Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Diseño de un modelo electrónico de señal de electrocardiograma digital para patologías comunes relacionadas con la enfermedad COVID-19

Autora: Alba Muñoz Carrero

Tutora: Mª del Mar Elena Pérez

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, Julio 2022

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Diseño de un modelo electrónico de señal de electrocardiograma digital para patologías comunes relacionadas con la enfermedad COVID-19

Autora:
Alba Muñoz Carrero

Tutora:
Mª del Mar Elena Pérez
Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, Julio 2022

Trabajo Fin de Grado: Diseño de un modelo electrónico de señal de electrocardiograma digital para patologías comunes relacionadas con la enfermedad COVID-19

Autora: Alba Muñoz Carrero
Tutora: Mª del Mar Elena Pérez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

En este último paso al final de la meta, después de todo el camino recorrido, me gustaría hacer un agradecimiento a todas las personas que me han acompañado en este largo trayecto.

En primer lugar, agradecer a mis padres y mi hermana por estar apoyándome y soportando mis cambios de humor por la presión de los exámenes. A mi mayor apoyo y mi compañera de batallas durante la carrera, Natalia. A todos mis compañeros que me llevo de esta etapa, que no son pocos, los cuales muchos de ellos han pasado de ser compañeros a ser amigos. A mi amigo Mario por empezar y terminar la carrera juntos. A mis abuelos, mis tías y mis primos por recordarme que el esfuerzo iba a tener su recompensa. Y también, a los profesores que me han hecho ver lo bonito de la profesión que he elegido y me han proporcionado los conocimientos con los que me voy a enfrentar ahora al mundo laboral.

En estos años en los que más que mi Escuela, la ETSI se ha convertido en mi segunda casa, quiero recordar siempre todas esas horas de estudio en el Centro de Cálculo, todas las comidas en el césped o en las piscinas, todas las salidas improvisadas y escapadas para despejar la mente con mis compañeros, y todas las comidas recalentadas de estos años. Estoy segura de que esta ha sido una de las etapas más bonitas que voy a vivir y es gracias a todos los que me habéis acompañado.

Darle las gracias también a mi tutora Mª del Mar por su apoyo y ayuda durante todo el proyecto, a pesar de las dificultades.

Alba Muñoz Carrero
Sevilla, 2022

Resumen

El modelado digital de la señal de electrocardiograma (ECG) es de suma importancia para la comprensión del funcionamiento de nuestro sistema cardiovascular sin el uso de un método invasivo. Con este modelado, se hace una reconstrucción de la señal para pacientes con patologías cardiovasculares y sin ellas. Con la reciente pandemia producida por SARS-CoV-2 se ha podido apreciar un pequeño repunte en las enfermedades cardiovasculares. En este proyecto se ha tratado de representar dos de las enfermedades más comunes de este tipo entre pacientes con COVID-19: Miocarditis e Infarto del Miocardio. Esto se ha hecho partiendo de la señal de un paciente sano y reconstruyéndola con las anomalías típicas de estas enfermedades. Para ello se ha usado el software de programación Simulink® de MATLAB, utilizando para el modelado de cada parte de la señal el método de análisis de Fourier de cuarto orden. Estos modelos podrán utilizarse para la detección de dichas patologías por comparación.

Abstract

Digital modeling of electrocardiogram signal (EKG) is very important for the understanding of our cardiovascular system, without the use of an invasive method. With this modeling, a reconstruction of the signal is made for patients with and without cardiovascular pathologies.

With the recent pandemic caused by SARS-CoV-2, a small upturn in cardiovascular diseases has been observed. In this project we have tried to represent, from a healthy patient signal, these waves for two of the most common cardiovascular pathologies among patients with COVID-19: Myocarditis and Myocardial Infarction. For these representations, we has been used MATLAB Simulink® programming software. For the modeling of each part of the signal, we have used the fourth order Fourier analysis method. These models may be used for the detection of these pathologies by comparison.

Índice

Resumen III
Abstract V

Índice de Figuras IX
Índice de Tablas XI

1 Introducción 1
1.1 Contexto 1
1.2 Objetivos 1
1.3 Alcance 2
1.4 Organización del documento 2

2 Antecedentes 3
2.1 Señal de electrocardiograma (ECG) 3
2.2 Precedentes 4
2.3 Modelado del electrocardiograma normal 6
2.4 Conclusiones y principales ideas del estudio 7

3 Modelos y resultados 9
3.1 Representación enfermedades 9
3.2 Miocarditis 10
3.2.1 Descripción de la patología 10
3.2.2 Modelo creado para su representación 11
3.2.3 Parámetros para el modelo 11
3.2.4 Resultados del modelo y comparación con la señal normal 13
3.3 Infarto del miocardio 14
3.3.1 Descripción de la patología 14
3.3.2 Modelo creado para su representación 14
3.3.3 Parámetros usados para su representación 15
3.3.4 Resultados del modelo y comparación con la normal 16
3.4 Discusión de resultados para ambos modelos 17

4 Conclusiones 19
4.1 Aplicación del modelo 19
4.2 Líneas futuras de investigación 19
4.3 Dificultades 20
4.4 Planificación de tareas 20
Anexo A: Modelos de Simulink® 21
Anexo B: Ecuaciones del modelo de Fourier 25
Anexo C: Manual de prácticas para Bioingeniería 27
Bibliografía 33

Índice de Figuras

2.1 Partes de la señal de electrocardiograma [2] 3
2.2 Modelo del corazón en Starling® [15] 5
2.3 Bloques de Simulink® dividido en partes diferenciadas para una señal ECG normal 6
2.4 Respuesta Simulink® para un solo ciclo de una ECG normal 6
2.5 Respuesta de la simulación de la señal ECG normal replicada cinco veces para comparar con un electrocardiograma real 7

3.1 Señal ECG de Miocarditis de un electrocardiograma real [8] 10
3.2 Procedimiento a seguir para la representación de la señal ECG 11
3.3 Respuesta de Simulink® de un solo ciclo de la señal ECG de Miocarditis 13
3.4 Respuesta de Simulink® para la Señal ECG Miocarditis y la Señal ECG Normal para la comparación entre ambas representaciones 13
3.5 Simulación de electrocardiograma real usando cinco ciclos de la señal repetida con el ECG de Miocarditis y el ECG Normal 14
3.6 Señal ECG de IMEST de un electrocardiograma real [10] 15
3.7 Respuesta de Simulink® para un solo ciclo de la señal ECG de IMEST 16
3.8 Respuesta de Simulink® de un ciclo de la señal ECG de IMEST y Normal para la comparación entre ambas 16
3.9 Simulación de electrocardiograma real con Señal ECG IMEST y Señal ECG Normal, replicando la señal para cinco ciclos 17

4.1 Planificación de tareas durante todo el proyecto 20
4.2 Modelo en Simulink® de la señal ECG normal dividido en bloques diferenciados 21
4.3 Modelo en Simulink® de la señal ECG de Miocarditis dividido en las partes diferenciadas de la señal 22
4.4 Modelo en Simulink® de la señal ECG de IMEST dividido en cada bloque por separado 23
4.5 Time Stop = 0.7 y Run 28
4.6 Modelo en Simulink® de la señal ECG normal 28
4.7 Respuesta del modelo para la señal ECG normal para un solo ciclo 29
4.8 Modelo en Simulink® de la señal ECG de Miocarditis 29
4.9 Respuesta del modelo para la señal ECG de Miocarditis para un solo ciclo 30
4.10 Modelo en Simulink® de la señal ECG de IMEST 31
4.11 Respuesta del modelo para la señal ECG de IMEST para un solo ciclo 32

Índice de Tablas

2.1 Valores de los parámetros utilizados en Simulink® para señal ECG normal 5

3.1 Valores de parámetros utilizados para la señal ECG de Miocarditis 12
3.2 Valores de parámetros utilizados para la señal ECG de IMEST 15

1 Introducción

Actualmente, las enfermedades cardiovasculares constituyen la principal causa de mortalidad en el mundo. Desde el año 2000 han aumentado en más de dos millones de personas, representando el 16 % del total de muertes debidas a todas las causas [6]. Esta cifra es preocupante y alarmante, y las mejoras en este campo siguen siendo escasas.

Con la reciente pandemia causada por SARS-CoV-2 se han hecho estudios [5] los cuales han afirmado que la infección por COVID-19 puede afectar al sistema cardiovascular humano. Esto se relaciona particularmente con el desarrollo de patologías como la insuficiencia cardiaca, síndrome coronario agudo, miocarditis, arritmia y en ciertos casos en niños, la enfermedad de Kawasaki.

1.1 Contexto

Como punto de partida para este proyecto, se tomó de referencia el Trabajo Fin de Grado *Desarrollo de un modelo electrónico del comportamiento cardiovascular del ser humano* [11]. En este proyecto se plantea la idea de ver de una forma más visual el comportamiento del cuerpo humano para una mayor comprensión por parte del alumnado de la asignatura de Bioingeniería. De este proyecto y junto con el artículo *Synthesis of ECG Waveform using Simulink® Model* [7], surgió la idea de representar las ondas de electrocardiograma (ECG) en Simulink® para diferentes patologías cardíacas como trabajo final de la asignatura de Bioingeniería. Finalmente, el proyecto ha derivado en la representación de las señales del ECG de diferentes enfermedades cardiovasculares causadas por la COVID-19.

1.2 Objetivos

La finalidad que buscamos en este proyecto es crear un modelo digital de simulación de una señal ECG normal y para diferentes patologías cardiovasculares que estén relacionadas con la enfermedad COVID-19. Para ello se han declarado los siguientes objetivos:

1. Realizar un estudio sobre cuáles son las enfermedades cardiovasculares más comunes entre pacientes con COVID-19 y cuáles de ellas son detectables mediante un electrocardiograma.
2. Creación de un modelo digital de la señal ECG para las diferentes patologías relacionadas con la COVID-19 a partir de un modelo de un paciente sano.

1.3 Alcance

Se ha dividido el alcance del proyecto con respecto a los objetivos marcados:

- Objetivo 1:
  - Búsqueda de artículos que relacionen las enfermedades cardiovasculares con la COVID-19.
  - Elección de las dos patologías más comunes entre este tipo de pacientes y cómo se detectan en un electrocardiograma.
- Objetivo 2:
  - Creación del modelo digital de la señal ECG de un paciente sano.
  - Búsqueda de parámetros que modelen las señales ECG con patologías.
  - Creación del modelo digital de la señal ECG de las patologías elegidas a partir del electrocardiograma normal.

