

Caracterización de Electrocardiogramas Mediante Transformada Ondita y Redes Neuronales

Jeremy A. Fischer



2014

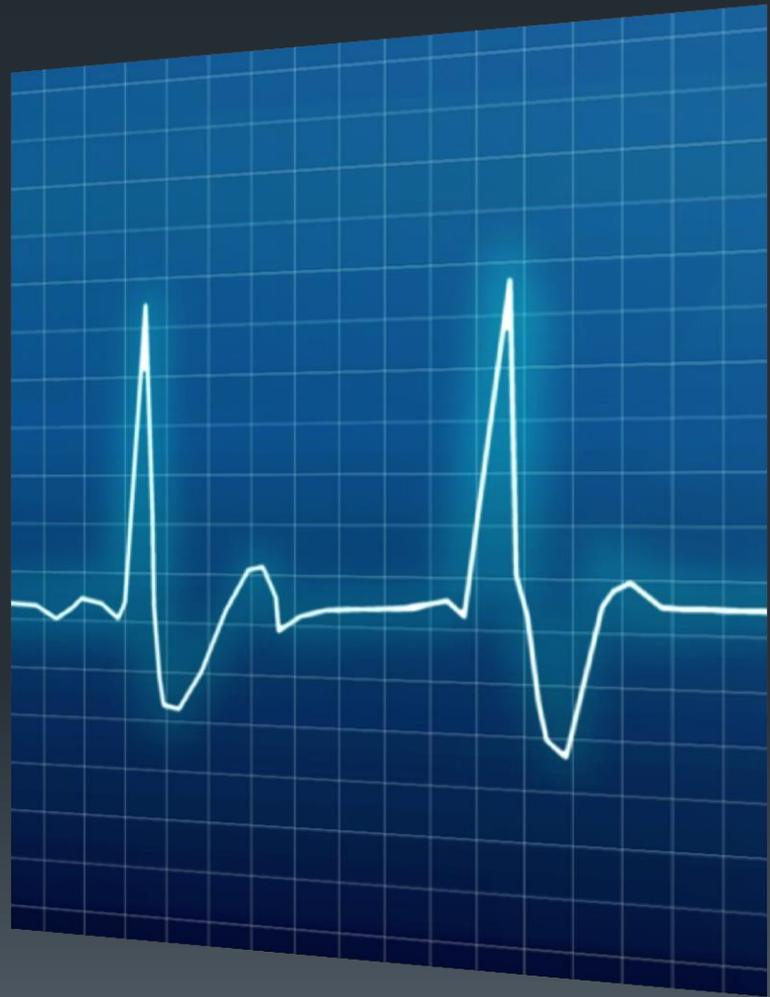
Objetivos



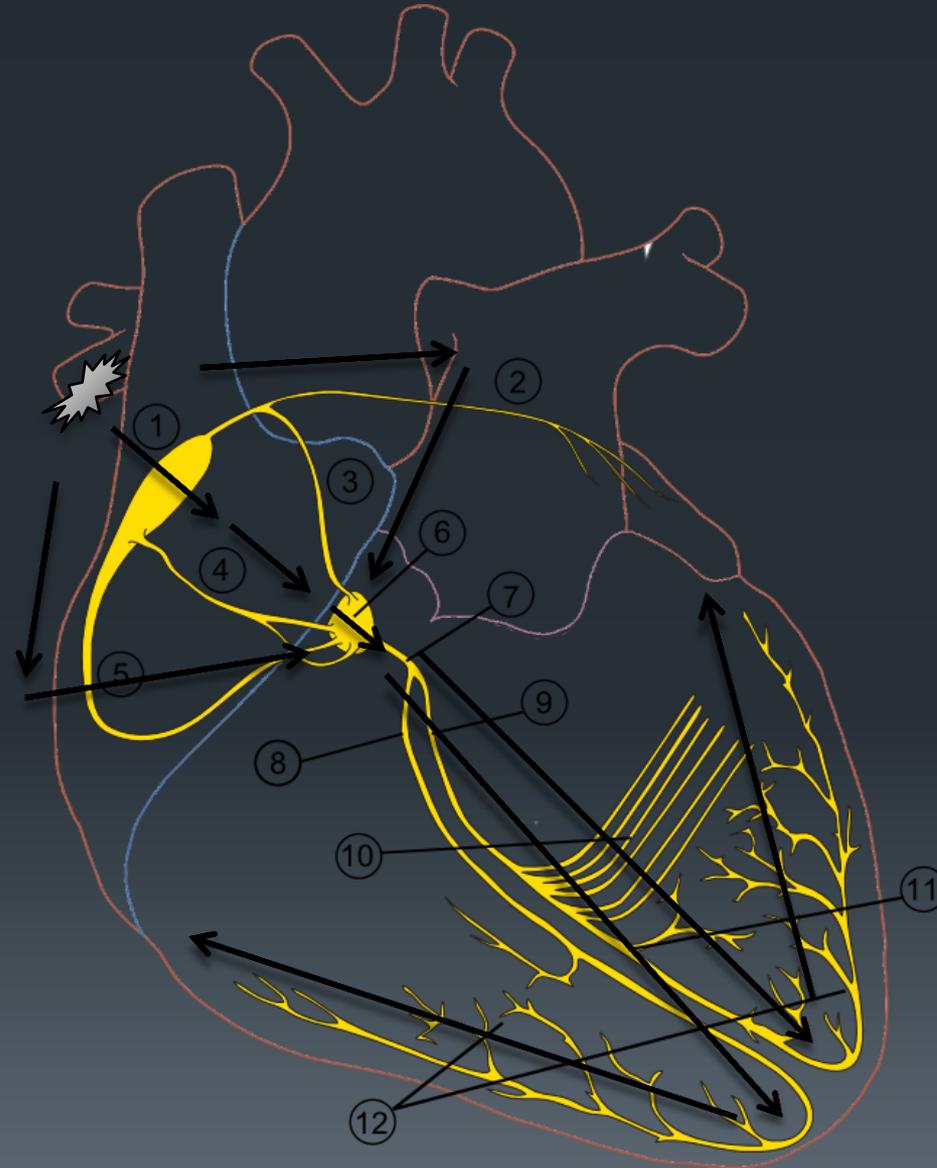
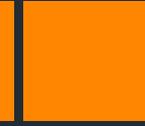
Desarrollar un algoritmo o sistema de clasificación, capaz de reconocer y diferenciar los principales tipos de intervalos RR existentes en estudios ECG de larga duración:

- Latidos normales.
- Contracciones prematuras.
- Bloqueos de rama.
- Latidos generados por M.E.I.

