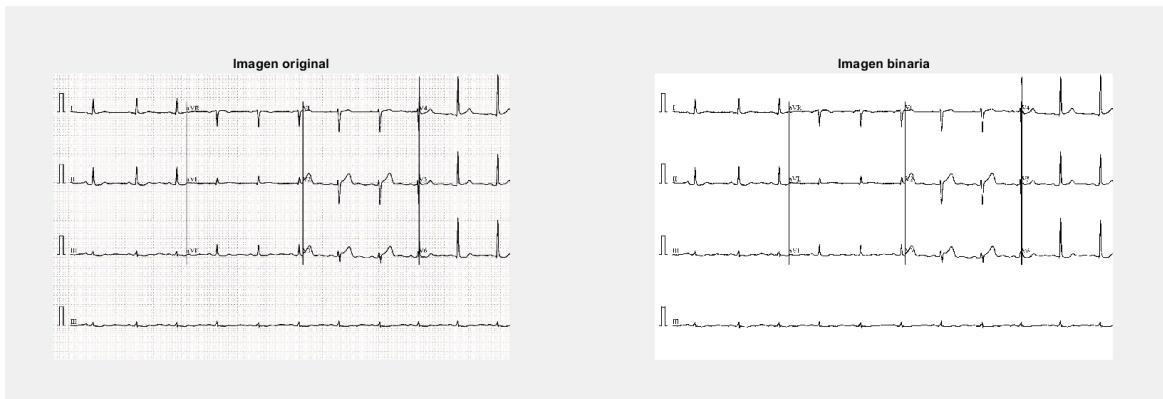


Ilustración 23 Imagen binarizada

Segmentación de la señal

Este procedimiento tiene como objetivo la identificación y separación de las componentes significativas del electrocardiograma (ECG), como las ondas P, QRS y T, de los elementos de fondo y otros artefactos presentes en la señal. Esta segmentación tiene la importancia de aislar las partes más significativas de la señal para posteriormente, analizar estos puntos importantes para realizar un buen diagnóstico del paciente. Los métodos más conocidos a la hora de la segmentación son: Segmentación por umbralización, detección de bordes, segmentación por contornos y técnicas de morfología matemática. Los enfoques de segmentación pueden ser variados y deben ajustarse en función de la calidad de la imagen y su nivel de variabilidad. La segmentación precisa resulta fundamental para llevar a cabo un análisis cuantitativo y cualitativo de la señal ECG que ha sido digitalizada.

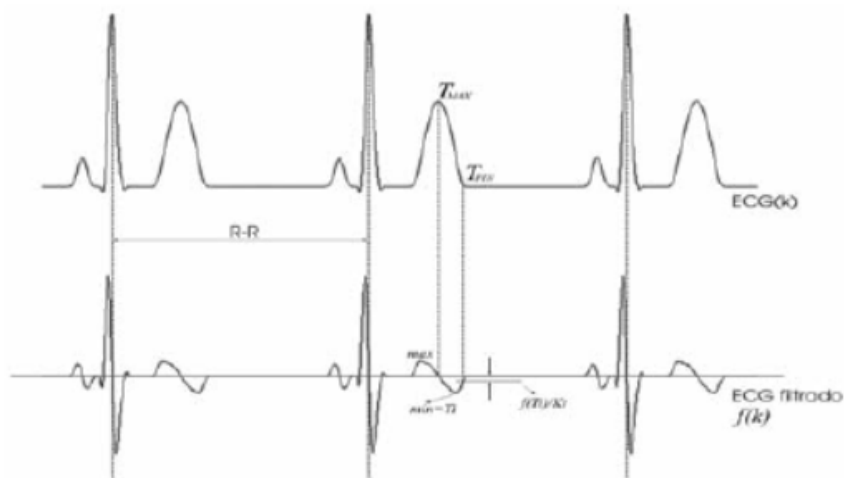


Ilustración 24 Segmentación de la señal[16]

Extracción de datos

La extracción de datos juega un papel clave en la digitalización de electrocardiogramas (ECG), que originalmente estaban en formato papel. Esto implica identificar y cuantificar características específicas de la señal cardíaca y prepararla para su posterior análisis. Esto nos permitirá posteriormente digitalizar la señal para tener un vector de 1D con el cual podamos trabajar. Las características más importantes que se pueden extraer de una señal de ECG son: La amplitud, la duración, los intervalos entre puntos y el área bajo la curva.

La extracción de la cuadrícula también es un factor importante debido a que al obtener una buena referencia sobre la cuadrícula podemos tener mayor precisión en las mediciones, facilitar un buen análisis clínico, llevar un seguimiento correcto del paciente, automatización y análisis asistido ayudado de un ordenador.

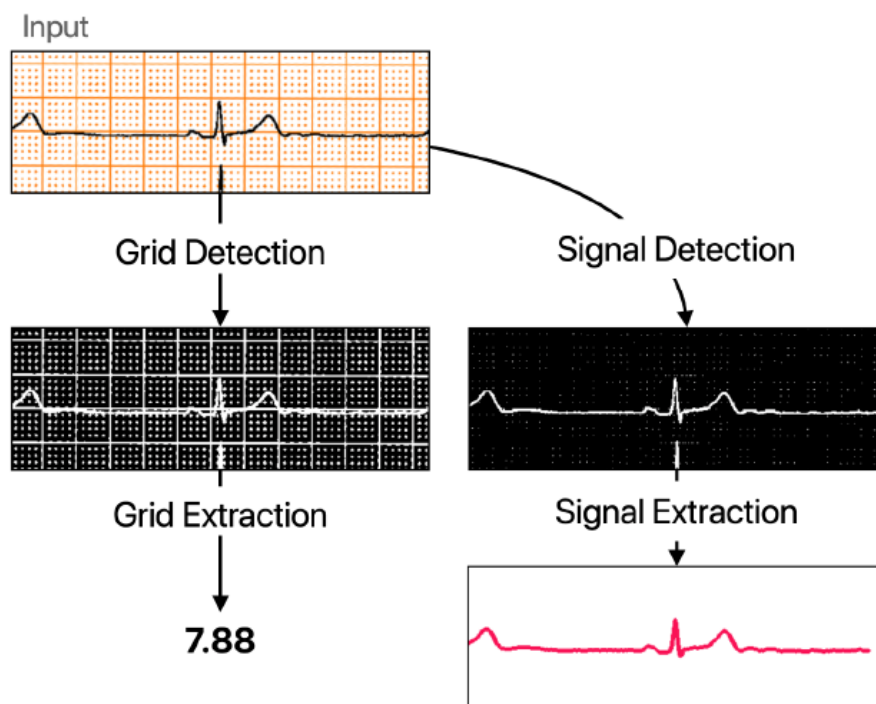


Ilustración 25 Extracción datos señal

Almacenamiento y procesamiento

En este proceso se toman los datos digitales obtenidos de la imagen digitalizada y se preparan para su análisis y almacenamiento. Estos datos se almacenarán en un vector 1D de Matlab, teniendo como resultado final un vector representado tal que así.

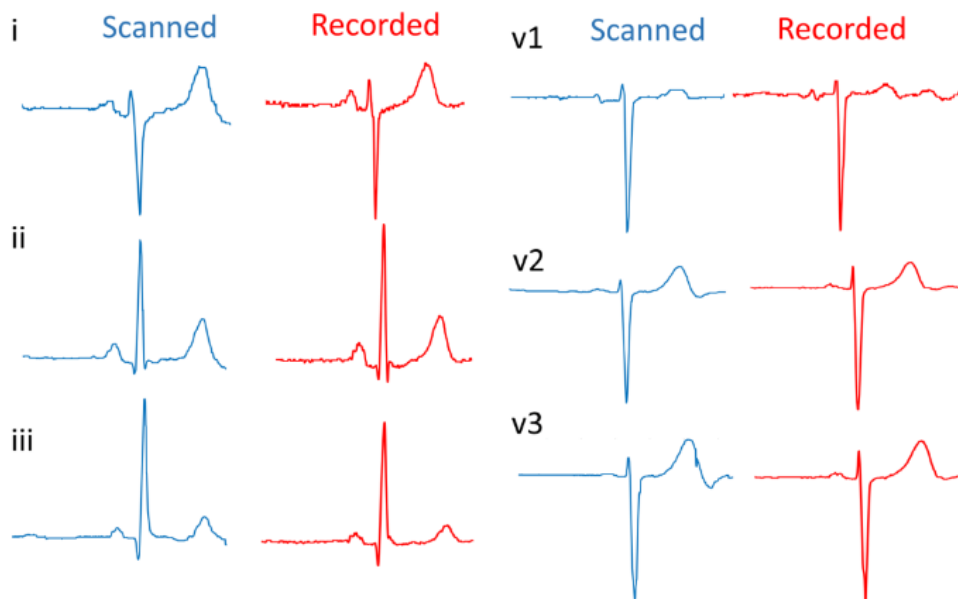


Ilustración 26 Imagen digitalizada[16]

5.6 Desarrollo de una Aplicación para la Digitalización de Electrocardiogramas

El método propuesto para desarrollar este trabajo fue experimental, ya que se trabajó con las imágenes del ECG y se probaron múltiples métodos para determinar con cual teníamos los mejores resultados.

El objetivo principal de este desarrollo es el de conseguir una digitalización de la mayor calidad posible de un electrocardiograma impreso a papel, para ello, utilizaremos una base de datos con distintas muestras de diferentes pacientes, con diferentes patologías. Esta base de datos ha sido obtenida de internet. [17]

Tenemos disponible una base de datos en la cual tenemos recogidas, un número total de 284 ECG impresos a papel de diferentes pacientes. La base de datos es ampliable a otros formatos de ECG ya que la propia aplicación permite adaptar las imágenes al perfil deseado por la APP para realizar la digitalización con la mayor precisión posible.

A continuación, se mostrará uno de los ejemplos de las muestras que vamos a utilizar para el desarrollo de esta digitalización, analizaremos esta imagen y sacaremos de ella información relevante que utilizaremos posteriormente para apoyarnos en la solución.



Ilustración 27 ECG base de datos

En el primer paso observando el electrocardiograma impreso se obtienen muestras utilizando una escala de tiempo específica, donde 1 mm en el eje horizontal representa un intervalo de 0,04 segundos, es decir, un cuadrado en la cuadrícula equivale a 0,04 segundos. Para una rejilla vertical, 5 mm corresponden a un valor de 0,5 mV. Posteriormente, se ajustó la escala de tiempo para expandir la señal horizontalmente, mientras que la escala vertical se mantuvo sin cambios. Esta información podemos obtenerla del propio ECG, en la siguiente ilustración se muestra de donde se ha obtenido esta información que posteriormente nos será útil para calcular la frecuencia de muestreo, número de cuadrículas de fondo.

Posteriormente analizaremos y entraremos en detalle en cada uno de estas funciones desarrolladas para la toolbox creada en MATLAB.

Cargar imagen de la base de datos

En primer lugar, se realizó una búsqueda para encontrar una base de datos, con la cual nos permitiese trabajar de una manera fluida y tuviésemos abundancia de muestras para tener los resultados más exactos. Esta búsqueda nos llevó a escanear una cantidad elevada de electrocardiogramas proporcionados por el Centro de salud Virgen de Linarejos, pero encontramos problemas de homogeneidad, presentando disparidades en términos de tamaños, calidad, entre otros aspectos, que dificultaban abordar el problema. Por lo tanto, se decidió recurrir a una base de datos disponible, ampliamente utilizada por investigadores, lo que posibilitaba la comparación de resultados.

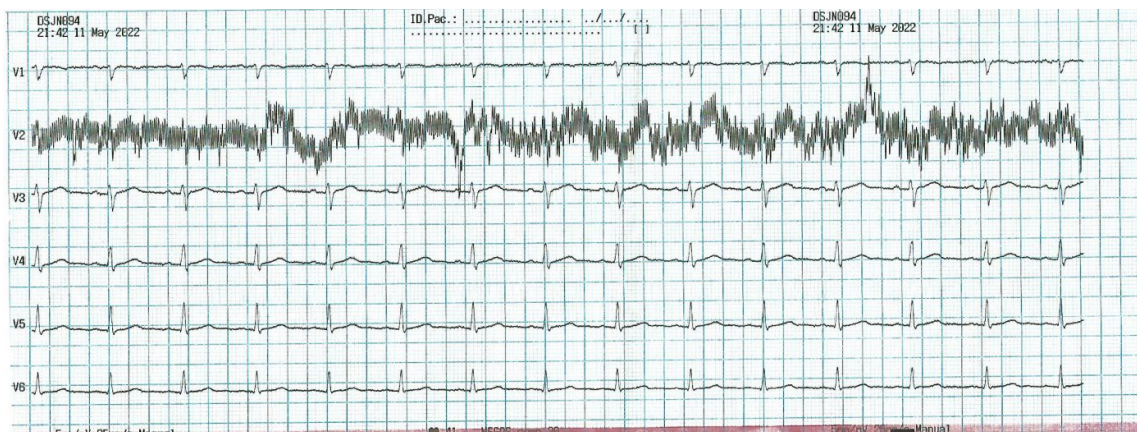


Ilustración 30 Imagen ECG Centro Salud

A continuación, se mostrará una muestra de las imágenes que se han tomado para la realización de este trabajo. En ella podemos apreciar mucha información irrelevante, la cual será eliminada posteriormente, aplicando procesados de imagen de la toolbox generada. Entre esta información irrelevante podemos encontrar, los datos de los pacientes médicos, entre los que se encuentra la ID del paciente, la fecha en la que se realizó, la información que hemos utilizado anteriormente para obtener los datos del ECG. Toda esta información es innecesaria para digitalizar finalmente la parte que nos interesa de la imagen, que es la señal.

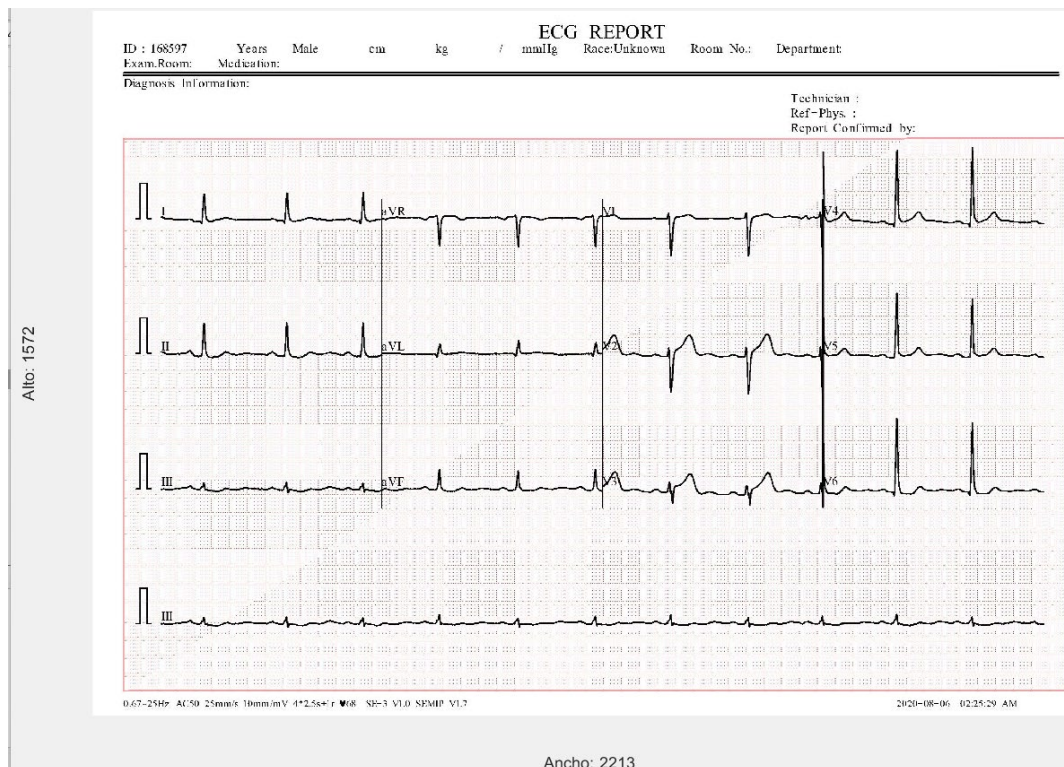


Ilustración 31 Imagen ECG Base de Datos

Finalmente, se ha escogido esta base de datos, ya que todas las imágenes tienen un tamaño similar 1572 x 2213 (dimensiones aproximadas imágenes base de datos), aunque mediante procesados posteriormente se realizará un reescalado de las imágenes para trabajar con todas las imágenes con las mismas dimensiones. Este reescalado es importante debido a que, al tener todas las imágenes del mismo tamaño, tenemos los datos de todas las imágenes más normalizados permitiéndonos trabajar de manera más efectiva y homogénea, ya que el algoritmo está diseñado en su gran mayoría para imágenes de este tamaño, esto hará que el procesamiento de las imágenes presente una uniformidad en las imágenes.