Fuera del alcance se queda la distinción entre las señales de electrocardiograma de personas de sexos o edades diferentes.

1.4 Organización del documento

La organización de la memoria se ha dividido en diferentes capítulos:

- En primer lugar, se va a hacer una breve explicación de las partes de una señal ECG de un paciente sano.
- Se va a exponer la investigación que se ha realizado sobre las enfermedades cardiovasculares que existen y que se han relacionado con la COVID-19.
- Después, se ha procedido a la elección entre dichas enfermedades.
- Seguidamente, se mostrarán las patologías que se han representado y los resultados obtenidos para cada una de ellas.
- Se plantearán todas las conclusiones sacadas junto con las líneas futuras de este proyecto.
- Por último, al final de la memoria, nos encontraremos en los anexos los modelos creados a partir de Simulink® , las ecuaciones del modelo de Fourier para sacar las ondas individuales y un modelo de práctica para la asignatura de Bioingeniería.

2 Antecedentes

Para facilitar la comprensión del proyecto en sí, se va a hacer una breve explicación de las partes de la señal ECG, se enumerarán los antecedentes del proyecto para ver desde el punto que se ha partido, se expondrá la creación del modelo de electrocardiograma para un paciente sano y las principales conclusiones e ideas a las que se ha llegado con este estudio.

2.1 Señal de electrocardiograma (ECG)

El electrocardiograma es la representación visual de la actividad eléctrica del corazón en función del tiempo. Para realizar un ECG estándar de doce derivaciones se utilizan diez electrodos. Se le llama derivación a la medida de voltaje entre dos electrodos colocados sobre el cuerpo del paciente [3]. Estas doce derivaciones representan doce vistas eléctricas del corazón desde doce ángulos diferentes. Los diez electrodos se colocan uno en cada extremidad (cuatro en total) y seis en la parte torácica. Sacamos las doce derivaciones de solamente diez electrodos, puesto que estas medidas son diferenciales.

En este proyecto nos hemos centrado en la derivación I (registra la diferencia de voltaje entre los electrodos del brazo izquierdo y del brazo derecho) para facilitar los resultados. El trazado típico de un ECG registrando un latido cardíaco normal consta de varias partes, las cuales cada una tiene su significado. Para verlo con mayor claridad, vamos a hacer uso de la siguiente imagen:

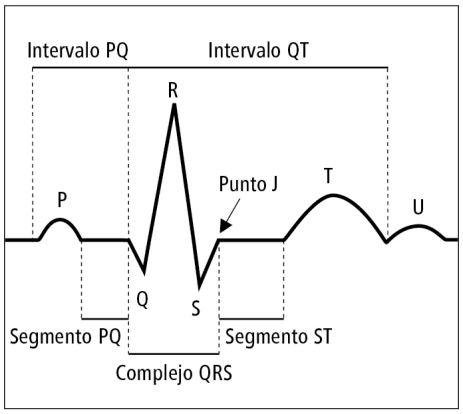

Figura 2.1 Partes de la señal de electrocardiograma [2].

En ella podemos distinguir varias partes:

- *Onda P: contracción de las aurículas*
- *Segmento PR: vaciado de las aurículas*
- *Complejo QRS: contracción de los ventrículos*
- *Segmento ST: vaciado de los ventrículos*
- *Onda T: relajación del corazón*
- *Onda U: posible repolarización de las fibras Purkinje*

Con respecto a la onda U, no se sabe a ciencia cierta su fuente, pero la teoría más común sobre su origen es la repolarización de las fibras de Purkinje [4].
Hay ciertas patologías que son detectables mediante el electrocardiograma. Dependerá de ciertos factores, como cambios específicos en la onda T, descenso del segmento ST, etc.

2.2 Precedentes

Para llegar a la idea de donde surgió este proyecto se ha realizado un estudio previo. Se partió del Trabajo Fin de Grado *Desarrollo de un modelo electrónico del comportamiento cardiovascular del ser humano* [11]. Su idea principal es investigar formas de estudio más experimentales para que el alumnado de la asignatura de Bioingeniería vea de una forma más visual los avances en este campo y llegar a una mayor comprensión de las diferentes tecnologías. De aquí surgió la idea de por donde guiar este proyecto.

Seguidamente, para el trabajo final de la asignatura de Bioingeniería se utilizó el artículo *Synthesis of ECG Waveform using Simulink® Model* para darle un uso más didáctico. El artículo consta de un modelo de la señal ECG creado a partir de la herramienta de programación Simulink® , de MATLAB. Resulta de gran utilidad para ver gráficamente todas las partes de la señal de ECG normal, sin necesidad de tener a un paciente conectado. Es muy útil estudiar cada parte de esta señal, puesto que como hemos visto en el apartado anterior, cada una consta de ciertas características, las cuales, si están alteradas, nos estarán informando de que se está produciendo una anomalía en nuestro sistema cardiovascular.

Se ha hecho una investigación sobre diferentes modelos digitales del corazón en busca de ideas para el enfoque del proyecto. Uno de los artículos por los que se empezó fue por *Simulation of Cardiovascular Diseases Using Electronic Circuits* [15], en el que se plantea un modelo del corazón, a nivel de tensiones, resistencias, cargas y capacitancias que corresponden al flujo, presión arterial, etc. Este proyecto está realizado mediante el software Starling y a su vez, también plantea problemas como insuficiencia ventricular y estenosis mitral, entre otras.

Su modelo digital es el que se muestra a continuación:

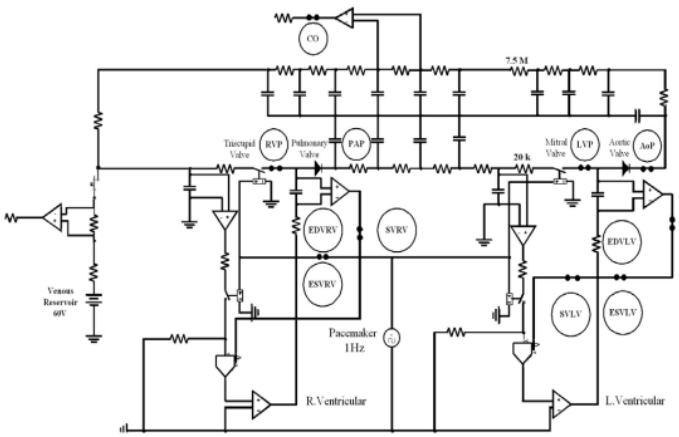

Figura 2.2 Modelo del corazón en Starling® [15].

Otro artículo a destacar es *A review on low-dimensional physics-based models of systemic arteries: application to estimation of central aortic pressure* [17], en el que se plantean modelos hemodinámicos, ajustándose lo máximo posible a la realidad. Se incluyen tanto modelos de alta dimensión (modelos 2D y 3D), como modelos de baja dimensión (0D, 1D y modelos de carga tubular).

A partir de aquí se decidió utilizar el modelo descrito en el artículo mencionado *Synthesis of ECG Waveform using Simulink® Model* y modelar esta señal para diferentes enfermedades. En este modelo se ha utilizado el método de análisis de Fourier de cuarto orden para la creación de cada onda individual. Las ecuaciones utilizadas para este método podemos encontrarlas en el Anexo B: Ecuaciones del modelo de Fourier.

Los valores de cada uno de estos parámetros son:

Tabla 2.1 Valores de los parámetros utilizados en Simulink® para señal ECG normal.

	$Intervaltime(ms)$	C_θ	$\omega_\theta(rad/sec.)$	n	A_n	B_n
PR wave	150	0.1930	50.8400	1	-0.05936	-0.0421
				2	-0.001045	0.0007528
				3	-0.001097	0.006853
				4	-0.003357	-0.002575
QRS wave	190	0.3330	27.5600	1	-0.1478	0.3649
				2	-0.0897	-0.1668
				3	0.03549	-0.03145
				4	-0.007896	0.005792
ST wave	220	0.2239	32.3000	1	-0.08521	-0.06894
				2	0.0005602	0.003117
				3	-0.00397	0.007659
				4	-0.00485	0.002272

Con estos datos extraídos del artículo se ha desarrollado el modelo de señal de ECG normal, el cual veremos en el siguiente apartado.

2.3 Modelado del electrocardiograma normal

Cada onda individual ha sido modelada utilizando el método de análisis de Fourier de cuarto orden. Cada parte de la onda ha sido generada mediante bloques generadores de intervalos, bloques de función de rampa, bloques de productos, bloques de generación de segmentos y sumadores, generando así una onda de intervalo PR, una onda de intervalo QRS y una onda de intervalo ST dentro de diferentes rangos de tiempo para un solo ciclo de onda de ECG.

El modelo utilizado es el siguiente:

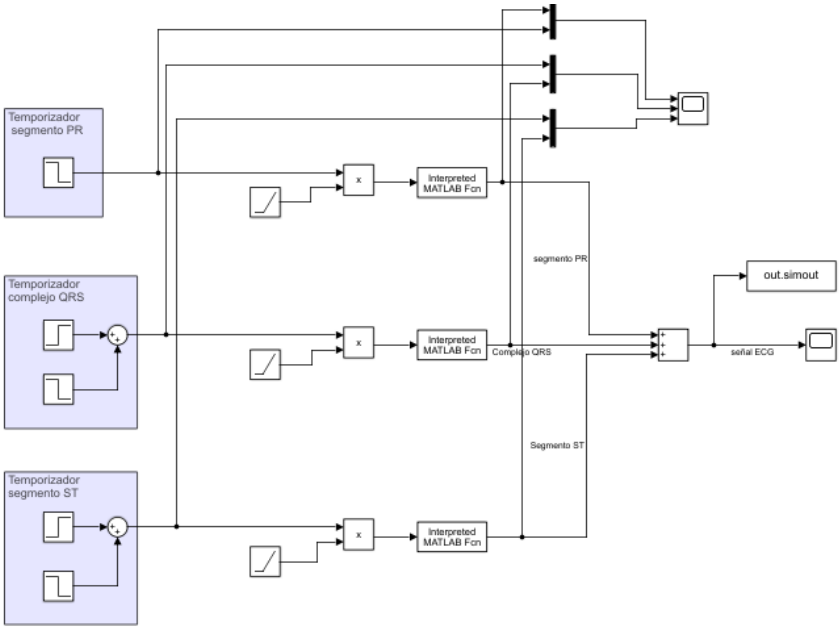

Figura 2.3 Bloques de Simulink® dividido en partes diferenciadas para una señal ECG normal.