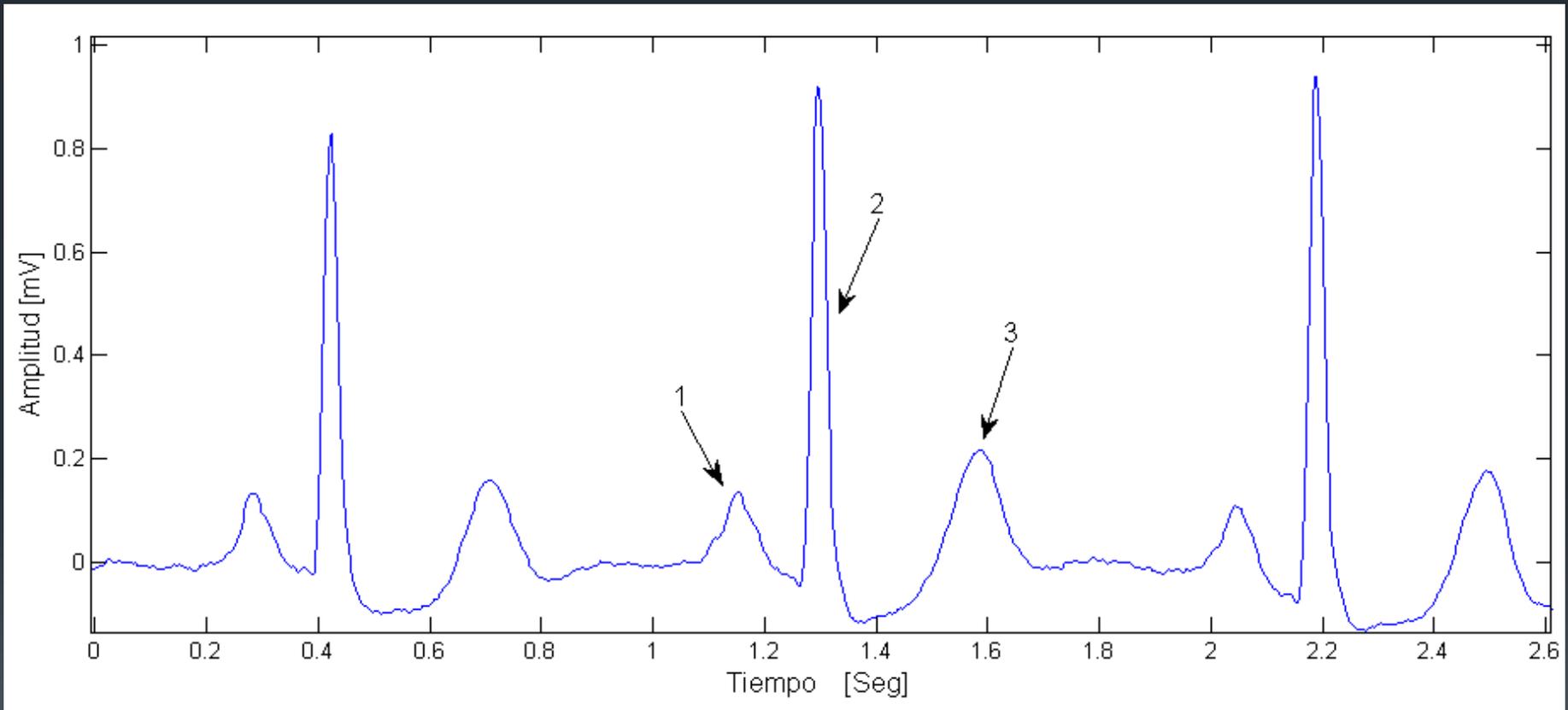
Conceptos Previos



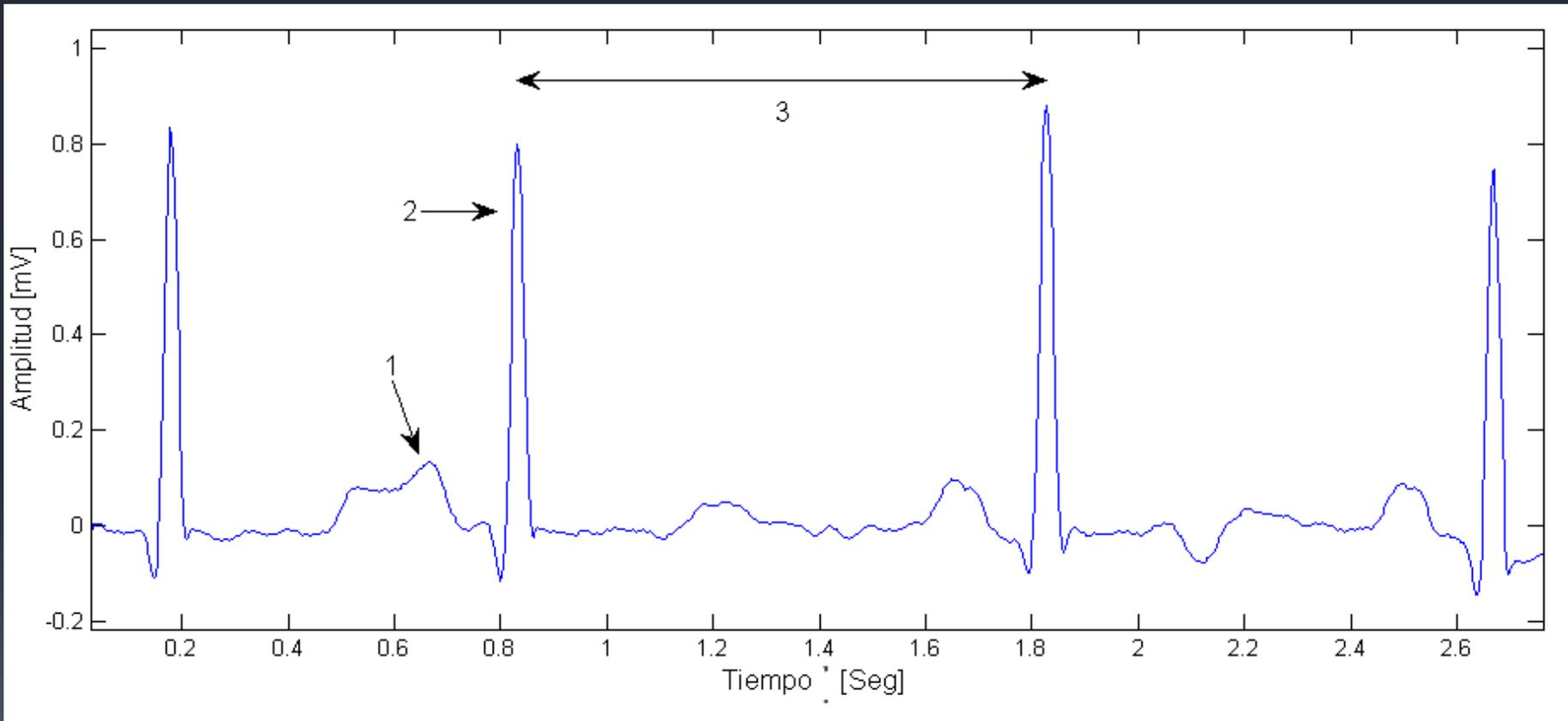
