

Obtención de Electrocardiograma Digital a partir de Trazados Impresos de Electrocardiógrafos.

CARLOS ARTURO CHAVARRO CABRERA



**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
26.05.2021**

Obtención de Electrocardiograma Digital a partir de Trazados Impresos de Electrocardiógrafos.

Autor

CARLOS ARTURO CHAVARRO CABRERA

Trabajo de grado para optar por el título de
Magíster en Ingeniería Electrónica con énfasis en ingeniería Biomédica.

Director

ING. JAVIER ALBERTO CHAPARRO PRECIADO PhD

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
26.05.2021**

Nota de aceptación:

La tesis de maestría titulada “Obtención de Electrocardiograma Digital a partir de Trazados Impresos de Electrocardiógrafos”, presentada por Carlos Arturo Chavarro Cabrera, cumple los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Electrónica con énfasis en Ingeniería Biomédica.

Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Bogotá, D.C., 26 de Mayo de 2021

A Dios, y a mis padres Carlos Julio y Cecilia que siempre me brindan su apoyo y amor incondicional para poder alcanzar todas mis metas.

Agradecimientos

En primer lugar, mi gratitud a Dios por permitirme terminar esta maestría que es un escalón más en mi vida.

Destaco el amor y apoyo incondicional de mis padres y mi familia para el logro de todos mis propósitos.

Un agradecimiento muy especial al ingeniero Javier Alberto Chaparro PhD, por brindarme todo su apoyo en el desarrollo de esta tesis, por sus consejos y su gran disposición para ayudarme y motivarme a culminar este trabajo.

Agradezco a todos mis profesores por haber compartido sus conocimientos, experiencias y sabiduría, para animarme a avanzar en mi vida académica y convertirme en un profesional íntegro.

Reconozco al médico Daniel Mauricio Andrade, por la colaboración en el concepto médico de los análisis de los resultados y por compartir sus conocimientos para el avance de la ciencia.

Finalmente, y no menos importante, me siento gratificado por el apoyo que mi novia Cristina Prieto y mis amigos me han brindado en este largo proceso.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo investigativo, consiste en evaluar técnicas de procesamiento de imágenes y señales para la obtención de electrocardiogramas (ECG) digitales a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos comerciales.

Después de consultar los avances de la digitalización de electrocardiogramas impresos, así como su registro, el ajuste de muestras impresas de señales ECG, y la adecuación espectral de estas, se encontraron ventajas de los ECG digitales frente a los ECG analógicos en lo referente, por ejemplo, a la facilidad de disponer de herramientas automáticas de diagnóstico de cardiopatías.

En este contexto se propuso una metodología para la digitalización de electrocardiogramas impresos. Se utilizan varios mecanismos para la lectura de la imagen, su redimensionamiento y la corrección de la iluminación, la definición e identificación de contornos, la eliminación del fondo, la agrupación de objetos pequeños para eliminar ruido y letreros, y la separación de las señales.

Después de hacer varias pruebas con imágenes tomadas desde un teléfono celular, se llegó a la conclusión que la variabilidad en las condiciones de luz, inclinación, y calidad de la imagen son muy variables y no es el mejor método de adquisición del electrocardiograma. Como la resolución, la luminosidad y la perspectiva permanecen relativamente constantes, se utiliza un escáner convencional en la adquisición de la imagen.

Gran parte de los resultados se sustentan en el estudio e implementación de los lenguajes de programación Python y OpenCV. Se aplicaron técnicas de procesamiento de imágenes como filtrado adaptativo, binarización gaussiana, segmentación de imágenes por áreas, y filtrado pasabanda de señales entre otras. Después de hacer varias pruebas con electrocardiogramas comerciales se llegó a un ajuste satisfactorio de las técnicas anteriores para extraer las señales ECG de la imagen del electrocardiograma.

Al evaluar técnicas utilizadas a lo largo de esta investigación, se concluye que es viable la digitalización de una señal de electrocardiograma a partir de un trazado impreso emitido por un electrocardiógrafo. Este aporte investigativo contribuye a una transformación digital que soporta el desarrollo de sistemas más sofisticados y expeditos para el bien de los pacientes con problemas cardiovasculares y los médicos comprometidos en este propósito.

CONTENIDO

	pág.
ACRÓNIMOS	18
1. INTRODUCCIÓN	19
1.1 ANTECEDENTES	19
1.1.1 Inicio y evolución de desarrollos tecnológicos	23
1.2 ESTADO DEL ARTE	25
1.2.1 Análisis del proceso de conversión de ECG registrado en papel a ECG basado en computador.	27
1.2.1.1 Algoritmo de digitalización	28
1.2.2 Procesamiento de imágenes de Electrocardiograma (ECG) y extracción de información numérica	31
1.2.2.1 Extracción y digitalización de la señal ECG	32
1.2.3 Un novedoso método para digitalización de registros ECG en papel	34
1.2.4 Conversión de una gráfica de ECG a formato digital	37
1.2.5 Aprendizaje profundo para digitalizar registros de ECG en papel muy ruidosos.	42
1.2.6 Digitalización de Imágenes de ECG para la Detección del Síndrome de Bayés	45
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	47
1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	49
1.5 Objetivos	49
1.5.1 Objetivo General	49
1.5.2 Objetivos Específicos	49
1.6 Presentación del documento	50

2.	MARCO TEÓRICO	51
2.1	APARATO CIRCULATORIO	51
2.1.1	El corazón	51
2.2	POTENCIAL CARDÍACO	53
2.2.1	Generación de la señal Electrocardiográfica (ECG)	54
2.3	INTERPRETACIÓN DE UN ELECTROCARDIOGRAMA	54
2.3.1	Periodo ECG	55
2.3.1.1	Intervalos y segmentos del ECG	56
2.4	ADQUISICIÓN	57
2.4.1	Derivaciones	57
2.4.1.1	Derivaciones bipolares	57
2.4.1.2	Derivaciones unipolares	58
2.4.1.3	Derivaciones precordiales	58
3.	METODOLOGÍA	60
3.1	CAPTURA Y PREPROCESAMIENTO DE LA IMAGEN	61
3.2	Redimensionamiento de la imagen y corrección de la iluminación	67
3.3	Binarización y Definición e identificación de contornos	68
3.4	Eliminación del fondo	69
3.5	Agrupamiento de objetos para eliminación de caracteres	70
3.6	Separación de la señales e identificación de discontinuidades a causa de cambio de derivación	71
3.7	Eliminación de derivaciones incompletas	73
3.8	Convertir la imagen a puntos y graficarlos	73
4.	RESULTADOS Y CONTIBUCIÓN	76
		14

4.1	RESULTADO DE LAS SEÑALES	76
4.1.1	Concepto médico	84
4.2	CONTRIBUCIÓN	85
5.	Conclusiones y recomendaciones	87
5.1	CONCLUSIONES	87
5.2	RECOMENDACIONES	89
6.	BIBLIOGRAFÍA	90

Lista de Imágenes

ILUSTRACIÓN 1. CAUSAS PRINCIPALES DE DEFUNCIÓN EN EL MUNDO (EN MILLONES) (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 2019)	22
ILUSTRACIÓN 2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN DE REGISTROS EN PAPEL DE ECG (TUN, WIN KHAING, & ZAW MIN, 2017)	29
ILUSTRACIÓN 3. IMAGEN DEL ELECTROCARDIOGRAMA DE ENTRADA PARA PROBAR EL ALGORITMO PROPUESTO EN ESTE ARTÍCULO (TUN, WIN KHAING, & ZAW MIN, 2017)	30
ILUSTRACIÓN 4. SEÑAL DIGITALIZADA DE SALIDA DEL ALGORITMO PROPUESTO EN ESTE ARTÍCULO (TUN, WIN KHAING, & ZAW MIN, 2017)	30
ILUSTRACIÓN 5. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE DIGITALIZACIÓN (TUN, WIN KHAING, & ZAW MIN, 2017)	33
ILUSTRACIÓN 6. IMAGEN DE ENTRADA (TUN, WIN KHAING, & ZAW MIN, 2017).....	34
ILUSTRACIÓN 7. SEÑAL DIGITALIZADA DE SALIDA (TUN, WIN KHAING, & ZAW MIN, 2017).....	34
ILUSTRACIÓN 8. IMAGEN DE ENTRADA (SUN, WANG, HE, & ZHANG, 2019)	36
ILUSTRACIÓN 9. SEÑAL DIGITALIZADA DE SALIDA (TUN, WIN KHAING, & ZAW MIN, 2017).....	36
ILUSTRACIÓN 10. IMAGEN BINARIZADA (VIRGIN & BASKAR, 2018).....	38
ILUSTRACIÓN 11. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS BASADAS EN GRADIENTES (VIRGIN & BASKAR, 2018)	39
ILUSTRACIÓN 12. RECHAZO DE RUIDO (VIRGIN & BASKAR, 2018).....	40
ILUSTRACIÓN 13. IMAGEN DIGITALIZADA OBTENIDA (VIRGIN & BASKAR, 2018)	41
ILUSTRACIÓN 14. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN DE LA SEÑAL ECG	42
ILUSTRACIÓN 15. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE DIGITALIZACIÓN. (YAO, Y OTROS, 2021).....	44
ILUSTRACIÓN 16. RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DEL PROCESO DE DIGITALIZACIÓN (YAO, Y OTROS, 2021)	45
ILUSTRACIÓN 17. IMAGEN SEGMENTADA INGRESADA A MATLAB (FRANCO, ESCOBAR ROBLEDO, BAYÉS DE LUNA, & MASSA, 2018)	46
ILUSTRACIÓN 18. IMAGEN OBTENIDA DESPUÉS DEL PROCESAMIENTO CON MATLAB (FRANCO, ESCOBAR ROBLEDO, BAYÉS DE LUNA, & MASSA, 2018)	46
ILUSTRACIÓN 19. COMPLEJO QRS (EMPENDIUM, 2019)	55
ILUSTRACIÓN 20. DERIVACIONES DE EXTREMIDADES Y TRIÁNGULO DE EINTHOVEN (MY EKG, 2019)	58
ILUSTRACIÓN 21. DERIVACIONES PRECORDIALES (MY EKG, 2019)	59
ILUSTRACIÓN 22. DIAGRAMA DE FLUJO DE METODOLOGÍA.....	61
ILUSTRACIÓN 23. CAPTURA FOTOGRÁFICA POR MEDIO DE CELULAR XIAOMI REDMI NOTE 8.	62
ILUSTRACIÓN 24. CAPTURA FOTOGRÁFICA POR MEDIO DE CELULAR XIAOMI REDMI 9.	62
ILUSTRACIÓN 25. CAPTURA FOTOGRÁFICA POR MEDIO DE CELULAR ASUS ZENFONE 2.....	63
ILUSTRACIÓN 26. UBICACIÓN DE CENTROIDES	64
ILUSTRACIÓN 27. UBICACIÓN DE CENTROIDES CON INCLUSIÓN DE COORDENADAS.....	65
ILUSTRACIÓN 28. ALINEACIÓN DE CENTROIDES JUNTO CON LA IMAGEN	65
ILUSTRACIÓN 29. IMAGEN DE ELECTROCARDIOGRAMA DESDE ESCÁNER EPSON L4160	66
ILUSTRACIÓN 30. IMAGEN REDIMENSIONADA CON PROCESAMIENTO DE ILUMINACIÓN.....	68

ILUSTRACIÓN 31. ECG BINARIZADO CON APLICACIÓN DE CONTORNOS	69
ILUSTRACIÓN 32. ECG DILATADO SIN CUADRÍCULA DE FONDO	70
ILUSTRACIÓN 33. IMAGEN EROSIONADA Y DILATADA.....	71
ILUSTRACIÓN 34. ECG SIN CARACTERES.....	71
ILUSTRACIÓN 35. SEÑALES SEPARADAS CON INDICACIÓN DE CAMBIO DE DERIVACIÓN CARDIACA	72
ILUSTRACIÓN 36. ECG RECORTADO A TRES DERIVACIONES	73
ILUSTRACIÓN 37. IMAGEN ORIGINAL SECCIONADA.....	74
ILUSTRACIÓN 38. IMAGEN OBTENIDA DE LA SEÑAL ORIGINAL.....	75
ILUSTRACIÓN 39. IMAGEN DE MATRIZ DE PUNTO ECG1	75
ILUSTRACIÓN 40. IMAGEN OBTENIDA DESDE ESCÁNER	76
ILUSTRACIÓN 41 IMAGEN CON CORRECCIÓN DE ILUMINACIÓN Y FILTRADO ADAPTATIVO	77
ILUSTRACIÓN 42 IMAGEN BINARIZADA CON CONTORNOS DEFINIDOS SIN FONDO.....	77
ILUSTRACIÓN 43 IMAGEN DILATADA Y EROSIONADA.....	78
ILUSTRACIÓN 44 IMAGEN SIN CARACTERES.....	78
ILUSTRACIÓN 45 IMAGEN CON SEÑALES SEPARADAS Y CON AISLAMIENTO DE DERIVACIONES.....	79
ILUSTRACIÓN 46 IMAGEN CON ELIMINACIÓN DE SEÑALES DE DERIVACIONES INCOMPLETAS	80
ILUSTRACIÓN 47 IMAGEN DEL TRAZADO ELECTROCARDIOGRÁFICO ORIGINAL.....	81
ILUSTRACIÓN 48 SEÑAL DIGITALIZADA OBTENIDA A PARTIR DE MATRIZ DE PUNTOS	82
ILUSTRACIÓN 49 SEÑAL DIGITALIZADA SOBREPUESTA SOBRE IMAGEN ORIGINAL	83

ACRÓNIMOS

aVR Potencial absoluto del brazo derecho.

aVL Potencial absoluto del brazo izquierdo.

aVF Potencial absoluto de la pierna izquierda.

De V1 a V6 derivaciones precordiales, también conocidas como mono polares.

ECG o EKG Electrocardiograma.

ECV Enfermedades cardiovasculares.

OMS Organización Mundial de la Salud.

1. INTRODUCCIÓN

El contenido del presente estudio responde al objetivo central de evaluar técnicas de procesamiento de imágenes y señales para la obtención de electrocardiograma (ECG) digital a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos comerciales.

Para este propósito cabe indicar que, dado que no existe mucha información sobre estudios comparativos entre las ventajas del ECG digital y el ECG analógico o tradicional, el desarrollo del presente trabajo explora en la posibilidad de digitalizar un trazado impreso de un electrocardiograma que apoye la evaluación posterior del riesgo cardiovascular.

En consecuencia, mediante la revisión de una amplia bibliografía que permite detallar en los antecedentes, el estado del arte, los mayores problemas y ventajas para la implementación de ECG digital y las enfermedades cardiovasculares como primera causa de muerte a nivel mundial, se facilita encaminar los aspectos de la investigación sobre un objetivo general y unos específicos que soporten un marco teórico bajo metodología adecuada con miras a obtener unos resultados conducentes a conclusiones y recomendaciones articuladas que bien explican la importancia de adelantar el trabajo con precisión y claridad.

1.1 ANTECEDENTES

Justo en el centro del tórax: el corazón no es solo objeto de estudio médico-científico, es el órgano de nuestro cuerpo que el arte lírico más belleza le dedica. La sangre oxigenada que bombea a todo el cuerpo y la desoxigenada que hace llegar a los pulmones, representa todo un arte: cámaras, aurículas, ventrículos, tejido muscular, vasos, tubos, bombas... Sangre para todo el cuerpo, transporte, circulación: coreografía de células.

Si bien es cierto que el tema aquí abordado es obtener electrocardiogramas digitales a través de trazados impresos de electrocardiógrafos lo que parece tan técnico, también es posible anotar que esto tiene un trasfondo y propósito tan humano como el hombre mismo que siempre investiga, para proteger y preservar la vida.

De acuerdo con la última publicación de la (Organización Mundial de la Salud, 2019) sobre las Estadísticas Sanitarias Mundiales, la mayor causa de defunción del mundo entre 2000 y 2019 es la cardiopatía isquémica, responsable del 16% del total de muertes. Desde el año 2000, el mayor aumento de muertes corresponde a esta enfermedad, que ha pasado de más de 2 millones de defunciones en 2000 a 8,9 millones en 2019.

La cardiopatía isquémica es una enfermedad causada por la arterioesclerosis de los vasos sanguíneos que van hacia el corazón, especialmente las arterias coronarias. Para entender esta enfermedad, es necesario definir la arterioesclerosis. Se presenta en el proceso de formación de colágeno que se vuelve lento, la acumulación de grasas (lípidos) y células del proceso inflamatorio (linfocitos). Todas estas condiciones hacen que los vasos sanguíneos coronarios, sean los encargados de alimentar los músculos del miocardio, que al taponarse, generan infartos, necrosando regiones importantes del corazón.

Para la (Fundación Española del Corazón, 2020), la mayoría de estos casos fueron susceptibles de predecir con un equipo de monitoreo y prediagnóstico aplicado a cada paciente previo a la llegada a un centro de atención en salud.

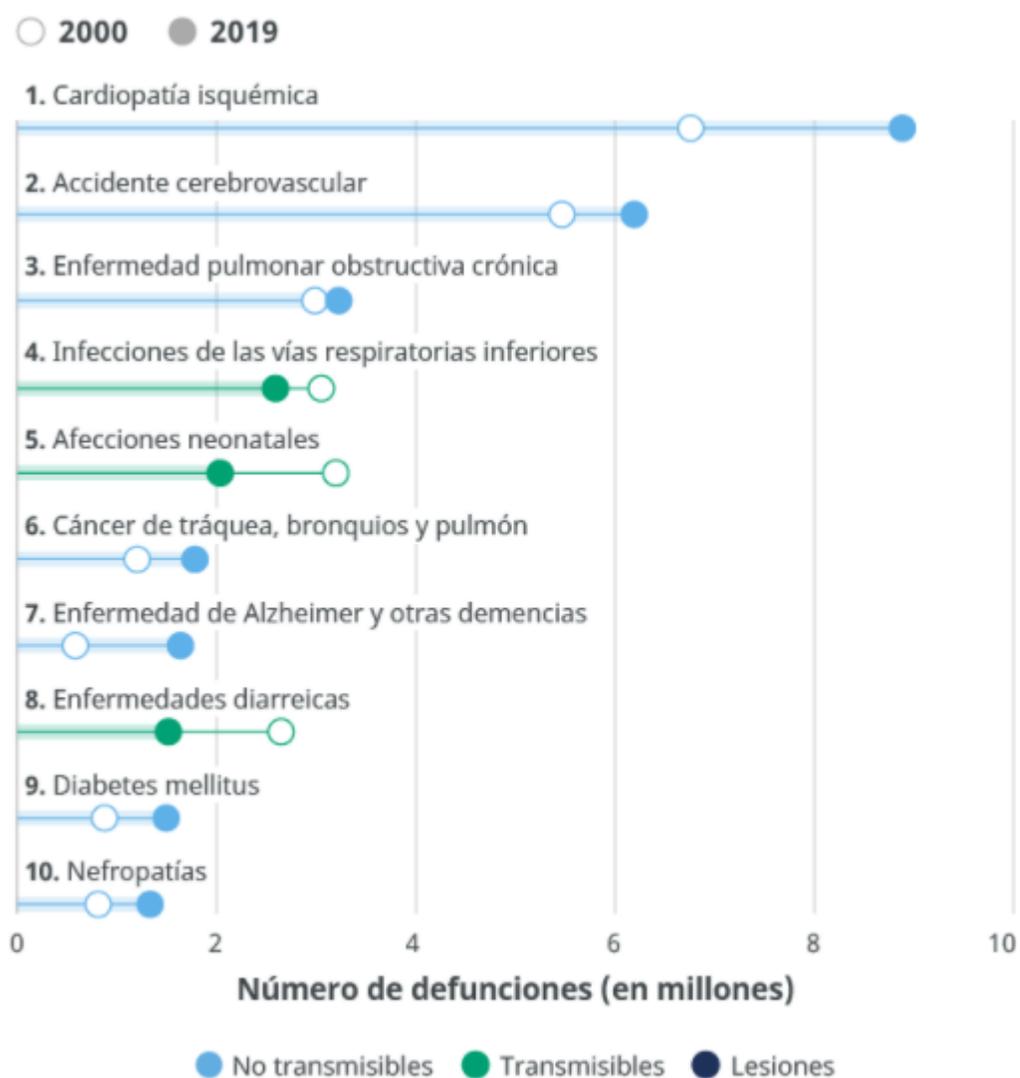
No obstante, en la agenda para los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas se deja en claro que las tendencias de las dos últimas décadas en mortalidad y morbilidad por enfermedades y traumatismos, evidencia la necesidad de prestar una mayor atención en el ámbito mundial a la prevención y

el tratamiento de las enfermedades cardiovasculares (cardiopatías isquémicas, accidentes cerebrovasculares), en todas las regiones del mundo. Así, las cardiopatías siguen siendo la primera causa de mortalidad. En ese sentido, la (Organización Mundial de la Salud, 2019) también sostiene que la Región del Pacífico Occidental registra más de la mitad de los dos millones de muertes adicionales ocurridas por cardiopatías.