Reescalado de la imagen

Reescalar una imagen consiste en modificar las dimensiones de una imagen, es decir, cambiar su ancho y alto, para ajustarlos a un tamaño específico diferente.

Debido a que los ECG pueden variar en longitud, se desarrolló un procedimiento de cambio de tamaño para garantizar que todas las imágenes se ajusten a un tamaño uniforme. El motivo principal para realizar este reescalado se debe en gran medida a que trabajamos con los píxeles de la imagen en relación con la cuadrícula y el trazo del

ECG. Por lo tanto, resulta interesante que todas las muestras en nuestra base de datos tengan el mismo número de píxeles

Para realizar este reescalado de imagen, tomamos como punto de referencia de cambio un eje (en este caso el Y), y para calcular el reescalado del otro eje, mantenemos la relación de aspecto que teníamos en la imagen original para no alterar las proporciones entre la altura y la anchura de la imagen. De este modo evitamos que se produzcan efectos indeseables, como distorsión de la imagen, pérdida de información relevante o tener un aspecto inusual.

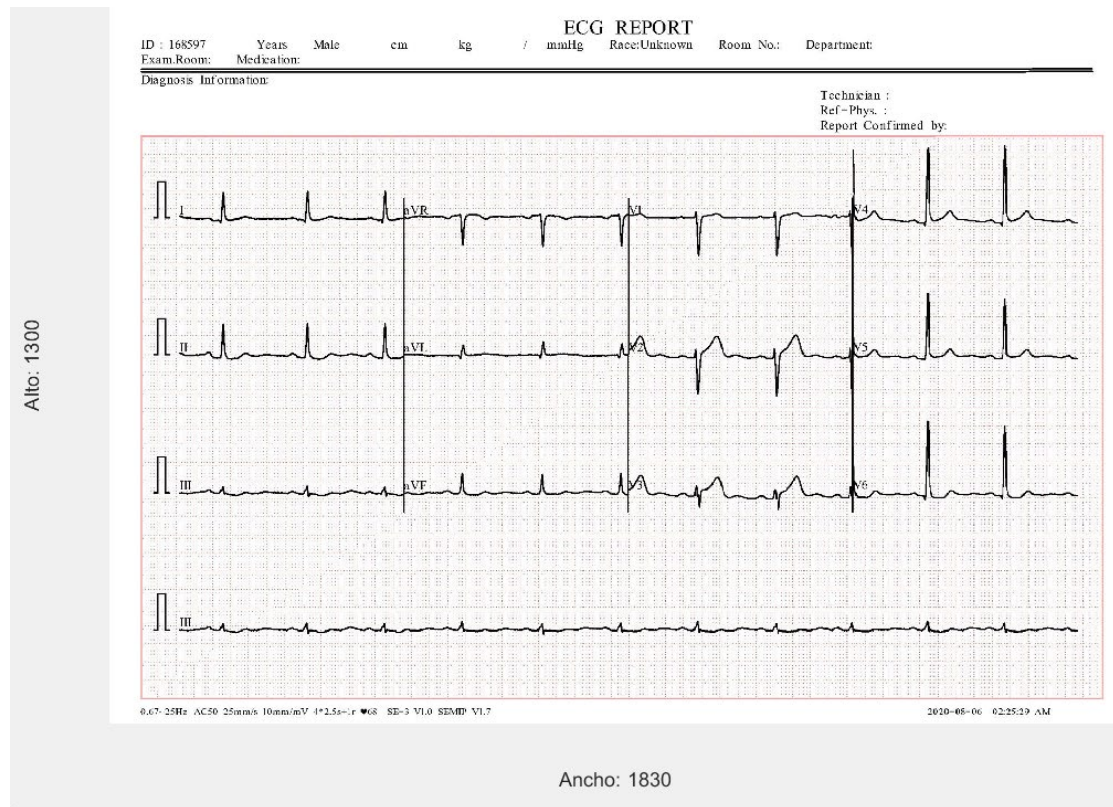


Ilustración 32 Imagen reescalada a 1830 x 1300

Se puede apreciar en los márgenes tanto de la ilustración 31 como la 32 que el tamaño de la imagen (en píxeles) ha disminuido, pero la imagen sigue siendo la misma sin sufrir estos efectos indeseables.

Redimensionado de la imagen

Debido a que la imagen tiene una cantidad de información irrelevante para nosotros a la hora de digitalizar un electrocardiograma (Datos del paciente, número de identificación, fecha, peso, altura), se realiza un redimensionado de la imagen mediante la función “imcrop” de Matlab. Esta función desarrollada en Matlab puede trabajar de dos maneras distintas para nuestro algoritmo, puede trabajar de manera manual o automática, según se adecue a las necesidades de cada electrocardiograma.

- Uso de “imcrop” utilizando coordenadas específicas para el recorte de la imagen. Este método toma dos argumentos, uno de ellos la imagen que se desea redimensionar y otro un vector que especifica la región que se desea recortar. Para este caso se ha seleccionado un vector el cual nos deja una imagen como la siguiente.

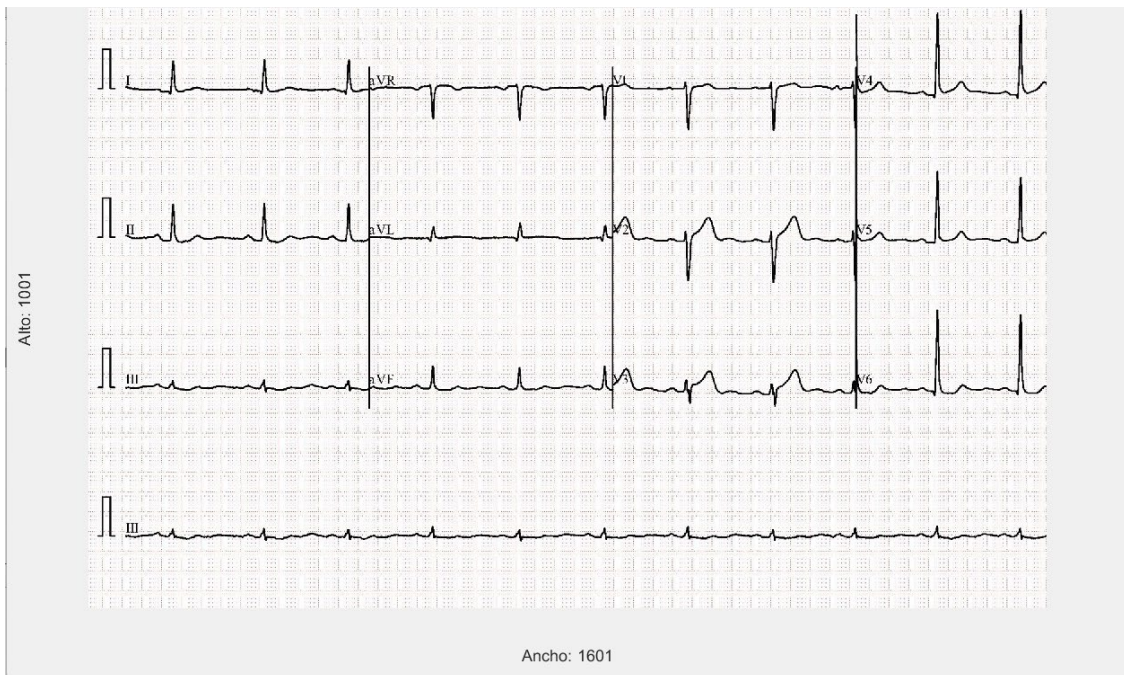


Ilustración 33 Imagen Redimensionada por coordenadas

- Utiliza "imcrop" mediante la selección con el cursor. Aunque esta función requiere un enfoque más manual, te brinda la capacidad de abordar las necesidades específicas de cada electrocardiograma. Al ejecutar esta función, se abre una ventana gráfica que te permite seleccionar la región que desees recortar de la imagen. Esto otorga una mayor flexibilidad y adaptación a tus ECG.



Ilustración 34 Imagen redimensionada por selección cursor

Obteniendo como resultado final la imagen recortada de la parte seleccionada con el cursor (Azul).

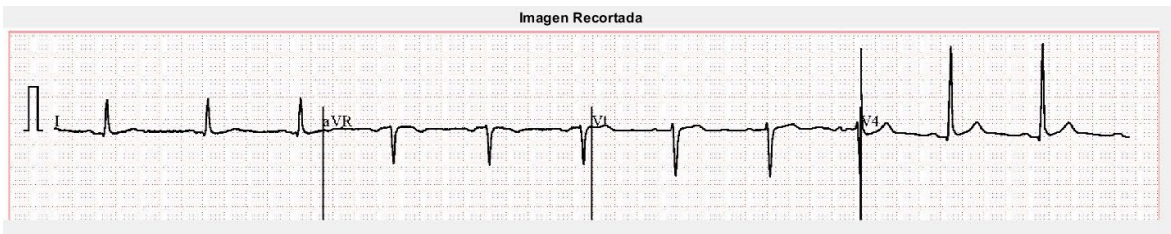


Ilustración 35 Imagen redimensionada

Con este procesado, conseguimos eliminar zonas de la imagen original que no aportaban ningún tipo de información relevante a la hora de la extracción de la señal de ECG.

Corrección Luminosidad

La corrección de luminosidad en Matlab es un procesado que se le aplica a la imagen para corregir, ajustar o modificar los niveles de brillo de la imagen seleccionada, de esta manera seremos capaces de mejorar la calidad de la imagen o corregir problemas de luminosidad.

El ajuste de brillo ajusta los valores de píxeles de una imagen para mejorar los detalles, reducir las sombras o equilibrar la exposición. Esto resulta útil si la imagen es demasiado oscura o demasiado brillante.

Gracias a la toolbox de Matlab que hemos desarrollado, podemos llevar a cabo diversas mejoras de luminosidad mediante los métodos que hemos implementado. Algunos de estos métodos incluyen ajuste de contraste, corrección gamma y ecualización del histograma. A continuación, describiremos cada uno de ellos en detalle.

- **Ecualización de histograma:** La ecualización de histograma es considerada una técnica de procesamiento de imágenes que se utiliza para mejorar el contraste de una imagen redistribuyendo las intensidades de los píxeles de manera uniforme en todo el rango de intensidad. Este procesado se ha descartado ya que obtenemos un resultado completamente contrario a lo deseado, al redistribuir los píxeles negros por toda la imagen, oscurecemos la parte del fondo

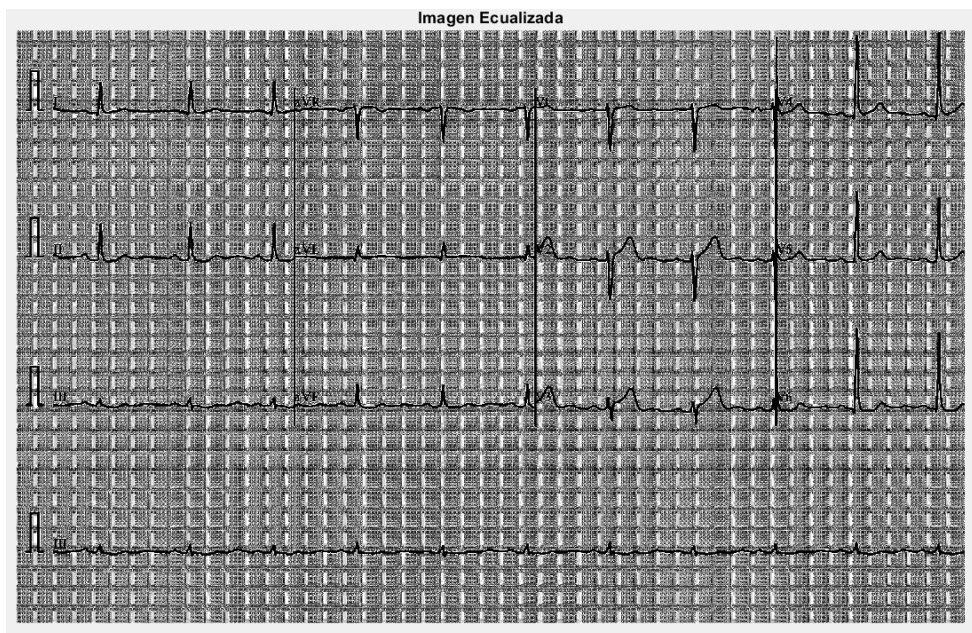


Ilustración 36 Imagen ecualizada

- Corrección gamma:** Es una técnica de procesamiento de imágenes, que ajusta la relación entre la intensidad de la luz de entrada y la intensidad de la luz de salida. Lo más característico de esta corrección es, que se trata de una función no lineal, lo que significa que la diferencia entre la entrada y la salida no sigue una progresión constante. En este caso utilizaremos este procesado de imagen para aclarar la imagen por lo que utilizaremos un valor de gamma por debajo de 1, en este caso será “ $\gamma = 0.5$ ”. Esto hará que se aumente el contraste en las zonas que son más claras y disminuye el contraste en las zonas más oscuras. Para realizar esta corrección gamma sobre la imagen nos apoyaremos en la función de Matlab “`imadjust`” cuya finalidad es modificar el mapeo de intensidad de los píxeles de una imagen, esto puede ayudarnos a la hora de extraer la señal debido a que puede mejorar o resaltar características de interés en la imagen

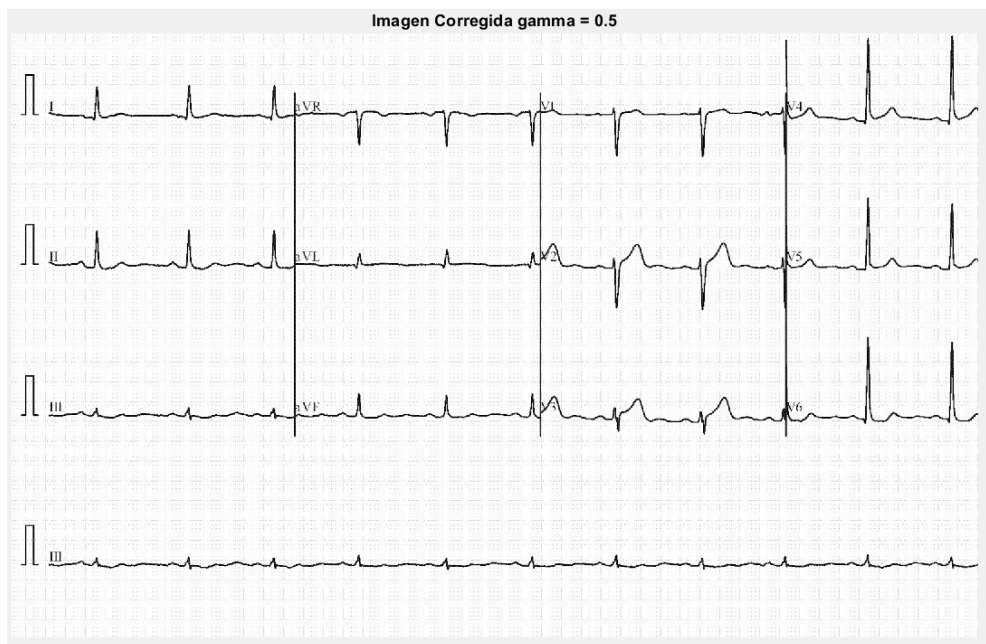


Ilustración 37 Imagen corrección gamma = 0.5

- Ajuste de contraste:** En mi función de la corrección de luminosidad de mi toolbox de Matlab aplico un ajuste de contraste a la imagen ya modificada anteriormente por la corrección gamma, ya que esto permite aplicar un ajuste de contraste específico en un rango deseado de detalles en la imagen sin afectar a otras zonas, de esta manera se puede controlar con precisión que parte del rango de intensidades se modifica.