Electrocardiografía



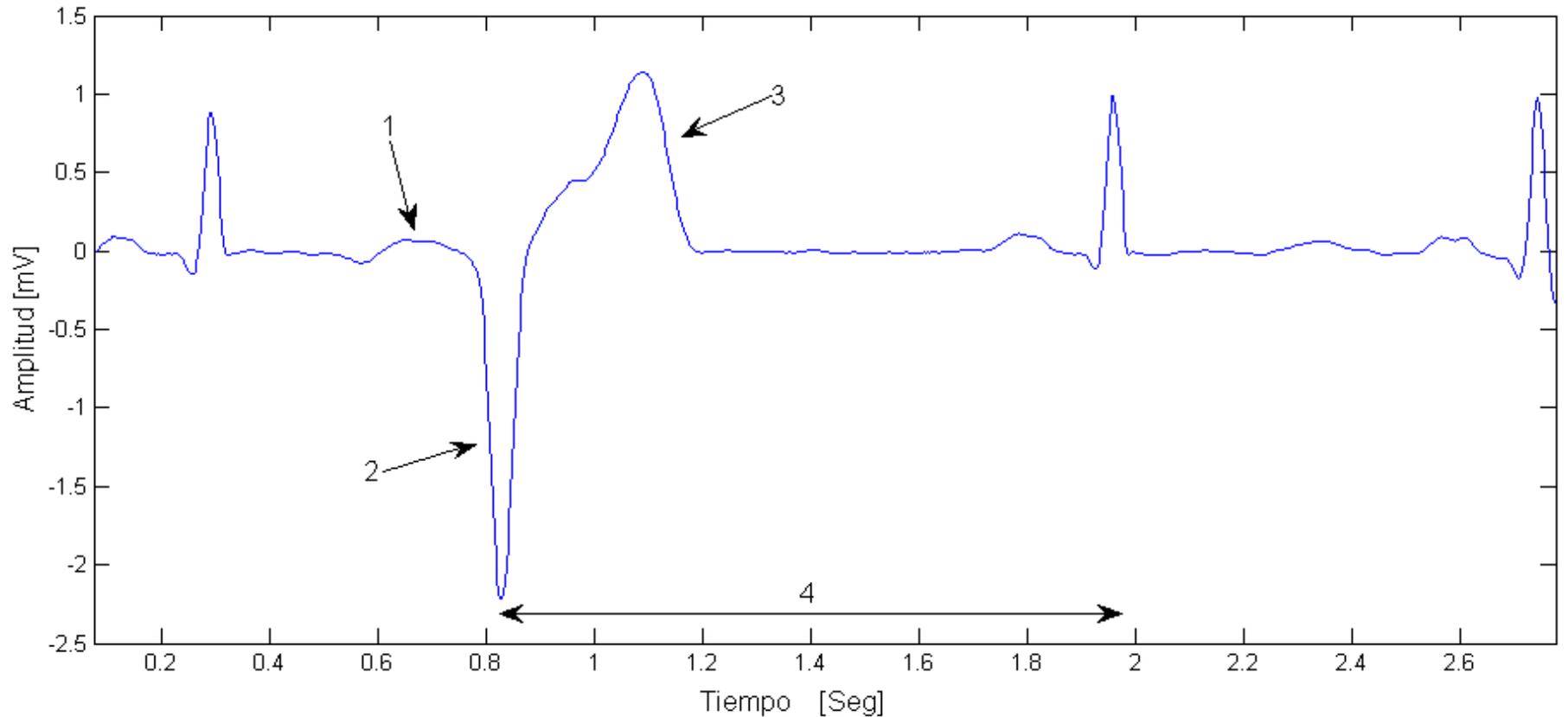
ECG Normal