Para la (Organización Mundial de la Salud , 2014), la causa de mortalidad por enfermedades cardiovasculares (ECV), supera las defunciones por conflictos bélicos, muertes violentas, accidentes de tránsito y otro tipo de enfermedades. Como se observa en la ilustración 1, las enfermedades isquémicas se han incrementado entre los años 2000 al 2019.

Por otra parte, la escasez de médicos especialistas en cardiología, es una de las razones primordiales para que la tasa de mortalidad por ECV se haya incrementado en todo el mundo. Para el año 2014, la Sociedad Colombiana de Cardiología y Cirugía Cardiovascular reporta 711 médicos cardiólogos (Revista Colombiana de Cardiología , 2014), y *“En dicho año, la población colombiana asciende a 48 millones de habitantes, lo cual equivale a un 1 cardiólogo por cada 65.300 habitantes”*. (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2015)

En el año 2016, Bogotá registró 31.720 muertes. Una tasa de 397,5 muertes por cada 100.000 habitantes. En población general, encabezan la lista de las diez primeras causas, siendo la primera las enfermedades isquémicas del corazón, con una tasa de 65,8 muertes por cada 100.000 habitantes. (Secretaría de Salud Bogotá, 2015)



**Ilustración 1. Causas principales de defunción en el mundo (En millones)
(Organización Mundial de la Salud, 2019)**

Ahora bien, para establecer el estado de salud de una persona, los médicos se apoyan en exámenes clínicos. Con base en sus resultados y otra serie de consideraciones, se realiza el diagnóstico, convirtiéndose en el eje fundamental de la práctica médica. Para lograrlo, la ciencia médica se apoya en la creación de equipos especializados de diagnóstico.

El electrocardiógrafo es el instrumento más idóneo para la detección de problemas cardiacos. A través de electrodos, este dispositivo electrónico capta y amplía la actividad eléctrica del corazón. El registro se denomina trazado electrocardiógrafo. (Iberomed, 2017)

El electrocardiograma (ECG), inventado por el fisiólogo Willen Einthoven, es un procedimiento simple e indoloro que registra la actividad eléctrica del corazón producida en cada latido cardiaco. La representación visual de esta actividad eléctrica queda plasmada en un papel de forma gráfica. Las ondas representan los estímulos eléctricos de las aurículas y los ventrículos.

El ritmo y la fuerza del latido, así como el tamaño y la posición de las cámaras del corazón, quedan igualmente registradas. Con un electrocardiógrafo en forma de cinta continua, el examen se practica desde la superficie corporal en el pecho.

La posición jerárquica del electrocardiograma para la detección de enfermedades cardiacas es indiscutible. De allí la orientación de esta investigación en obtener electrocardiogramas digitales a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos que permitan mejoras en el diagnóstico de cardiopatías.

1.1.1 Inicio y evolución de desarrollos tecnológicos

Como la historia de la electrocardiografía y sus más destacados representantes es nutrida y variada, en este espacio se hace alusión a los eventos más determinantes para llegar a la actualidad. Entre los siglos XVII y XVIII se estudian los efectos de la electricidad sobre los tejidos humanos y se descubre la "electricidad animal". Los eruditos lo califican como el dominio de la electricidad.

El estudio de la electricidad bajo la óptica médica en tejidos humanos y animales inicia desde el siglo XVII. Humanos, perros y ranas eran utilizados para las pruebas que a lo largo de los años condujeron a sistemas de detección y/o tratamiento de ciertas patologías cardíacas, como electrocardiógrafos o desfibriladores. En todo este trayecto, fue hasta finales del siglo XIX, que el primero en aproximarse al corazón desde un punto de vista eléctrico, sería el fisiólogo británico Auguste Waller, pionero también en publicar el primer electrocardiograma humano, registrado con un galvanómetro capilar. (Jenkins, 2019)

Paralelamente, el médico Willem Einthoven introduce el término 'electrocardiograma' en un congreso de la Sociedad Médica Holandesa. Su invento para plasmar en papel el sonido del corazón, le merece el premio Nobel de Medicina en 1924.

Desde 1895 se hace el primer registro exacto del electrocardiograma y su utilización clínica como se ve hoy. Con base en las ideas de Deprez y D' Arson, Einthoven inventa en 1901 un galvanómetro nuevo para producir electrocardiogramas que utilizan un filamento fino de cuarzo revestido en la plataval. En 1902 publica el primer electrocardiograma. El 22 de marzo de 1905 empieza a transmitir electrocardiogramas desde el hospital a su laboratorio, a 1.5 km., vía cable telefónico. Así se registra el primer 'tele cardiograma. (Einthoven W, 2002)

Harold Pardee publica en 1920 el primer electrocardiograma de un infarto agudo de miocardio en un humano. Por su parte, Goldhammer y Scherf proponen en 1932 el uso del electrocardiograma después de un ejercicio moderado como una ayuda en el diagnóstico de la insuficiencia coronaria. (HEB, 2018)

Es así como la tecnología del electrocardiograma, con más de 100 años de historia, puede aún ser empleada en el descubrimiento de nuevas entidades

nosológicas que describen, explican, diferencian y clasifican la amplia variedad de enfermedades y procesos patológicos. (Brugada P, 1992).

En 1992, Pedro Brugada y Josep Brugada de Barcelona publican una serie de 8 casos de muerte súbita, patrón de bloqueo de rama derecha y elevación del ST en V1-V3 en personas supuestamente saludables. Este 'Síndrome de Brugada' puede *ocasionar* un 4-12 % de muertes súbitas y es la causa más común de muerte súbita de origen cardíaco entre los individuos de menos de 50 años en el Sur de Asia. (Brugada P, 1992)

1.2 ESTADO DEL ARTE

Las cifras sobre las enfermedades cardíacas a escala mundial ya referidas al inicio de la introducción, conducen a pensar que la búsqueda de servicios y/o exámenes para prevenir y diagnosticar a tiempo enfermedades que podrían tratarse como lo son algunas cardiopatías, es de vital importancia. Así como indagar en la mejoría de las técnicas aplicadas para la obtención de dichos exámenes. Esta tesis apunta en este sentido. El registro de las señales eléctricas del corazón a través de un electrocardiograma, detecta problemas cardíacos y contribuye a controlar la salud del corazón. En los últimos años se ha avanzado bastante 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 con el estudio y desarrollo de técnicas que a través de la digitalización permitan un diagnóstico precoz y la detección de enfermedades. En dicha medida, su tratamiento puede ser lo que salve una vida, de allí, la importancia de implementar desarrollos tecnológicos, que permitan el diseño de nuevos métodos y sistemas que mejoren los procesos existentes en determinadas áreas de trabajo, cómo es la materialización en papel de electrocardiogramas a través de una señal digitalizada.

Con base en el estudio y análisis de las principales investigaciones sobre el tema, que a lo largo de los últimos años se han adelantado, se indaga en los principales resultados que permiten implementar de una manera segura y eficaz un método para obtener electrocardiogramas digitales, a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos. Para aproximarse de una manera coherente e integradora al núcleo de por qué es determinante desarrollar este estudio, se registran los resultados de seis investigaciones publicadas en artículos científicos como: a) Análisis del proceso de conversión de ECG registrado en papel a ECG basado en computador, b) Procesamiento de imágenes de electrocardiograma (ECG) y extracción de Información numérica, c) Un novedoso método para la digitalización de registros en papel de ECG, d) Conversión de una gráfica de ECG a formato digital, e) Aprendizaje profundo para digitalizar registros de ECG en papel muy ruidoso, y f) 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 abordadas a lo largo de este estudio. Así mismo, se acudió a 2 voluntarios para la toma de muestras con un electrocardiógrafo suministrado por la universidad.

Tras reconocer el electrocardiograma (ECG) como un procedimiento de diagnóstico importante, las investigaciones buscan mejorarlo y para ello, descomponen y analizan cada uno de sus elementos. Entrar a detallar minuciosamente cada uno de los estudios sería muy dispendioso y carecería de total sentido. Por ello se reseñan los aspectos más importantes y las principales conclusiones de los mismos. (Gurve, 2017)

A continuación, se registran las principales conclusiones de los tres estudios que ilustran bien el tema que se aborda en este trabajo de grado.

1.2.1 Análisis del proceso de conversión de ECG registrado en papel a ECG basado en computador.

La eliminación de fondo es el eje central del método algorítmico de digitalización de señales de ECG desarrollado por (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017). Para completar el sistema de digitalización, es igualmente necesario eliminar caracteres y objetos pequeños. En la investigación, mediante una operación morfológica, la cuadrícula se elimina de las imágenes de ECG escaneadas. El algoritmo utilizado elimina cualquier color, cuadrícula o fondo negro, así como carácter o ruido.

Este artículo subraya que:

[...] existe una amplia gama de procedimientos para mejorar la resolución de las imágenes y suprimir o detallar en un objeto o superficie digitalizada, de una señal grabada en papel: eliminación de antecedentes, supresión de caracteres y objetos pequeños, y conversión de forma de onda a señal 1-D, son los tres elementos más determinantes. *(Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)*

En el proceso de eliminar el fondo, conocido también como cuadrícula, y los objetos pequeños denominados personajes, radica lo novedoso de este complejo método que permite perfeccionar el sistema de digitalización. Lo ideal es escanear la imagen de entrada con una resolución de 600 PPP (puntos por pulgada), puesto que, si esta se escanea con una resolución de 300 DPI, la señal de ECG no se puede extraer fielmente, ni los personajes pueden eliminarse. Ahora bien, cuando la imagen de ECG escaneada no contiene caracteres u otros objetos que no clasifican como señal de ECG, no es necesario eliminar el paso que suprime el carácter y los objetos pequeños. Con el propósito de interpretar acertadamente el valor de la señal obtenida, dentro del proceso descrito, es necesario identificar el eje. Como se muestra en el diagrama de flujo de la señal,

la imagen escaneada de una tabla de papel vio-potencial contiene un fondo uniforme o liso, una forma de onda definida y un texto que representa amplitud mV / mm, también una velocidad de grabación mm / seg.

Las operaciones de imágenes morfológicas binarias, determinan el algoritmo de extracción y eliminación de fondo, de la imagen binaria original hasta obtener una imagen libre. Dicha “fotografía” se suaviza al utilizar el espesor morfológico. Ahora, la forma de onda es el único objeto que la define. Como se señaló inicialmente, a través de una manipulación morfológica, la cuadrícula es eliminada de las imágenes de ECG escaneadas. Si bien es cierto que la segmentación puede tener píxeles aislados que también se califican como caracteres o ruido, también lo es que el algoritmo desarrollado tiene la facultad de suprimirlos, así como cualquier color, fondo negro o cuadrícula.

1.2.1.1 Algoritmo de digitalización

Para que las líneas de la señal sean más nítidas, se escanean las tiras de ECG (impresas en papel térmico) y las imágenes se optimizan. La cuadrícula se suprime desde el umbral morfológico que permite el escáner de las imágenes de ECG. Para eliminar píxeles aislados se utiliza la segmentación. Al interpolar los valores de los píxeles, se logra la señal de ECG procesada, simbolizada por un píxel de señal específico por columna. La Ilustración 2 representa bien los pasos algorítmicos generales. (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017), La ilustración 3 muestra la imagen del electrocardiograma impreso de entrada y la Ilustración 4 muestra el resultado de la señal digitalizada de salida.

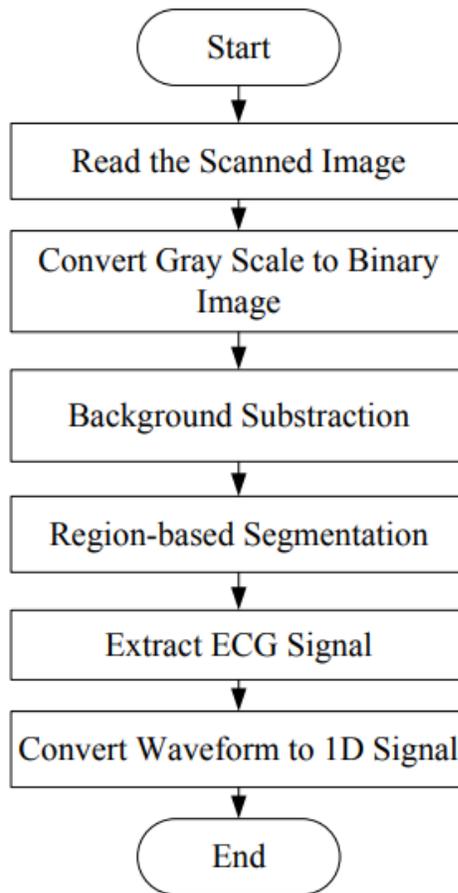


Ilustración 2. Diagrama de flujo del proceso de digitalización de registros en papel de ECG (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

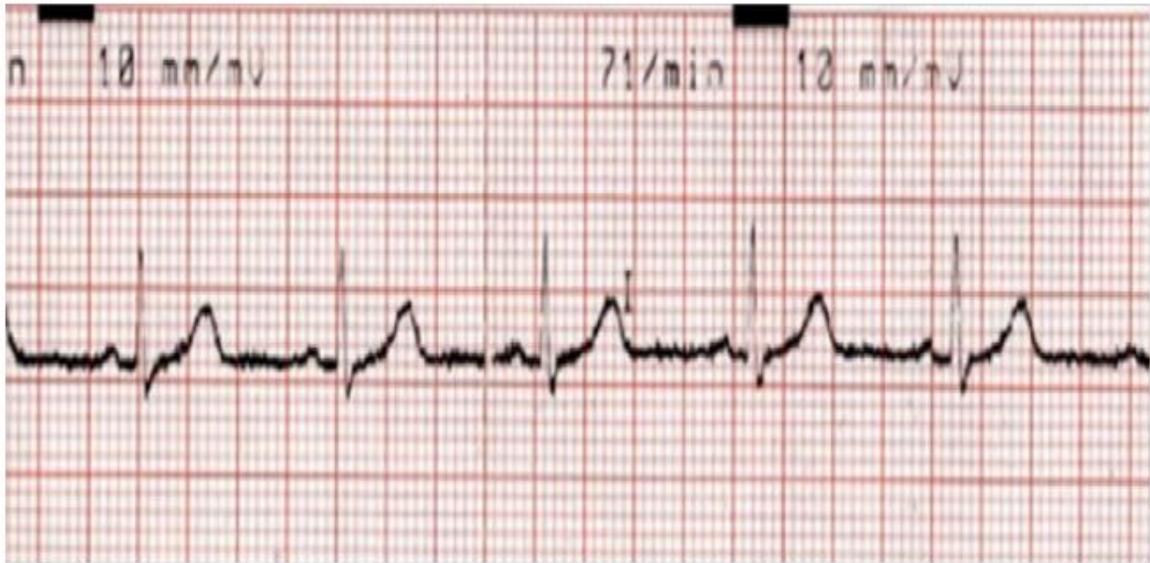


Ilustración 3. Imagen del electrocardiograma de entrada para probar el algoritmo propuesto en este artículo (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

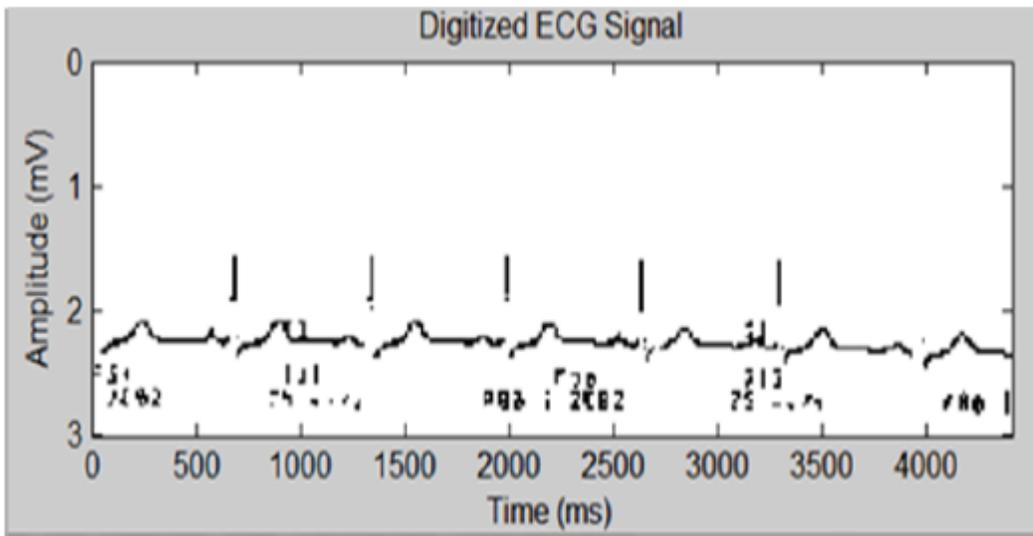


Ilustración 4. Señal digitalizada de salida del algoritmo propuesto en este artículo (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

1.2.2 Procesamiento de imágenes de Electrocardiograma (ECG) y extracción de información numérica

La técnica propuesta por (Gurve, y otros, 2016), busca eliminar el fondo de los gráficos de ECG y almacenar los puntos en una variable. Su ventaja radica en ser de fácil aplicación en todos los tipos de imágenes como son: BMP, JPG, TIF, GIF y PNG. El procesamiento de imágenes de electrocardiograma (ECG) y extracción de información numérica. El método conserva los bordes afilados, así como todos los picos presentes en la señal de ECG. Por su simplicidad, tiene múltiples aplicaciones en la computación, la fotografía y el procesamiento de imágenes. Los resultados del experimento mostraron imágenes con excelente calidad visual y la capacidad de eliminar dos fondos para dos trazos de ECG en una sola imagen. De igual forma, reduce el tamaño de la imagen, conservando todas las características de la señal ECG. (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

De manera estándar, el examen es grabado en la cuadrícula de un papel que se compone de muchos bloques diminutos con un cuadrado de 1 mm. En general, cada caja tiene una duración de 40 ms. Las líneas más gruesas permiten cuadrados más grandes, de cinco cajas de alto y cinco cajas de ancho con una duración de 200 ms. Cinco de estos cuadrados más grandes (200 × 5) equivalen a 1000 ms o 1 segundo. Al contar las cuadrículas se logra una aproximación expedita de la duración de un ciclo o tiempo cardíaco en particular. No obstante, si se quieren analizar los datos del ECG con precisión es más complejo.

El registro de ECG normal alcanza dos ondas, una P y una T, un complejo QRS y un segmento ST. Como las decisiones críticas del médico están asociadas a la duración del segmento se desarrolló el algoritmo MATLAB para leer las imágenes de ECG. “Tiene opciones de calibración en los ejes X e Y, seguido de un algoritmo para eliminar las cuadrículas de fondo y extraer las

coordenadas numéricas de los puntos individuales de la curva de ECG. (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

A través de numerosos experimentos con muchas imágenes, en fondo claro, moderado y oscuro, los autores muestran que el método propuesto para eliminar el ruido de cuadrícula en la imagen del gráfico de ECG produce resultados aceptables.

1.2.2.1 Extracción y digitalización de la señal ECG

Se propone desde un ejercicio investigativo, un método eficiente para la extracción y digitalización de la señal de ECG con un alto nivel de precisión y un procesamiento más rápido de un gran volumen de datos (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017) También plantea el uso de filtros para disminuir la influencia del ruido, particularmente el muscular, y así tener claridad sobre la línea eléctrica y la línea de base que determina el electrocardiograma. (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

Para identificar una enfermedad, reflejada en los datos del ECG, no utiliza ningún *hardware*. El sistema emplea el software MATLAB para obtener datos digitalizados. Las imágenes propuestas de ECG son capturadas desde dispositivos y provienen de diversas fuentes, como impresiones térmicas de ECG y ECG escaneado. El método de extracción convierte el gráfico de ECG en matrices, que, a su vez, se transforman a formato digital (archivo .dat). La imagen original se puede recuperar fácilmente decodificando en cualquier momento el formato digital de salida. La investigación propone, además, el uso de filtros para disminuir la influencia del ruido, particularmente el muscular, y así tener claridad sobre la línea eléctrica y la línea de base que la determina.