Para la vista del Scope, se ha utilizado un estilo similar a un electrocardiograma real y la respuesta generada es la siguiente:

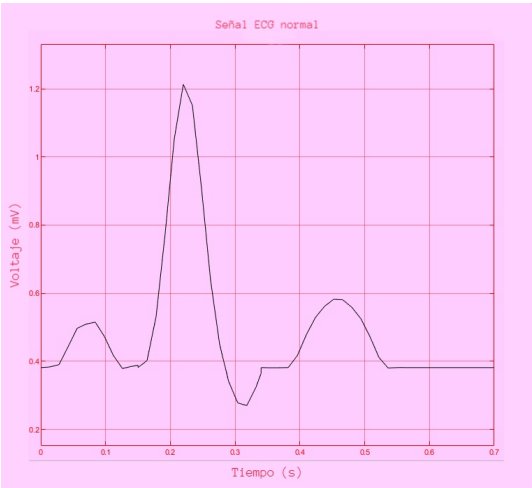

Figura 2.4 Respuesta Simulink® para un solo ciclo de una ECG normal.

Ésta es la representación de un solo ciclo de la señal ECG. Con vistas a la corroboración por parte de un cardiólogo, se ha adaptado esta señal para varios ciclos de esta y así tener una mayor percepción de lo que se está realizando:

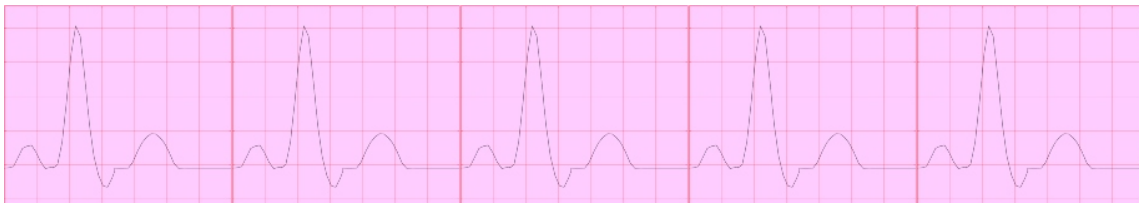

Figura 2.5 Respuesta de la simulación de la señal ECG normal replicada cinco veces para comparar con un electrocardiograma real.

Como podemos apreciar, en este modelo no se ha tenido en cuenta la onda U de la que se ha hablado en el apartado anterior.

Con toda la información extraída, se planteó cuál podría ser el objetivo principal de este proyecto. Se decidió coger de referencia el modelo de señal ECG creado con Simulink® y representar diferentes patologías cardiovasculares que ha acarreado la COVID-19. Para ello se ha hecho un estudio detallado de cuáles han sido las enfermedades más comunes entre este tipo de pacientes, y cuáles de ellas son detectables a través de un electrocardiograma. Este estudio se va a explicar en el siguiente apartado y se va a hacer una elección de las patologías que se van a estudiar y representar en un ECG.

Debido a que la enfermedad COVID-19 es muy reciente, no hay muchos artículos ni mucha información sobre sus efectos secundarios relacionados con el sistema cardiovascular, por lo que la mayoría de los estudios se han hecho con un número de población bastante reducida y los porcentajes entre diferentes estudios cambian considerablemente. Aunque es un dato importante, nuestra principal preocupación es cuáles han sido estas patologías, no su porcentaje. Por lo que vamos a partir de ese punto.

2.4 Conclusiones y principales ideas del estudio

A modo de resumen, podemos sacar ciertas ideas en claro para el inicio de este proyecto, que son las siguientes:

- *Hay una alta tasa de mortalidad debida a las enfermedades cardiovasculares.*
- *Muchas de ellas son detectables mediante un electrocardiograma.*
- *Existen modelos digitales de una señal ECG normal.*
- *La enfermedad COVID-19 ha incrementado el número de ciertas patologías cardiacas.*
- *El objetivo es crear un modelo de señal ECG digital para algunas de las patologías más comunes entre este tipo de pacientes.*

Una vez teniendo claras las ideas principales sacadas como conclusión del primer estudio realizado, se va a proceder a la investigación de las patologías mencionadas anteriormente.

3 Modelos y resultados

Algunas complicaciones cardiovasculares tales como la miocarditis, el infarto agudo de miocardio, la arritmia y la insuficiencia cardíaca (entre otras), han sido reconocidas durante epidemias anteriores y contribuyen significativamente a la mortalidad. De este mismo modo, los brotes anteriores de coronavirus se han asociado con una carga significativa de enfermedades cardiovasculares [16].

3.1 Representación enfermedades

Por ello, el siguiente paso ha sido hacer un estudio sobre las diferentes patologías cardiovasculares producidas por la COVID-19. Debido a que no se han hecho investigaciones a grandes niveles por su reciente aparición, los datos recogidos se han realizado entre pequeñas poblaciones y, por tanto, los porcentajes difieren entre ellos. Aun así, se han recogido datos suficientes como para ver cuáles de estas han sido las más frecuentes y de más importancia. Se ha tenido en cuenta que las enfermedades a representar tienen que verse reflejadas en un electrocardiograma.

Según uno de los estudios [12], se estableció un aumento de riesgo de infarto agudo de miocardio (Síndrome coronario agudo o IMEST) en pacientes con enfermedades respiratorias agudas como la COVID-19, con una tasa de incidencia del 6.1 %. También se han presentado casos de pacientes con miocarditis aguda y fulminante debido a coronavirus. Estudios de seguimiento han descrito complicaciones durante la hospitalización de este tipo de pacientes que incluían patologías como SDRA y arritmias.

Otra investigación realizada en Italia [14], publicó los datos de 1.625 pacientes fallecidos por esta enfermedad. Entre ellos, el 30 % tenían enfermedad coronaria, el 24,5 % fibrilación auricular y el 9,6 % antecedentes de accidente cerebrovascular. Solo tres pacientes (0,8 %) no tenían enfermedad subyacente y tres de cada cuatro tenían dos o más comorbilidades. Esta investigación, junto con otras realizadas, han confirmado que la COVID-19 puede producir daño y disfunción miocárdica. De hecho, la elevación de la troponina (proteína globular del músculo cardíaco) y las anormalidades electrocardiográficas son hallazgos frecuentes. El dato que se ha considerado uno de los más relevantes es la fuerte relación entre lesión cardíaca y mortalidad por COVID-19: 51,2 % con lesión frente al 4,5 % sin ella.

Se ha hecho una recopilación entre diferentes artículos de las patologías cardiovasculares más frecuentes y han sido las siguientes:

- *Insuficiencia cardiaca*
- *Síndrome coronario agudo (infarto del miocardio)*
- *Miocarditis*
- *Arritmia y paro cardiaco repentino*
- *Enfermedad de Kawasaki (en algunos niños)*

De entre todas ellas se ha hecho una elección, para su posterior representación, de las dos más prevalentes:

3.2 Miocarditis

A continuación se va a explicar la descripción de la enfermedad, se va a comentar el modelo creado para la representación de dicha patología, los parámetros usados para el modelo y los resultados obtenidos haciendo una comparación con la señal ECG normal.

3.2.1 Descripción de la patología

Primero vamos a comenzar explicando en qué consiste esta patología. La miocarditis es la inflamación del músculo cardíaco (miocardio), que causa la muerte del tejido. La inflamación puede reducir la capacidad de bombeo del corazón y causar ritmos cardíacos rápidos o irregulares [1].

Esta enfermedad es fácilmente detectable a través de un electrocardiograma. Sus cambios respecto a una señal ECG normal son cambios específicos en la onda T y en el segmento ST. Vamos a usar una imagen para poder verlo visualmente:

Figura 3.1 Señal ECG de Miocarditis de un electrocardiograma real [8].

Donde se pueden ver las anomalías mencionadas y se puede detectar fácilmente la patología.

3.2.2 Modelo creado para su representación

Para crear esta señal digitalmente, nos hemos basado en el modelo de la señal ECG normal mostrado en la Figura 2.3. Para llegar a esta señal hemos seguido una serie de pasos, los cuales vamos a representar mediante un diagrama de bloques.

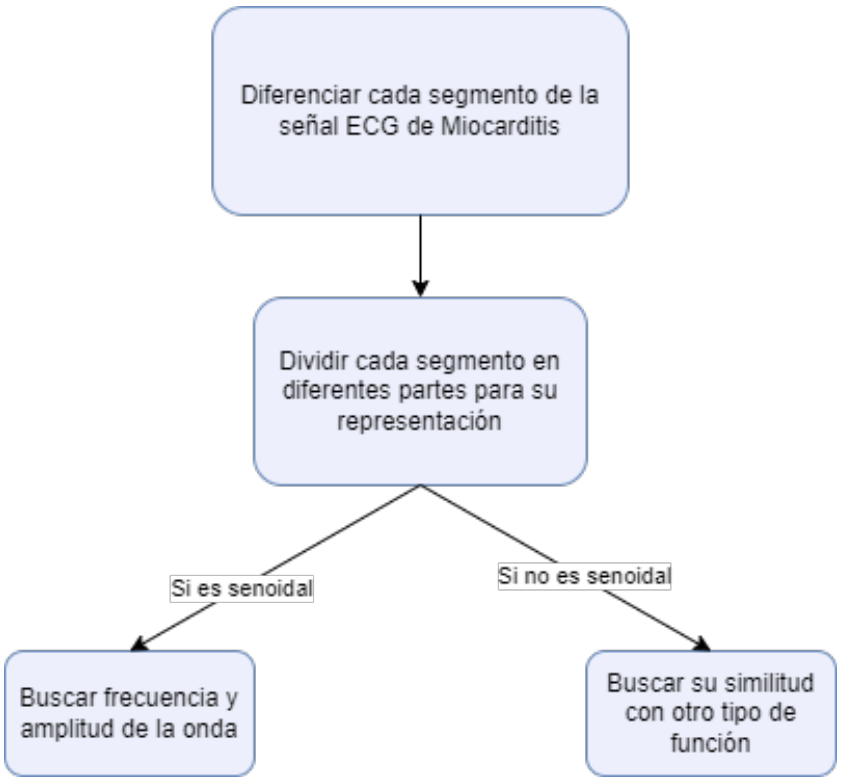

Figura 3.2 Procedimiento a seguir para la representación de la señal ECG.