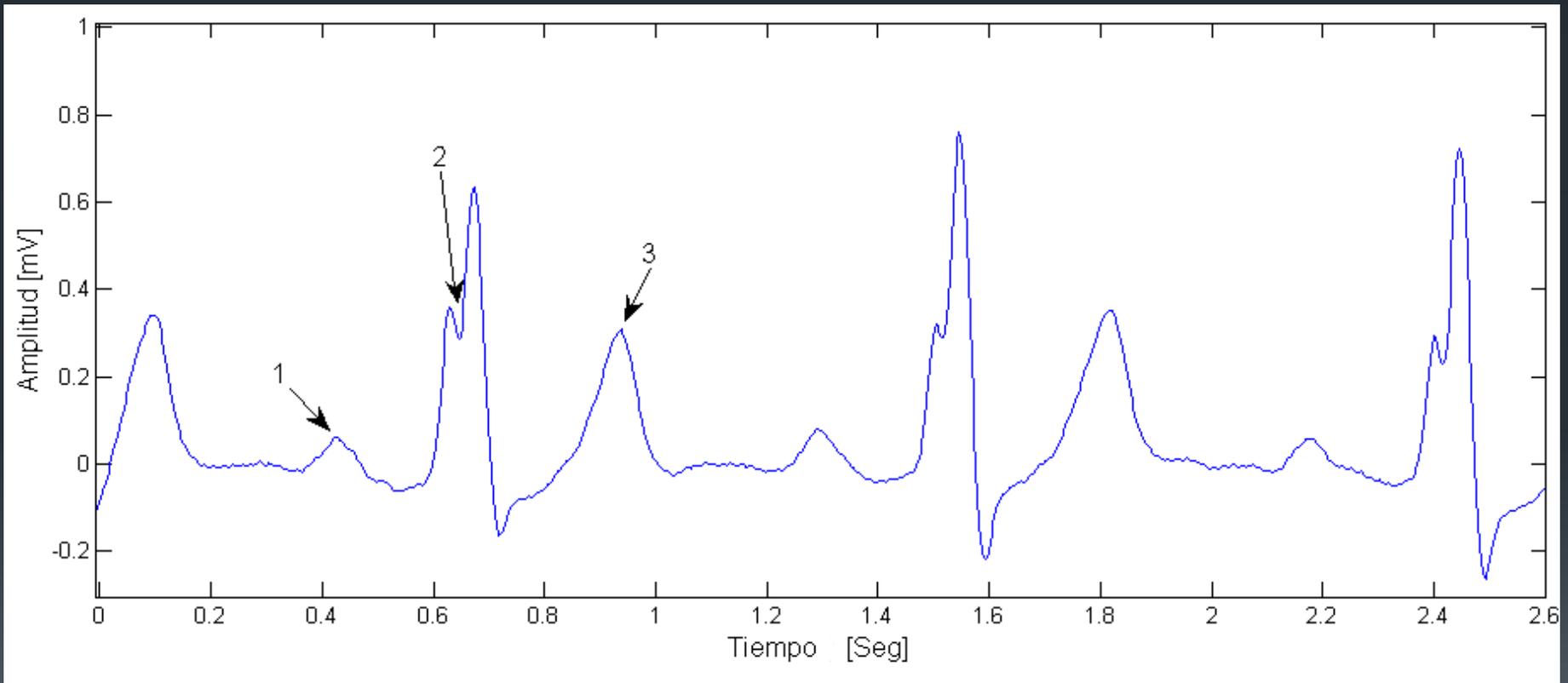
ECG Contracciones prematuras: C.P.A.