La imagen tiene un papel protagónico en la investigación. La propuesta planteada busca, con el apoyo de métodos de calibre en pantalla, aplicar la impresión escaneada. Es claro, sigue creciendo la necesidad de convertir a formato digital, grandes bases de datos de imágenes recopiladas. El diagrama del algoritmo se encuentra a continuación en la ilustración 5 que se encuentra a continuación. Adicionalmente, en la ilustración 6, se muestra la imagen del electrocardiograma antes de ser procesado por el algoritmo, y en la ilustración 7 se muestra la señal digitalizada que es el resultado del algoritmo.

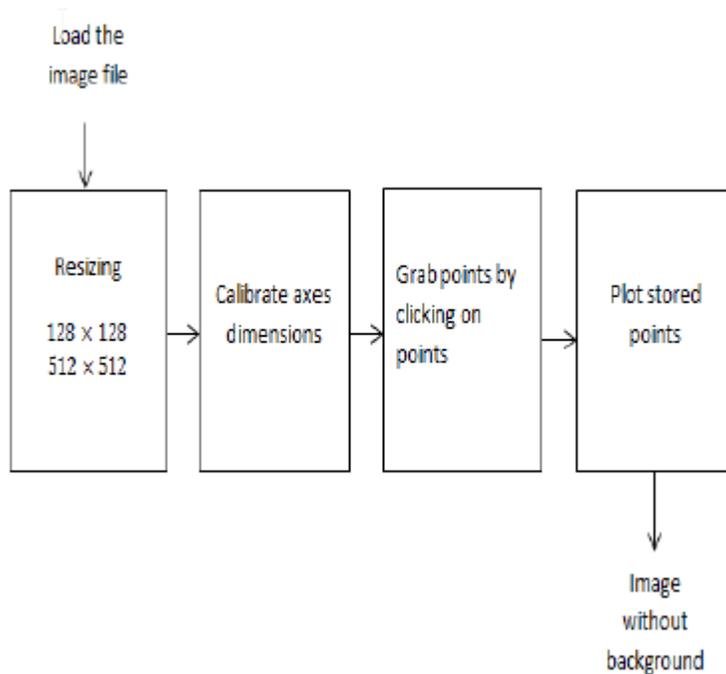


Ilustración 5. Diagrama de flujo de proceso de digitalización (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)



Ilustración 6. Imagen de entrada (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

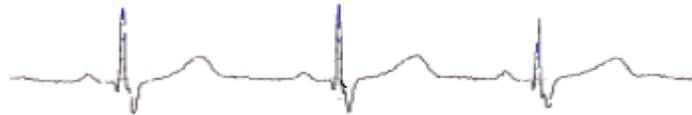


Ilustración 7. Señal digitalizada de salida (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

Como se puede observar, se genera un cambio morfológico en las señales lo que puede incurrir en diagnósticos médicos no adecuados.

1.2.3 Un novedoso método para digitalización de registros ECG en papel

Como bien lo analiza (Sun, Wang, He, & Zhang, 2019) construir una base de datos electrónica de registros médicos cardiológicos, es un verdadero desafío. Si bien los documentos de ECG en papel constituyen una fuente de información clínica para los médicos que tratan pacientes, su digitalización, no sólo permite algoritmos de aprendizaje para el diagnóstico automático de trastornos cardíacos, provee información esencial para la investigación científica clínica, primordial en el campo de electrofisiología cardíaca y para la salvación de vidas.

Bien se sabe que la mayoría de los registros de pruebas de ECG obtenidos se encuentran en papel. Como las imágenes son manuales, restringen su uso

para grandes bases de datos. Como el diagnóstico automático de enfermedades cardíacas no es de la mayor eficiencia, es claro entonces el valor para la investigación y los fines clínicos, digitalizar documentos de ECG.

El estudio de (Sun, Wang, He, & Zhang, 2019) propone un algoritmo para extraer automáticamente las señales de ECG a partir de registros en papel de ECG de doce derivaciones escaneadas. Las imágenes originales de grabación de ECG se pre procesan mediante operaciones de detección de bordes, binarización de imágenes y corrección de sesgo. Posteriormente, basadas en el análisis de componentes conectados (CCA), las formas de onda de ECG se extraen de las cuadrículas de fondo. Para obtener límites de segmentación de formas de onda, se aplica una proyección horizontal. Seguidamente, se recorre el trazo de la señal de ECG para extraer series de tiempo representadas mediante el uso de MATLAB como gráfico de señal del ECG final.

Después de ser probado en 129 registros de ECG reales de pacientes, los resultados del algoritmo estudiado revelan que las señales extraídas conservaban características esenciales de los registros de ECG en papel.

En la ilustración 8, se muestra la imagen del electrocardiograma antes de ser procesada por el algoritmo propuesto en este artículo, y la ilustración 9 muestra el resultado de la señal digitalizada por este algoritmo propuesto.



Ilustración 8. Imagen de entrada (Sun, Wang, He, & Zhang, 2019)

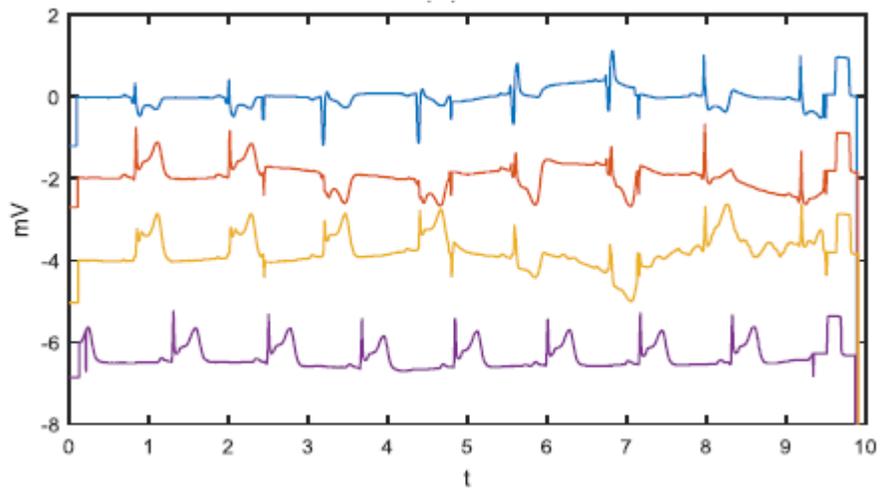


Ilustración 9. Señal digitalizada de salida (Tun, Win Khaing, & Zaw Min, 2017)

1.2.4 Conversión de una gráfica de ECG a formato digital

El artículo propone un método para extraer y digitalizar la señal de ECG con un alto nivel de precisión y un procesamiento más rápido de un gran volumen de datos. (Virgin & Baskar, 2018)

Para identificar una enfermedad, reflejada en los datos del ECG, no utiliza ningún hardware. El sistema emplea el software MATLAB para la consecución de datos digitalizados.

Las imágenes propuestas de ECG son capturadas desde dispositivos y provienen de diversas fuentes, como impresiones térmicas de ECG y ECG escaneado. El método de extracción convierte el gráfico de ECG en matrices, que, a su vez, se transforman a formato digital (archivo .dat). La imagen original se puede recuperar fácilmente decodificando en cualquier momento el formato digital de salida.

La investigación formula, además, el uso de filtros para disminuir la influencia del ruido, particularmente el muscular, y así tener claridad sobre la línea eléctrica y la línea de base.

La imagen tiene un papel protagónico en la investigación. La propuesta planteada busca, con el apoyo de métodos de calibre en pantalla, aplicar la impresión escaneada. Es claro, sigue creciendo la necesidad de convertir a formato digital, grandes bases de datos de imágenes recopiladas.

Ahora bien, como el procedimiento de binarización de imágenes es esencial en el proceso estudiado, se procede a enumerar sus logros, como son la reducción del número de colores a un nivel binario, la simplificación del análisis de imágenes, las ganancias aparentes de almacenamiento y el procesamiento de imágenes en color verdadero como se muestra en la ilustración 10.

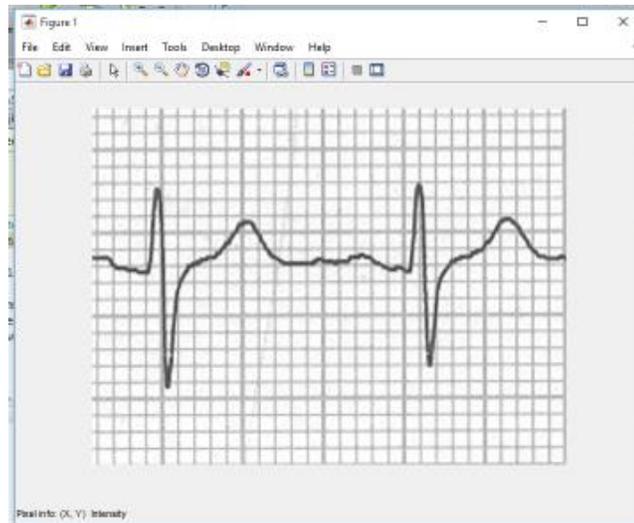


Ilustración 10. Imagen binarizada (Virgin & Baskar, 2018)

De hecho, los objetivos del proceso de binarización buscan:

- Obtener una secuencia de valores que correspondan a la amplitud de una serie de tiempo uniforme
- Pasar de una imagen de mapa biomédico hacia una señal digital
- Extracción de características, basada en degradados
- En este punto, es relevante considerar que el gradiente es un vector que tiene magnitud y dirección, como se muestra en la figura (1.5).
- La magnitud indica la fuerza del borde y la dirección es perpendicular a él.

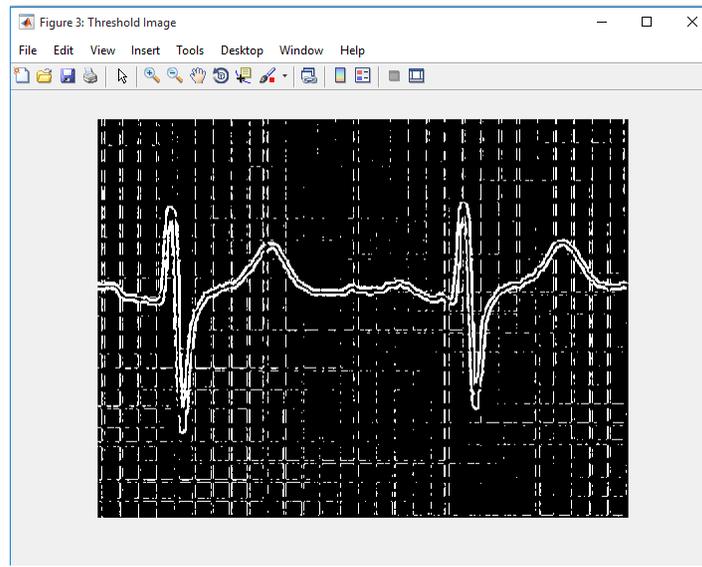


Ilustración 11 Extracción de características basadas en gradientes (Virgin & Baskar, 2018)

Posterior al proceso de binarización, es fundamental el rechazo de ruido, básicamente, cómo hacer para eliminarlo de la imagen. Se logra mediante:

- Escaneo vertical para encontrar el negro.
- Si se encuentra el píxel negro y todos los píxeles adyacentes a su alrededor son de color de fondo blanco, entonces este píxel negro será considerado y a su vez
- y tratado como un ruido, el cual será reemplazado por un fondo blanco como se aprecia en la ilustración 12.

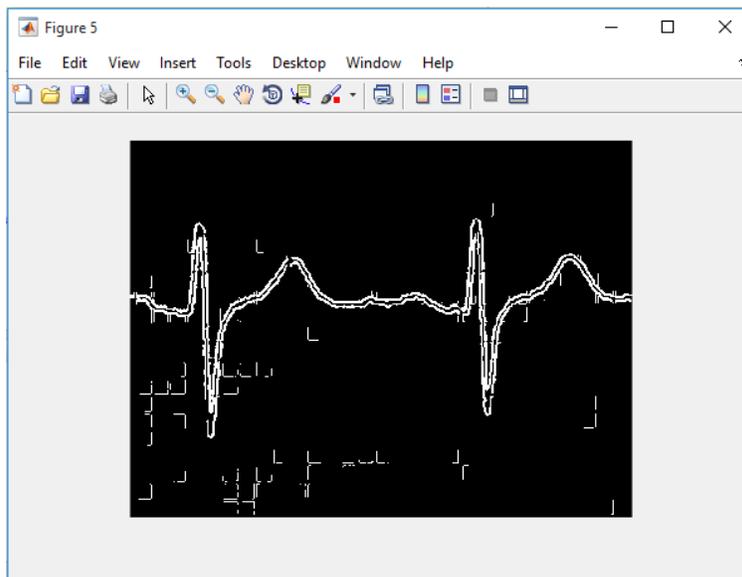


Ilustración 12. Rechazo de ruido (Virgin & Baskar, 2018)

En este punto del estudio, es necesario trabajar en la reducción de la imagen (el grosor es una redundancia de datos en el dominio de series de tiempo) y posteriormente en el proceso de adelgazamiento de imágenes binarias.

Finalmente se obtiene la señal digitalizada en archivo .dat como se ve a continuación en la ilustración 13.

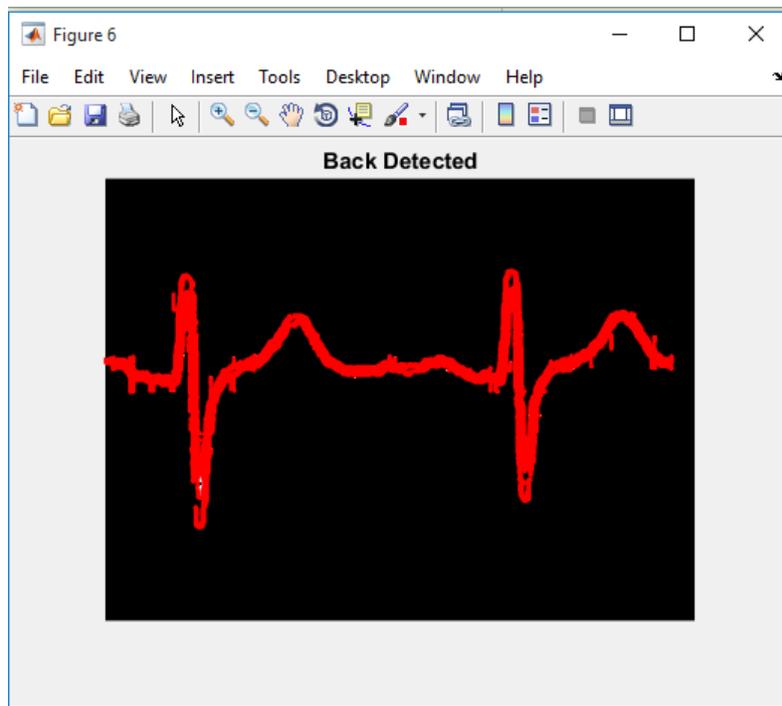


Ilustración 13. Imagen digitalizada obtenida (Virgin & Baskar, 2018)

Se puede visualizar en la ilustración 13, que se generan ruidos en la señal los cuales pueden inducir a un error de interpretación del electrocardiograma.

El diagrama del proceso de digitalización lo podemos observar en la ilustración 14.

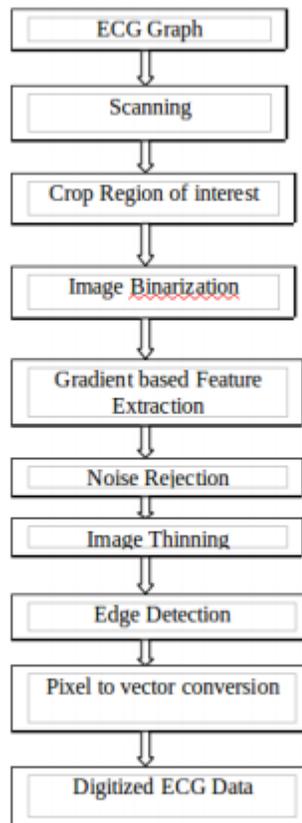


Ilustración 14. Diagrama de flujo del proceso de digitalización de la señal ECG

1.2.5 Aprendizaje profundo para digitalizar registros de ECG en papel muy ruidosos.

El estudio plantea un procedimiento para digitalizar ECG en papel, tras reconocerlo como un problema clásico de procesamiento de imágenes, y señalar las técnicas de digitalización existentes como dependientes del proceso de escaneo, que no necesariamente captura la propiedad geométrica más intrínseca del ECG, como lo es la forma de onda. Entonces, resuelve el problema formulado de la digitalización como imagen, utilizando la red de segmentación U-Net (red

neuronal profunda), que permite una alta concordancia con la verdadera señal. De hecho, U-net alcanza el mejor rendimiento de extracción de formas de onda entre las redes comunes. Al distinguir directamente la forma de onda del fondo, el modelo aprende las funciones útiles y se entrena en registros en papel de ECG binarios y muy ruidosos que obligan al modelo a conocer más características específicas de la forma de onda de ECG. (Yao, y otros, 2021)

Este modelo de segmentación, también utilizado en imágenes binarias como ya se señaló, permite procesar exploraciones de ECG diferentes en los que otros métodos han fallado. De acuerdo con los autores el “método puede salvar la brecha entre la aplicación de datos reales a gran escala y la investigación de ECG avanzado como los algoritmos de análisis” (Yao, y otros, 2021).

El artículo señala que las técnicas de digitalización son diseñadas manualmente y por ello obstaculizan el análisis de situaciones variadas y complejas. Para superarlo, se propone detectar el ROI, eliminar la red y el refinamiento integral de la señal. Las deducciones de la investigación revelan rendimientos en la segmentación y una destacada reciprocidad con la señal digital.

Este es el diagrama de flujo que utilizaron para el procesamiento de la imagen para llegar a tener una señal digital, ilustración 15.

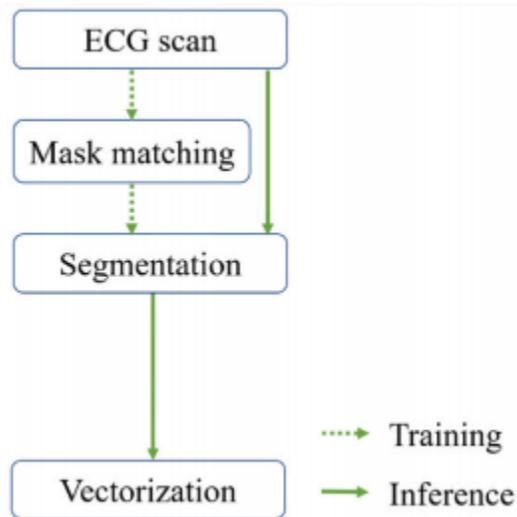


Ilustración 15. Diagrama de flujo de proceso de digitalización. (Yao, y otros, 2021)

Estos son los resultados que se muestran después del proceso de digitalización. Ilustración 16.