El modelo creado para esta señal podemos encontrarlo en el Anexo A: Modelos de Simulink® en la Figura 4.3

3.2.3 Parámetros para el modelo

Para la representación de esta enfermedad, hemos tenido que incluir (aparte de los bloques ya utilizados para la señal ECG normal), una serie de bloques nuevos para asemejar la señal a la real. Estos bloques son:

- Una señal rampa para la anomalía en el segmento ST.
- Una ganancia negativa para la caída en el intervalo PR.
- Descenso que ocurre entre la onda T y la onda U.

Para ello, se han tenido que recalcular los parámetros, puesto que en algunas partes de la señal cambia la amplitud y frecuencia de estas. Por lo que se ha procedido a darle valor a los parámetros que ya teníamos y a los nuevos que se han incluido para la visualización. Sus valores son los siguientes:

Tabla 3.1 Valores de parámetros utilizados para la señal ECG de Miocarditis.

	$Intervaltime$	C_θ	ω_θ	D_θ	$Pediente$	$Ganancia$	n	A_n	B_n
P wave	100	0.8930	65.84	0		1	1	-0.05936	-0.0421
							2	-0.001045	0.0004528
							3	-0.001097	0.001853
							4	-0.003357	0.002575
PR segment	65	0.8930	75.84	0		-1	1	-0.05936	-0.0421
							2	-0.001045	0.0003528
							3	-0.001097	0.006853
							4	-0.003357	-0.000575
QRS segment	168	0.3330	27.56	0		1	1	-0.1478	0.3649
							2	-0.0897	-0.1668
							3	0.03549	-0.03145
							4	-0.017896	0.005792
ST segment	30				3	1			
T wave	87	0.2239	30	5.15		1	1	-0.28521	-0.06894
							2	0.0005602	0.003117
							3	-0.00597	0.007659
							4	-0.00485	0.002272
TU segment	253	0.2000	4.5	0		1	1	-0.08521	-0.08894
							2	0.005602	0.13117
							3	-0.00597	0.007659
							4	-0.00005	0.04272

3.2.4 Resultados del modelo y comparación con la señal normal

El resultado de este modelo de bloques para la creación de la señal ECG con Miocarditis es el que se muestra a continuación:

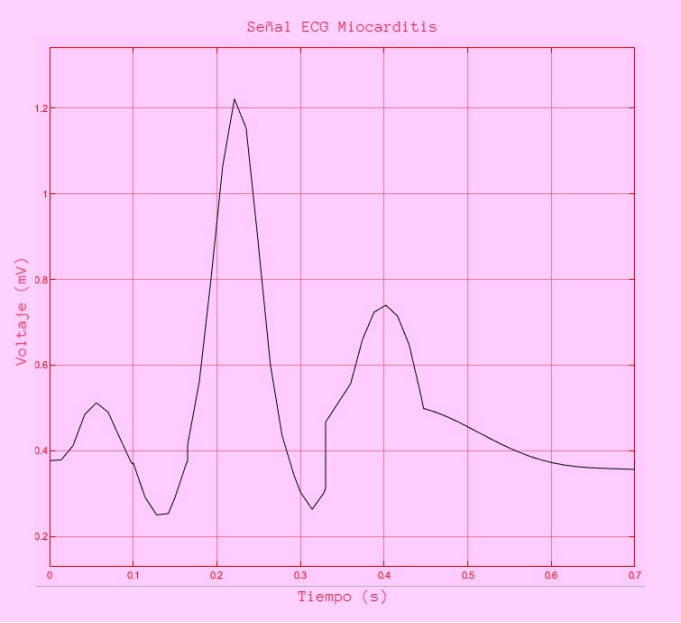

Figura 3.3 Respuesta de Simulink® de un solo ciclo de la señal ECG de Miocarditis.

Para ver con mayor claridad la diferencia entre ambas señales, vamos a unir ambas en una misma gráfica para ver las anomalías detectables.

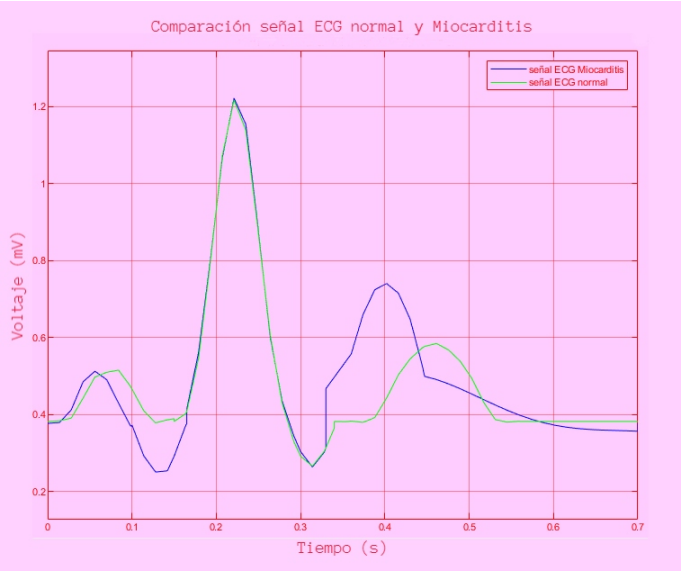

Figura 3.4 Respuesta de Simulink® para la Señal ECG Miocarditis y la Señal ECG Normal para la comparación entre ambas representaciones.

Se han representado ambas señales en colores llamativos para ver claramente la diferencia entre ellas. Se puede ver el claro descenso en el intervalo PR, la inclinación del segmento ST y la elevación de la onda T.

Al igual que para la señal ECG sana, se ha replicado la señal para poder corroborar esta respuesta por parte de un cardiólogo, uniéndola con la normal para ver la diferencia entre ambas.

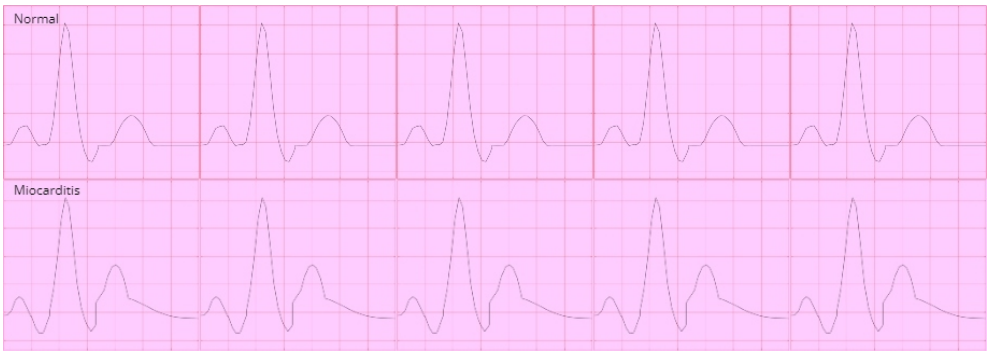

Figura 3.5 Simulación de electrocardiograma real usando cinco ciclos de la señal repetida con el ECG de Miocarditis y el ECG Normal.

Por lo tanto, con estas respuestas podemos ver que es una enfermedad fácilmente detectable con un electrocardiograma.

Ahora vamos a ver la siguiente enfermedad que se ha representado.

3.3 Infarto del miocardio

A continuación se va a explicar la descripción de la enfermedad, se va a comentar el modelo creado para la representación de dicha patología, los parámetros usados para el modelo y los resultados obtenidos haciendo una comparación con la señal ECG normal.

3.3.1 Descripción de la patología

El infarto de miocardio se produce por la muerte de una región del músculo cardíaco como consecuencia de la obstrucción de una arteria coronaria. El infarto ocurre cuando un coágulo de sangre (trombosis coronaria) obstruye una arteria previamente afectada por la arterioesclerosis. Al ocurrir esta obstrucción se suprime el aporte sanguíneo a esa zona y pasado un tiempo el tejido muere irreversiblemente (a este proceso se le denomina necrosis) [13].

Hay dos tipos de infarto de miocardio [9]:

- *Infarto de miocardio con onda Q o síndrome coronario agudo con elevación del segmento ST. Se produce por la obstrucción prolongada de una de las arterias coronarias importantes, lo que lleva a la muerte de una zona más o menos grande del corazón.*
- *Infarto de miocardio sin onda Q. La falta de riesgo afecta, por lo general, a arterias del corazón algo más pequeñas. No se muere una zona tan grande del corazón y tiene un mejor pronóstico.*

En nuestro caso, nos vamos a centrar en el primer tipo, también llamado IMEST.

3.3.2 Modelo creado para su representación

Como es de imaginar por su nombre, su anomalía más importante es la elevación del segmento ST. Para la representación de esta señal, de nuevo hemos seguido el procedimiento descrito en Figure 3.2.

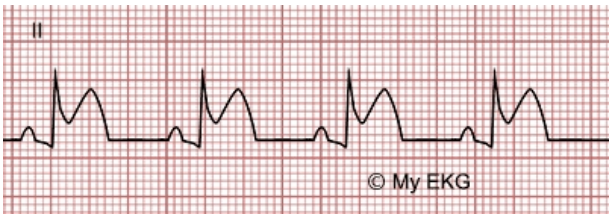

Figura 3.6 Señal ECG de IMEST de un electrocardiograma real [10].

El modelo creado para la representación de esta señal en Simulink® podemos encontrarlo en el Anexo A: Modelos de Simulink® en la Figura 4.4.

3.3.3 Parámetros usados para su representación

Los cambios que se han tenido que hacer para la representación de esta señal son los siguientes:

- Una ganancia negativa para la caída en el intervalo PR.
- División del segmento ST en varias partes
- Escalón para la elevación del segmento ST

Para la representación de esta señal se ha tenido que recalcular los parámetros, así como darle valor a los nuevos que se han necesitado para la visualización. Sus valores son los siguientes:

Tabla 3.2 Valores de parámetros utilizados para la señal ECG de IMEST.