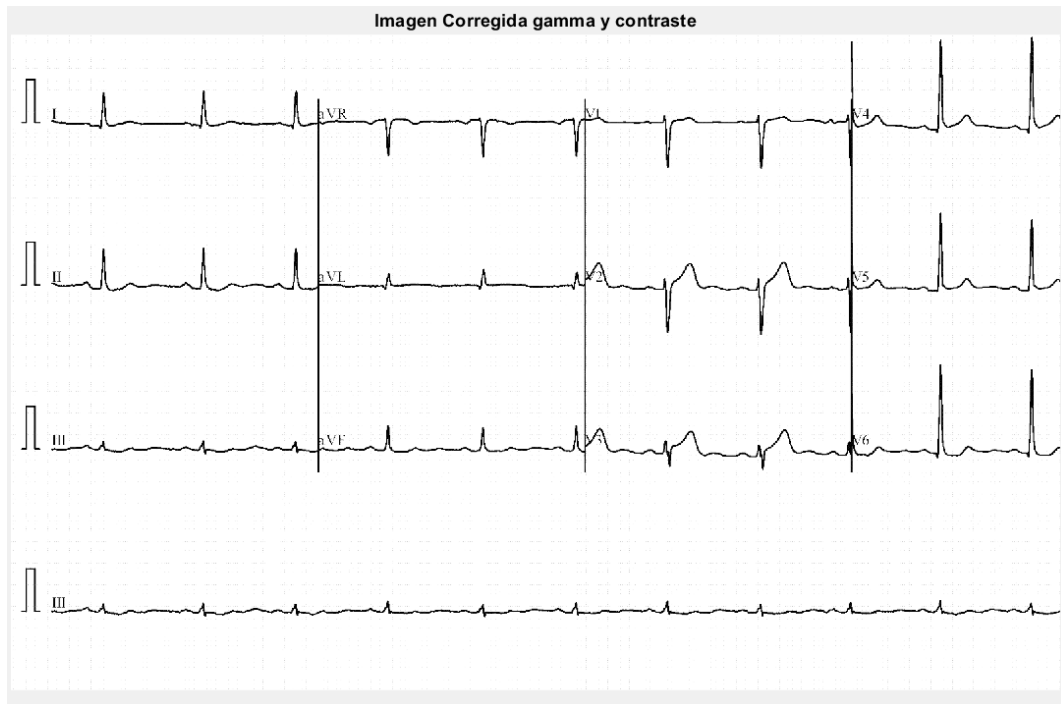


Ilustración 38 Imagen corregida a nivel de luminosidad

La aplicación de ambas correcciones generalmente producirá una imagen con un contraste mejorado y detalles más visibles en las áreas que desea resaltar. La corrección gamma le permite aclarar u oscurecer toda la imagen, mientras que el ajuste de contraste le permite enfatizar detalles en ciertos rangos de intensidad. Esto es realmente interesante para mi proyecto debido a que hemos conseguido resaltar lo que sería la parte de la señal de la imagen, eliminando gran parte del fondo, que será eliminado posteriormente.

Binarización, Identificación y almacenamiento de contornos grandes y pequeños

En este apartado vamos a comentar el funcionamiento de la función desarrollada en Matlab “Contorno_senal” la cual se basa en binarizar la imagen obtenida de realizar la corrección de luz en el apartado anterior, a partir de esa imagen binarizada aplicando la función en Matlab de `bwboundaries` conseguiremos extraer los contornos de la imagen y almacenarlos en grandes o pequeños.

A continuación, se profundiza más lo comentado en el párrafo anterior.

- **Binarización de la imagen:** Este procesado de imagen consiste básicamente en convertir los píxeles de una imagen en escala de grises, en valores binarios 0 o 1, para representar las zonas mayor interés y de menos interés. Esta función reemplaza todos los valores por encima del umbral determinado globalmente con 1 y todos los demás valores con 0. Este umbral del que se habla es el encargado de separar los píxeles en dos categorías, los que están por debajo del umbral y los que están por encima del umbral, por lo que solo se podrán tener valores de umbrales definidos entre 0 y 1. Para el desarrollo de esta APP se ha trabajado aplicando dos tipos de umbrales:

A continuación, se mostrará una comparativa entre ambos procesados y compararemos resultados para ver cuál de ellos nos interesa más para obtener el resultado más preciso

- **Umbral configurable:** Este valor representa la intensidad que hay de separación entre los píxeles de interés de los que no son. Este valor es definido manualmente de cara a las necesidades de cada uno. Para las necesidades de este ECG se ha establecido el valor en 0.7. El umbral de "0.7" se emplea para establecer qué intensidad de píxeles en la imagen original será clasificada como blanco y cuál como negro. En esta situación, se designará como blanco a cualquier píxel con una intensidad superior a 0.7, mientras que los píxeles con una intensidad igual o inferior a 0.7 se categorizarán como negros en la imagen binaria resultante. Este valor es ajustable y se definirá según las necesidades de la muestra que usemos.

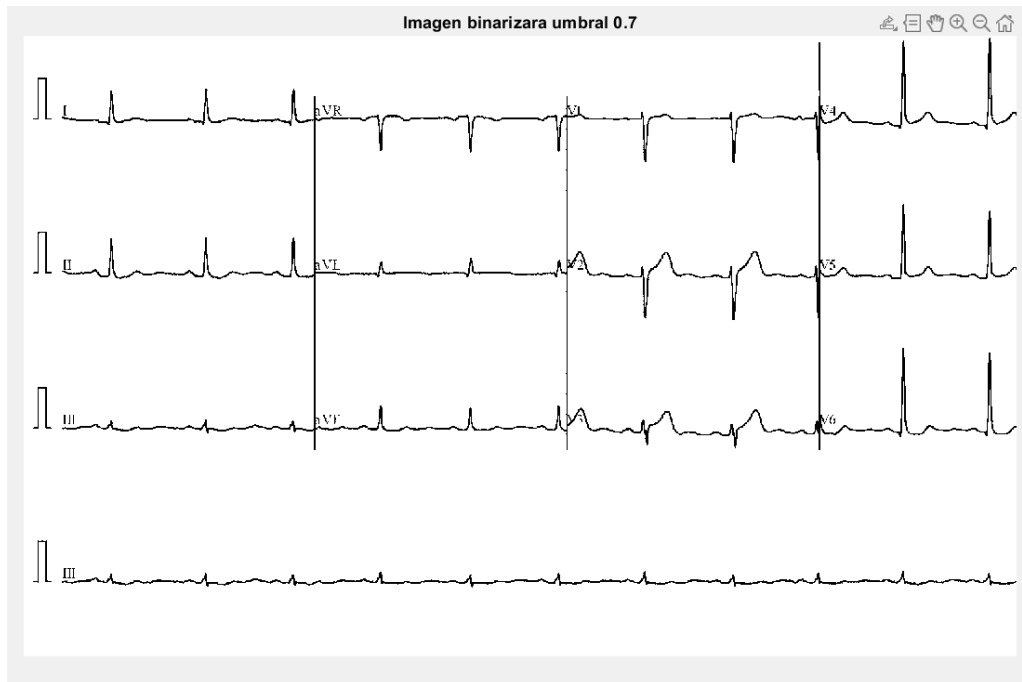


Ilustración 39 Imagen binarizada umbral 0.7

- **Nivel de Umbral por algoritmo de Otsu:** Este valor consiste en determinar un umbral óptimo de manera automática, sin tener la necesidad de indicar un umbral de manera manual como he realizado anteriormente. El algoritmo de Otsu se emplea en el procesamiento de imágenes para llevar a cabo la segmentación de una imagen en dos regiones (objetos y fondo), al determinar un umbral óptimo que maximiza la varianza entre dichas clases. Para ello Matlab tiene desarrollado una función llamada “graythresh”, la cual tiene como input de entrada la imagen en escala de grises, calculando el umbral más óptimo para esta imagen. Este algoritmo de Otsu, se ha implementado por mi parte, independientemente de tener una función de Matlab que lo realizase, para así comprobar que el resultado es el correcto y profundizar los conceptos del funcionamiento de este algoritmo. El valor obtenido para esta imagen es de 0.53.

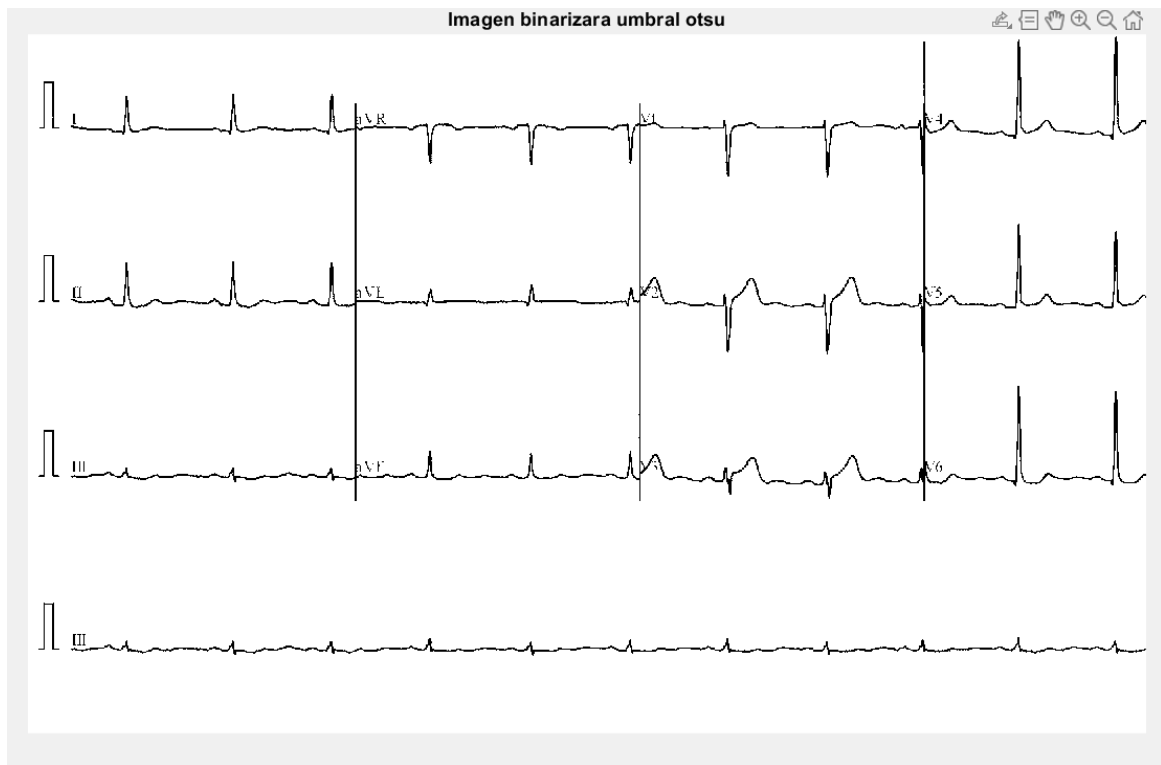


Ilustración 40 Imagen binarizada umbral Otsu

Una vez realizado el binarizado de la imagen mediante el algoritmo de Otsu, procedemos a intentar identificar los contornos encontrados en la imagen binarizada. Mediante esta búsqueda de los contornos, vamos a intentar separar contornos en grandes y pequeños, siendo los grandes, toda la parte de la señal y los pequeños detalles de la imagen que nos gustaría eliminar.

Para ello vamos a trabajar con la función en Matlab conocida como “bwboundaries”. Esta función se utiliza para encontrar los contornos de una imagen binaria, siendo los contornos las áreas donde la imagen tiene un cambio significativo de intensidad. Para ello se define un umbral de área para diferenciar entre los contornos grandes y los contornos pequeños. Entrando en profundidad sobre el desarrollo de esta función se crea un bucle en el cual va iterando a través de todos los contornos que se han encontrado y según sea el tamaño de su área se van distribuyendo en grandes o pequeños, teniendo un resultado tal que así:



Ilustración 41 Imagen contornos grandes

Estos contornos serán útiles para posteriormente eliminar el fondo de la imagen, ya que se realizará un procesado de imagen para que se elimine toda la información que no esté almacenada en la variable de contornos grandes.

En la siguiente imagen podemos apreciar que ha sido detectado como bordes pequeños, esto nos sirve para eliminar algunas de las trazas que aparecían en la imagen, pero no aportaban ninguna información relevante para la extracción de la señal de ECG.

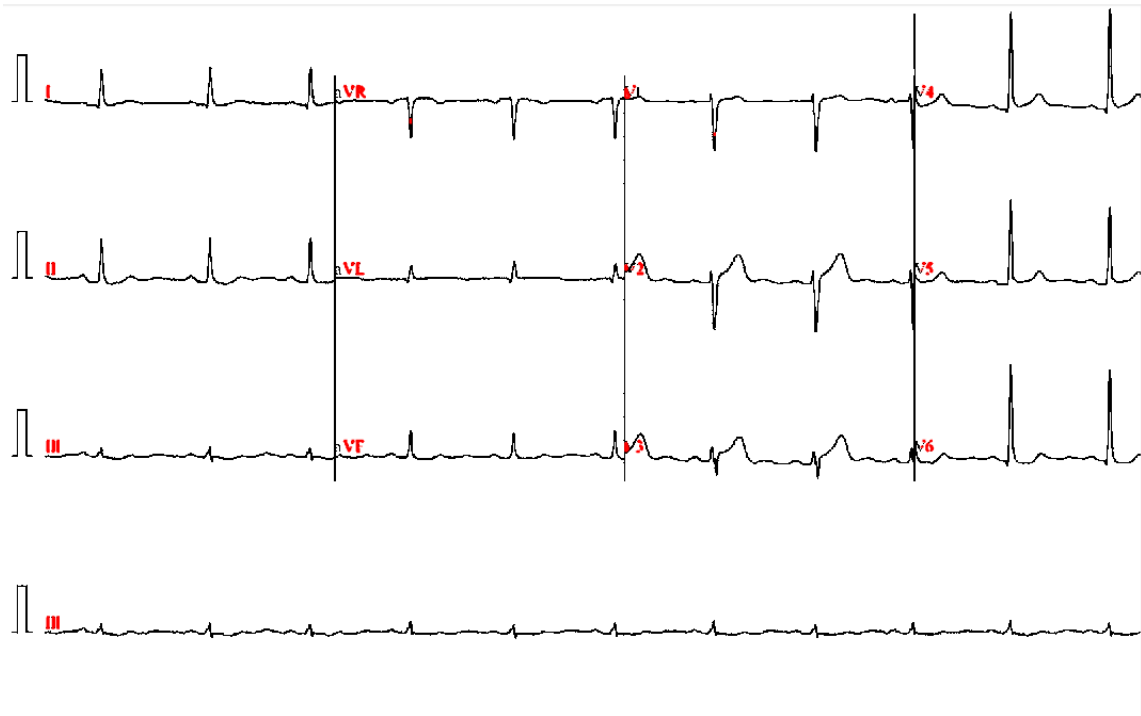


Ilustración 42 Imagen contornos pequeños

Eliminar fondo

La eliminación del fondo de una imagen es un proceso básico de procesamiento de imágenes que tiene como objetivo separar el objeto de interés en una imagen de su entorno. Este procesado tiene como finalidad mejorar la precisión en el reconocimiento y seguimiento de los objetos, así como la extracción de características importante, como en nuestro caso es la señal de ECG.

Para realizar este procesado de imagen se han realizado pruebas hasta obtener el mejor resultado posible, para ello hemos aplicado varias técnicas de eliminación de fondo, como, por ejemplo, a través de procesados morfológicos o eliminando el fondo mediante los contornos.

A continuación, se mostrará una comparativa entre ambos procesados y compararemos resultados para ver cuál de ellos nos interesa más para obtener el resultado más preciso.

- **Eliminación de fondo por contornos:** Para este procesado vamos a utilizar los contornos obtenidos con el procesado anterior. En este caso se tratará de

eliminar el fondo de la imagen para poder tener la señal de la manera más limpia posible para posteriormente pasarla a 1D. Para ello vamos a crear una máscara con los valores de los contornos grandes, ya que son los contornos que representan la señal. El siguiente paso a ejecutar sería crear una matriz del tamaño de la imagen llena de 0, dado que los píxeles del fondo en toda la imagen son 0, esto básicamente "anula" los píxeles correspondientes en la imagen binaria original. El próximo paso es eliminar el fondo de la imagen original. Esto se hace multiplicando la imagen binaria original por la imagen de fondo.