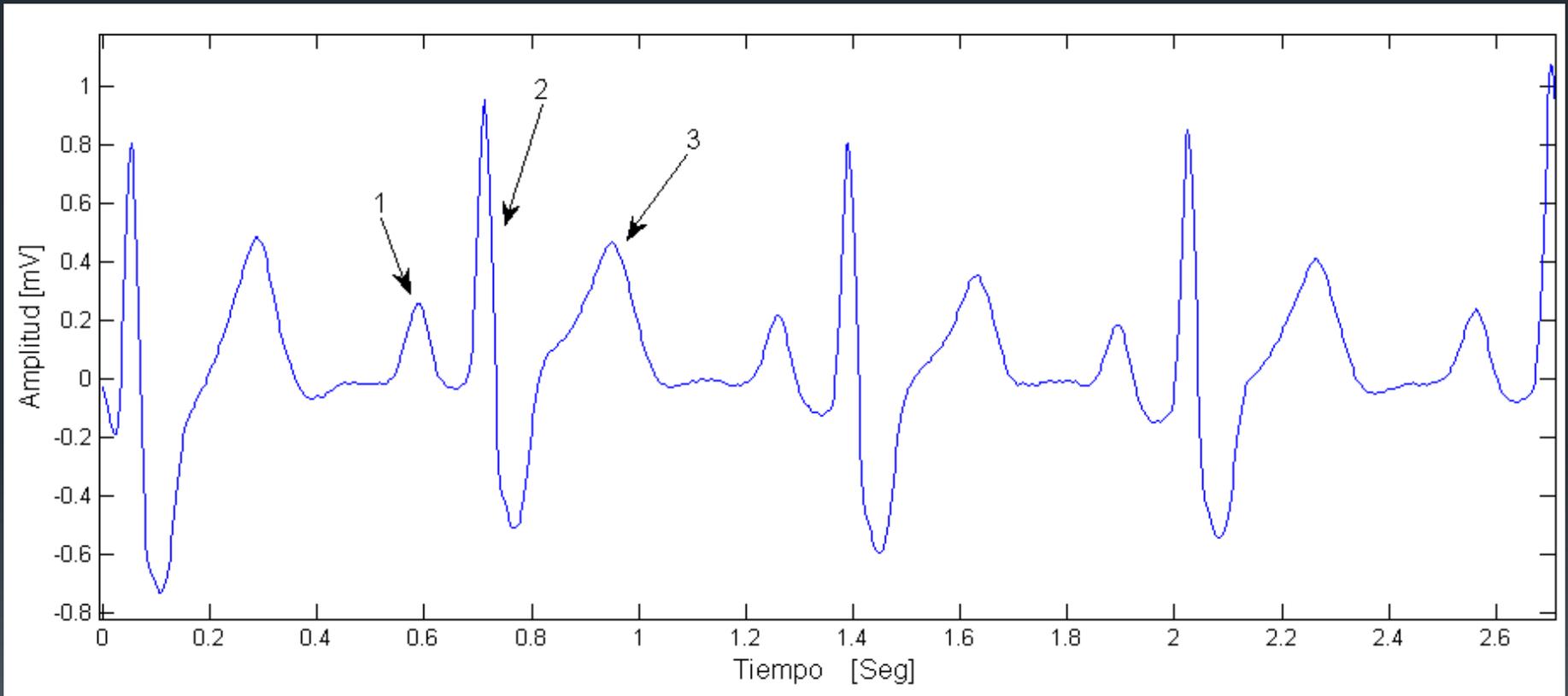
ECG Contracciones prematuras: C.P.V.