	$Intervaltime$	C_θ	ω_θ	D_θ	$Ganancia$	n	A_n	B_n
P wave	150	0.1930	50.84	0	1	1	-0.05936	-0.0421
						2	-0.001045	0.0007528
						3	-0.001097	0.006853
						4	-0.003357	0.002575
PR segment	65	0.8930	75.84	0	-1	1	-0.05936	-0.0421
						2	-0.001045	0.0003528
						3	-0.001097	0.006853
						4	-0.003357	-0.000575
QRS segment	65	0.3330	27.56	0	1	1	-0.1478	0.3649
						2	-0.0897	-0.1668
						3	0.03549	-0.03145
						4	-0.007896	0.005792
ST segment (principio)	20	0.2239	30	5.15	1	1	-0.28521	-0.06894
						2	0.0005602	0.003117
						3	-0.00597	0.007659
						4	-0.00485	0.002272
ST segment (final)	418	0.2239	30	5.15	1	1	0.28521	-0.06894
						2	0.005602	0.003117
						3	-0.00597	0.007659
						4	-0.00485	0.002272

3.3.4 Resultados del modelo y comparación con la normal

El resultado del sistema anterior en Simulink® es el siguiente:

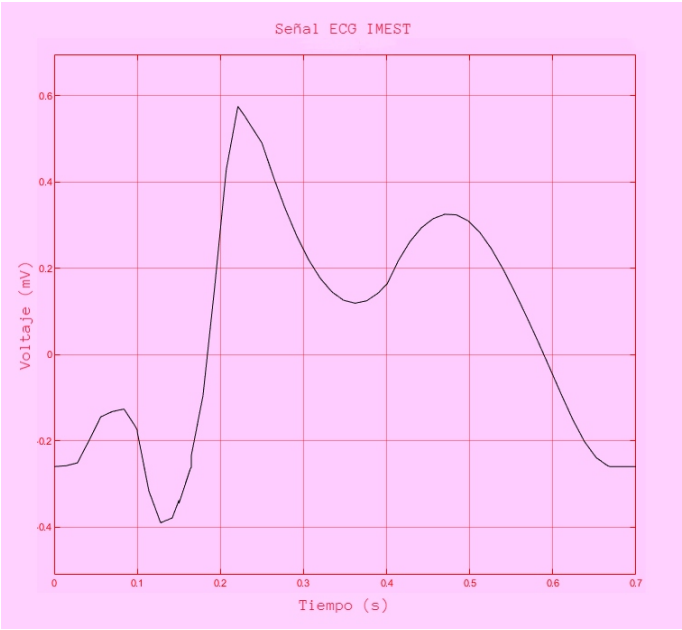

Figura 3.7 Respuesta de Simulink® para un solo ciclo de la señal ECG de IMEST.

Para ver con mayor claridad la diferencia entre ambas señales de nuevo, vamos a unir ambas en una misma gráfica para ver las anomalías detectables.

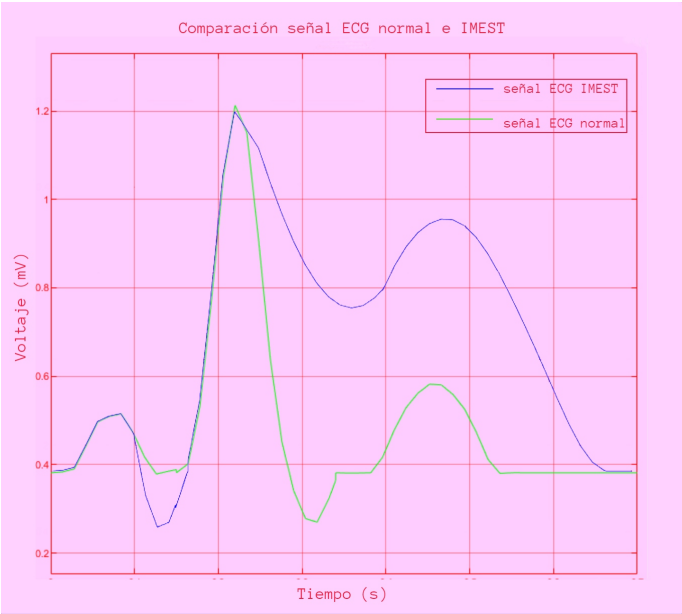

Figura 3.8 Respuesta de Simulink® de un ciclo de la señal ECG de IMEST y Normal para la comparación entre ambas.

Se ha replicado la señal de nuevo para poder corroborar esta respuesta por parte de un cardiólogo, uniéndola

con la normal para ver la diferencia entre ambas.

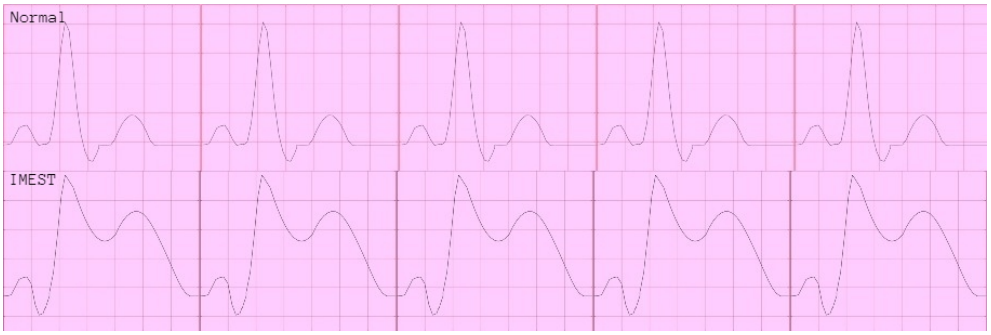

Figura 3.9 Simulación de electrocardiograma real con Señal ECG IMEST y Señal ECG Normal, replicando la señal para cinco ciclos.

3.4 Discusión de resultados para ambos modelos

Una vez obtenidos los resultados para ambos modelos, podemos sacar como conclusión que ambas enfermedades son fácilmente detectables en un electrocardiograma, ya que cada una tiene unas características particulares en esta señal y se pueden detectar a simple vista.

Hay que hacer un estudio previo de la enfermedad que se quiere representar para saber cuáles son los síntomas de estas y cómo se pueden detectar en un electrocardiograma. Una vez teniendo estos conocimientos claros, buscar qué bloques podemos usar para buscar el efecto que queremos en la visualización de la señal.

El artículo del que se ha partido planteaba el modelo para la señal de ECG normal en dos software de simulación diferentes: Simulink® y PSPICE® . Para este proyecto se ha decidido realizar las simulaciones en Simulink® puesto que se ha considerado más intuitivo a la hora de la creación de las diferentes ondas.

4 Conclusiones

4.1 Aplicación del modelo

Se han cumplido todos los objetivos iniciales del proyecto. Este modelo en Simulink® podría usarse con fines educativos, ya que ahorra tiempo y también elimina las dificultades de tomar señales de ECG reales con métodos invasivos. Para realizar un electrocardiograma es necesario colocar electrodos sobre el torso descubierto del paciente y hay que ser riguroso en la colocación de estos para obtener una buena lectura. El paciente no puede moverse ni hablar durante el proceso.

Sin embargo, estos modelos nos permiten analizar y estudiar formas de onda de ECG normales y con patologías, sin utilizar una máquina de ECG ni pacientes directamente conectados. Un estudiante puede aprender a detectar cambios significativos en estas señales, los cuales corresponden a diferentes patologías, directamente en las ondas creadas digitalmente. Se ha realizado un ejemplo de aplicación para una práctica de la asignatura de Bioingeniería, la cual se encuentra en Anexo C: Manual de prácticas para Bioingeniería.

4.2 Líneas futuras de investigación

En cuanto a las líneas futuras, se plantean varios caminos a seguir:

- Por un lado, se plantea la idea de usar estas señales con el fin de hacer una comparativa con señales reales de pacientes y ayudar a su temprana detección. Esto se puede implementar en una FPGA, la cual se programe para hacer esta función. Para ello habría que implementar la parte hardware. Es un uso muy útil, puesto que hay patologías en las que se necesita una rápida actuación para detectarlas en un ECG, como por ejemplo el Infarto Agudo de Miocardio. Con ello, no haría falta la presencia de un cardiólogo para su detección, únicamente una persona encargada de saber el funcionamiento de dicha maquinaria. Se podría obtener una actuación más rápida sobre el paciente, ya que este tipo de patologías lo requieren.

- Otra línea de futuro es, siguiendo los modelos creados para las dos patologías desarrolladas, representar otras enfermedades diferentes y así tener un amplio repertorio de enfermedades cardiovasculares, para ser estudiadas o para incluirlas en el desarrollo de la maquinaria descrita en la propuesta anterior. A una mayor variedad de enfermedades, más interesante sería la utilización de este software.

- A partir de estos modelos representados, también se pueden reproducir estas señales con el modelo del método de Fourier de un orden superior, para poder tener señales con mayor precisión. Para el uso que se le quiere dar en este proyecto es suficiente la precisión con la que se han implementado las señales, pero para algún uso diferente podría necesitar de una precisión mayor. A mayor orden en el método de Fourier, mayor precisión obtendremos en dichas señales.

4.3 Dificultades

Para el desarrollo de este proyecto, las principales dificultades a destacar son:

- Por una parte, debido a que la pandemia de COVID-19 es muy reciente, hay muy poca información de la relación entre este virus y las enfermedades cardiovasculares. Entre los artículos que se han encontrado para el desarrollo del proyecto, los datos de porcentajes variaban significativamente unos de otros, puesto que se había realizado para poblaciones muy reducidas.
- Otra dificultad encontrada es que, a la hora de crear el modelo de señal para cada patología, se ha tenido que hacer un estudio previo sobre la influencia de cada uno de los parámetros usados para la señal ECG normal. Esto es debido a que en el artículo que se desarrolla el modelo, hace una descripción de cómo implementarlo, pero no del significado de cada parámetro. Llegar a su completo entendimiento no ha sido tarea fácil.

4.4 Planificación de tareas

Se va a hacer una breve explicación de cómo ha sido la planificación de tareas para llevar a cabo el proyecto:

- En primer lugar, se empezó por realizar un estudio de artículos que relacionen las enfermedades cardiovasculares con la COVID-19. Posteriormente, se pasó a buscar cuáles de estas enfermedades eran detectables mediante un electrocardiograma, ya que no todas lo son, y cuáles son las anomalías de estas para ser detectadas. Como ya se ha mencionado anteriormente, fue una tarea complicada, ya que hay poca información. Aproximadamente, esta tarea ha sido un 20 % del total de tiempo empleado en el proyecto.
- El siguiente paso fue crear el modelo de la señal ECG normal, ya que a partir de ella se iba a buscar la representación de las otras. De esta ya teníamos todos los parámetros. Esta tarea nos ocupó un 10 % del tiempo empleado.
- Seguidamente, se pasó a la representación de ambas señales (tarea muy costosa por lo explicado anteriormente y lo que se llevó la mayor parte del tiempo del proyecto). Primero se procedió a entender la función de cada parámetro, y luego a la representación de ambas enfermedades. El tiempo empleado fue el 50 % del total.
- Por último, se pasó a validar estas señales y verificar que efectivamente se había llegado a los resultados que se querían. Se procedió a la redacción de la memoria y pensar tanto en unas conclusiones, como en unas líneas futuras para este proyecto. Se empleó un 20 % del total.