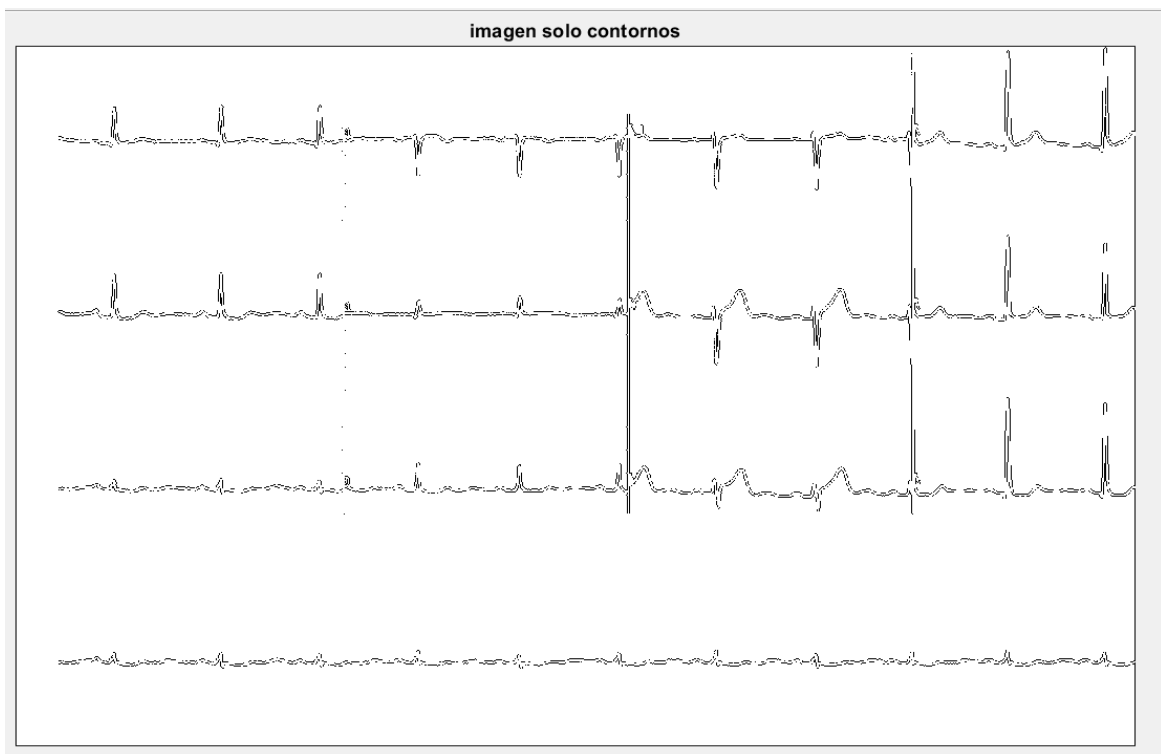


Ilustración 43 Eliminar fondo por contornos

- **Eliminación mediante procesado morfológico:** El procesamiento morfológico es un método de procesamiento de imágenes que se basa en la forma y estructura de los objetos en una imagen en lugar de en sus valores de intensidad. Se utiliza para analizar y procesar características de forma en imágenes como: Contornos, texturas o regiones.

Para ello Matlab trabaja con varios tipos de contornos, así de esta manera podrás definir de mejor manera la parte de la imagen que no deseas eliminar. Los contornos más significativos de Matlab son los siguientes:

```
se = strel('rectangle', [m n]); % Elemento Estructural Rectangular
se = strel('disk', radio); % Elemento Estructural Disco o Círculo
se = strel('diamond', tamaño); % Elemento Estructural Diamante
se = strel('square', tamaño_cuadrado); % Crear un elemento estructurante cuadrado
se = strel('arbitrary', matriz); % Elemento Estructural Personalizado
```

Ilustración 44 Elementos estructurales Matlab

Una vez seleccionamos que tipo de contorno que se adecua más a nuestras necesidades, en nuestro caso utilizaremos el elemento estructural cuadrado, con un tamaño de cuadrado de 2.

En Matlab, se puede utilizar diferentes tipos de elementos estructurantes para realizar operaciones morfológicas, como erosión, dilatación, apertura y cierre. A continuación, se mostrarán algunas de las muestras que se han utilizado y valoraremos cual tiene un mejor resultado.



Ilustración 45 Imagen Dilatada



Ilustración 46 Imagen eroida

En la ilustración 41, podemos observar una imagen dilatada, esto se utiliza para agrandar los objetos de una imagen. se coloca el elemento estructurante en cada píxel de la imagen, pero el píxel central de la imagen de salida se establece en blanco si al menos un píxel cubierto por el elemento estructurante es blanco, mientras que la erosión (procesado ilustración 42) se utiliza para intentar eliminar los detalles más pequeños de la imagen, en este caso al haber realizado más procesados anteriormente el objeto más grande es la señal, junto con algunos detalles más, debido a esto obtenemos la señal junto con esos pequeños detalles, con tanto resalte. Esta solución se tomará como válida y posteriormente será convertida en vector 1D para obtener la señal del ECG.

A continuación, se muestra una imagen comparativa entre utilizar un elemento estructural de tamaño 2 (utilizado) y un tamaño de 4. Como podemos apreciar al aumentar el tamaño del elemento perdemos información relevante de la señal debido a que no identifica bien esos contornos al tener un tamaño mayor

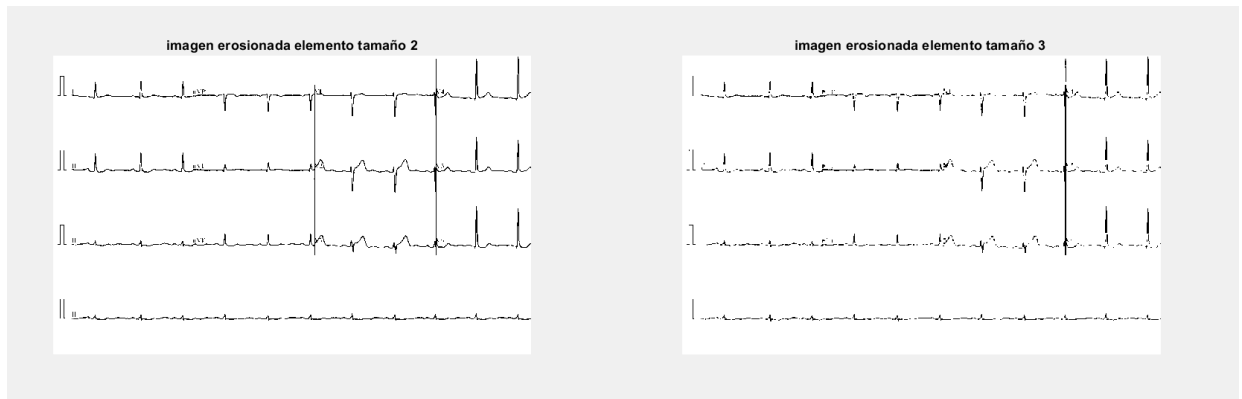


Ilustración 47 Comparativa tamaño elemento estructural

Otro de los métodos que hemos desarrollado para eliminar el fondo, sería mediante procesado morfológico de apertura y cerrado (función en Matlab `Imopen` e `Imclose`) El procesamiento morfológico es una técnica importante para trabajar con imágenes en blanco y negro. Se basa en conceptos de conjuntos y matemáticas para entender y cambiar las formas y estructuras en estas imágenes. En este caso trabajaremos también con elemento estructural cuadrado de tamaño dos, posteriormente una vez calculado este elemento, gracias a la función `Imopen` combinamos unas operaciones de erosión que van seguidas de una operación de dilatación, ya que esto nos ayudará a eliminar detalles finos, eliminar ruido y separar algunos objetos que estén entre sí muy cerca. El resultado obtenido de trabajar con este método será la entrada para otro, el cual se basa en realizar iteraciones con la función `Imclose`, hasta que los elementos entre una imagen y otra tengan poca variación. Esta iteración se realizará hasta que el número de píxeles sea diferente al valor de umbral que se ha establecido, en este caso será 30, ya que de esta manera obtenemos un buen resultado. En caso de trabajar con otra base de datos este valor es ajustable según las necesidades de cada ECG.



Ilustración 48 Imagen cerrada iteración 1

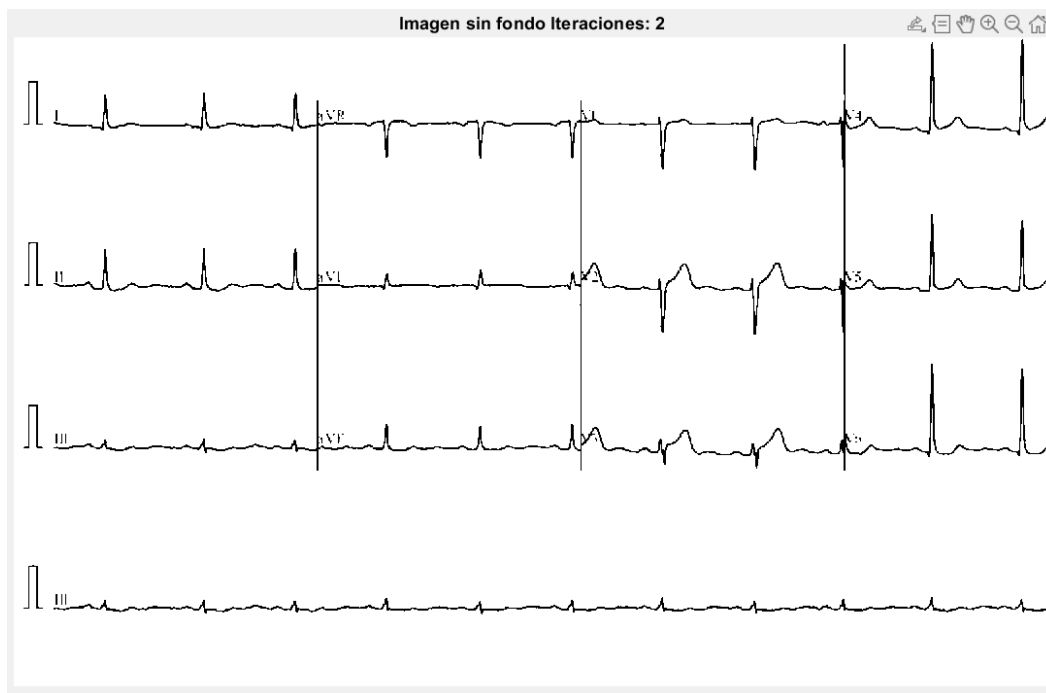


Ilustración 49 Imagen resultado iteraciones

Como se puede apreciar en ambas ilustraciones, la diferencia entre una y otra es mínima debido a que el método solo itera 2 veces sobre la función de Matlab `Imclose`. El resultado final que obtenemos se considera valido y será traspasado posteriormente a vector 1D para comparar con los resultados del anterior y ver cuál de ellos tiene menos ruido.

Separación señales

El siguiente paso de nuestro programa consiste en separar las distintas señales que hay representadas en el papel del electrocardiograma, gracias a esto a la hora de realizar la conversión de imagen a vector será más fácil ya que se realizará esta conversión realizando un escaneo de columnas donde se buscan que valores de los pixeles valen 1.

Este procesado se basa en recortar la imagen mediante Imcrop para obtener como resultado final, 4 imágenes independientes en las cuales, tenemos una parte de la señal en cada una.

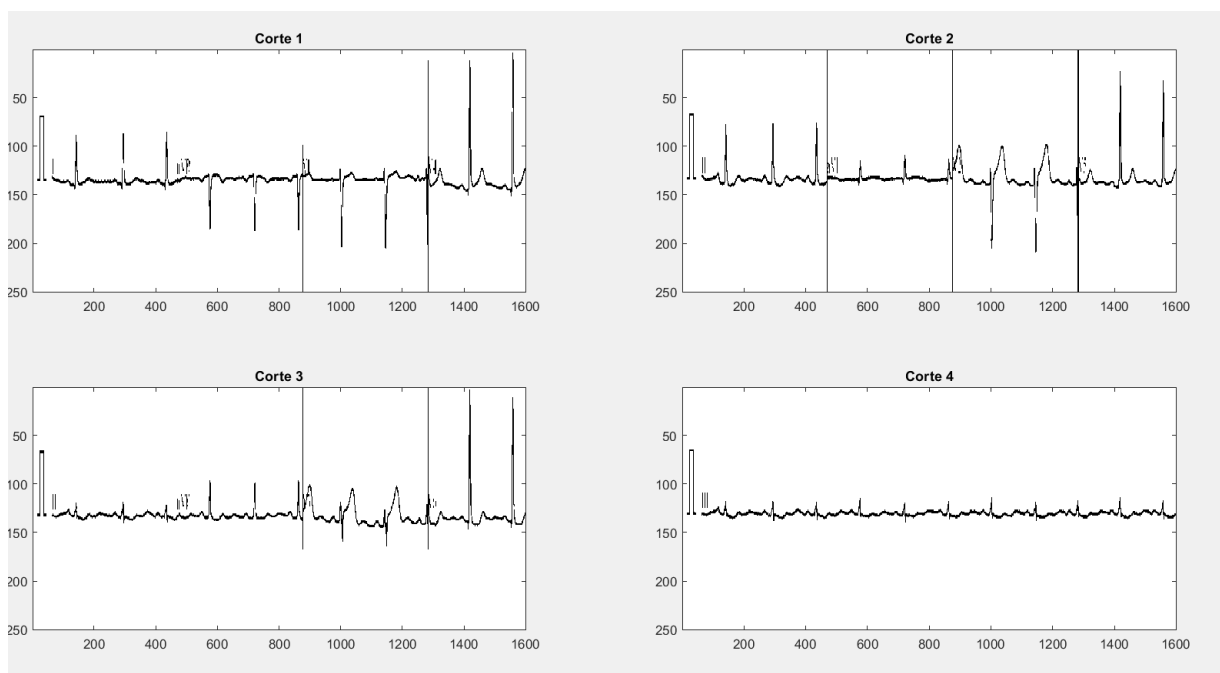


Ilustración 50 Separación señales

Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo a la hora de realizar un estudio sobre un electrocardiograma a papel, tiene una importancia muy elevada, ya que permite obtener la información necesaria para saber cuántos pixeles transcurren por cada unida de tiempo o de amplitud de forma que se pueda a partir de coordenadas espaciales, obtener información del tiempo del ECG (ritmo cardíaco, separación entre picos) A continuación, se van a comentar brevemente, algunos de los aspectos claves que podemos obtener gracias a la frecuencia de muestreo.. Otro de los aspectos claves a tener en cuenta, sería el diagnóstico clínico, una frecuencia de muestreo inadecuada puede

distorsionar la señal y llevar a diagnósticos incorrectos, además otra diagnosis que se puede obtener gracias a esta frecuencia de muestreo, sería la interpretación de arritmias.

Para aplicar esta función, nos hemos basado en 2 métodos, uno de ellos se trata del método desarrollado por el grupo de investigación al que pertenece el tutor y que el trabajo está pendiente de publicación, este método ha sido traspasado de Python a Matlab y será estudiado con más detalle posteriormente. Debido a que este método no se adecuaba bien a esta base de datos, se ha diseñado otro método para obtener la frecuencia de muestro para la base de datos que hemos utilizado para este proyecto. En nuestra APP se podrá obtener este valor mediante los dos métodos, para en caso de usar otra base de datos, ver cuál de ellos tiene un resultado más beneficioso.

- **Método desarrollado en la APP del grupo de investigación:** Este método hace referencia a la función del anexo `estimación_periodo_muestreo`. Para el desarrollo de este método, vamos a obtener en primer lugar el tamaño de la imagen (número de filas y columnas). Una vez tengamos este tamaño, vamos a realizar una generación de números aleatorios para posteriormente realizar el análisis de estas líneas que han sido seleccionadas aleatoriamente. El análisis de estas líneas se realiza con intención de ir encontrando los picos más significativos utilizando un umbral definido en la función. Posteriormente se calculará la diferencia entre la ubicación de los picos, se calculará la media y la desviación estándar de estas diferencias y junto con el umbral ya definido, calcularemos el periodo promedio de los de los picos válidos. Este valor podrá ser utilizado para calcular el periodo de muestro, gracias a que conocemos el dato teórico sobre el tiempo que representa cada retícula pequeña, este tiempo es igual a 0.04s. La frecuencia de muestreo se calcula como el inverso del período.

```

%% Periodo muestreo con imagenes
function [Ts,Fs,periodo_medio]= estimacion_periodo_muestreo(imagen_bgr)

[filas, columnas] = size(imagen_bgr);
sondeos=4;

% Generar un vector de números aleatorios entre 0 y 1
numeros_aleatorios = rand(1, sondeos);

% Escalar los números aleatorios al rango de 0 a nfila/2
numeros_escalados = numeros_aleatorios * (filas / 2);

% Redondear hacia abajo los números escalados y convertirlos en enteros
lineas = floor(numeros_escalados);

periodo = [];

for cont_periodo = 1:sondeos
    linea = imagen_bgr(lineas(cont_periodo), :);
    linea_1= im2double(linea);
    [~, locs] = findpeaks(linea_1, 'MinPeakProminence', 0.1);
    % figure(1)
    % findpeaks(linea_1, 'MinPeakProminence', 0.4);
    dif_locs = diff(locs);
    media_dif = mean(dif_locs);
    desv = std(dif_locs);
    umbral_periodo = desv/4;
    periodos_validos = dif_locs(abs(dif_locs - media_dif) < umbral_periodo);
    if numel(periodos_validos) > 0
        periodo = mean(periodos_validos);
    end
periodo_medio = mean(periodo);
Ts = 0.04 / periodo_medio;
Fs= 1/Ts;
end

```

Ilustración 51 Método grupo investigación Frecuencia muestreo

Al ser un método que toma valores de manera aleatoria, en cada ejecución de esta función obtendremos un resultado distinto. El rango de resultados para esta frecuencia de muestreo estará entre 140 y 200, dependiendo del número de sondeos que realicemos.