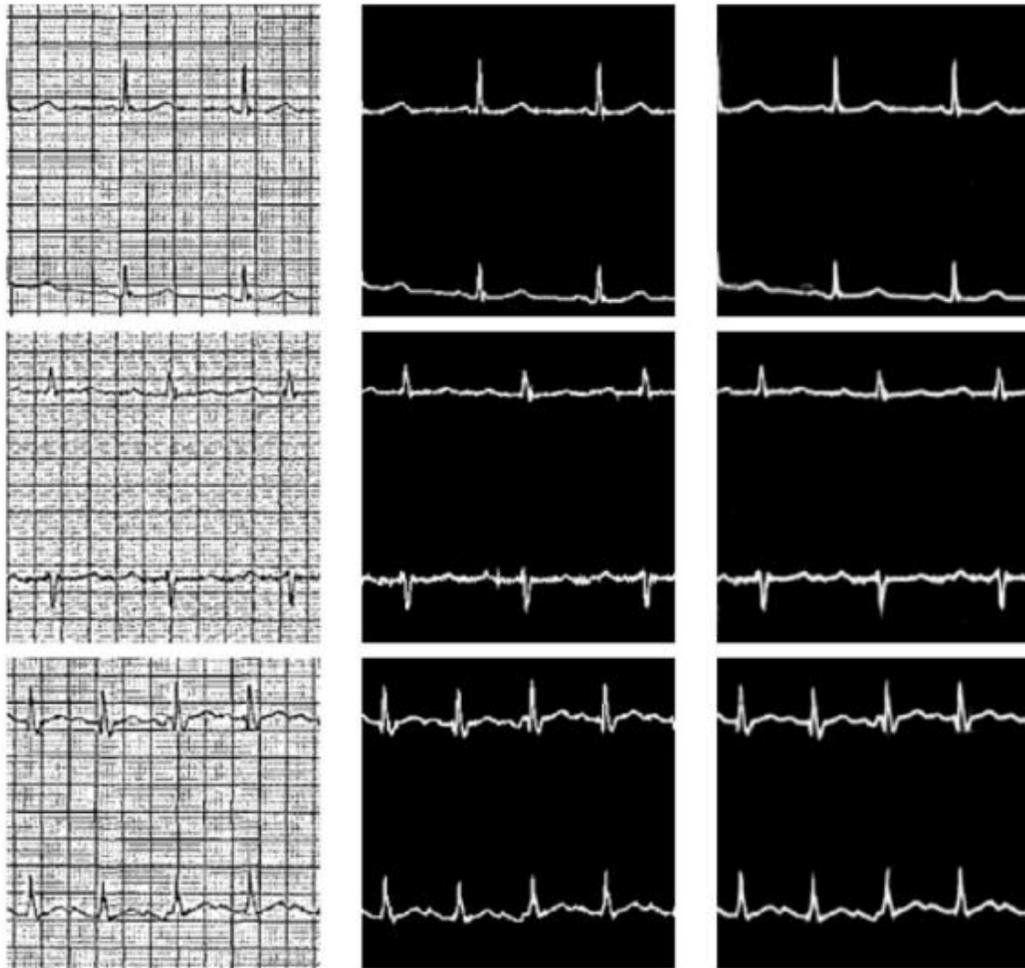


Ilustración 16. Resultados obtenidos después del proceso de digitalización (Yao, y otros, 2021)

1.2.6 Digitalización de Imágenes de ECG para la Detección del Síndrome de Bayés

En este artículo que registra la investigación, se procesaron electrocardiogramas de pacientes con la enfermedad del síndrome de Bayés, mediante la digitalización de ECG's y el procesamiento de las señales. (Franco, Escobar Robledo, Bayés de Luna, & Massa, 2018).

Se utilizó el software MatLab para realizar el procesamiento de las imágenes. En primer lugar, se realizó un proceso de segmentación, en donde se aísla la región de la señal de interés del resto de la imagen, para poder evaluar más fácilmente la morfología y tamaño de la señal ECG y poder realizar un adecuado reconocimiento de patrones.

El siguiente paso que realizan, es el proceso de umbralización que permite de una forma simple y efectiva hacer una separación de píxeles de una imagen y llevarla a escala de grises a partir de un valor umbral para que después se pueda binarizar y eliminar el fondo de la señal.

Este método utiliza un algoritmo en Matlab, en donde se introduce un valor de un umbral global y con éste se realiza la segmentación de la imagen. Seguido de esto, el software solicita que ingresen las coordenadas de la región a digitalizar y con estos datos, se obtienen los resultados visualizados en las ilustraciones 17 y 18.

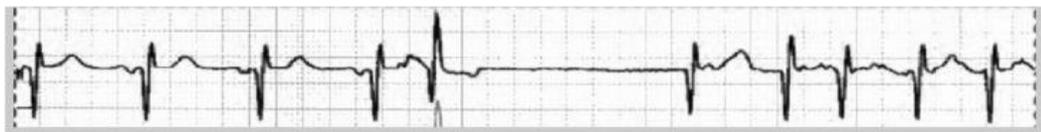


Ilustración 17. Imagen segmentada ingresada a MatLab (Franco, Escobar Robledo, Bayés de Luna, & Massa, 2018)

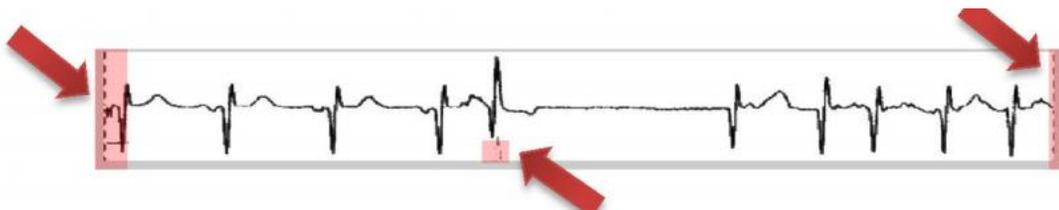


Ilustración 18. Imagen obtenida después del procesamiento con MatLab (Franco, Escobar Robledo, Bayés de Luna, & Massa, 2018)

Se puede evidenciar que quedan partes de otras señales y rastros de la gradilla de fondo en la imagen.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Millones de personas mueren por enfermedades cardíacas. De hecho, es la principal causa de muerte en el mundo (16%) (Organización Mundial de la Salud, 2019). Un diagnóstico oportuno no solo salva, permite mayor calidad de vida a quien padece una o varias deficiencias de corazón.

Por consiguiente, la importancia del electrocardiograma (ECG o EKG) un procedimiento sencillo y rápido que registra la actividad eléctrica del corazón es una de las principales herramientas para el diagnóstico de las enfermedades del corazón, sus daños y los efectos que sobre él tienen los medicamentos. Además de medir el ritmo y la regularidad de los latidos, proporciona información sobre el tamaño y la posición de las aurículas y los ventrículos.

Para tomar el examen se requieren varios tipos de electrodos, dependiendo de la derivación. Estos electrodos establecen la comunicación entre los polos de un electrolito y el circuito. Después de amplificar los electrodos situados en el tórax, se obtiene un registro de las descargas eléctricas conocido como ECG.

De otra parte, existe bastante información de patologías cardíacas emitidas por electrocardiógrafos y registradas en papel. Como lo que se obtiene es únicamente la imagen plasmada en el documento, estos registros son muy difíciles de estudiar mediante patrones estadísticos. Si se tuvieran de manera digital, para realizar un tratamiento de la señal, se podría hacer un reconocimiento automático de patrones asociados a un estado cardiaco específico. Después de revisar la literatura científica y las listas de referencias bibliográficas en ella incluidas, se puede concluir que no existe mucha información sobre estudios comparativos entre las ventajas del ECG digital y el ECG analógico o tradicional. Tal vez la novedad de la digitalización en general, contribuya a explicarlo.

Ahora bien, las doce derivaciones estándares o clásicas con las que cuenta el electrocardiograma, resultan de la exploración indirecta del corazón desde

distintos planos. Se basan en una concepción de bipolaridad (polo positivo menos polo negativo). De allí que también se les conozca como derivaciones bipolares.

Primero surgieron los potenciales proyectados sobre ambos brazos y la pierna izquierda. Después, las tres derivaciones unipolares de miembros: aVR, aVL y aVF, que aumentan la amplitud de su trazado. Finalmente, con su aporte fundamental al diagnóstico topográfico, nacieron las 6 derivaciones precordiales: de V1 a V6 también conocidas como monopulares. Desde los planos anteriores, laterales y posteriores, observan la actividad eléctrica del corazón. (Rodríguez & Enrique, 2016)

Como se observa, en primera instancia, la tecnología del ECG digital se basa en el muestreo de la señal de ECG captada por los electrodos en la superficie corporal. A diferencia de la tecnología analógica, donde la información se captura de forma continua, la tecnología digital requiere tomar “muestras” de información a intervalos regulares de tiempo.

El ECG detecta enfermedades de la arteria coronaria, cambios en la cantidad de electrolitos (químicos en la sangre), taquicardia o bradicardia (frecuencia cardíaca demasiado rápida o excesivamente lenta), defectos congénitos del miocardio, agrandamiento del corazón, enfermedades de válvula cardíaca y arritmias, entre otras.

Es de anotar que el aparato a través del cual se registran las descargas eléctricas es el electrocardiógrafo. Para su funcionamiento requiere de un galvanómetro, un sistema de amplificación y de registro en papel milimetrado. El alto grado de automatización de un electrocardiógrafo, es lo que le permite buena calidad de registro.

A saber, de las consultas realizadas se puede aseverar que las ventajas de los ECG digitales en comparación con los ECG analógicos se centran en la

capacidad de reducir o eliminar las variaciones de latido a latido y de registrar hasta ocho canales de información simultáneamente. Bajo estas circunstancias, es más fácil el diagnóstico.

Las posibilidades de almacenar, acceder remotamente y enviar a distancia la información obtenida para su interpretación, reafirman los ECG digitales como mecanismos idóneos de soporte para el diagnóstico a través de electrocardiogramas.

1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

En este contexto, la pregunta de investigación se centra en si ¿Es viable digitalizar un trazado impreso de un electrocardiograma y a partir de este, convertirlo en una señal analizable por un algoritmo?

La hipótesis planteada es que es posible digitalizar un trazado impreso de un electrocardiograma que apoye la evaluación del riesgo cardiovascular.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Evaluar técnicas de procesamiento de imágenes y señales para la obtención de ECG digital a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos comerciales.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Evaluar diferentes métodos de captura de imágenes

- Evaluar diferentes técnicas de procesamiento de imágenes para la extracción de las señales ECG.
- Adecuar espectralmente los contenidos frecuenciales de las señales.
- Desarrollar un procesamiento automático de la señal ECG
- Contribuir a una transformación digital que soporte el desarrollo de sistemas más robustos.

1.6 PRESENTACIÓN DEL DOCUMENTO

En el capítulo 1 se muestran los antecedentes del problema, el estado del arte, el planteamiento del problema, la pregunta de investigación y los objetivos de este proyecto.

En el capítulo 2 se expone el marco teórico con los conceptos requeridos para el desarrollo del proyecto.

En el capítulo 3 se enseña la metodología con la cual se realizó esta investigación y con la cual se da cumplimiento a los objetivos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados arrojados por este trabajo y contribuciones que se hacen a la ciencia.

En el capítulo 5 se muestran las conclusiones de este trabajo y se sugieren las recomendaciones para realizar trabajos futuros referentes al tema.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan conceptos clínicos y técnicos que sustentan este trabajo y ayudan a explicar sus fundamentos. De allí que sea necesario referirse a los sistemas circulatorio y cardiovascular.

2.1 APARATO CIRCULATORIO

El aparato circulatorio está compuesto por el sistema cardiovascular que transporta y hace circular la sangre, y por el sistema linfático que conduce la linfa unidireccionalmente hacia el corazón. (García & Villamil, 2016)

El sistema cardiovascular está formado por el corazón, los vasos sanguíneos (arterias, venas y capilares), la sangre y el sistema linfático que está compuesto por los vasos linfáticos, los ganglios, los órganos linfáticos (el bazo y el timo), la médula ósea, los tejidos linfáticos (como las amígdalas) y la linfa. (García & Villamil, 2016)

2.1.1 El corazón

Es el músculo que bombea la sangre rica en oxígeno y nutrientes a los tejidos del cuerpo a través de los vasos de la sangre.

[...]En una sola dirección y en un circuito cerrado donde nada se pierde, el corazón mantiene la sangre en movimiento en el cuerpo. La sangre que vuelve al corazón es recibida por los atrios, mientras que los ventrículos bombean la sangre del corazón hacia fuera. Las arterias transportan la sangre oxigenada desde el corazón hacia los tejidos del cuerpo donde se extraen los

nutrientes que regresan a través de las venas al corazón. (Azcona, L, 2021)

El órgano que más trabaja en el cuerpo humano es el corazón: late unas 115.000 veces al día, con un índice promedio de 80 veces por minuto, es decir, aproximadamente 42 millones de veces al año. Para lograr esta tarea, late gracias al músculo cardíaco, conocido como miocardio.

En un informe de (Azcona, L, 2021), durante un tiempo de vida normal, el corazón humano latirá más de 3.000 millones de latidos. Es el cálculo estimado en el tiempo de vida del corazón humano que bombea una cantidad de sangre cercana a un millón de barriles. Incluso cuando estamos descansando, el corazón continúa trabajando duro.

Para (Azcona, L, 2021), el sistema eléctrico del corazón controla la velocidad de los latidos. La actividad eléctrica del corazón que recoge el electrocardiograma se representa en un trazado con diferentes deflexiones (ondas del ECG) que se corresponden con el recorrido de los impulsos eléctricos a través de las diferentes estructuras del corazón.

Es relevante aquí conocer, así sea superficialmente, los fundamentos por los cuales se produce el movimiento del corazón, generado a través de micro corrientes eléctricas del sistema de conducción eléctrica del corazón. Ello, para comprender los principios básicos que explican las oscilaciones en las líneas del ECG y las señales cardíacas. (Azcona, L, 2021)

El sistema de conducción es el tejido especializado mediante el cual se inician y se conducen los impulsos eléctricos en el corazón, cuya representación gráfica es el ECG. El sistema de conducción (Nodo sinoauricular (nodo SA), Nodo auriculoventricular (nodo AV) y Sistema de His-Purkinje), regula la frecuencia cardíaca, la fuerza y la sincronía en la contracción del corazón.

El nodo sinoauricular es quien marca el paso en condiciones normales en cuanto al ritmo con que late el corazón, pues en él se originan los impulsos eléctricos cardíacos responsables de la actividad del corazón. Una vez estimulado el tejido auricular en su totalidad, el impulso se canaliza y orienta hasta llegar al nodo AV a través de las vías intermodales.

El nodo auriculoventricular permite que las aurículas se contraigan y vacíen su contenido de sangre en los ventrículos antes de producirse la propia contracción ventricular. El nodo AV tiene un *efecto embudo* en la canalización de los impulsos eléctricos en su viaje desde las aurículas a los ventrículos.

El Sistema de His-Purkinje después de atravesar el nodo AV, el impulso cardíaco se propaga por el haz de His y sus ramas izquierda y derecha. Posteriormente el impulso eléctrico se distribuye por toda la masa ventricular gracias a una red de microfibrillas llamadas *fibras de Purkinje*; se produce entonces la contracción (y consiguiente expulsión de la sangre) de ambos ventrículos. (Garzas, 2015)

2.2 POTENCIAL CARDÍACO

Después de abordar el movimiento del corazón, es necesario referirse al potencial cardíaco, generado por células autorritmicas que transmiten el potencial de acción a través de ondas de despolarización y tienen la virtud de despolarizarse a sí mismas. Así, logran que la carga eléctrica pase a ser positiva en el interior y negativa en el exterior. Luego, las células se repolarizan y su carga eléctrica pasa a ser positiva en el exterior tomando como referencia la carga eléctrica en el interior. Las células trascienden a una etapa de relajación.

2.2.1 Generación de la señal Electrocardiográfica (ECG)

Estudiar el comportamiento del corazón es posible mediante el estudio de las diferencias de potencial y la naturaleza eléctrica de las señales que coordinan sus movimientos. Estos voltajes pueden registrarse desde distintos puntos de la superficie del cuerpo, a través de los electrocardiogramas que registran gráficamente las corrientes que circulan en el corazón. Son útiles por que suministran información acerca de la orientación anatómica del corazón, el tamaño relativo de las cámaras, los trastornos del ritmo y de la conducción, la existencia y evolución de isquemias y entre otros, la alteración de los electrolitos.

El paso del potencial de acción a través de las células cardiacas genera formas de onda, las cuales, sumadas entre sí, generan una gráfica electrocardiográfica. (Empendium, 2019)

2.3 INTERPRETACIÓN DE UN ELECTROCARDIOGRAMA

La línea horizontal existente entre cada latido o ECG se denomina isoeletrica o basal. Sus oscilaciones en forma de ángulos, segmentos, ondas e intervalos, conforman una imagen característica repetida regularmente a lo largo de la tira de papel del ECG. Entre latido y latido va fluyendo la línea base.

El tiempo transcurrido refleja el recorrido en sentido horizontal y la altura o profundidad, la distancia en sentido vertical al voltaje producido. Cada cuadrado pequeño del papel milimetrado por el que discurre el registro de la línea, mide 1 mm. Cinco cuadrados pequeños forman un cuadrado grande, remarcado por un grosor mayor en la tira de papel del ECG. Cinco cuadrados grandes en sentido horizontal equivalen exactamente a un segundo. (Empendium, 2019)

Cada complejo de un ECG normal, tiene deflexiones, también conocidas como ondas que alternan con la línea basal. Al leer de izquierda a derecha, se distinguen la onda P, el segmento P-R, el complejo QRS, el segmento ST y finalmente la onda T.

2.3.1 Período ECG

Un período del ECG perteneciente a un individuo sano, consiste en una onda P, el complejo QRS, la onda T y la onda U. La ilustración 10 muestra las partes del complejo QRS y sus parámetros.

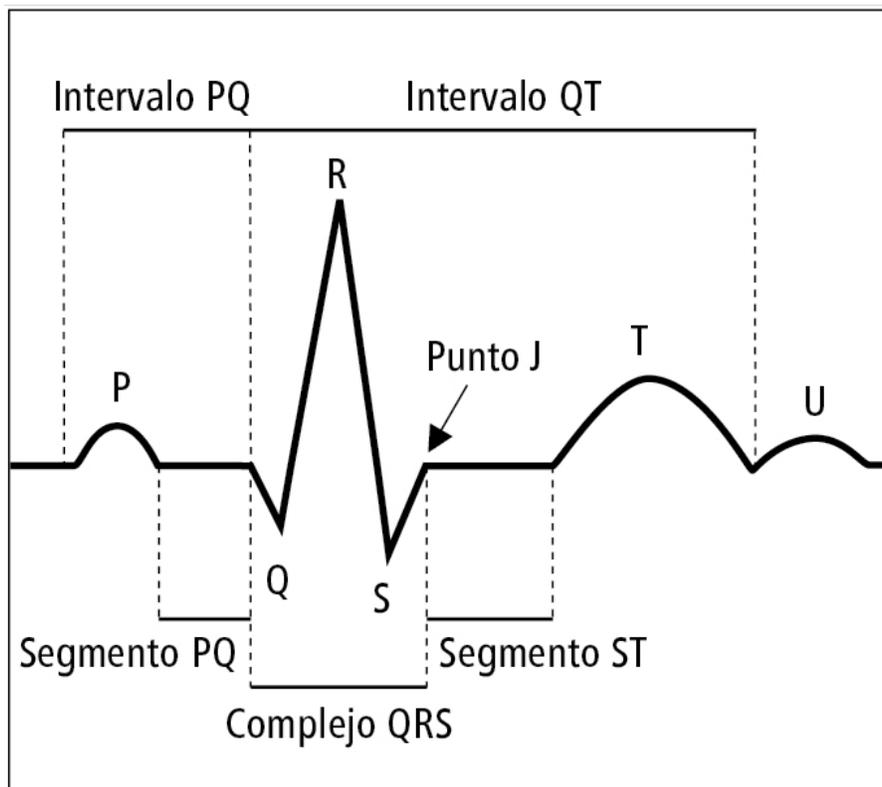


Ilustración 19 Complejo QRS (Ependium, 2019)

Los segmentos son las porciones del electrocardiograma entre las deflexiones y los intervalos son las distancias entre ondas. (Empendium, 2019)

2.3.1.1 Intervalos y segmentos del ECG

- **Onda P:** es la primera señal de activación a las aurículas, con una duración menor a 100 ms. Su voltaje no excede los 2,5mV. Normalmente es el primer sello del ECG.
- **Intervalo PR:** el retraso fisiológico del estímulo en el nodo auriculoventricular, señala un período de inactividad eléctrica. Su duración abarca entre los 120 y 200ms.
- **Complejo QRS:** indica el arribo de la señal de activación a ambos ventrículos. Dura de 80 a 100ms. Es la marca distintiva de la señal electrocardiográfica.
- **Segmento ST:** abarca desde el final del complejo QRS hasta el principio de la onda T.
- **Onda T:** surge al final del segmento ST y corresponde a la repolarización ventricular.
- **Intervalo QT:** además de simbolizar la despolarización y repolarización ventricular, alcanza desde el inicio del complejo QRS y concluye en la onda T. Su duración oscila entre 320 y 400 ms. (Empendium, 2019)

2.4 ADQUISICIÓN

Para poder realizar una toma de trazado electrocardiográfico, es necesario conectar una serie de electrodos al cuerpo, los cuales para este caso se llaman derivaciones. Éstas nos permiten capturar los niveles eléctricos producidos por la actividad cardíaca.