Figura 4.1 Planificación de tareas durante todo el proyecto.

Anexo A: Modelos de Simulink®

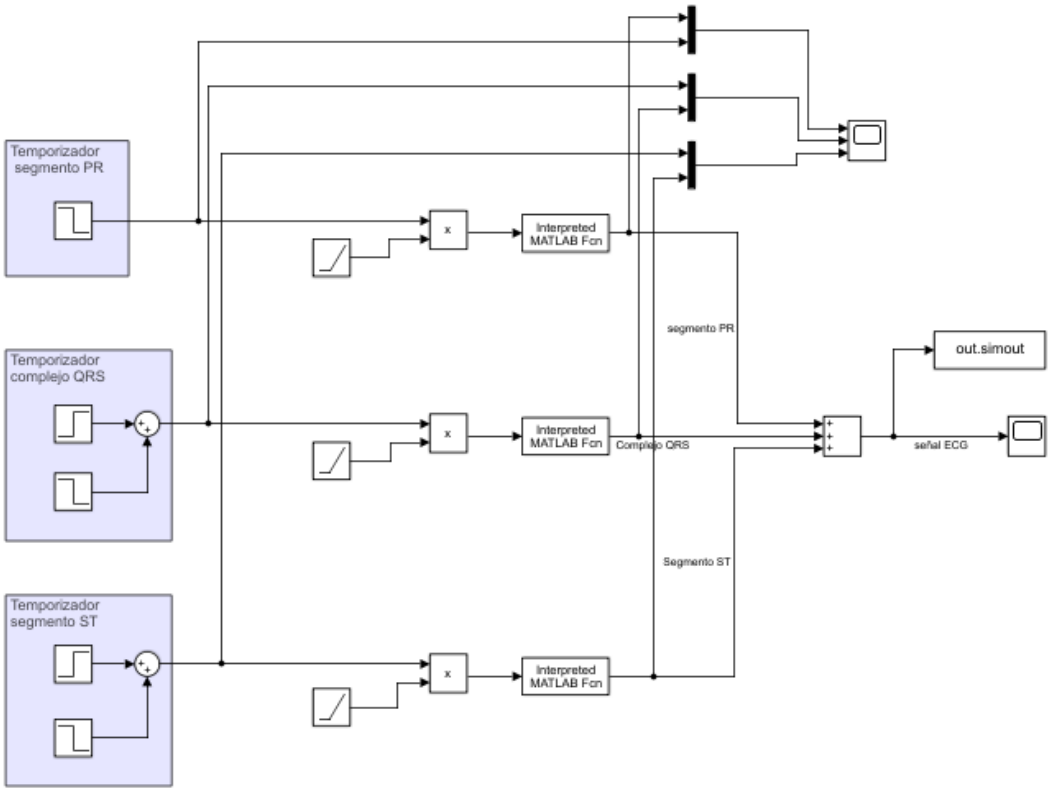

Figura 4.2 Modelo en Simulink® de la señal ECG normal dividido en bloques diferenciados.

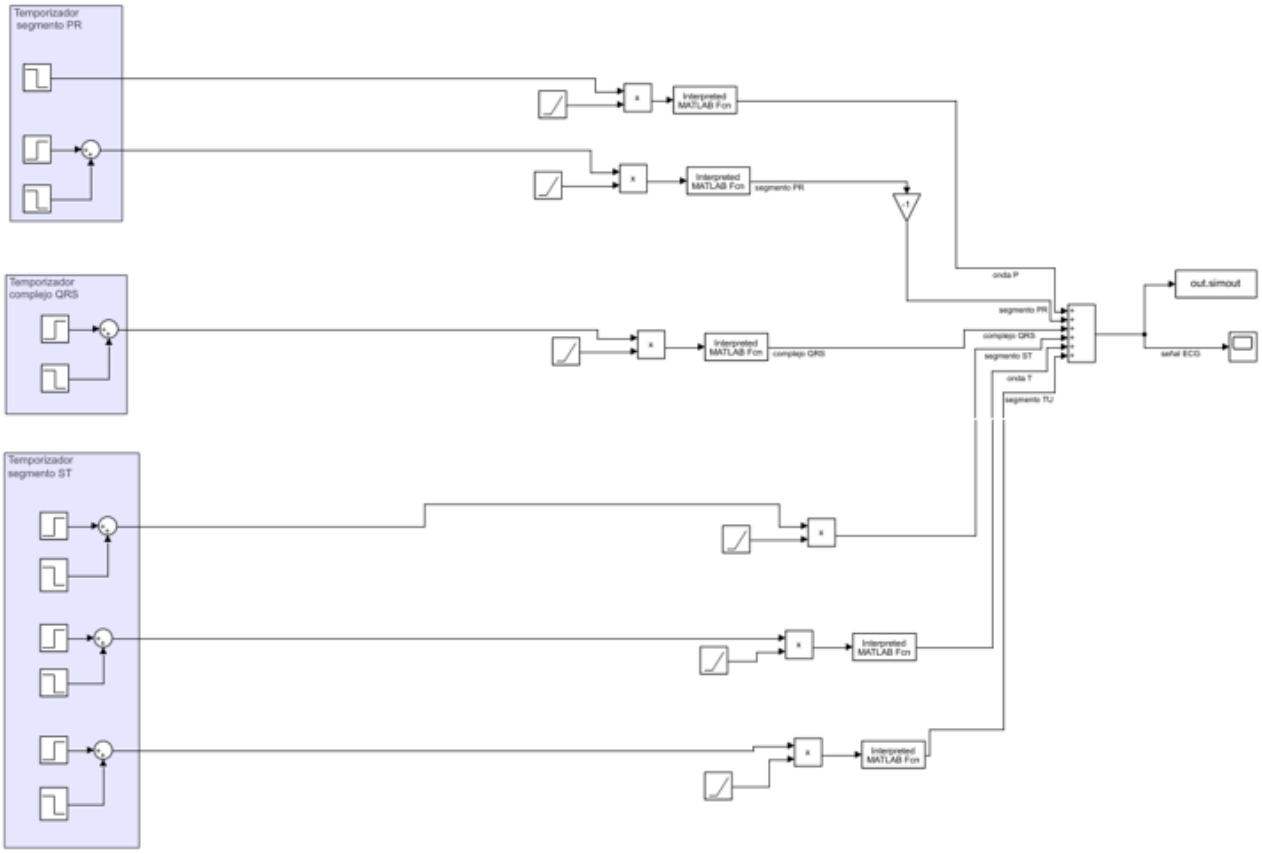

Figura 4.3 Modelo en Simulink® de la señal ECG de Miocarditis dividido en las partes diferenciadas de la señal.

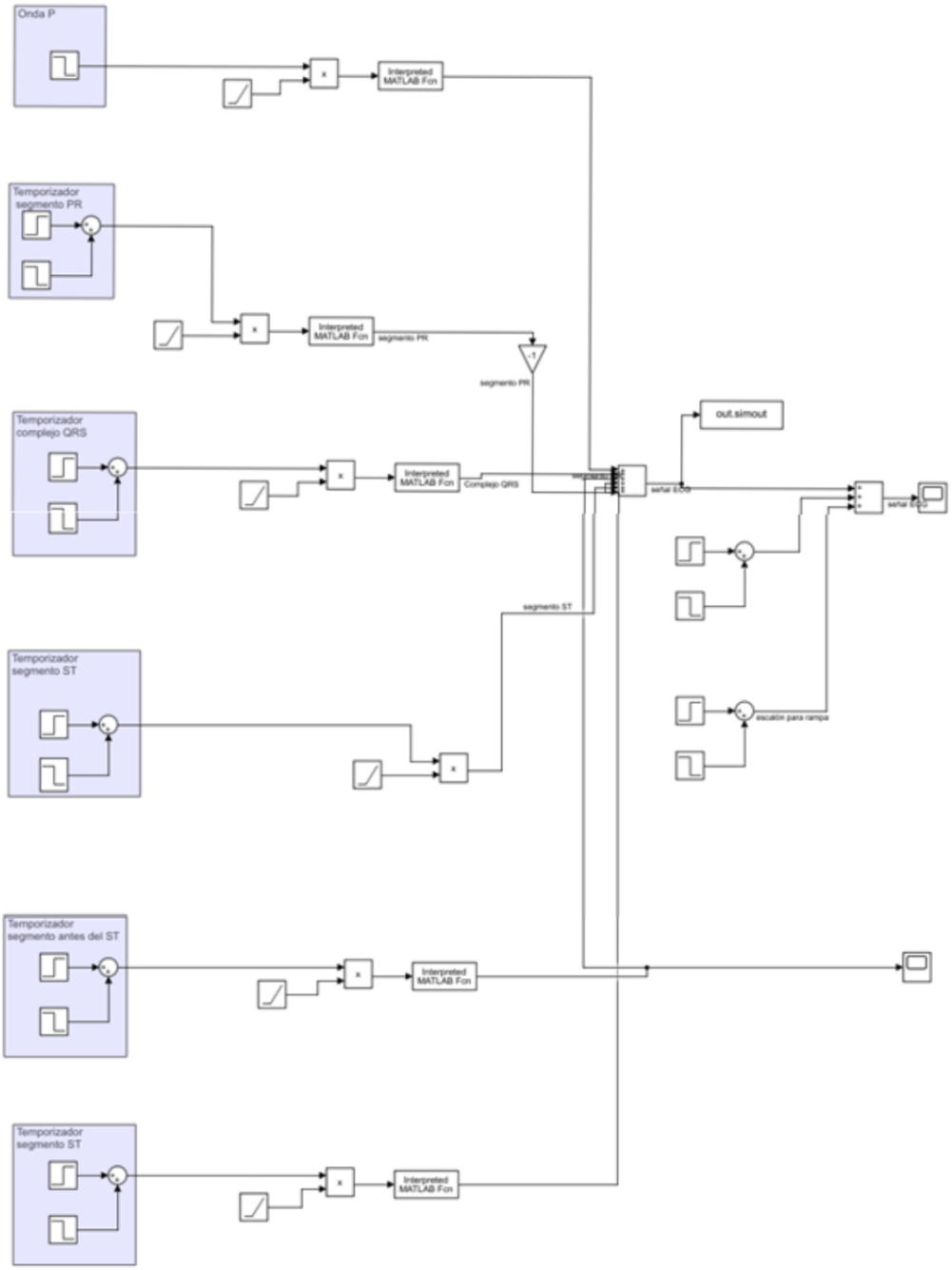

Figura 4.4 Modelo en Simulink® de la señal ECG de IMEST dividido en cada bloque por separado.