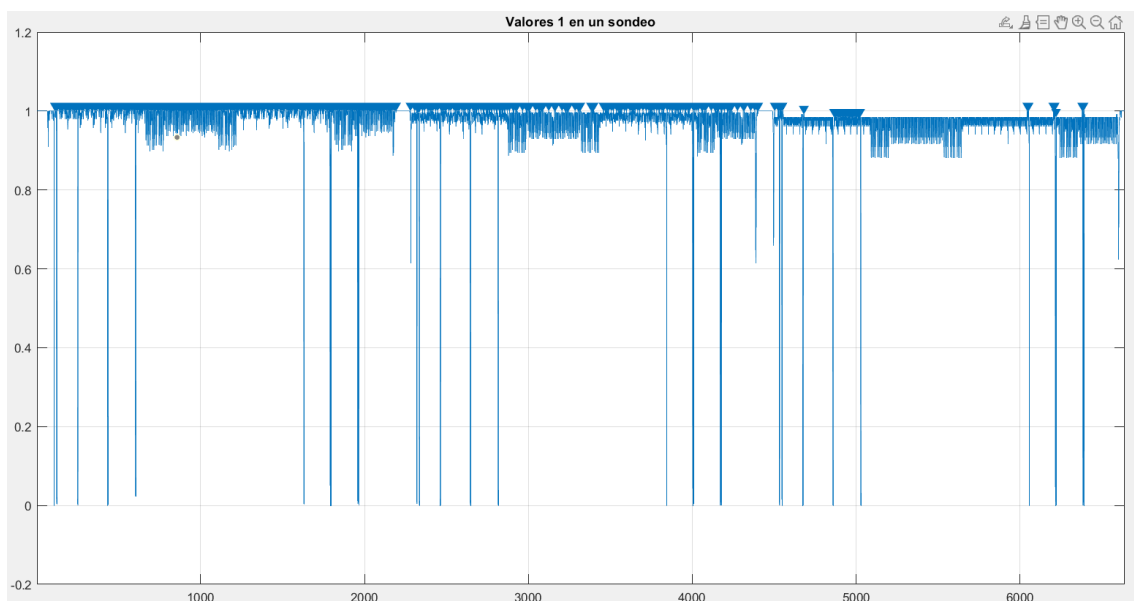


Ilustración 52 Valores pixeles 1 en sondeos

Este método tal y como comentaba anteriormente, no es el más idóneo para nuestra base de datos, ya que toma como imagen retícula otra imagen y busca la cuadrícula grande de los ECG, lo que provoca que se obtengan valores aproximadamente 5 veces más pequeños que el método más exacto que se explicara a continuación. Este método funciona de mejor manera con retículas homogéneas.

- **Método de suma filas y columnas:**

En primer lugar, este método ofrece dos formas de calcular la frecuencia de muestreo. Uno de estos métodos se considera automático, ya que al ejecutar la función se obtiene tanto el período de muestreo como la frecuencia de muestreo. Es importante señalar que este método automático está más adaptado a la base de datos utilizada.

Esta metodología automática se fundamenta en realizar un recorte (Imcrop) con las coordenadas de la imagen en las cuales no aparece ninguna porción de la señal, mostrando únicamente el fondo con cuadrícula. Esto posibilita aplicar el método de suma de filas y columnas para obtener un resultado más preciso. Al evitar cualquier interferencia de valores de señal, al buscar la distancia en píxeles entre las cuadrículas, se obtiene un cálculo más preciso de la frecuencia.

Al emplear este método, se calcula automáticamente el tamaño de la imagen obtenida y, al sumar todas las filas por un lado y todas las columnas por el otro, se puede determinar la distancia en píxeles entre una cuadrícula y otra.

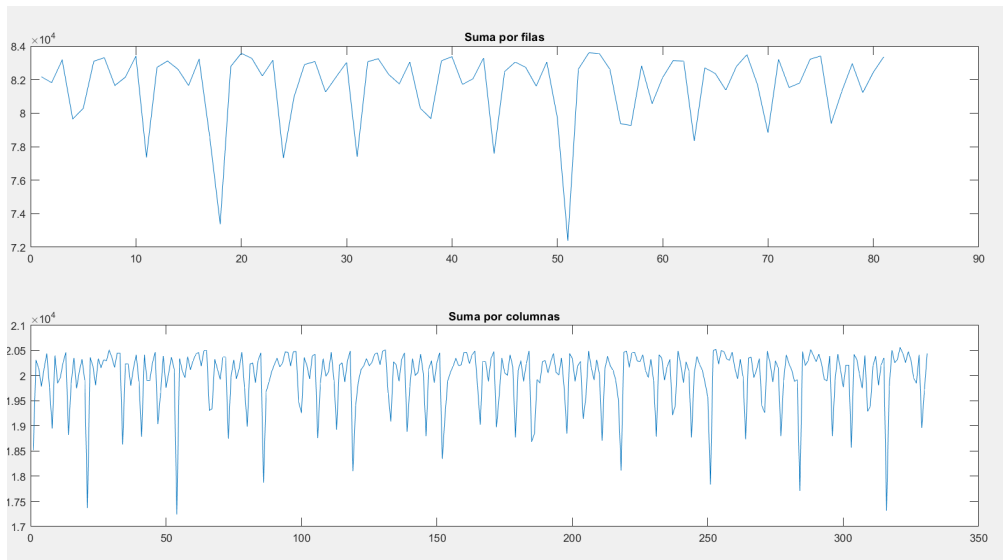


Ilustración 53 Suma filas y columnas

En este caso, al trabajar con cuadrículas, podemos calcularlas tanto por las filas como por las columnas. Como se puede apreciar en la ilustración 49, hay puntos en el gráfico a una distancia constante; estos representan las líneas más gruesas de las cuadrículas en la imagen, es decir, el principio y el final de una cuadrícula. Al calcular la distancia entre dos de estos puntos, obtenemos que, para todas las muestras de esta base de datos la distancia en píxeles entre las cuadrículas es de 33.

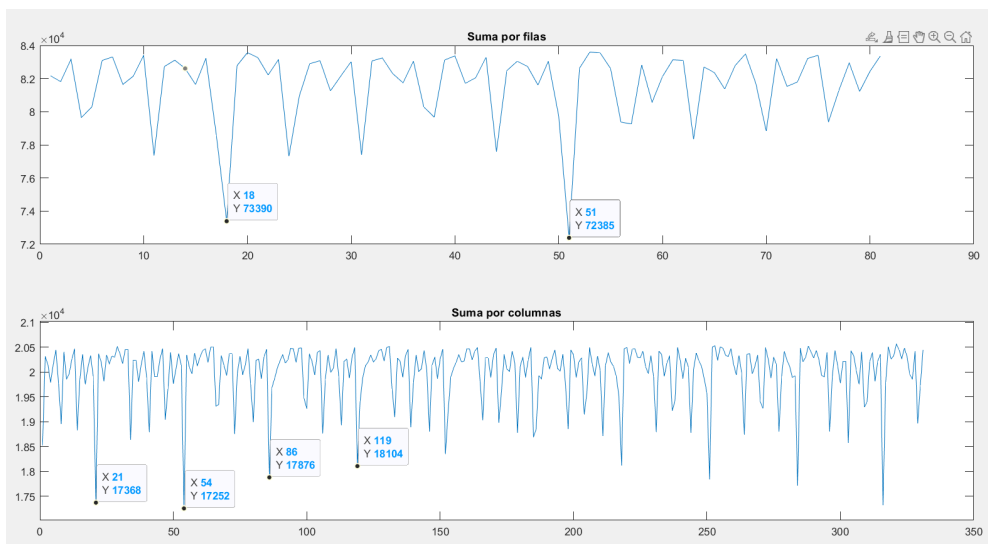


Ilustración 54 Distancia entre cuadrículas en píxeles

Se puede apreciar que la distancia es constante en ambas filas y columnas, siendo esta de 33 píxeles. Una vez determinada esta medida y teniendo en cuenta que el tiempo transcurrido entre cada cuadrícula es de 0.04 segundos, podemos calcular la frecuencia de muestreo dividiendo el número de píxeles por cuadrícula entre el tiempo transcurrido. En el caso de esta base de datos, obtendremos un valor de 825 muestras por segundo.

Por otro lado, tenemos un método manual, el cual se adapta más a cualquier tipo de electrocardiograma, ya que mediante Imcrop, te deja seleccionar la región de la imagen que quieres recortar para calcular la frecuencia de muestreo, aunque una de las instrucciones que se muestran a la hora de recortar esta imagen

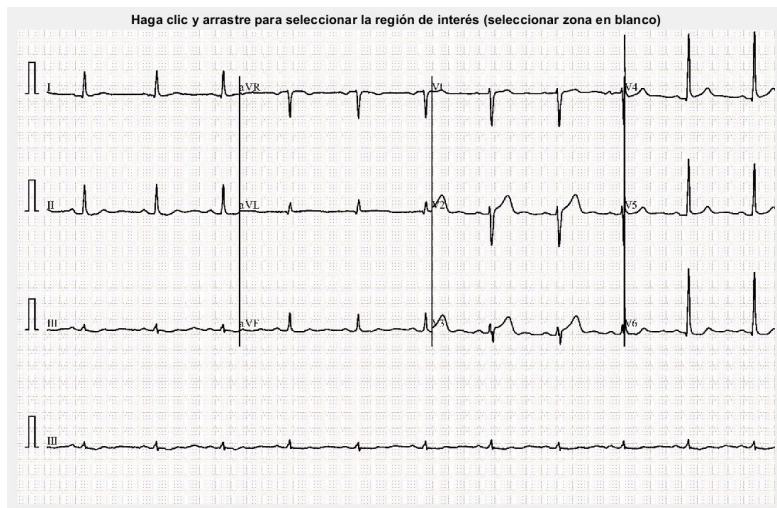


Ilustración 55 Selección de región

Posteriormente se aplicará el mismo proceso explicado en el método anterior para obtener el valor de la frecuencia de muestro. Este método seleccionado se adapta mayoritariamente a cualquier base de datos, ya que al seleccionar manualmente la parte de imagen que más nos interesa, se adapta más a las necesidades de cada ECG en particular.

Conversión imagen a vector

Finalmente, este es nuestro último método aplicado en nuestra digitalización de un electrocardiograma a papel. Este método consiste en obtener una sola matriz unidimensional (vector) en la cual estén registrados todos los valores necesarios para reconstruir la señal del electrocardiograma. Para ello vamos a implementar un método el

cual se basa en la extracción de la señal obtenida y procesada anteriormente. El primer paso sería obtener el tamaño de la imagen (número de filas y de columnas), una vez tenemos estos valores, vamos a recorrer las columnas de la imagen, extrayendo vectores de datos de cada columna. Luego, busca los índices en los que el valor de ese vector sea igual a 0. Si encuentra algún índice en el que el valor sea 0, calcula la mediana de esos índices y la almacena en la posición correspondiente. Esto se realizará a lo largo de toda la imagen buscando que valores sean negros y almacenando en el vector su posición respecto a la línea encontrada.

```
function out = imagen2vector2(senal)
cortes = senal;

num_imagenes = numel(cortes);
out = cell(1, num_imagenes);

for i = 1:num_imagenes
    corte = cortes{i};

    [nfila, ncol] = size(corte);
    ncol = ncol - 4;
    ecg = zeros(1, ncol);
    ecg(1) = -1;

    for cont = 2:ncol
        vector = corte(:, cont);
        inds = find(vector == 0);

        if ~isempty(inds)
            mediana_indices = median(inds);
            ecg(cont) = mediana_indices;
        else
            ecg(cont) = ecg(cont - 1);
        end
    end

    for cont = fliplr(1:(ncol - 1))
        if ecg(cont) == -1
            ecg(cont) = ecg(cont + 1);
        end
    end

    out{i} = zeros(length(ecg), 1);
    out{i}(:, 1) = nfila - ecg;
end
```

Ilustración 56 Pasar imagen a vector

Como resultado final, obtenemos un vector en 1D, en el cual quedan registrados todos los valores calculados con el método mostrado anteriormente. A continuación, se mostrará el resultado final de digitalizar un electrocardiograma a papel mediante el uso de esta APP.