2.4.1 Derivaciones

El sistema de 12 derivaciones con el que se cuenta en la actualidad, permite igual número de posiciones para observar la actividad eléctrica. Son ellas las derivaciones bipolares: DI, DII, DIII, las derivaciones unipolares: aVR, aVL, aVF y las derivaciones precordiales: V1, V2, V3, V4, V5, V6. (My EKG, 2019)

2.4.1.1 Derivaciones bipolares

Las diferencias de potencial entre las extremidades del cuerpo se reconocen como se enuncia a continuación:

- El brazo izquierdo (LA) y el brazo derecho (RA): DI
- La pierna izquierda (LF) y el brazo derecho (RA): DII
- La pierna izquierda (LF) y el brazo izquierdo (LA): DIII

Este es el conocido triángulo de Einthoven, conformado por las derivaciones del sistema triaxial. (My EKG, 2019)

2.4.1.2 Derivaciones unipolares

Como miden los potenciales absolutos de las extremidades del brazo derecho: aVR, el brazo izquierdo: aVL y el pie izquierdo: aVF, se les denomina aumentadas. Conforman el plano frontal. En la ilustración 11 podemos observar la configuración de la posición de los electrodos para toma de electrocardiograma.

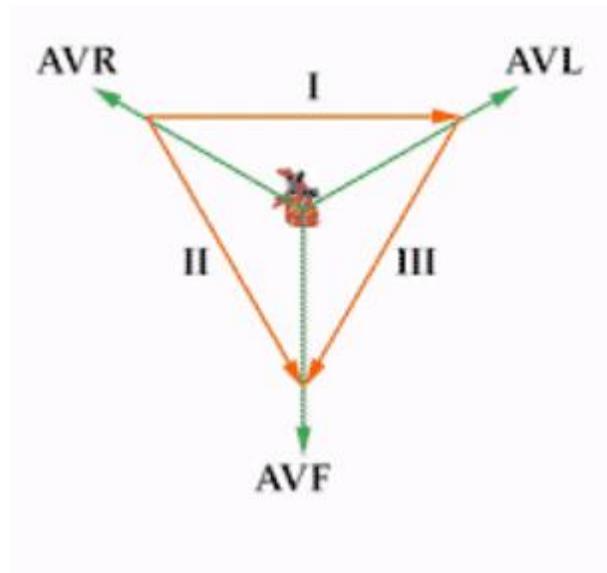


Ilustración 20 Derivaciones de extremidades y triángulo de Einthoven (My EKG, 2019)

2.4.1.3 Derivaciones precordiales

Las derivaciones unipolares y los electrodos precordiales miden el potencial absoluto en la zona donde se encuentren localizados. Se ubican en el plano transversal como se puede observar en la ilustración 12. (My EKG, 2019)

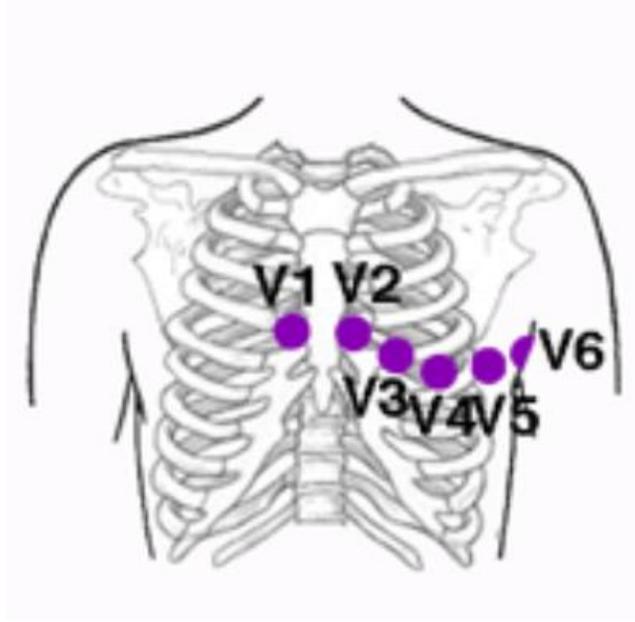


Ilustración 21 Derivaciones precordiales (My EKG, 2019)

V1: cuarto espacio intercostal para esternal derecho.

V2: cuarto espacio intercostal para esternal izquierdo.

V3: punto intermedio entre V2 y V4.

V4: quinto espacio intercostal izquierdo.

V5: al nivel horizontal de V4 en la línea axilar anterior izquierda.

V6: al nivel horizontal de V4 en la línea media axilar izquierda. (My EKG, 2019)

3. METODOLOGÍA

La metodología planteada para el desarrollo de este trabajo es experimental, ya que se afecta directamente la imagen del electrocardiograma y se prueban varios métodos para determinar cuál es el que arroja mejores resultados.

Como el objetivo de esta investigación es la digitalización de electrocardiogramas impresos, no es necesario tener muestras de electrocardiogramas de diferentes pacientes, ya que de un mismo paciente se pueden obtener bastantes muestras impresas.

Por tal razón, se obtuvieron 122 registros impresos a partir de 2 pacientes y con estas muestras se empezó a realizar el proceso de digitalización.

Para la creación de estas muestras, se contó con el electrocardiógrafo que se encuentra en la Escuela Colombiana de ingeniería, un WELCH ALLEN CP50.

Se realizaron 12 derivaciones estándar: 3 bipolares, 6 unipolares precordiales y 3 unipolares de los miembros.

Inicialmente se obtuvieron muestras a una escala de tiempo definida de $1\text{mm}=0.04$ segundo, es decir un cuadro de la cuadrícula en el eje horizontal equivale a 0.04 segundos, y en la cuadrícula vertical, 5mm que equivalen a 0.5mV. Se realizaron modificaciones en la escala de tiempo, para que la señal se pudiera apreciar dilatara horizontalmente. Verticalmente la escala se conservó.

En el siguiente diagrama (Ilustración 22) se puede observar el diagrama de flujo de la metodología desarrollada.

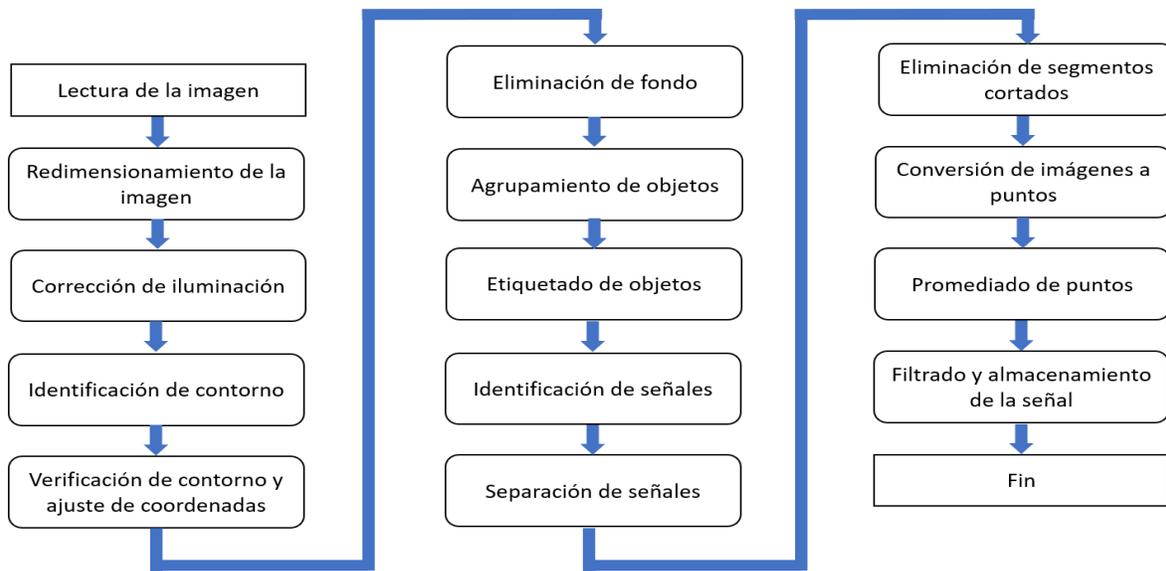


Ilustración 22. Diagrama de flujo de metodología.

3.1 CAPTURA Y PREPROCESAMIENTO DE LA IMAGEN

Se realizó la captura del electrocardiograma impreso por el electrocardiógrafo Welch Allyn CP 50 a través de diferentes métodos.

El primero que se utilizó fue la captura por fotografía mediante un celular. Se manejaron varios modelos de celulares con cámaras fotográficas de mínimo 5 Megapíxeles para que el este desarrollo esté disponible para la mayoría de usuarios.

En el transcurso de la investigación se utilizaron los siguientes equipos celulares de gama media:

- Xiaomi Redmi Note 8
Cámara principal de 48 Mpíxeles.
- Xioami Redmi 9
Cámara principal de 48 Mpíxeles.
- Asus Zenfone 2
Cámara principal de 13Mpíxeles.

El método generó muchas variables adicionales de interferencia, como lo fueron la iluminación, la resolución del celular, el enfoque de la cámara del dispositivo celular, y entre otras, la perspectiva que se genera por el ángulo de inclinación al momento de la captura entre otras. En la ilustración 23, se muestra la captura de la imagen de un electrocardiograma tomada con un teléfono celular.

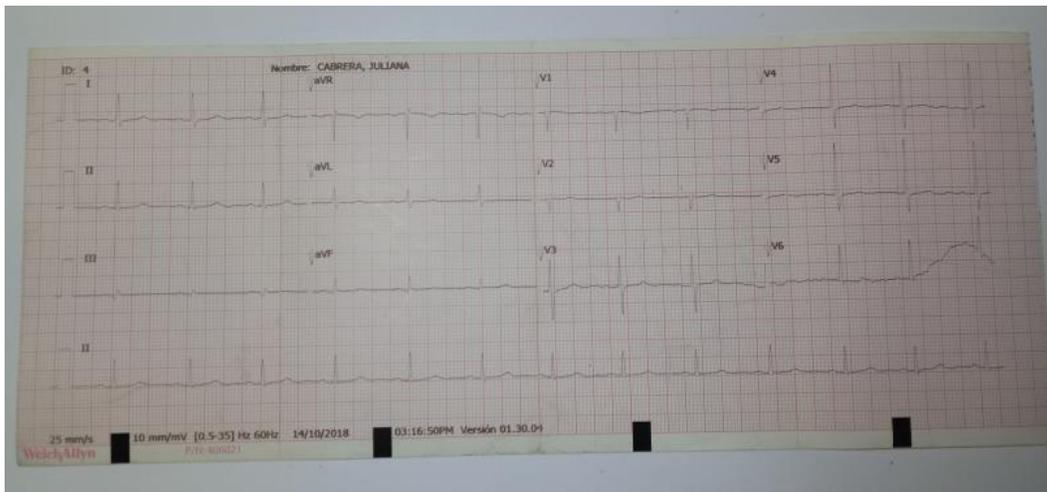


Ilustración 23. Captura fotográfica por medio de celular Xiaomi Redmi Note 8.

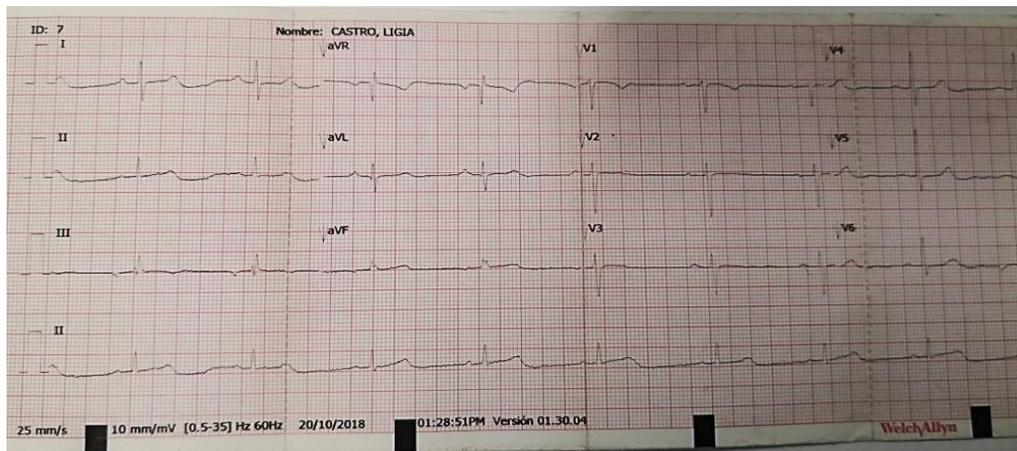


Ilustración 24. Captura fotográfica por medio de celular Xiaomi Redmi 9.

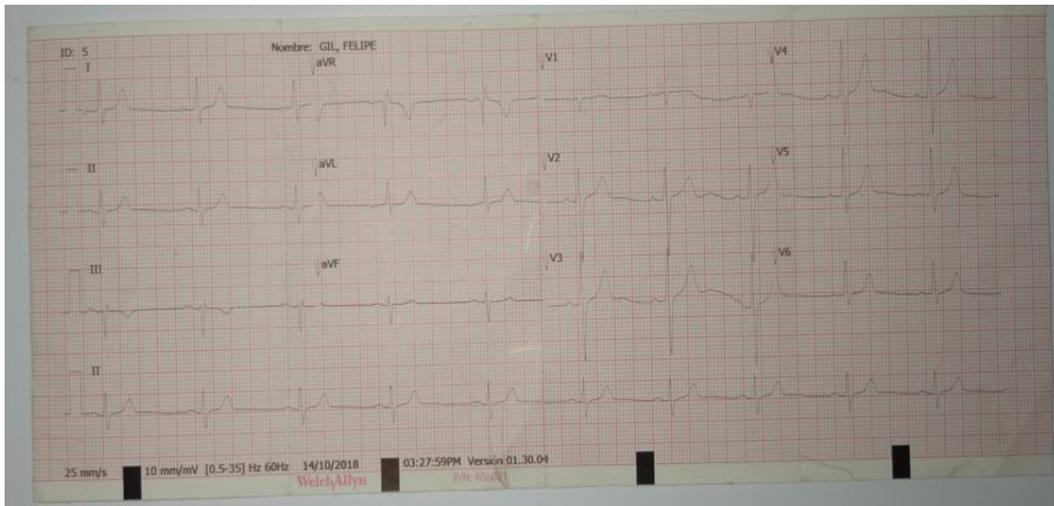


Ilustración 25. Captura fotográfica por medio de celular Asus Zenfone 2

Para poder solucionar estos inconvenientes se desarrolló métodos en donde se utilizaron librerías de OpenCv de transformaciones morfológicas (cv.morphologyEx) para buscar y realizar marcas, y así poder ajustar algunas de las variables producidas por la captura de la imagen para realizar un correcto procesamiento como lo fue la corrección de luminosidad, perspectiva e inclinación obteniendo los siguientes resultados:

En la ilustración 26 se muestra la ubicación de los centroides de las marcas del papel electrocardiográfico



Ilustración 26. Ubicación de Centroides

En la ilustración 27 se muestran estos centroides con las coordenadas de los centros, que fueron encontrados mediante iteraciones que busca los momentos de los centroides.

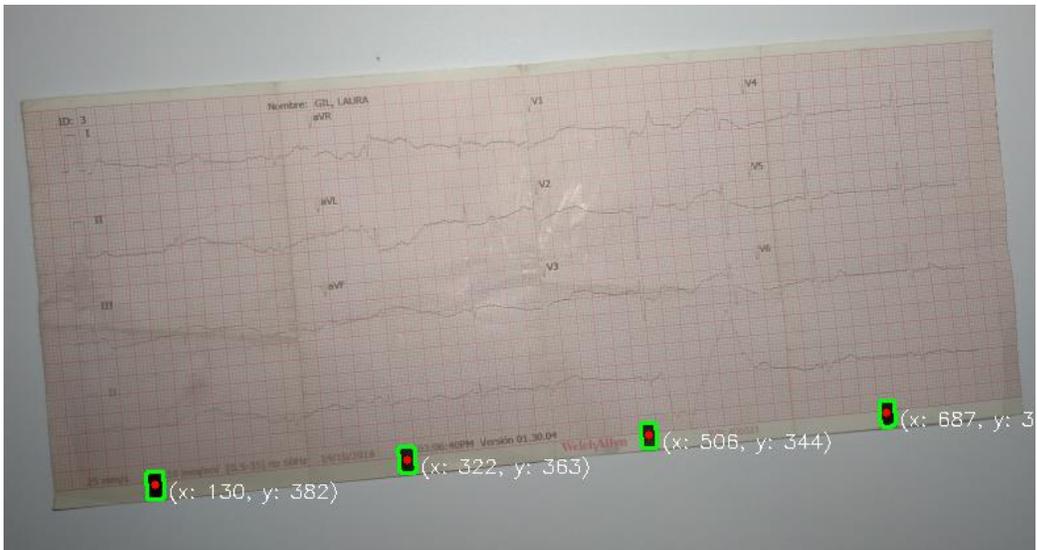


Ilustración 27. Ubicación de centroides con inclusión de coordenadas

En la ilustración 28 se muestra la alineación de la imagen a partir de las coordenadas de los centroides que se realizó con el cálculo de la recta y corrección de la pendiente.



Ilustración 28. Alineación de Centroides junto con la imagen

En este preprocesamiento se notó que dependiendo de las modificaciones de las variables anteriormente mencionadas, los resultados eran diferentes en cada ejecución.

Por tal motivo, se optó por la utilización de un escáner convencional de uso doméstico. Se utilizó el escáner de una impresora multifuncional Epson L4160, la cual tiene la resolución de 1.200 x 1.400 dpi, Por su parte, las imágenes fueron tomadas 600 ppp, en donde la luminosidad y la perspectiva permanecían relativamente constantes y se obtuvo el resultado que se observa en la ilustración 29.

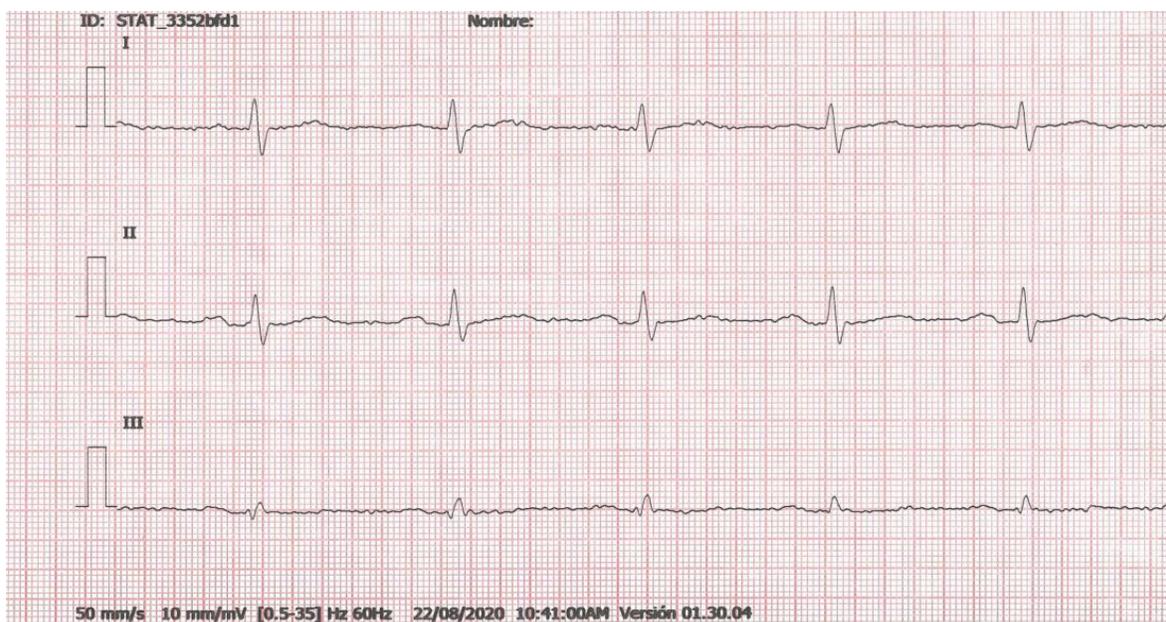


Ilustración 29. Imagen de Electrocardiograma desde escáner Epson L4160

Esto permitió avanzar y enfocarse en el procesamiento de la imagen, como la eliminación de las letras, de la cuadrícula y recorte de la señal, entre otras.