Anexo B: Ecuaciones del modelo de Fourier

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{n} A_n sin(n\omega_\theta t) + B_n \cdot cos(n\omega_\theta t) \tag{4.1}$$

Donde x(t) es el valor instantáneo de los intervalos PR, QRS y ST. C0 es el valor medio del intervalo de la señal PR, QRS y ST.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{4.2}$$

Donde w es la frecuencia angular. T es el periodo de las ondas PR, QRS y ST.

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T c(t) sin(n\omega_0 t) dt \tag{4.3}$$

$$B_n = \frac{2}{T}\int_0^T c(t) cos(n\omega_0 t) dt \tag{4.4}$$

Asumiendo

$$A_n = C_n cos\omega_n \tag{4.5}$$

$$B_n = C_n sin\omega_n \tag{4.6}$$

Entonces (4.1) puede escribirse como:

$$x(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{n} C_n sin(n\omega_0 t + \theta_n) \tag{4.7}$$

Donde

$$C_n = [{A_n}^2 + {B_n}^2]^{\frac{1}{2}} \tag{4.8}$$

$$\theta_n = tan^{-1}[\frac{B_n}{A_n}] \tag{4.9}$$

Todas las ecuaciones están sacadas del artículo [7]

Anexo C: Manual de prácticas para Bioingeniería

Se va a proporcionar un archivo comprimido para la realización de la práctica (***practicaECG.zip***), cuyo contenido es el siguiente:

- Archivos de simulación de señal de electrocardiograma (ECG) normal, la cual incluye:
  - Archivo tipo script de MATLAB® ***cargaValores.m***
  - Modelo en Simulink® de la señal ECG normal ***ECGnormal.slx***
- Archivos de simulación de señal ECG de Miocarditis, la cual incluye:
  - Archivo tipo script de MATLA® ***cargaValoresMiocarditis.m***
  - Modelo en Simulink® de la señal ECG normal ***ECGmiocarditis.slx***
- Archivos de simulación de señal ECG de IMEST, la cual incluye:
  - Archivo tipo script de MATLAB® ***cargaValoresIMEST.m***
  - Modelo en Simulink® de la señal ECG normal ***ECGIMEST.slx***

La práctica consiste en la simulación de la señal de electrocardiograma para un paciente sano y para dos pacientes con enfermedades cardiovasculares diferentes. Se va a hacer una comparativa entre las distintas señales para aprender a detectarlas en un electro.

Inicio de la práctica

1. Abrimos MATLAB® y nos colocamos en la carpeta de trabajo **practicaECG**, que contiene todos los ficheros necesarios para poder realizar la siguiente práctica.
2. Vamos a empezar con la señal ECG de un paciente sano, por lo que vamos a abrir desde MATLAB® el archivo ***cargaValores.m***, el cual ejecutaremos. Este código nos servirá para introducir los valores a los parámetros de la señal que queremos simular.
3. Seguidamente, abrimos en el entorno de Simulink® el archivo ***ECGnormal.slx***. En este archivo encontraremos el modelo para simular una señal ECG normal, de un paciente sano.

4. Para ver su representación, ajustamos el Stop Time a 0.7 y ejecutamos el modelo. Para ver la salida hacemos doble clic sobre el Scope.

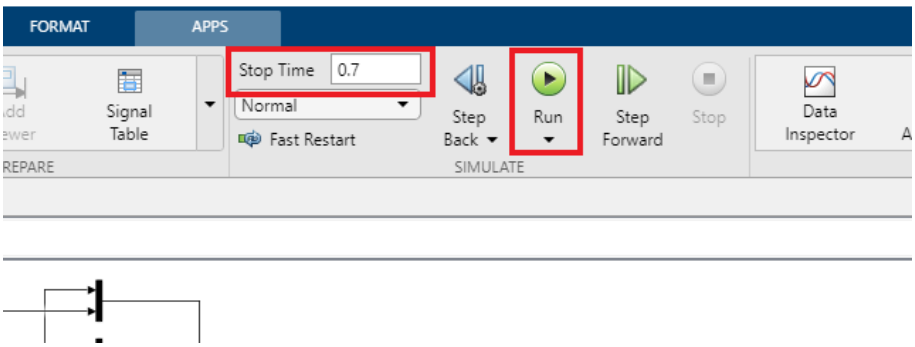

Figura 4.5 Time Stop = 0.7 y Run.

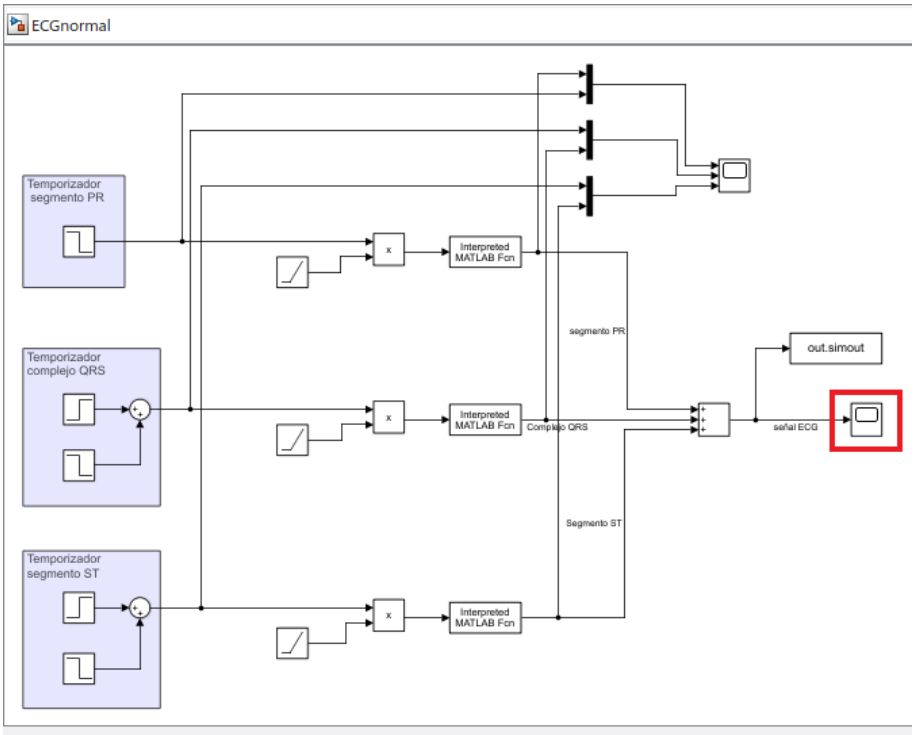

Figura 4.6 Modelo en Simulink® de la señal ECG normal.

Este modelo consta de tres partes diferentes:

- Segmento PR
- Complejo QRS
- Segmento ST

Son las tres partes de las que estará formada la señal ECG, cada una con sus intervalos de tiempo correspondientes.

La respuesta del sistema que tiene que salir sería la siguiente:

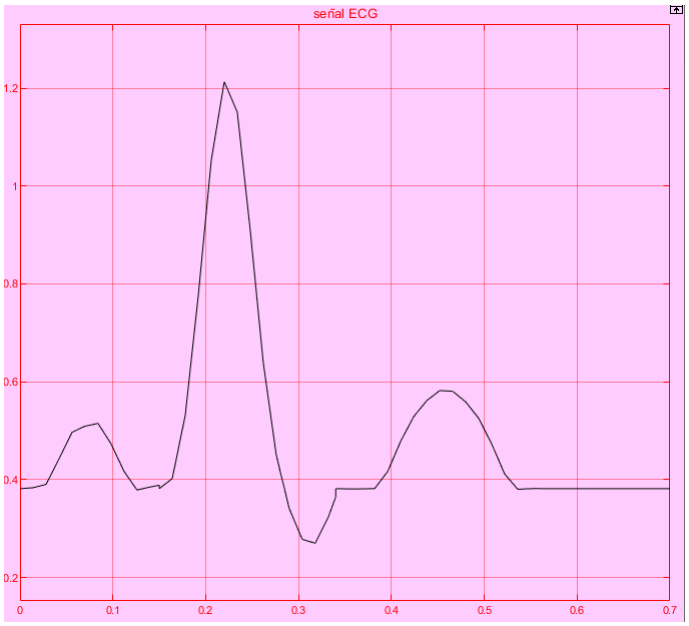

Figura 4.7 Respuesta del modelo para la señal ECG normal para un solo ciclo.

Una vez simulada esta señal, vamos a proceder a ver esta misma, pero para pacientes con diferentes patologías y ver en que partes de la señal pueden ser detectadas estas enfermedades.

5. Nos vamos de nuevo a MATLAB® y cargamos el archivo ***cargaValoresMiocarditis.m***, el cual nos cargará los valores para la simulación para pacientes con miocarditis.