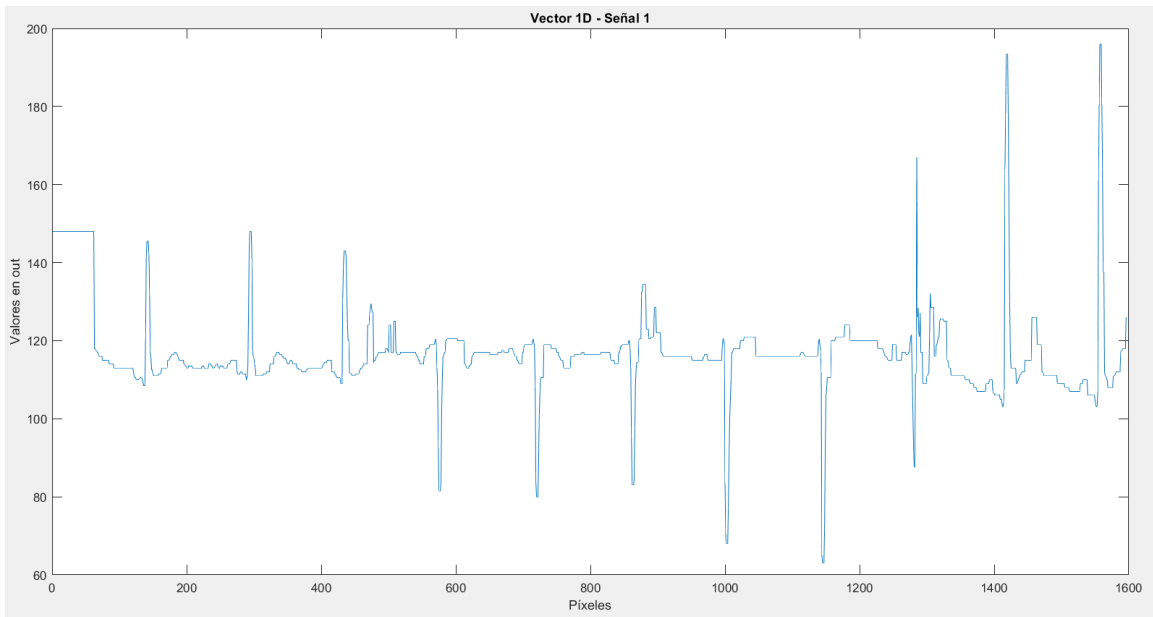


Ilustración 57 Señal 1 digitalizada

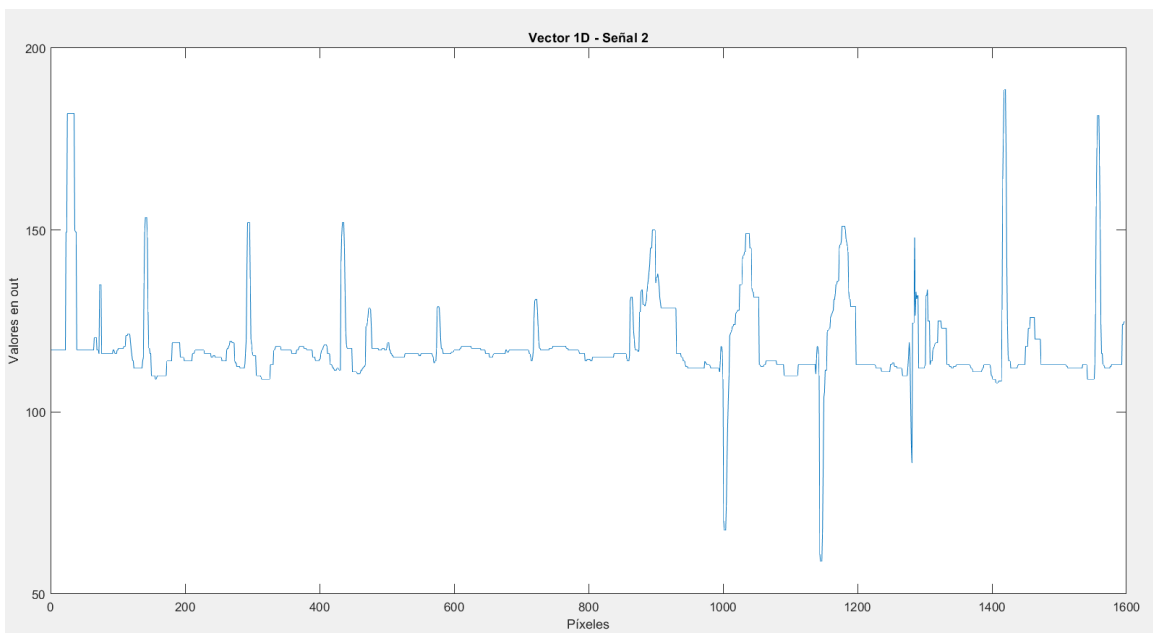


Ilustración 58 Señal 2 digitalizada

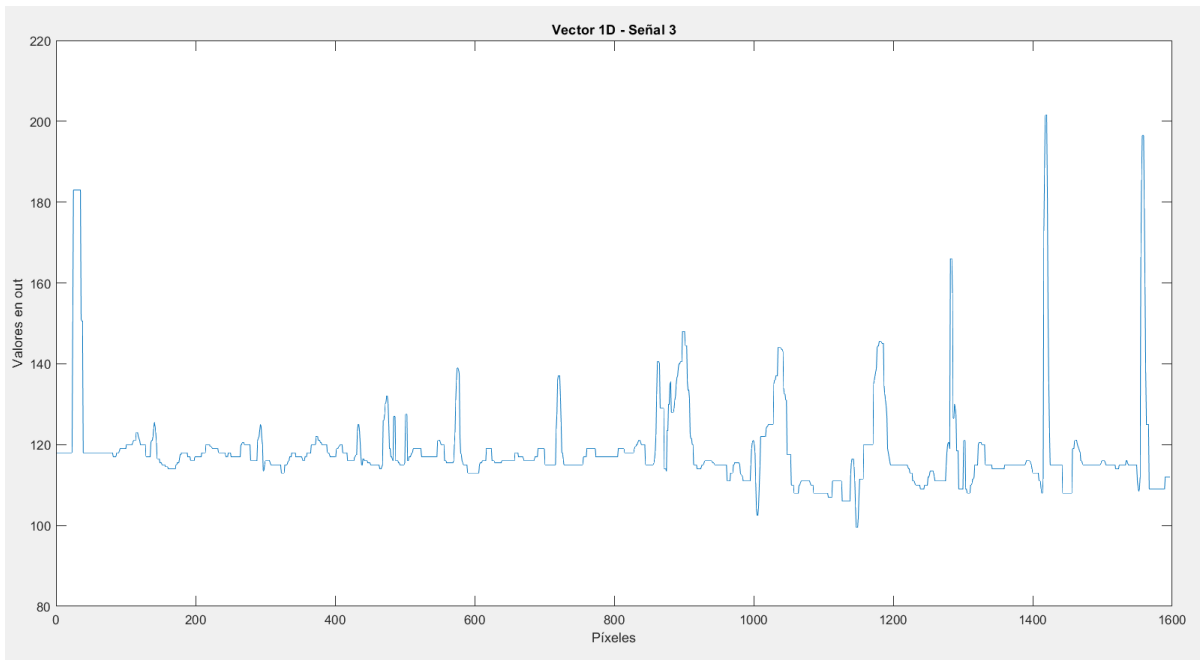


Ilustración 59 Señal 3 digitalizada

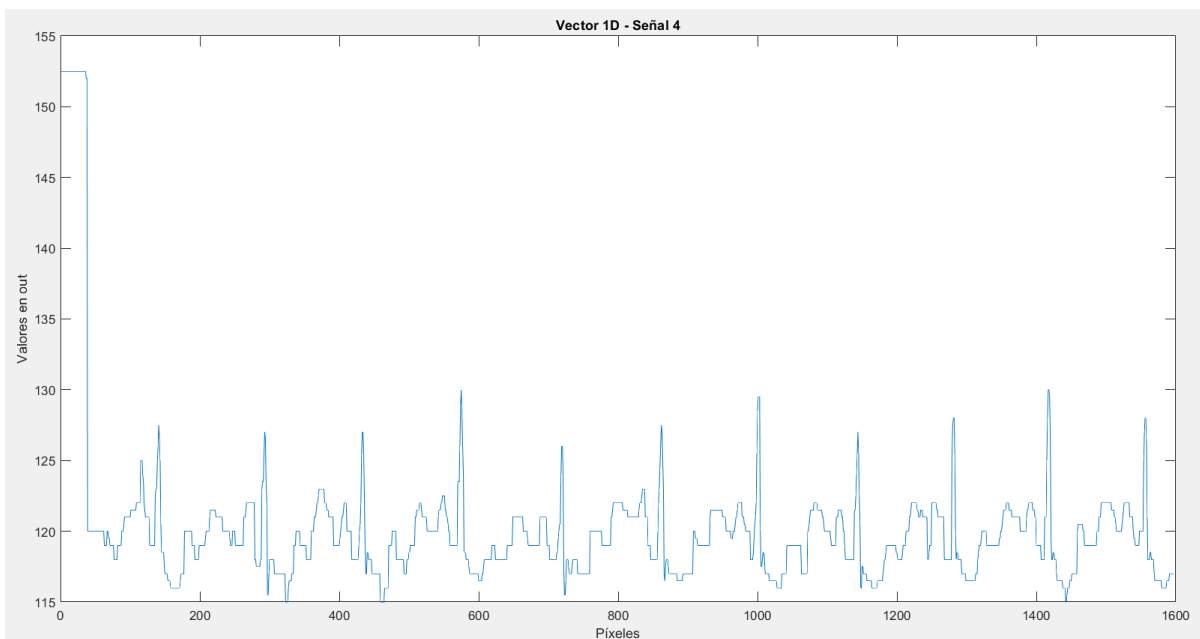


Ilustración 60 Señal 4 digitalizada

APP interactiva

Para finalizar este trabajo de fin de grado, se ha desarrollado en Matlab una aplicación simple, en la cual te permite realizar pruebas con las muestras de la base de datos. A continuación, se mostrará brevemente el funcionamiento de la APP, que además ira acompañada de un video explicativo de cómo usarla.



Ilustración 61 Menú APP

Como se puede observar en la ilustración 61, disponemos de un pequeño menú, en el cual podemos interactuar con los distintos procesados de imagen que hemos desarrollado a lo largo del TFG. Por ejemplo, vamos a mostrar un ejemplo de usar la función de cargar imagen.

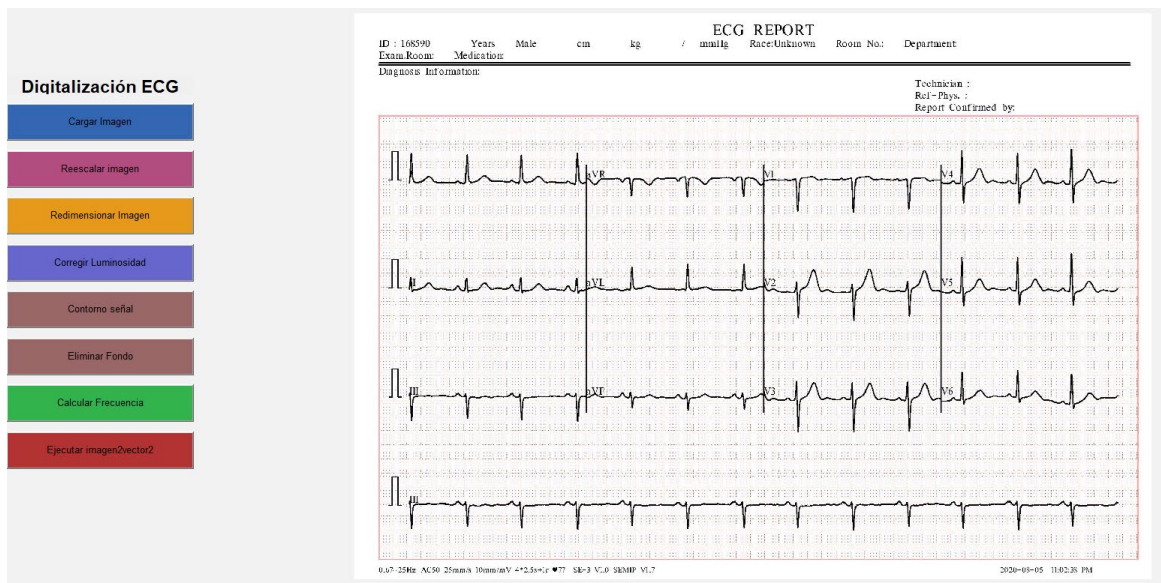


Ilustración 62 Cargar imagen

Otra de las funciones que podemos realizar con esta APP interactiva, es la de redimensionar la imagen para eliminar elementos innecesarios en nuestra imagen. Al ejecutar esta función podremos realizarlo tanto de manera manual como automática, como se explicó anteriormente. Se recomienda utilizar la automática para esta base de datos, ya que los algoritmos se han desarrollado en base a esta base de datos.

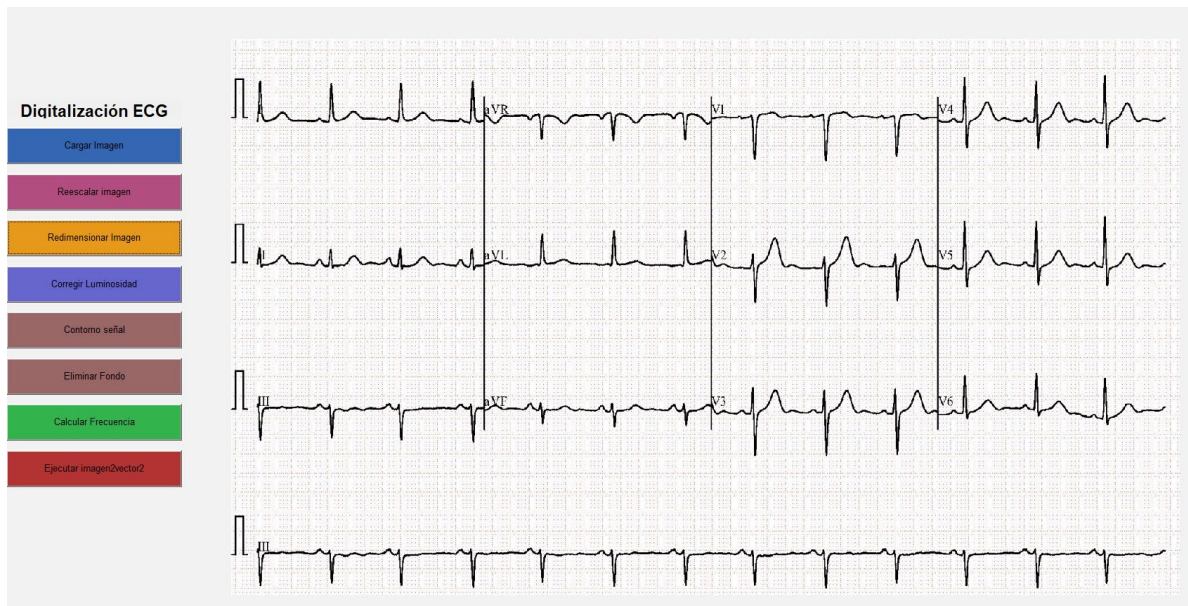


Ilustración 63 Imagen redimensionada

También podemos aplicar una corrección de luminosidad de la imagen para ir eliminando el fondo y resaltando más la señal. Para ello la APP te dará la posibilidad de corregir la luminosidad con un valor de gamma que sea seleccionado por el usuario. El

usuario podrá seleccionar el valor que se adapte mejor a las necesidades de cada ECG. Se ha configurado un valor de 0.7 por defecto, ya comentado anteriormente.



Ilustración 64 Imagen corregida la luz

Otra de las funciones que podemos ejecutar con esta APP interactiva es para calcular cuales son los contornos más significativos de la imagen. Se muestra un ejemplo en la ilustración 65

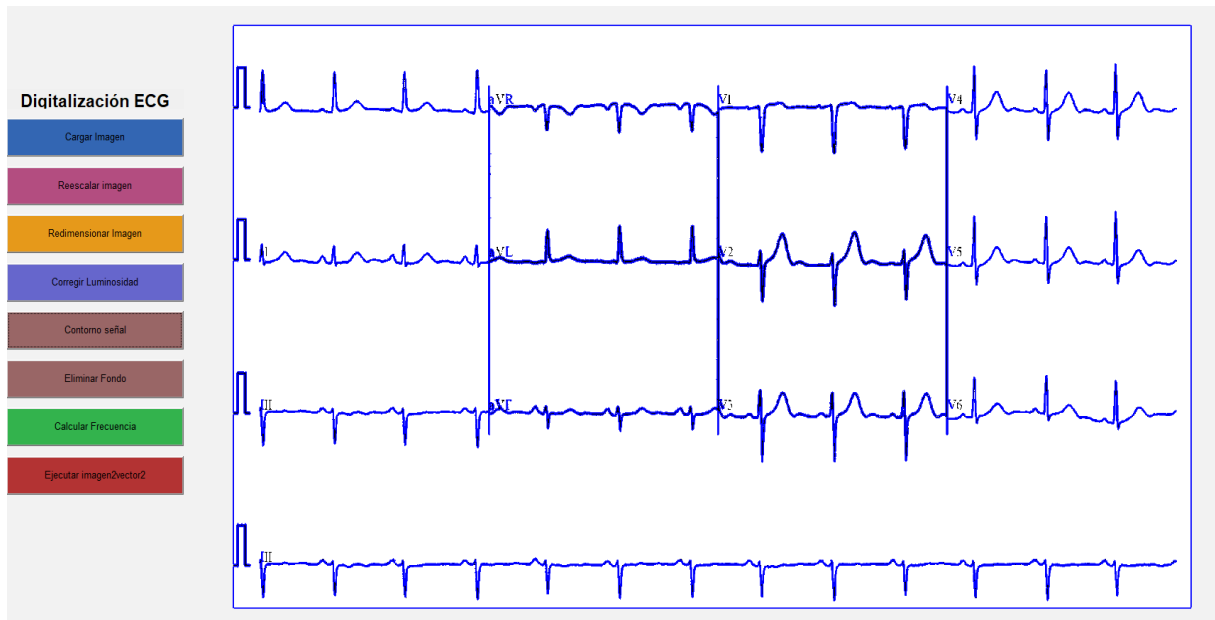


Ilustración 65 Contorno grande imagen

La función de eliminar fondo, dejara aplicar varios tipos de procesados morfológicos para ver cuál es el que más se adecua al ECG seleccionado. Se podrán realizar procesados morfológicos por erosión, dilatación o por defecto (open y close) que están más adaptados a la base de datos utilizada para este TFG.



Ilustración 66 Eliminado fondo por defecto

La APP interactiva también nos permitirá calcular la frecuencia de muestreo de la imagen, esta frecuencia de muestreo se podrá calcular tanto de manera manual como de manera automática, tal y como se comentaba en el apartado de la frecuencia de muestreo.

```
¿Desea calcular la frecuencia de muestreo de manera manualmente (M) o automáticamente (A)? A
La frecuencia de muestreo es: 825.00 Hz
>>
```

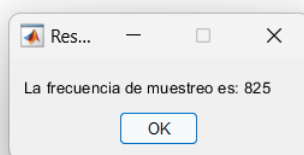


Ilustración 67 Frecuencia de muestreo

Para finalizar, podemos ejecutar la función pasar imagen a vector, la cual convertirá la imagen obtenida anteriormente en un vector 1D que será el resultado final de nuestro algoritmo desarrollado para este TFG.

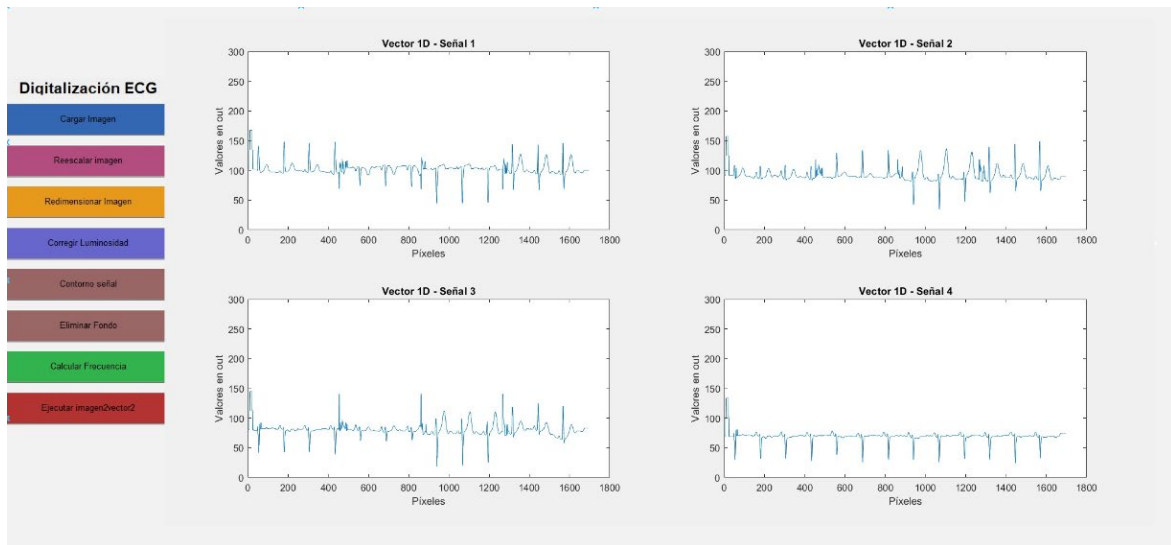


Ilustración 68 Vector 1D representado

6. Análisis, resultados y conclusiones

A continuación, presentaremos los resultados obtenidos al escanear algunas de las muestras almacenadas en la base de datos y las evaluaremos en términos de la calidad lograda en este proceso de escaneo.