3.2 REDIMENSIONAMIENTO DE LA IMAGEN Y CORRECCIÓN DE LA ILUMINACIÓN

Debido a que los electrocardiogramas varían en su longitud, se implementó un método de redimensionamiento para trabajar siempre con el mismo tamaño de imagen.

En la toma de los electrocardiogramas a personas voluntarias, se modificó intencionalmente la velocidad de adquisición de datos para que el electrocardiograma obtenido tuviera diferente longitud y así poder simular la eficiencia de éste método.

Para la corrección de la iluminación y modificación del color, se utilizaron funciones disponibles en OpenCV de la siguiente forma:

Se usaron las siguientes funciones:

- “Color Space Conversions” la cual permite cambiar el espacio de color de una imagen representada en capas.
- “Splitting image” la cual permite realizar una división de los canales de colores.
- “Histogram Equalization” la cual posibilita realizar la ecualización de histogramas adaptativos dividiendo la imagen en pequeños bloques que se denominan mosaicos.
- Se realiza también la conversión a escalas de grises.

Y de esta manera se obtiene el siguiente resultado mostrado en la ilustración 30:

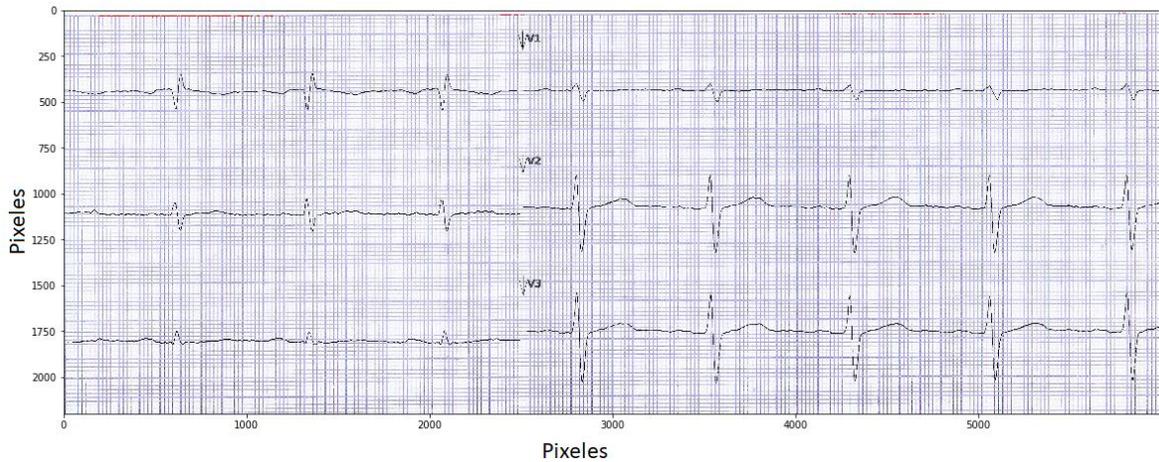


Ilustración 30. Imagen redimensionada con procesamiento de iluminación

Permitiendo así, siempre tener el mismo tamaño y color de las imágenes para que los algoritmos de trabajo desarrollen resultados similares siempre.

3.3 BINARIZACIÓN Y DEFINICIÓN E IDENTIFICACIÓN DE CONTORNOS

Se define en primer lugar un umbral máximo (threshold), el cual se toma del promedio de la primera o última fila.

Seguidamente, se realiza una binarización de esta imagen para después realizar modificaciones de dilation, erosion y closing.

En tercer lugar, se definen los contornos a través de una búsqueda con la función "findContours". El resultado es la extracción de varios puntos para únicamente 4, que serían los de las esquinas. Para tal desarrollo se realizan iteraciones en donde se calcula la longitud del arco, se reducen el número de vértices de los contornos y se obtienen los 4 puntos de los vértices de las esquinas.

Con estos cuatro vértices obtenidos, se realiza un nuevo ajuste de coordenadas y con ellas las nuevas dimensiones de la nueva imagen, obteniendo el siguiente resultado mostrado en la ilustración 31:

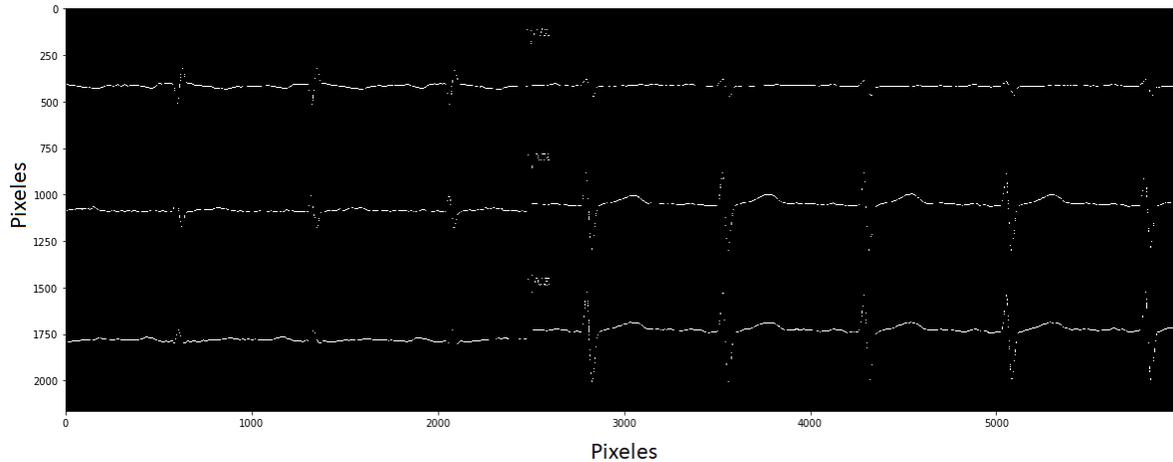


Ilustración 31. ECG binarizado con aplicación de contornos

3.4 ELIMINACIÓN DEL FONDO

Para la eliminación de la cuadrícula de fondo y dejar únicamente la señal, se ejecutan los filtros de desenfoque Gaussiano y desenfoque medio. Seguido de esto se usa una función de umbral adaptativo, que permite definir un valor de umbral que varía con base en las características adyacentes del entorno de la imagen. Posteriormente se implementan filtros gaussianos y filtro de promedio o suavizado, los cuales permiten realizar un desenfoque y reducción del ruido. Con estas herramientas se contrasta más la señal que el fondo y así se puede segmentar la imagen para la eliminación de la cuadrícula de fondo.

Adicionalmente se completan con ceros los bordes superior e inferior, utilizando las coordenadas definidas anteriormente, y de lo cual se obtiene como resultado la imagen mostrada en la ilustración 31.

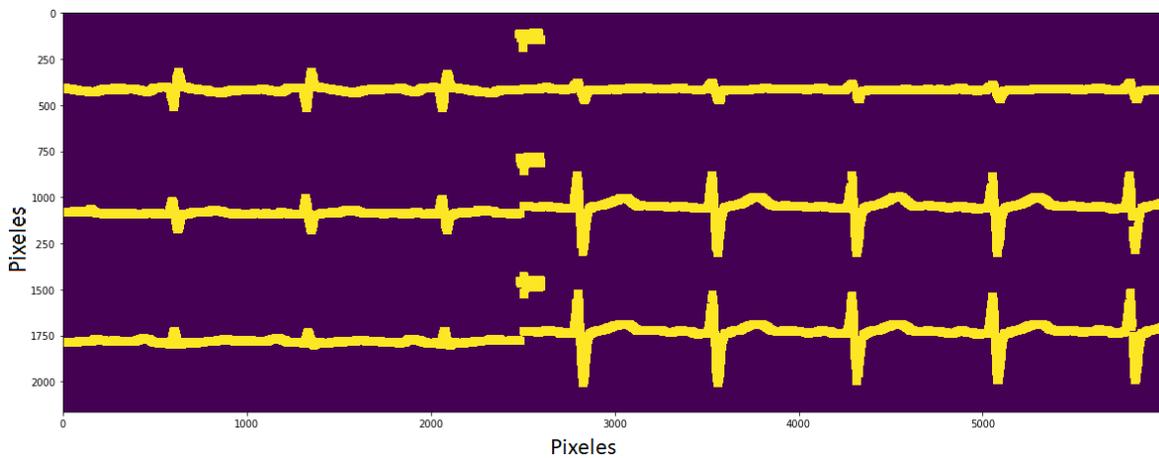


Ilustración 32. ECG dilatado sin cuadrícula de fondo

3.5 AGRUPAMIENTO DE OBJETOS PARA ELIMINACIÓN DE CARACTERES

Para realizar este agrupamiento, se realizó una binarización de forma exagerada para que se formaran grupos pequeños.

Nuevamente se ejecutan procesos de dilatación y de erosión mediante método Kernel.

Se realiza el conteo de los píxeles de cada grupo, se ordenan de menor a mayor cantidad de número de píxeles por cada grupo y se toman las tres más grandes, y los demás se eliminan, dejando así las áreas más grandes que serían las señales. La imagen erosionada y dilatada se puede observar en la ilustración 33 y la imagen que se obtiene después de la eliminación de caracteres se puede visualizar en la ilustración 34:

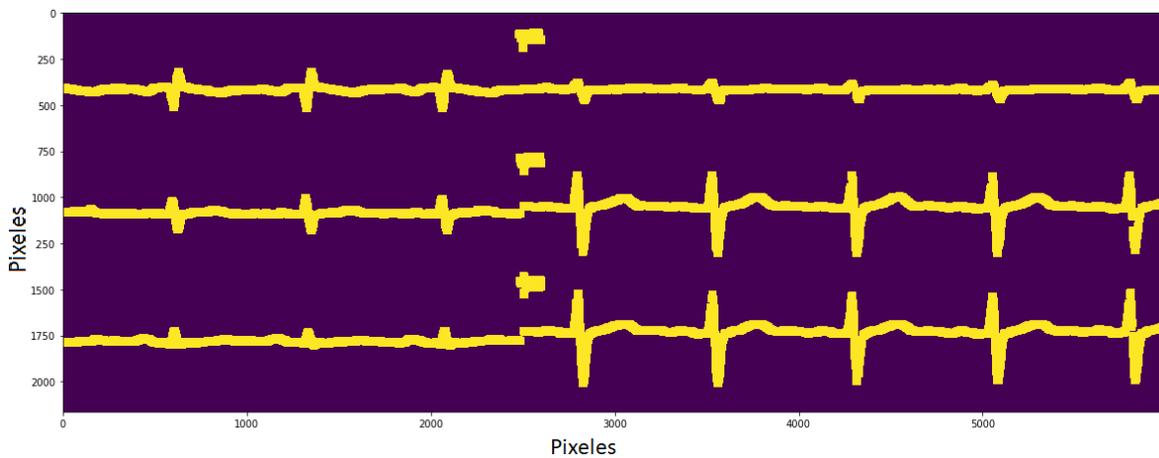


Ilustración 33. Imagen erosionada y dilatada

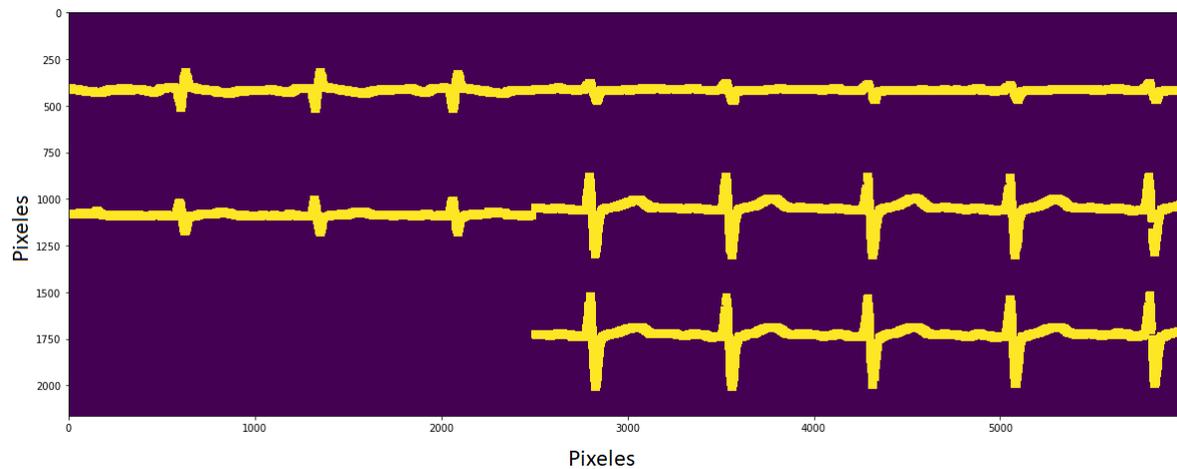


Ilustración 34. ECG sin caracteres

3.6 SEPARACIÓN DE LAS SEÑALES E IDENTIFICACIÓN DE DISCONTINUIDADES A CAUSA DE CAMBIO DE DERIVACIÓN

Para este proceso se decide mirar la coordenada en X de los centros de coordenadas de cada grupo y observar los grupos cuya coordenada X sea similar. Lo que se busca es tener tres de esos grupos.

Para tal proceso, se extrae la coordenada X, sin tener en cuenta aún los centros de las señales.

Seguidamente se filtran las coordenadas en X para determinar cuáles son similares y así queden agrupadas por nombre de la señal.

Adicionalmente se crea una línea que sirve como indicación de discontinuidad de las señales, lo cual define la finalización y/o inicio de una señal de derivación.

Así se conoce que señales pertenecen a cada derivación cardiaca y se dejan visibles únicamente tres de estas señales, obteniendo el siguiente resultado visualizado en la ilustración 35:

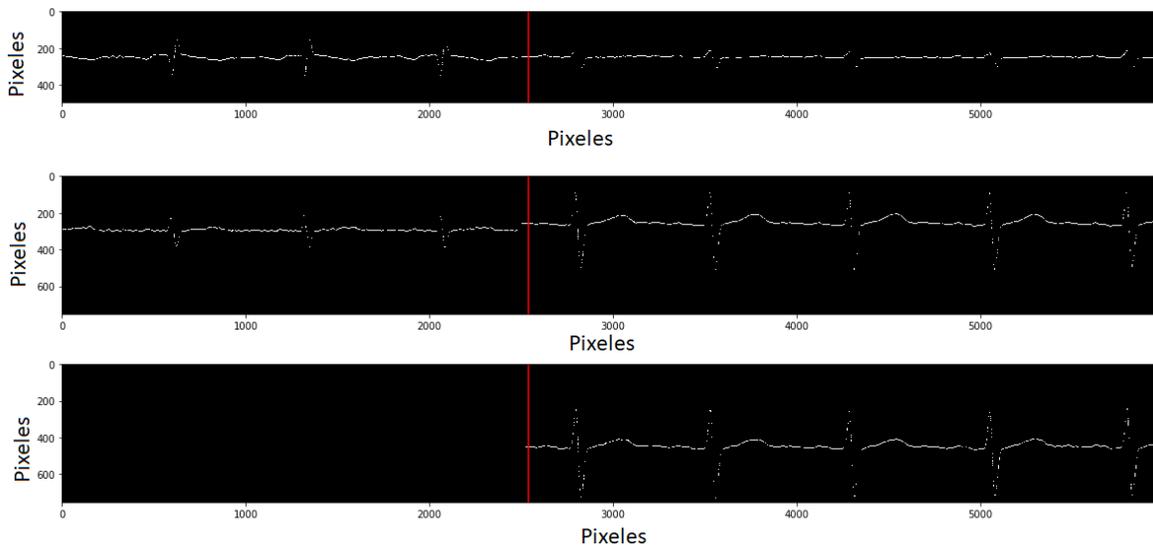


Ilustración 35. Señales separadas con indicación de cambio de derivación cardiaca

3.7 ELIMINACIÓN DE DERIVACIONES INCOMPLETAS

Para la eliminación de las derivaciones incompletas, se realiza una medición desde la marca de la línea roja que indica la discontinuidad de la señal, es decir, la terminación y/o inicio de una derivación, hasta los extremos laterales de la imagen y se procede a realizar la eliminación de la parte más corta, dejando así, una derivación completa para digitalizar. Para este proceso se realizan unas iteraciones en donde el objetivo es contar pixeles horizontales y después hacer la comparación de las variables temporales.

Con este proceso se obtienen los siguientes resultados mostrados en la ilustración 36:

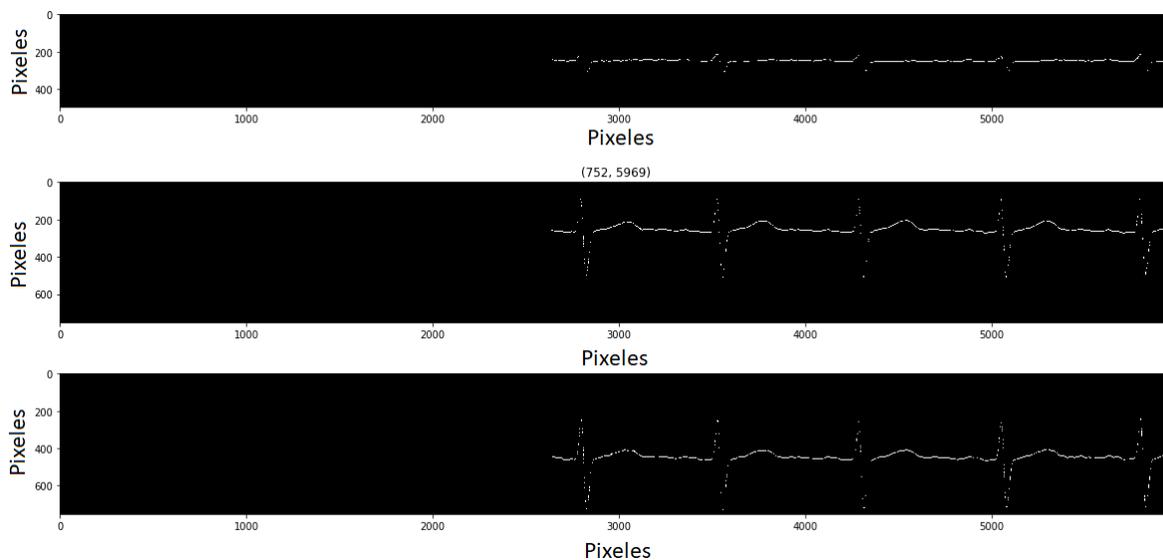


Ilustración 36. ECG recortado a tres derivaciones

3.8 CONVERTIR LA IMAGEN A PUNTOS Y GRAFICARLOS

Para este procedimiento, se debe recorrer toda la matriz de pixeles que forma la imagen (señal) y se crea otra matriz de puntos.

Una vez se tiene la matriz de puntos, se realiza la visualización de esta matriz, que corresponde a la señal original de la imagen.

Finalmente, en Python se diseña el filtro utilizando la librería signal de Scipy, en concreto la función butter. La banda de frecuencias se establece experimentalmente entre 1 Hz y 250 Hz según las recomendaciones de la literatura y los resultados experimentales. La frecuencia de muestreo es tomada de 4000 muestras por segundo, y es establecida analizando la escala de los registros fotográficos y el número de puntos obtenidos después del procesamiento de las imágenes. Esta señal final, es almacenada en un formato .dat para su correcto y posterior procesamiento.