6. Abrimos en Simulink® el archivo ***ECGmiocarditis.slx*** y de nuevo ejecutamos con el mismo valor de Stop Time.

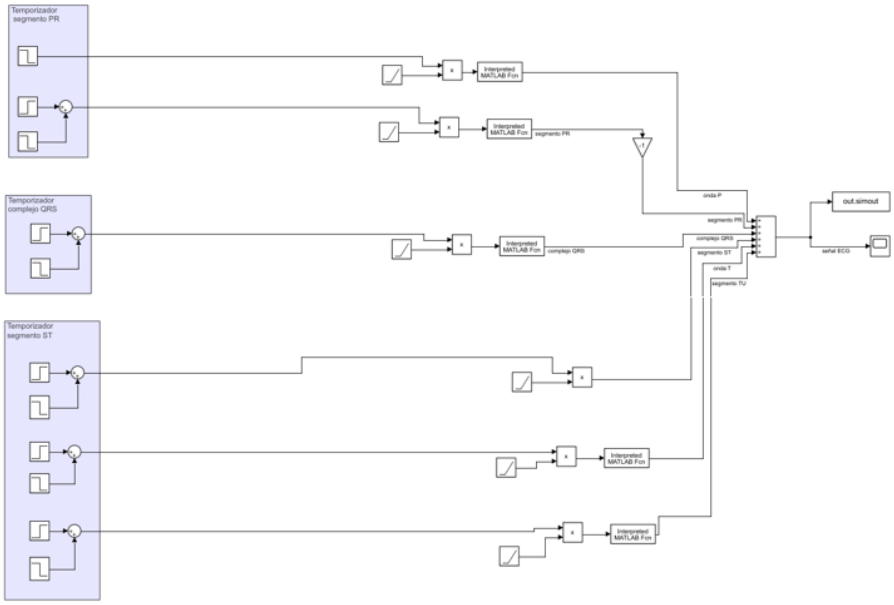

Figura 4.8 Modelo en Simulink® de la señal ECG de Miocarditis.

Como podemos ver en el modelo, se han tenido que incluir bloques nuevos para su representación. Se ha incluido:

- Una rampa en el segmento ST
- Una ganancia negativa para la caída del intervalo PR.

La respuesta al sistema tiene que salir como la siguiente:

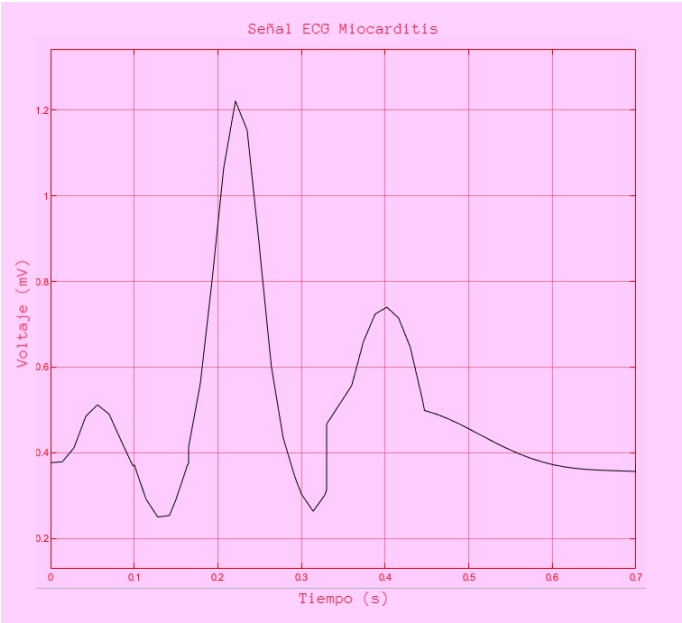

Figura 4.9 Respuesta del modelo para la señal ECG de Miocarditis para un solo ciclo.

7. Y por último, vamos a realizar la última simulación para la patología de Infarto del miocardio (IMEST). Se carga el script ***cargaValoresIMEST.m*** para cargar de nuevo los parámetros de nuestra señal.

8. Abrimos en Simulink® el archivo ***ECGIMEST.slx***, en el cual se encuentra el modelo de la señal ECG para IMEST:

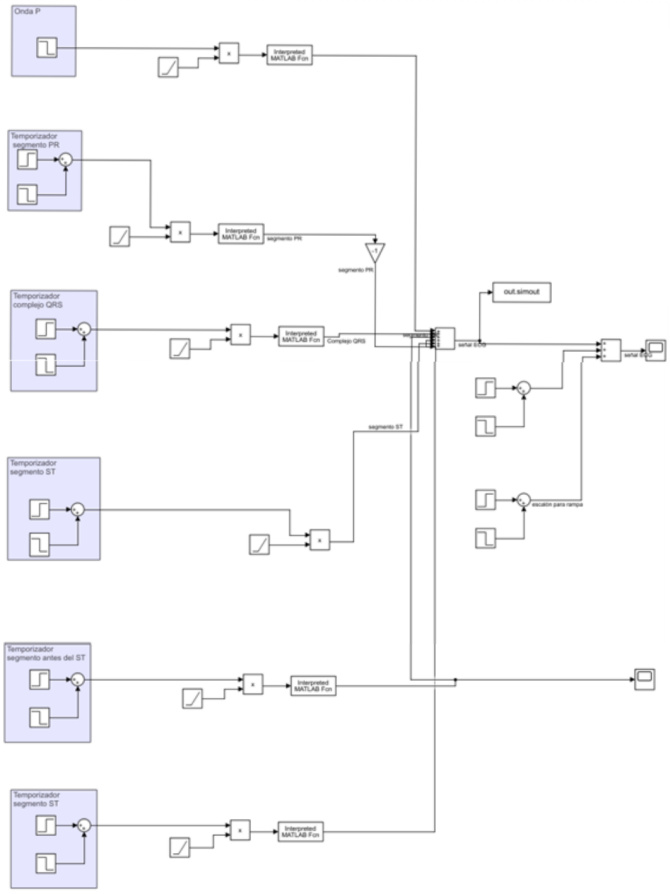

Figura 4.10 Modelo en Simulink® de la señal ECG de IMEST.

Para esta patología se han hecho de nuevo cambios en el modelo:

- Ganancia en el complejo QRS.
- Diferenciación entre distintos intervalos dentro del segmento ST.

La cual, si ejecutamos y abrimos el Scope, la respuesta al sistema tiene que ser la siguiente:

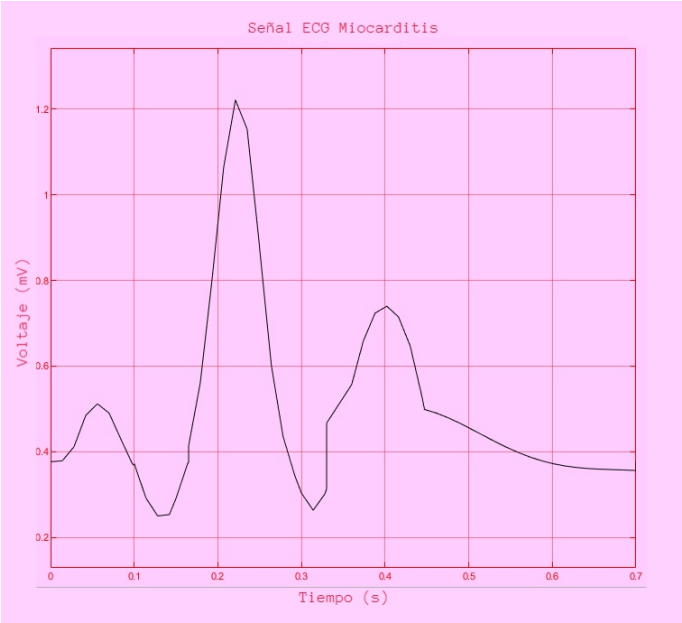

Figura 4.11 Respuesta del modelo para la señal ECG de IMEST para un solo ciclo .

Como podemos ver, para cada patología hay ciertos cambios detectables en la señal de electrocardiograma. Por lo que tenemos un medio rápido y eficaz de detección de estas enfermedades.

Cuestiones

Tras la comparativa entre las señales ECG normales y las de patologías,

a) ¿Qué cambios significativos ves en la señal ECG de Miocarditis con respecto a la de un paciente sano?

b) ¿Cuáles ves en la señal ECG de IMEST con respecto a la de un paciente sano?

Bibliografía

[1] *Descripción miocarditis www.descripcion-miocarditis.com*, mayoClinic.org.

[2] *Señal ecg www.procedencia-senalECG.com*, Empedium.

[3] *Derivaciones señal ecg www.derivaciones.com*, 2013, My EKG.

[4] *Procedencia onda u www.procedenciadelaunaU.com*, 2013, My EKG.

[5] *Covid-19 y enfermedad cardiovascular*, Revista Colombiana de Cardiología **27** (2020), no. 3, 166–174.

[6] José R Banegas, Fernando Villar, Auxiliadora Graciani, and Fernando Rodríguez-Artalejo, *Epidemiología de las enfermedades cardiovasculares en españa*, Revista Española de cardiología suplementos **6** (2006), no. 7, 3G–12G.

[7] Subhajit Bhowmick, Palash Kumar Kundu, and Gautam Sarkar, *Synthesis of ecg waveform using simulink model*, 2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI), IEEE, 2016, pp. 61–64.

[8] Sociedad Española de Imagen Cardiaca, *señal ecg miocarditis* , My EKG.

[9] Sociedad Española de Medicina Interna, *Tipos de infarto del miocardio www.Tipos-infarto-miocardio*.

[10] My EKG, *señal ecg imest www.senal-ECG-IMEST*.

[11] J. Fernández-Palacios Serrano, *Desarrollo de un modelo eléctrónico del comportamiento cardiovascular del ser humano. (trabajo fin de grado inédito)*, Universidad de Sevilla **27** (2021), no. 1, 95.

[12] Juan Francisco Figueroa Triana, Diego Alfredo Salas Márquez, Juan Sebastián Cabrera Silva, Cristian Camilo Alvarado Castro, and Andrés Felipe Buitrago Sandoval, *Covid-19 y enfermedad cardiovascular*, Revista Colombiana de Cardiología **27** (2020), no. 3, 166–174.

[13] Cardiología Lugo, *Descripción imest www.descripcion-IMEST*.

[14] M. Salazar, J. Barochiner, W. Espeche, and I. Ennis, *Covid-19, hipertensión y enfermedad cardiovascular*, Hipertensión y Riesgo Vascular **37** (2020), no. 4, 176–180.

[15] DG Tsalikakis, DI Fotiadis, and D Sideris, *Simulation of cardiovascular diseases using electronic circuits*, Computers in Cardiology, 2003, IEEE, 2003, pp. 445–448.

[16] Tian-Yuan Xiong, Simon Redwood, Bernard Prendergast, and Mao Chen, *Coronaviruses and the cardiovascular system: acute and long-term implications*, European Heart Journal **41** (2020), no. 19, 1798–1800.

[17] Shuran Zhou, Lisheng Xu, Liling Hao, Hanguang Xiao, Yang Yao, Lin Qi, and Yudong Yao, *A review on low-dimensional physics-based models of systemic arteries: application to estimation of central aortic pressure*, Biomedical engineering online **18** (2019), no. 1, 1–25.