En primer lugar, vamos a comparar imágenes para ir viendo mediante los procesados aplicados como mejora la imagen de cara a obtener un resultado final aceptable.

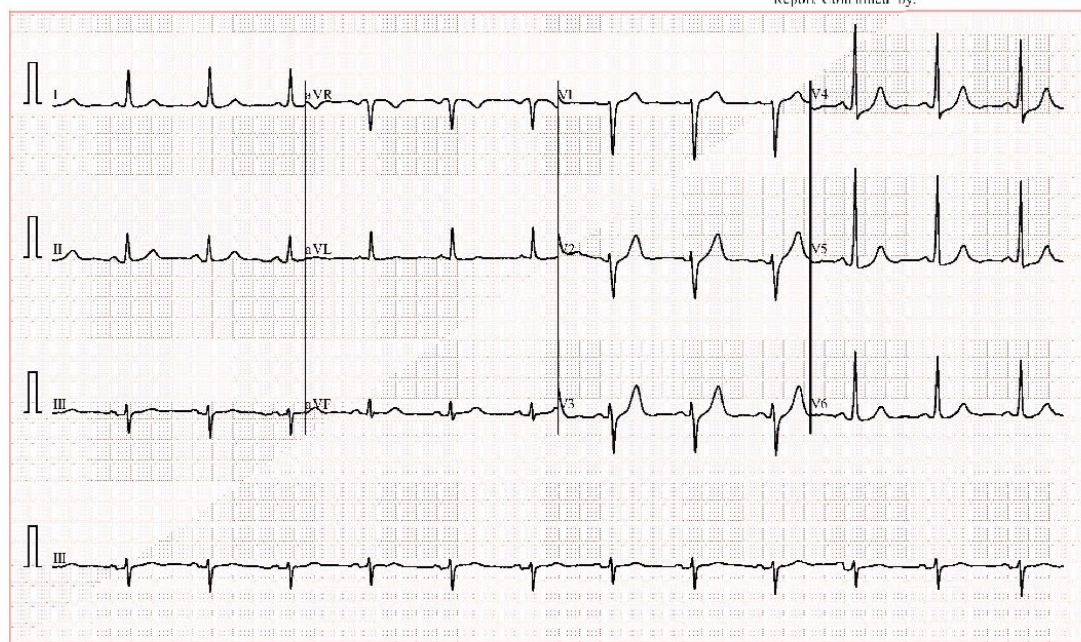
ECG REPORT

ID : 168617 Years Male cm kg / mmHg Race:Unknown Room No.: Department:

Exam.Room: Medication:

Diagnosis Information:

Technician :
Ref-Phys :
Report Confirmed by:



0.67-25Hz AC/50 25mm/s 10mm/mV (4*2.5k*r) V71 SF-3 V1.0 SFMIP V1.7

2020-08-06 10:58:41 AM

Ilustración 69 ECG escaneado original

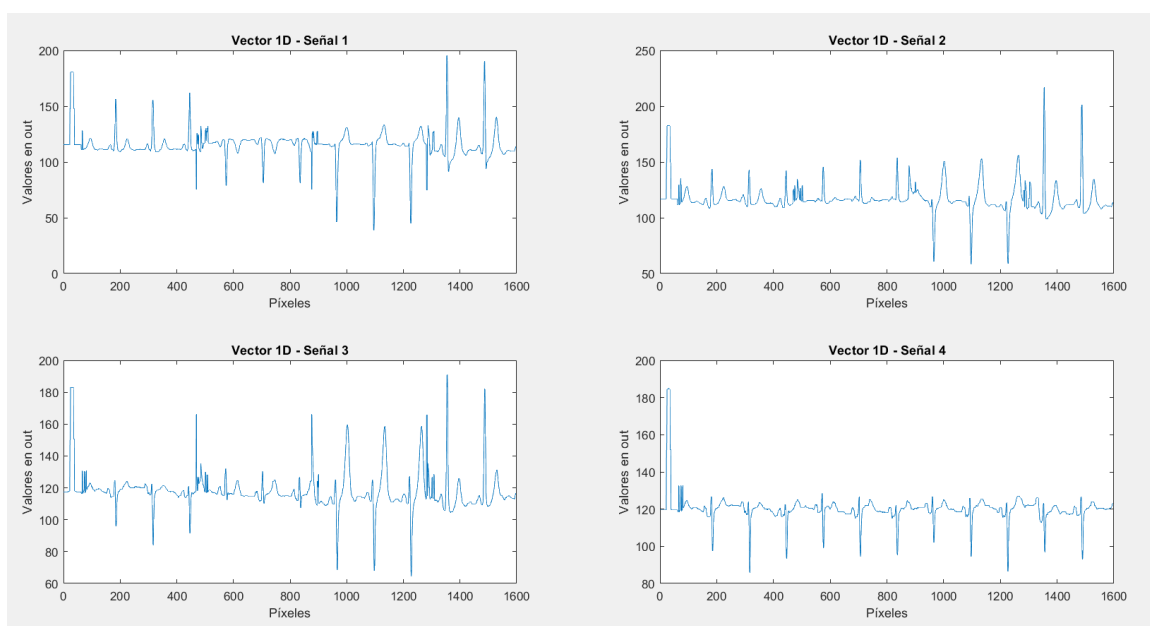


Ilustración 70 ECG digitalizado

Vamos a realizar una comparativa señal por señal, ya que, a la hora de digitalizar la señal, se habían separado las señales para obtener un mejor resultado.

Señal 1



Ilustración 71 Señal 1 2D

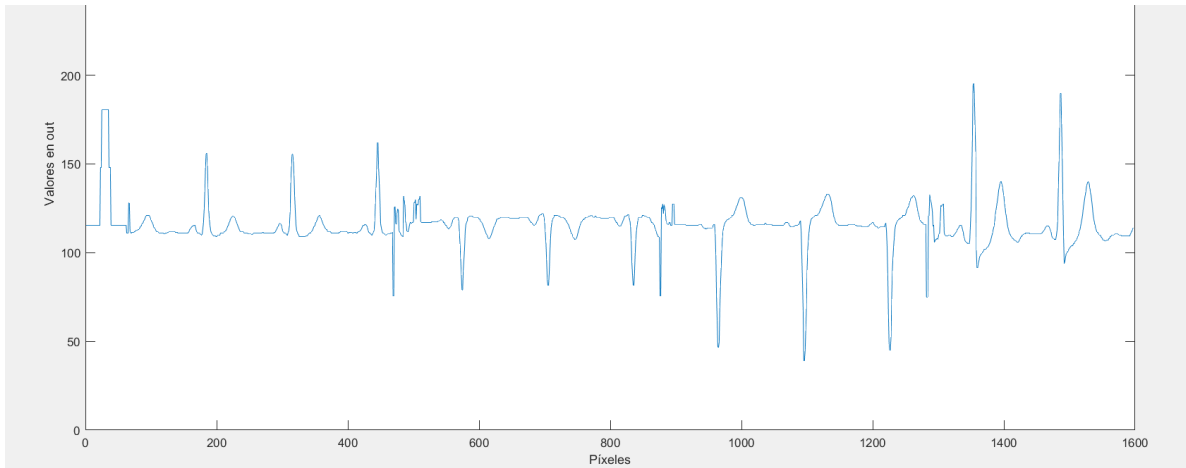


Ilustración 72 Señal 2 en 1D

Como se puede apreciar el resultado obtenido es correcto, aunque podría mejorar en varios aspectos, como, por ejemplo, conseguir eliminar en la imagen algunos objetos indeseados como las letras y los números romanos que aparecen para identificar las señales. Se puede apreciar en la ilustración que donde se encuentran identificados estos objetos, a la hora de digitalizarla aparece un ruido que hace perder un poco de claridad a la digitalización. Una de las mejoras que se podría aplicar a este TFG sería, realizar un método que sea capaz de eliminar estos objetos (letras y números). Una manera de realizar este método en Matlab sería mediante la función “bwareaopen”, ya que esta función se utiliza para eliminar objetos pequeños de una imagen binaria.

Señal 2

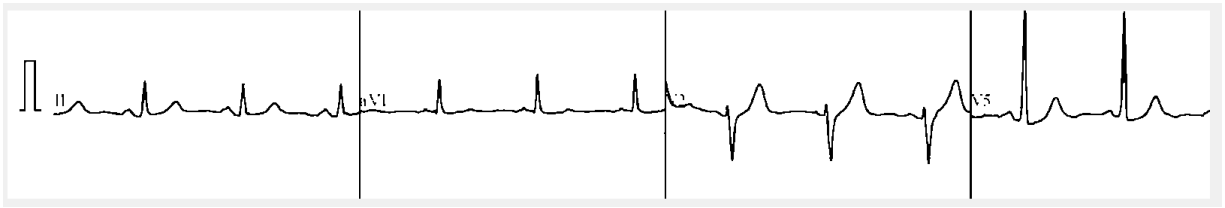


Ilustración 73 Señal 2 2D

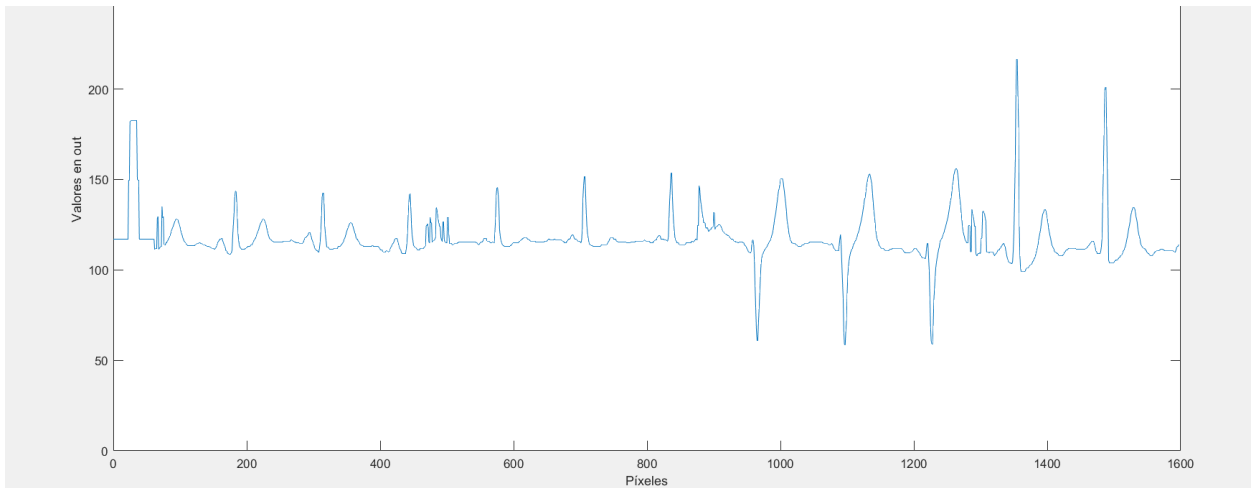


Ilustración 74 Señal 2 1D

En la siguiente ilustración se va a marcar con círculos rojos las zonas donde aparecen representadas las letras y números romanos, para que se pueda apreciar que el resto de la señal se ha podido obtener sin ningún tipo de ruido.

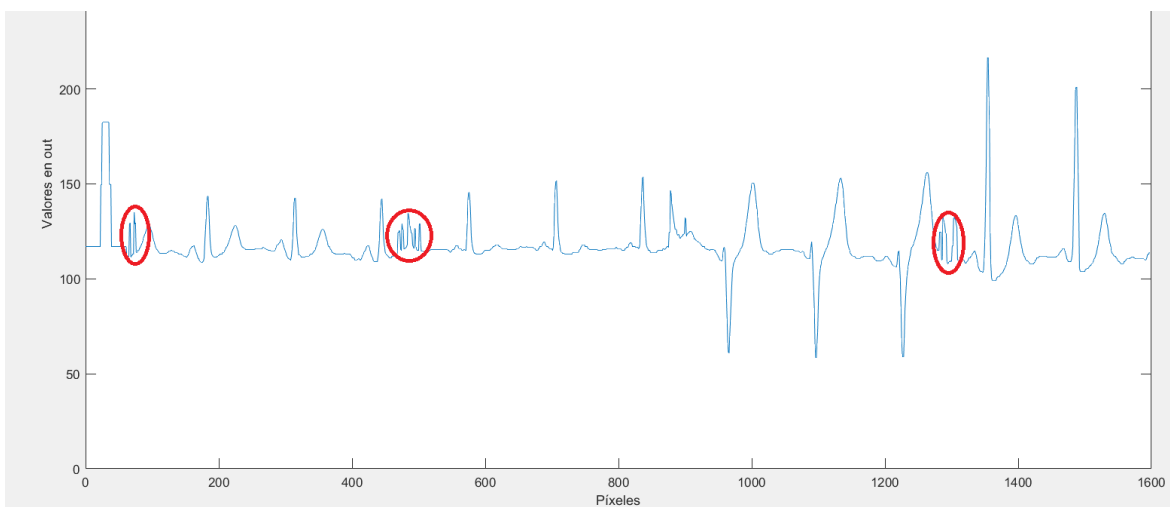


Ilustración 75 Imagen 1D letras

Señal 3



Ilustración 76 Señal 3 2D

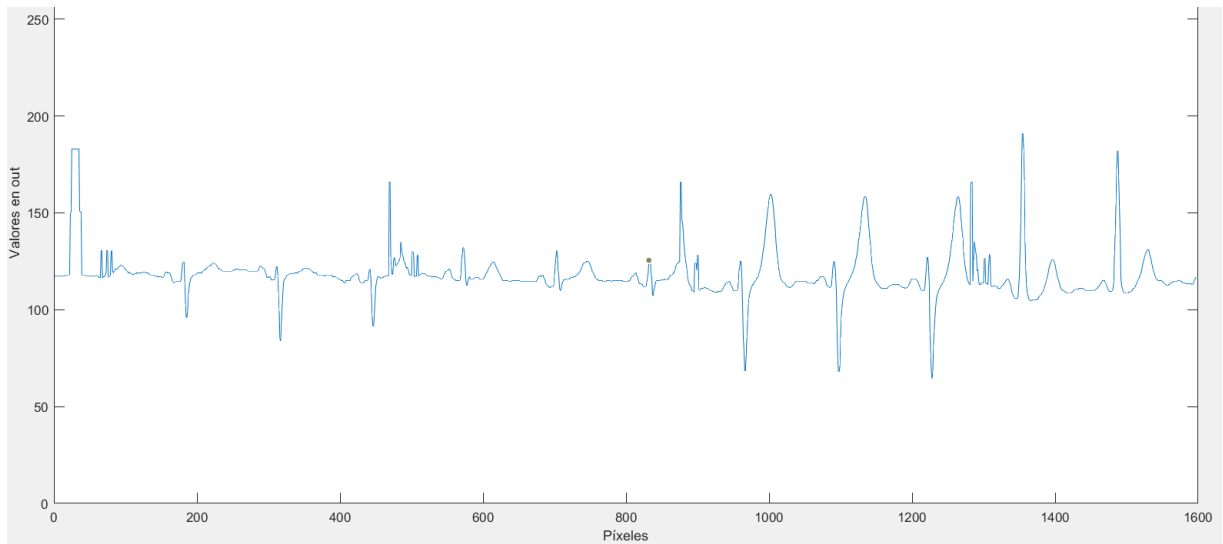


Ilustración 77 Señal 3 1D

Señal 4

En la señal 4, podemos apreciar que aparece menos ruido, debido a que no tiene letras, solo contiene un número romano al principio. A continuación, se marcará en rojo como anteriormente para volver a demostrar que el resto de la señal es legible perfectamente.