A continuación en la ilustración 37 se observa la gráfica de la señal original después del acondicionamiento con las coordenadas obtenidas para realizar el recorte:

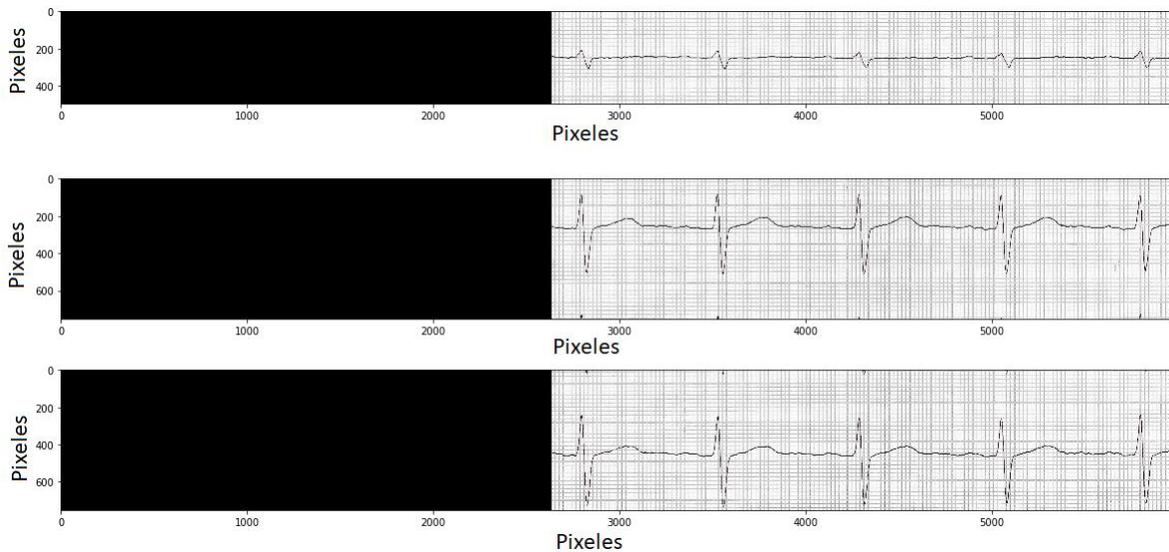


Ilustración 37. Imagen original seccionada

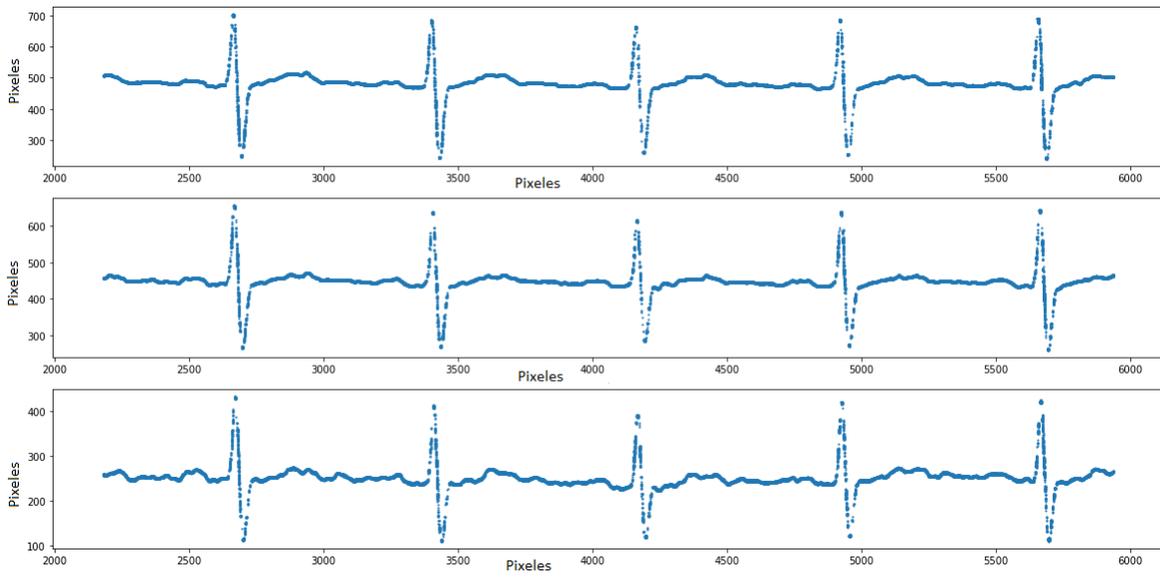


Ilustración 38. Imagen obtenida de la señal original.

En la ilustración 39 se muestra las señales de las matrices de puntos:

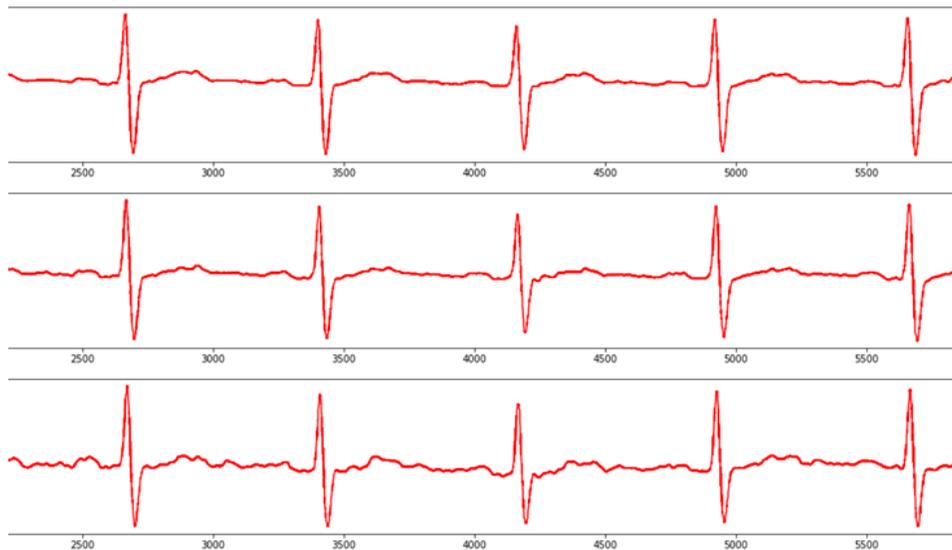


Ilustración 39. Imagen de matriz de punto ECG1

4. RESULTADOS Y CONTIBUCIÓN

4.1 RESULTADO DE LAS SEÑALES

A continuación, se presentan los resultados más importantes de acuerdo con la metodología propuesta.

Se realizará una presentación de imágenes desde que se ingresa la primera hasta el resultado final.

En la ilustración 40 se muestra la imagen obtenida por el escáner de un electrocardiograma.

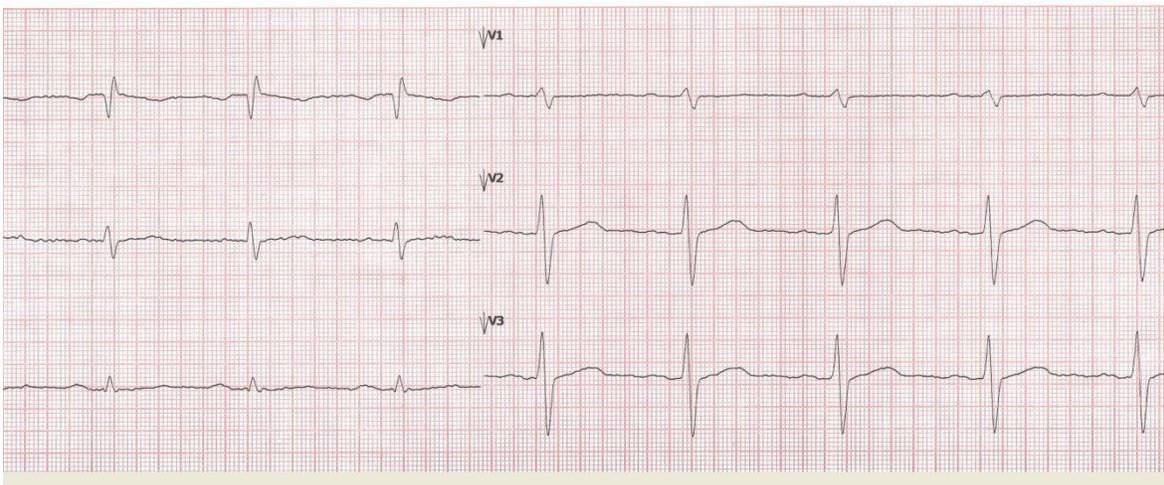


Ilustración 40. Imagen obtenida desde escáner

En la ilustración 41, se observa la imagen con corrección de iluminación y filtrado adaptativo.

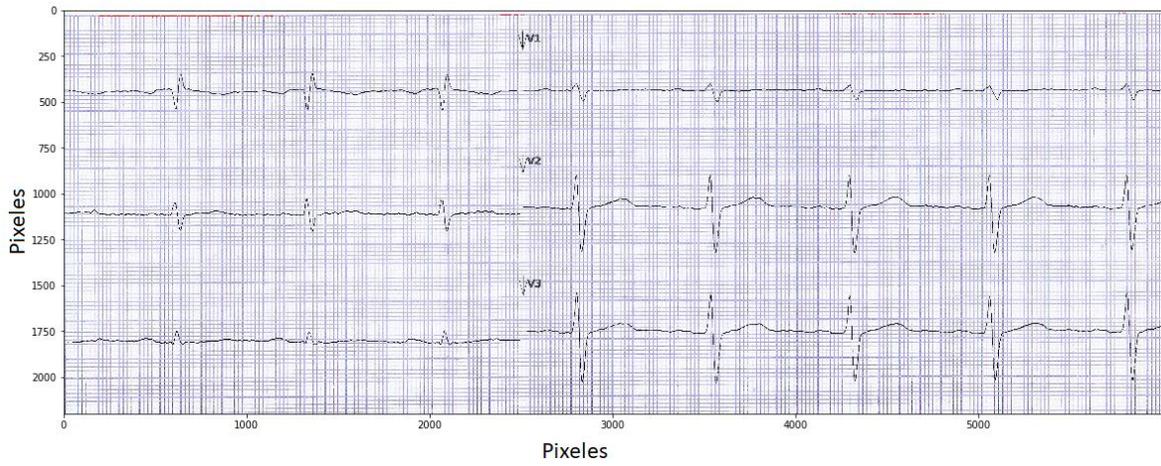


Ilustración 41 Imagen con corrección de iluminación y filtrado adaptativo

En la ilustración 42, se aprecia la imagen binarizada con contornos definidos sin cuadrícula de fondo.

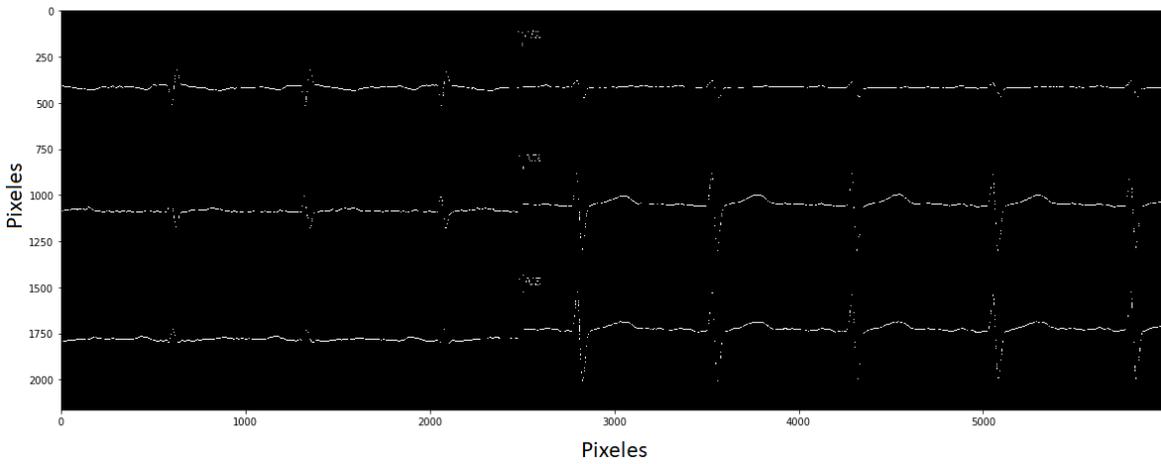


Ilustración 42 Imagen binarizada con contornos definidos sin fondo

En la Ilustración 43 se puede ver la imagen dilatada y erosionada.

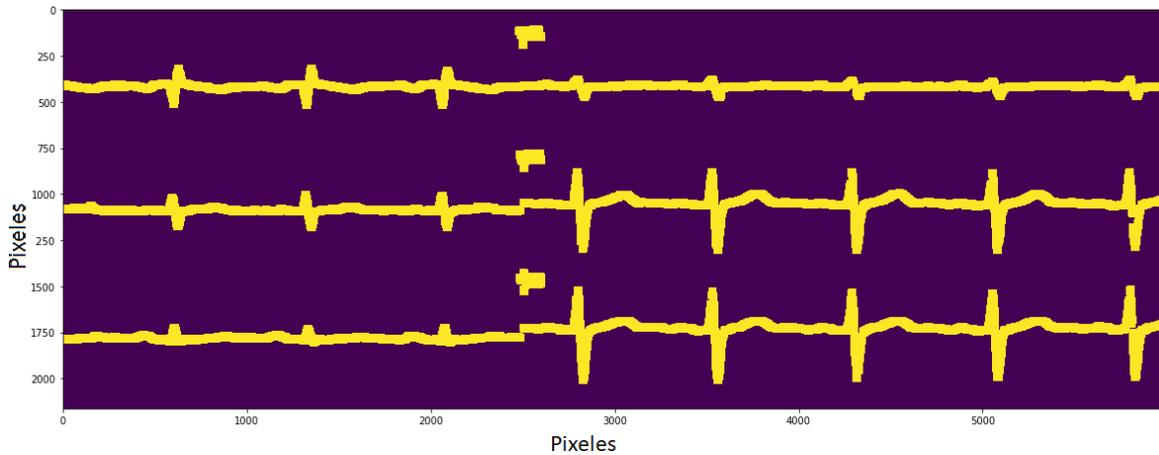


Ilustración 43 Imagen dilatada y erosionada

En la ilustración 44, se puede evidenciar la eliminación de las áreas pequeñas en donde se encuentran incluidos los caracteres.

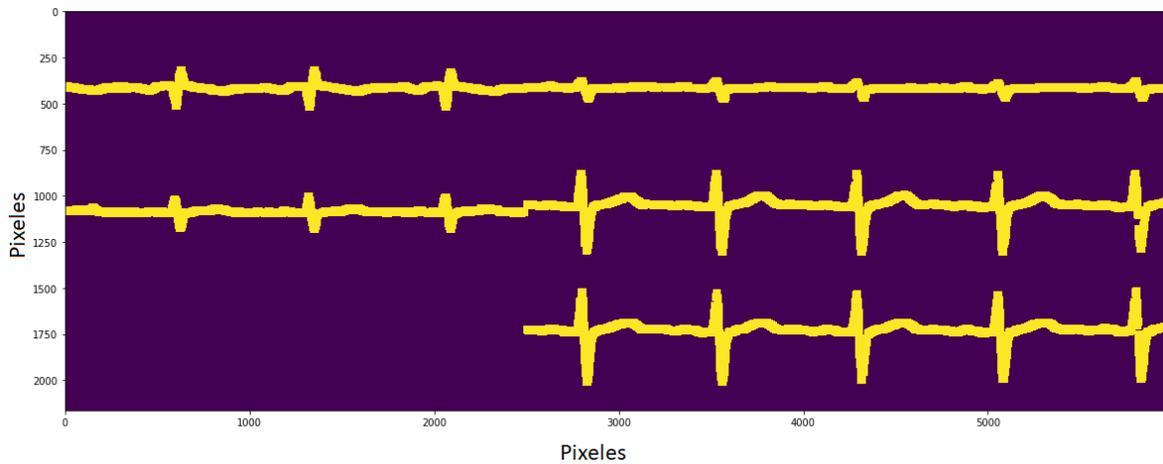


Ilustración 44 Imagen sin caracteres

En la ilustración 45, se muestra la imagen seccionada y la línea roja que indica donde se encuentran los cambios de derivaciones o las discontinuidades.

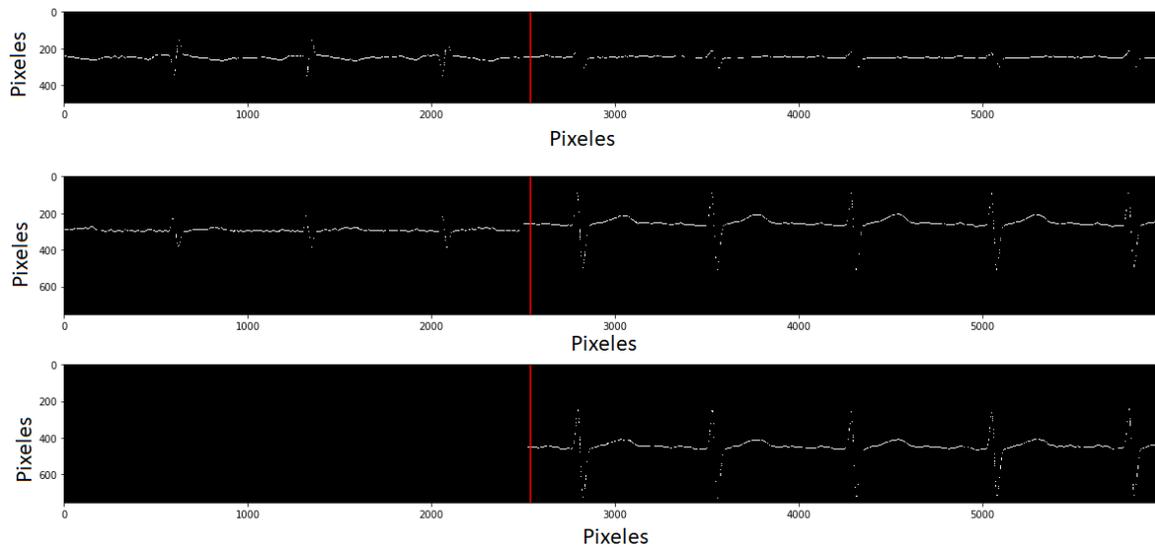


Ilustración 45 Imagen con señales separadas y con aislamiento de derivaciones

En la ilustración 46, se muestra la eliminación de las derivaciones más cortas para poder así dejar una señal más amigable.

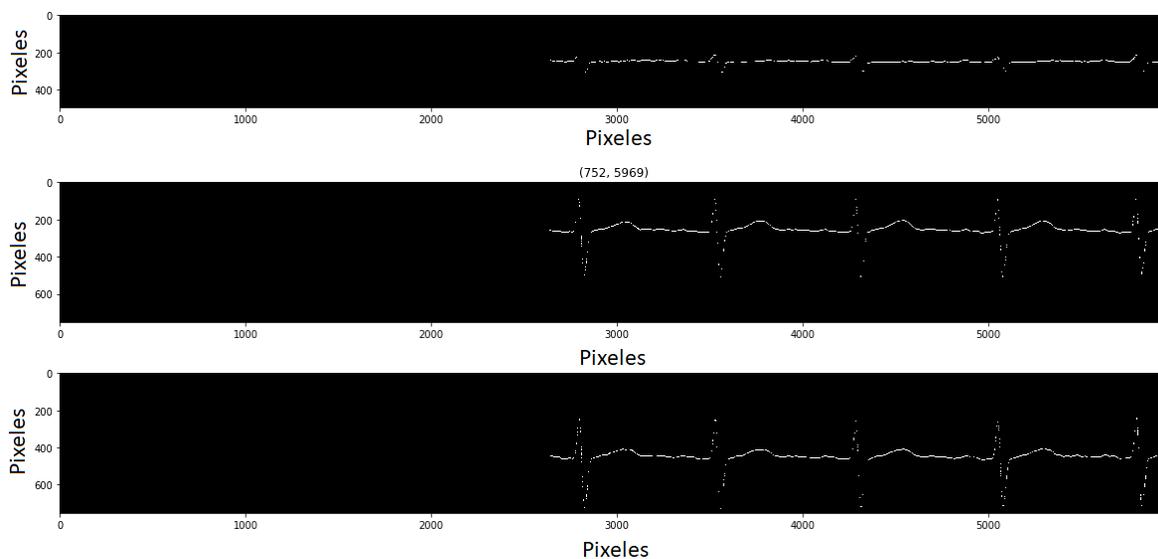


Ilustración 46 Imagen con eliminación de señales de derivaciones incompletas

En la ilustración 47, se muestra la imagen de la señal procesada antes de convertirse en puntos de una matriz.

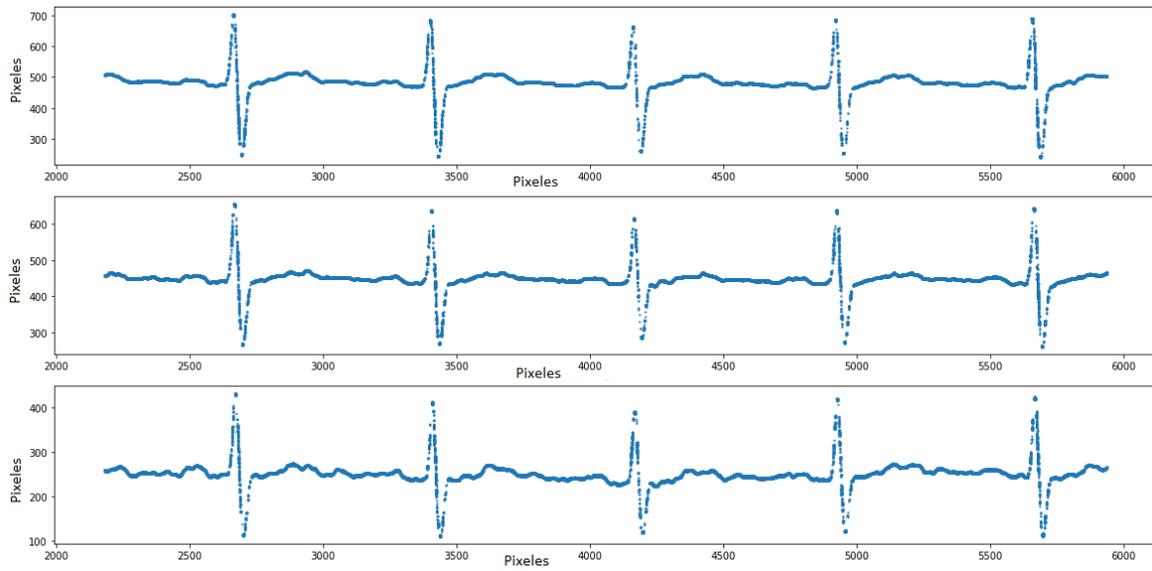


Ilustración 47 Imagen del trazado electrocardiográfico original

En la ilustración 48, se indica la representación gráfica de la matriz de puntos.

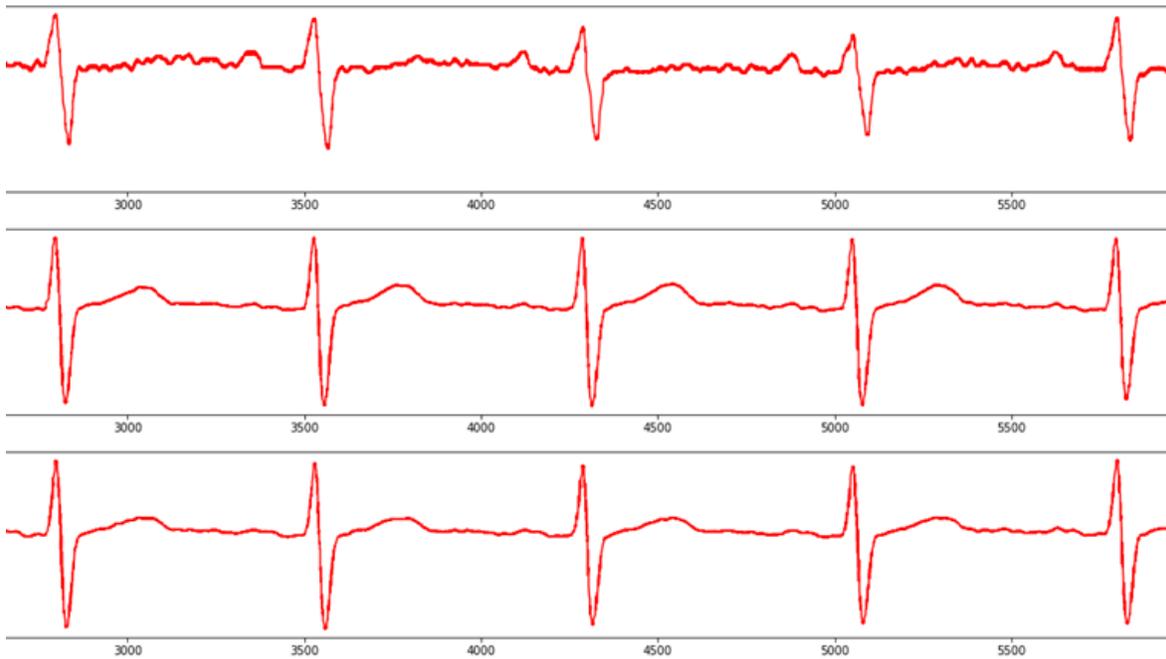


Ilustración 48 Señal digitalizada obtenida a partir de matriz de puntos

Para la verificación y la comprobación de la calidad de la digitalización del trazado electrocardiográfico, se realizó una sobreposición de la señal obtenida sobre la señal de la imagen original, y con esto, se puede observar si existe alguna alteración morfológica, o longitudinal de la señal como se puede observar en la ilustración 49.

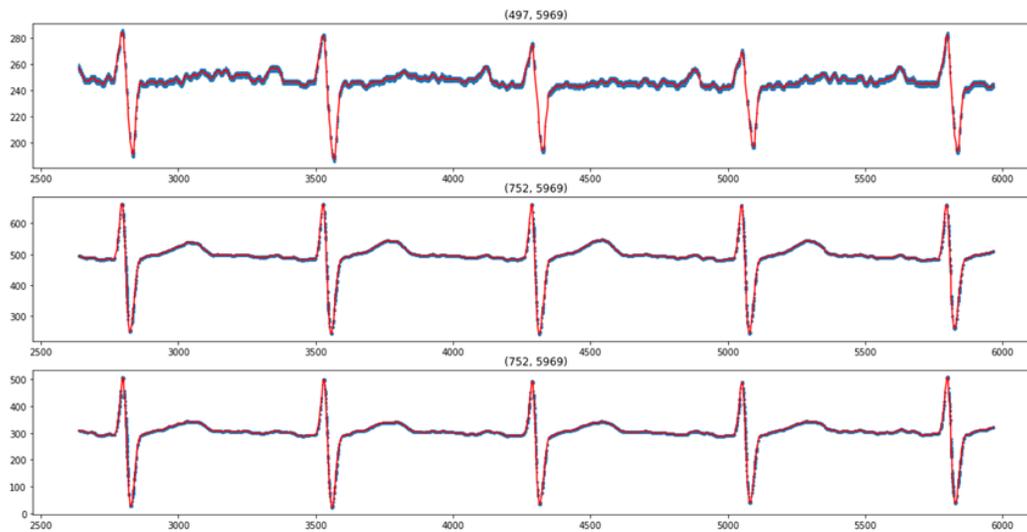
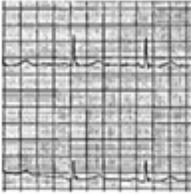
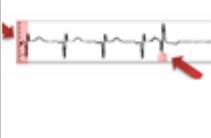
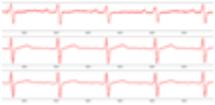


Ilustración 49 Señal digitalizada sobrepuesta sobre imagen original

En los siguientes cuadros comparativos, podemos observar las bondades y las falencias de los métodos presentados en el estado del arte comparados con el desarrollo de este trabajo investigativo.

	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 digitalización de registros ECG en papel	Obtención de Electrocardiograma Digital a partir de Trazados Impresos de Electrocardiógrafos
Derivaciones Análizadas simultáneamente				
Selección de Regiones a digitalizar	Manual	Manual	Automática	Automática
Señal Obtenida				
Unidades de Medida	Si	No	No Corresponde	No
Fallas	<ul style="list-style-type: none"> • Señales discontinuas • Atenuación en amplitud • Introducción de caracteres y ruido 	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsión en la señal. • No tiene Unidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsión de la señal • La medida de las unidades no corresponde a las señales 	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta Unidades

	Conversión de una gráfica de ECG a formato digital	Aprendizaje profundo para digitalizar registros de ECG en papel muy ruidosos	Digitalización de Imágenes de ECG para la Detección del Síndrome de Bayés	Obtención de Electrocardiograma Digital a partir de Trazados Impresos de Electrocardiógrafos
Derivaciones Analizadas simultáneamente				
Selección de Regiones a digitalizar	Manual	Manual	Manual	Automática
Señal Obtenida				
Unidades de Medida	No	No	No	No
Fallas	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción de ruido en la señal. • No presenta unidades 	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta unidades 	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta Unidades. • No segmenta la Señales. 	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta Unidades

4.1.1 Concepto médico

De acuerdo a la experiencia obtenida en mi trabajo diario en el diagnóstico de alteraciones cardiacas a partir de trazados de electrocardiografía, evidencio que la variabilidad de los resultados de un electrocardiograma impreso y del procesado en el programa de digitalización desarrollado por el Ing. Carlos Chavarro es mínima, dado que existe una congruencia alta entre los parámetros encontrados en el electrocardiograma impreso y la señal arrojada por el programa de digitalización, como por ejemplo: el cálculo de la Frecuencia Cardiaca, el cálculo del eje de rotación del corazón, la longitud intervalo PR, la morfología, amplitud y longitud de la onda QRS y la morfología de la onda T.

La utilización de este novedoso recurso sería crucial desde el aprendizaje en la escuela de medicina, dado que lo primero a identificar es el trazado electrocardiográfico normal junto con todos los cálculos que se deben realizar, debido a la alta fiabilidad del novedoso recurso se podría usar como modelo académico experimental en las prácticas de los estudiantes de pregrado de medicina y/o enfermería. Adicionalmente en la labor diaria del médico complementaria los protocolos actuales de telemedicina, los cuales se vienen implementando en las diferentes instituciones prestadoras de salud, mejorando la accesibilidad y la oportunidad del sistema de salud en las zonas rurales dispersas.

Dr. Daniel Mauricio Andrade Forero
RM. 85622015
Médico Cirujano
Universidad Nacional de Colombia.

4.2 CONTRIBUCIÓN

Con esta investigación se pretende formar el primer escalón para el desarrollo de nuevas técnicas en el procesamiento de señales médicas.

Una vez se obtiene el trazado electrocardiográfico en una señal digital, se pueden realizar distintos desarrollos para el avance del diagnóstico médico, como por ejemplo la creación de un programa de inteligencia artificial en donde se puedan ingresar señales digitalizadas de pacientes sanos y enfermos con cardiopatías específicas, y el programa logre aprender y emitir un concepto preliminar de un nuevo resultado.

Adicionalmente, con la digitalización de un electrocardiograma se puede mejorar el proyecto de telemedicina con especialista. En este caso, un médico cardiólogo o internista le podría servir como complemento a los protocolos

actuales de atención, en especial en zonas rurales dispersas, mejorando así los tiempos de atención del sistema de salud.

En lo que se refiere a la parte académica, los resultados de los electrocardiogramas pueden trascender en el futuro, sin que se tengan pérdidas de casos atípicos en pacientes con alguna patología huérfana, teniendo así la posibilidad de mostrar a los estudiantes de pregrado o de especialización, casos extraños con algún tratamiento efectivo para esa condición cardíaca.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se concluye sobre el cumplimiento de los objetivos propuestos y se da respuesta a la pregunta de investigación. Adicionalmente se dan algunas recomendaciones para investigaciones o desarrollos futuros que permitan mejorar la evolución científica en especialmente en el ámbito médico.

5.1 CONCLUSIONES

Después de estudiar y evaluar las técnicas de procesamiento de imágenes y señales, se concluye que es posible obtener electrocardiogramas (ECG) digitales a partir de trazados impresos de electrocardiógrafos comerciales de manera fiable, como objetivo central del trabajo de tesis que aquí se reseña.

Se logró desarrollar una metodología más simple para el proceso de digitalización con respecto a los anteriores desarrollos y se pudo obtener una señal confiable, sin atenuaciones y sin distorsiones que puedan afectar el concepto médico.

Esta certeza es producto del logro de cada uno de los objetivos específicos enunciados: evaluar diferentes métodos de captura de imágenes y de técnicas de procesamiento de las mismas para la extracción de las señales de ECG. Efectivamente, también se adecuaron espectralmente los contenidos frecuenciales de las señales, se desarrolló un procesamiento automático de la señal ECG y se contribuye a una transformación digital que soporta el desarrollo de sistemas más robustos. Todo ello, en beneficio de la evaluación que los médicos realizan del riesgo cardiovascular.

No obstante, al momento de eliminar la cuadrícula, no se logró recuperar la información del tiempo en el eje horizontal ni el de voltaje en el eje vertical.

Tras considerar la importancia de la información procesada y estudiada a lo largo y ancho de esta tesis, así como del trabajo de campo realizado, se diseña y evalúa una herramienta de software que utiliza diferentes técnicas de procesamiento de imágenes para digitalizar los trazados clínicos de ECG y facilitar su almacenamiento en un formato (.dat). Este, permite el desarrollo de programas como el de reconocimiento automático de patrones o de aspectos estadísticos en trabajos posteriores.

Adicionalmente, las bases de datos digitalizadas no podrían eliminarse fácilmente ya que se excluye la característica que tienen los papeles térmicos de borrado en el tiempo. En esta medida, ya no habría pérdida de estudios interesantes de posibles patologías huérfanas y en cualquier momento pueden ser consultadas y estudiadas para avances en los tratamientos oportunos.

Así mismo, el procedimiento estudiado permite almacenar los registros bajo un estándar médico aceptado por la comunidad científica internacional.

Es claro entonces, que la tecnología permite avances en todos los sectores y en el caso que nos ocupa, el de la salud. El progreso en los procesos apoya la implementación de metodologías para el monitoreo de pacientes. La técnica aquí propuesta para la digitalización del electrocardiograma a partir de trazados impresos, define los procedimientos para obtener una señal con la cual se puedan realizar mediciones estadísticas que sean adaptables al reconocimiento automático de patrones. Es decir, que disponer de los exámenes digitales de una historia clínica es viable para el análisis y diagnóstico de un paciente. Además de crear la posibilidad de consultar y comparar los registros electrocardiográficos de diferentes momentos y pacientes, crea una herramienta poderosa al momento de evaluar la evolución del tratamiento de un paciente.

Es de destacar, el contar con el apoyo de un médico con amplia experiencia en la interpretación de electrocardiogramas para que conceptualizara si la señal generada quedó acorde con la imagen, cuyo concepto emitido fue

positivo por lo que se concluye que es viable la digitalización de una señal de electrocardiograma a partir de un trazado impreso emitido por un electrocardiógrafo de forma eficiente y sin introducir errores en los resultados.

Adicionalmente, se observa que este desarrollo, permite realizar automáticamente el recorte de las señales incompletas y la interpolación de los puntos faltantes. El procesamiento se realiza con tres señales simultáneamente a diferencia del estado actual del arte.

Este estudio deja la puerta abierta para que en el futuro se puedan hacer diferentes desarrollos digitales que permitan facilitar el avance de la medicina y ayudar a las personas a tener una rápida y mejor atención médica.

5.2 RECOMENDACIONES

El desarrollo de este trabajo deja una base en el avance del prediagnóstico médico en conocimiento y en experiencia, que permite en un futuro, ayudar a desarrollar nuevos avances que permitan realizar un prediagnóstico médico antes de ir con el especialista.

Se recomienda la utilización de un escáner para la captura de la imagen, ya que con el uso de un teléfono celular, las variables que se introducen son bastantes y diferentes: depende de la iluminación, el ángulo de captura, la resolución del celular, el enfoque de la cámara y demás variables que afectan el resultado de la captura.

Se recomienda visualizar la resolución de la impresora del electrocardiógrafo y contemplar el ruido que puede introducir en la señal, puesto que estas impresoras térmicas son de tipo digital y no análogo, y al ampliar la imagen del electrocardiograma impreso, vemos un escalonamiento de la señal que introduce ruido al momento del procesamiento.

6. BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). Obtenido de Fundación Española del corazón:
<http://www.fundaciondelcorazon.com/informacion-para-pacientes/metodos-diagnosticos/electrocardiograma.html>
- Azcona, L. (2021). *El electrocardiograma*. Obtenido de Servicio de Cardiología del Hospital Clínico San Carlos:
www.fbbva.es/microsites/salud_cardio/mult/fbbva_libroCorazon_cap4.pdf
- Brugada P. (1992). Right Bundle Branch Block, Persistent ST Segment Elevation and Sudden Cardiac Death: A Distinct Clinical and Electrocardiographic Syndrome.
- Einthoven W. (2002). Un nouveau galvanometre. Myanmar, Birmania.
- Empendium. (2019). *Empendium*. Obtenido de
<https://empendium.com/manualmibe/chapter/B34.V.25.1.1>.
- Franco, L., Escobar Robledo, L., Bayés de Luna, A., & Massa, J. (2018). Digitalización de Imágenes de ECG para la Detección. *XXIV Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.
- Fundación Española del Corazón. (2020). *Fundación Española del Corazón*. Obtenido de <http://www.fundaciondelcorazon.com/informacion-para-pacientes/metodos-diagnosticos/electrocardiograma.html>
- García, L., & Villamil, P. (2016). Sistema circulatorio . *Sistema circulatorio* .
- Garzas, P. (2015). El electrocardiograma y su tecnología. *El electrocardiograma y su tecnología*. Monterrey, México.

Curve, D., Srivastava, A., Mukhopadhyay, K., Prasad, E., Shukla, S., & Muthurajan, H. (07 de 2016). Electrocardiogram (ECG) Image processing and Extraction of Numerical Information. *Electrocardiogram (ECG) Image processing and Extraction of Numerical Information*. Delhi, India.

HEB, P. (2018). An electrocardiographic sign of coronary artery obstruction.

Iberomed. (2017). *Iberomed*. Obtenido de <https://www.iberomed.es/blog/2017/08/11/electrocardiografo-y-su-funcionamiento-iberomed/>

Instituto Nacional de Salud. (9 de Diciembre de 2013). *Instituto Nacional de Salud*. Obtenido de Instituto Nacional de Salud: https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Boletines/boletin_web_ONS/boletin1.html

Jenkins, D. (2019). *Asociación Española de Enfermería en Cardiología*. Obtenido de <https://www.enfermeriaencardiologia.com/wpcontent/uploads/22histelectro.pdf>

Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2015). *Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia*. Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/PES/informe-congreso-2014-2015.pdf>

My EKG. (15 de 06 de 2019). *My EKG*. Obtenido de <https://www.my-ekg.com/generalidades-ekg/derivaciones-cardiacas.html>

Organización Mundial de la Salud . (2014). *Organización Mundial de la Salud* .

Obtenido de https://www.who.int/cardiovascular_diseases/es/.

Organización Mundial de la Salud. (2016). Obtenido de Organización Mundial de

la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/deaths-attributable-to-unhealthy-environments/es/>

Organización Mundial de la Salud. (Enero de 2017). *Organización Mundial de la*

Salud. Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs310/es/>

Organización Mundial de la Salud. (2019). *Organización Mundial de la Salud*.

Obtenido de https://www.who.int/gho/publications/world_health_statistics/es/

Organización Mundial de la Salud OMS. (18 de Mayo de 2021). *The top 10*

causes of death. Obtenido de World Health Organization:

<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death#:~:text=The%20top%20global%20causes%20of,birth%20asphyxia%20and%20birth%20trauma%2C>

Revista Colombiana de Cardiología . (2014). La Sociedad Colombiana de

Cardiología y Cirugía Cardiovascular a mediano y largo plazo. *Revista Colombiana de Cardiología*.

Rodríguez, M., & Enrique, Á. (2016). Desarrollo de un dispositivo confiable y de

bajo costo para adquirir señales electro cardíacas, con capacidad de almacenamiento de datos y generación de registros. *Desarrollo de un dispositivo confiable y de bajo costo para adquirir señales electro cardíacas,*

con capacidad de almacenamiento de datos y generación de registros. San Salvador, El Salvador.

Secretaria de Salud Bogotá. (2015). *Secretaria de Salud Bogotá*. Obtenido de http://www.saludcapital.gov.co/Paginas2/Plan_de_Desarrollo_2016_2020.aspx

Sun, X., Wang, K., He, R., & Zhang, H. (12 de 2019). A Novel Method for ECG Paper Records Digitization. *A Novel Method for ECG Paper Records Digitization*. Harbin, China.

Tun, H., Win Khaing, M., & Zaw Min, N. (11 de 09 de 2017). Analysis on conversion process from paper record ECG to computer based ECG. *Analysis on conversion process from paper record ECG to computer based ECG*. Myanmar, Birmania.

Virgin, A., & Baskar, V. (2018). Conversion of ECG Graph into Digital. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 469-484.

Yao, L., Qixun, Q., Meng, W., Liheng, Y., Jun, W., Linghao, S., & Kunlun, H. (2021). Deep learning for digitizing highly noisy paper-based ECG records. *Computers in Biology and Medicine*.