Ilustración 78 Señal 4 2D

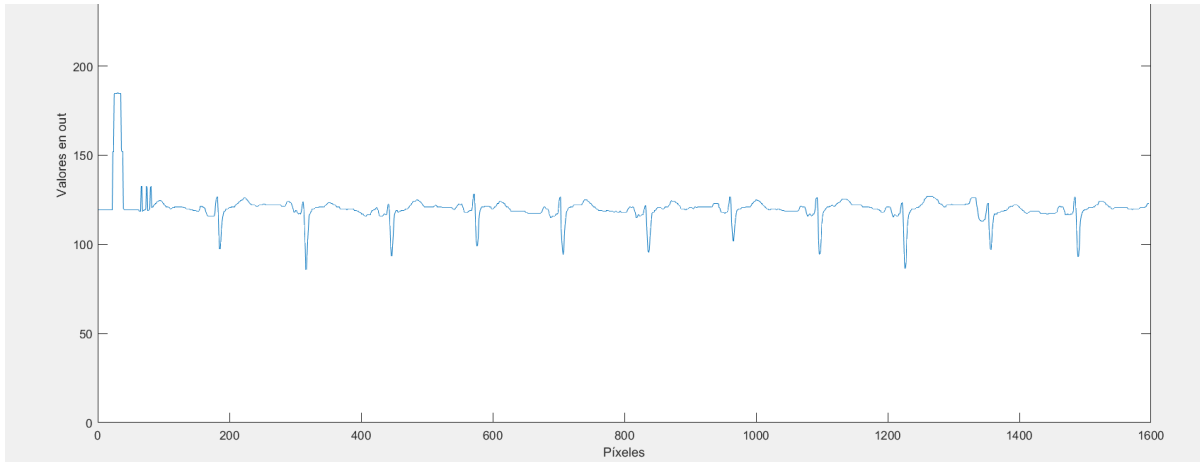
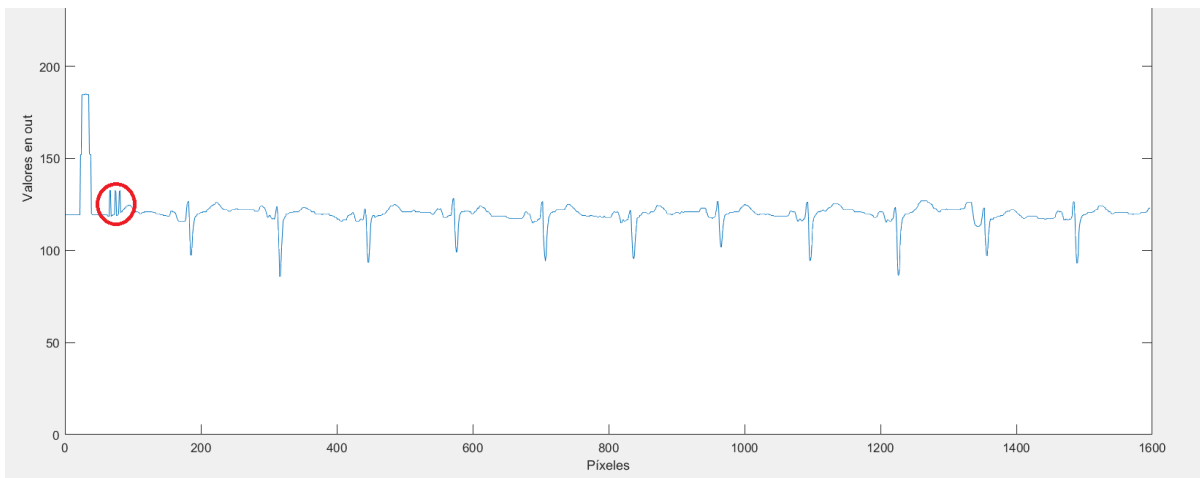


Ilustración 79 Señal 4 1D



A continuación, se mostrarán algunos ejemplos más digitalizados en los que se muestran ECG con características distintas y se pueda apreciar que la APP se puede aplicar a cualquier ECG. Estos ejemplos han sido valorados por médicos del centro de salud de Linares, Virgen de Linarejos, dando por válido el resultado obtenido.

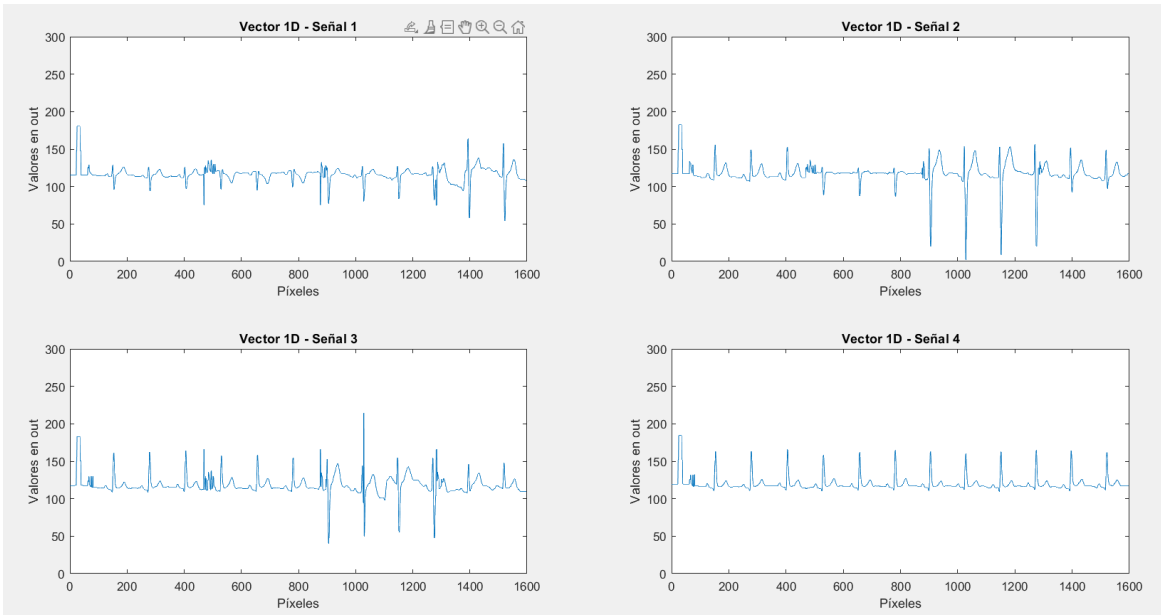


Ilustración 82 Imagen 1D ejemplo 1

Ejemplo 2



Ilustración 83 Imagen original ejemplo 2

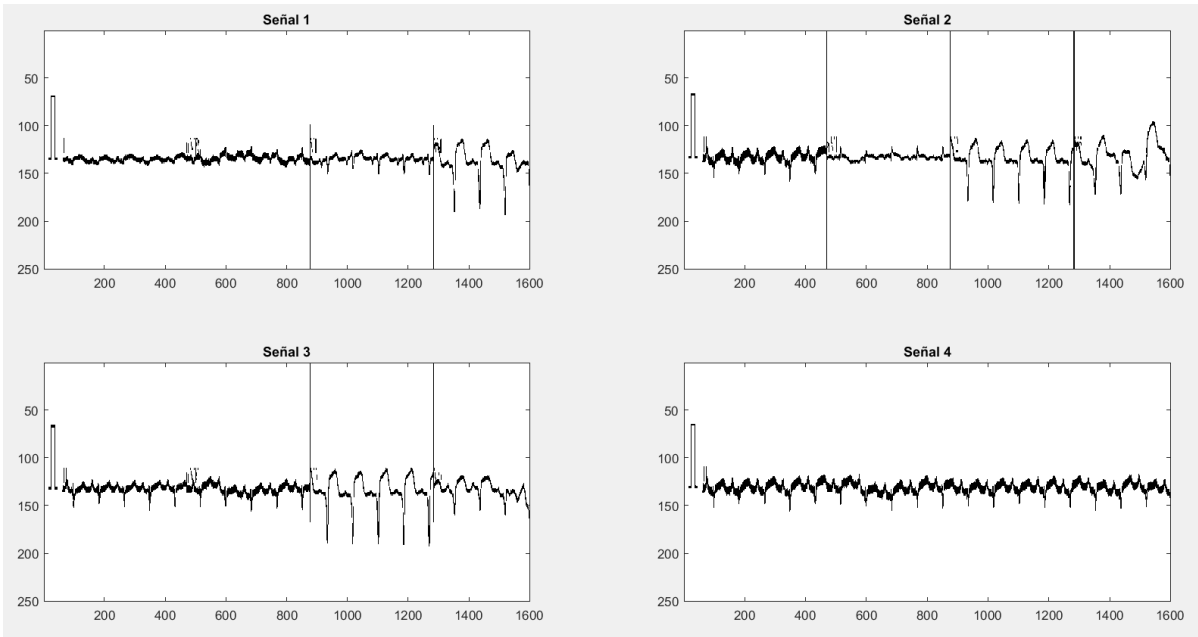


Ilustración 84 Imagen procesada ejemplo 2

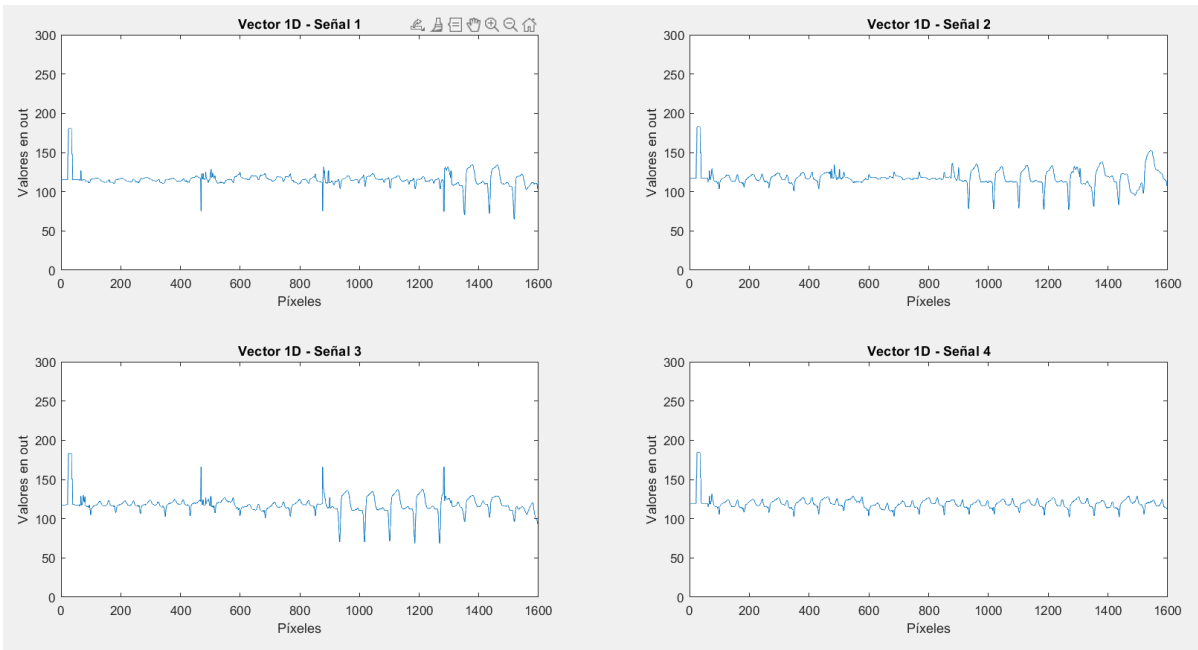


Ilustración 85 Imagen 1D ejemplo 2

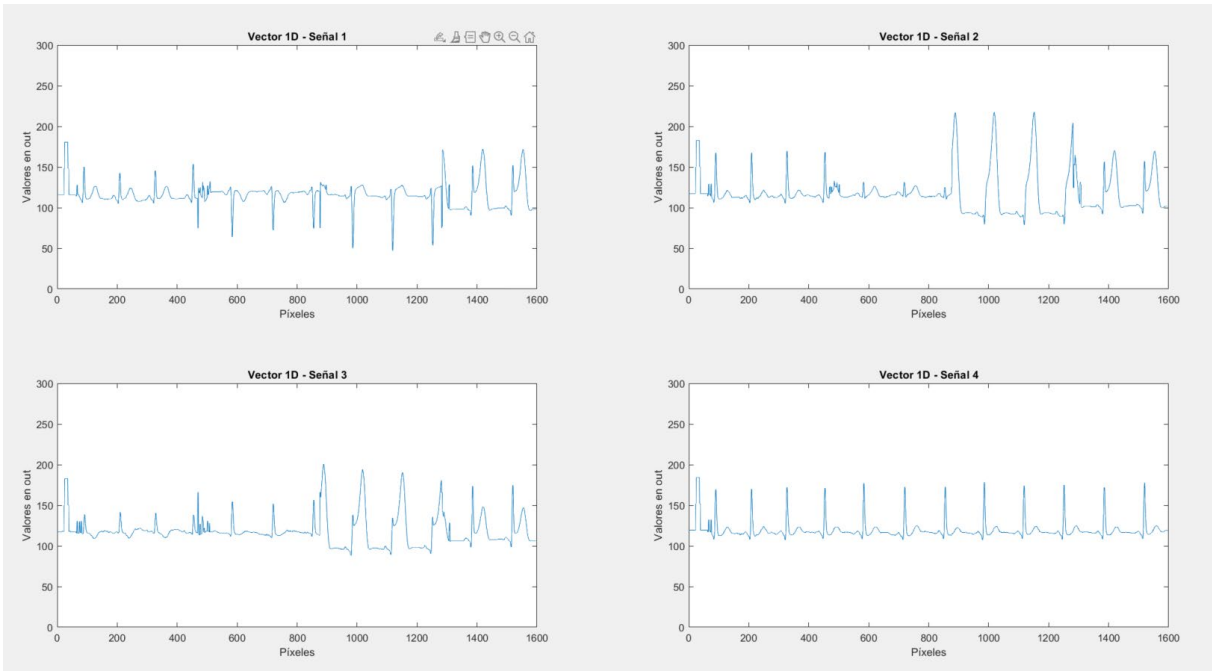


Ilustración 88 Imagen señal 1D Ejemplo 3

7. Bibliografía

- [1] «Causas de muerte más frecuentes el mundo», Statista. Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/601448/diez-principales-causas-de-muertes-a-nivel-mundial/>
- [2] «Salud Cardiovascular - Fundación Española del Corazón». Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://fundaciondelcorazon.com/>
- [3] «Enfermedades cardiovasculares». Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/health-topics/cardiovascular-diseases>
- [4] «EKG», *Rev. Esp. Cardiol.*, vol. 72, n.º 10, p. 796, oct. 2019, doi: 10.1016/j.recesp.2019.03.009.
- [5] H. Myo Tun, «Analysis on ECG Data Compression Using Wavelet Transform Technique», *Int. J. Psychol. Brain Sci.*, vol. 2, n.º 6, p. 127, 2017, doi: 10.11648/j.ijpbs.20170206.12.
- [6] «IMF Working Paper.pdf».
- [7] G. A. Virgin, V. V. Baskar, y P. Scholar, «Conversion of ECG Graph into Digital Format».
- [8] «Electrocardiografía - Trastornos del corazón y los vasos sanguíneos», Manual MSD versión para público general. Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.msdmanuals.com/es-es/hogar/trastornos-del-coraz%C3%B3n-y-los-vasos-sangu%C3%ADneos/diagn%C3%B3stico-de-las-enfermedades-cardiovasculares/electrocardiograf%C3%ADa>
- [9] «Salud cardiovascular: Anatomía del corazón | The Texas Heart Institute». Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.texasheart.org/heart-health/heart-information-center/topics/anatomia-del-corazon/>
- [10] Edajube, «01. Sistema de conducción cardíaco», Enfermería. Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://enfermeria.top/apuntes/fisiopatologia/trastornos-frecuencia-cardiaca/sistema-conduccion/>
- [11] «Potencial de acción cardíaco», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 23 de octubre de 2022. Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Potencial_de_acci%C3%B3n_card%C3%ADaco&oldid=146833278
- [12] «Figura 1.2: Ondas, intervalos y segmentos que conforman el...», ResearchGate. Accedido: 2 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-12-Ondas-intervalos-y-segmentos-que-conforman-el-electrocardiograma_fig2_246992000
- [13] «Correlación entre Derivaciones y Paredes Cardíacas, Localización de las Derivaciones». Accedido: 2 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.my-ekg.com/generalidades-ekg/paredes-derivaciones-cardiacas.html>
- [14] «CONSEJO DE ELECTROFISIOLOGIA - ELECTROCARDIOGRAMA DESAFIANTE». Accedido: 31 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.siacardio.com/academia/casos-clinicos/consejo-de-electrofisiologia-electrocardiograma-desafiante/>
- [15] «e: Grupo de Investigación Biomédica - Electrocardiografía (ECG) - Dalcam». Accedido: 2 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dalcame.com/ecg.html>
- [16] H. K. Khleaf, Kamarul H Bin Gazali, A. N. Abdalla, Mithaq Na'ma Raheema, y Dr-Hussain Kareem, «ECG Trace Digitization Using Image Processing Techniques», 2015, doi: 10.13140/RG.2.2.16556.10886.
- [17] A. H. Khan y M. Hussain, «ECG Images dataset of Cardiac Patients», vol. 2, mar. 2021, doi: 10.17632/gwbz3fsgp8.2.

8. Anexo A: Códigos Matlab.

A continuación, se proporcionará un enlace de Google drive, el cual contiene lo siguiente:

- Códigos implementados para el desarrollo del TFG.
- Funciones de apoyo
- Video explicativo del uso de la APP

<https://drive.google.com/drive/folders/1G9YQ3qRXO9CELOwX8FTdkAKleHTyq-nU>