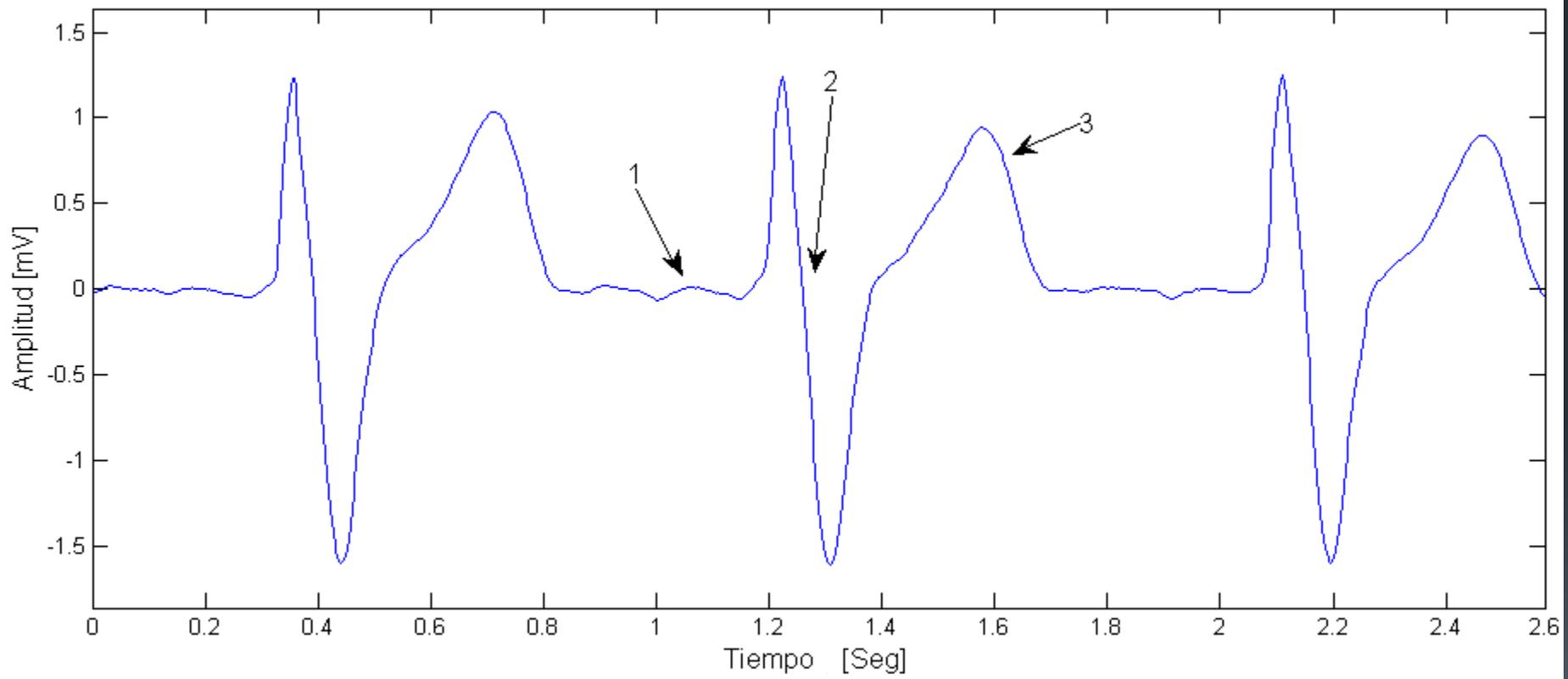
ECG Bloqueos de Rama: B.R.I.



ECG Bloqueos de Rama: B.R.D.



ECG Latidos causados por M.E.I.



Herramientas Utilizadas: Transformada Ondita

- Consiste en proyectar la señal en el dominio temporal sobre una base de funciones derivadas de una función madre a través de dilataciones y traslaciones:

$$C_{a,b}(x, \Psi) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{a,b}(t) dt$$

$$\text{con } \Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

- Permite el análisis multiresolución, lo que es ventajoso en el estudio de señales estocásticas.
- Las técnicas digitales de transformada ondita, consisten en filtrar la señal con un par de filtros, y sub muestrear la señal resultante (codificado sub banda).

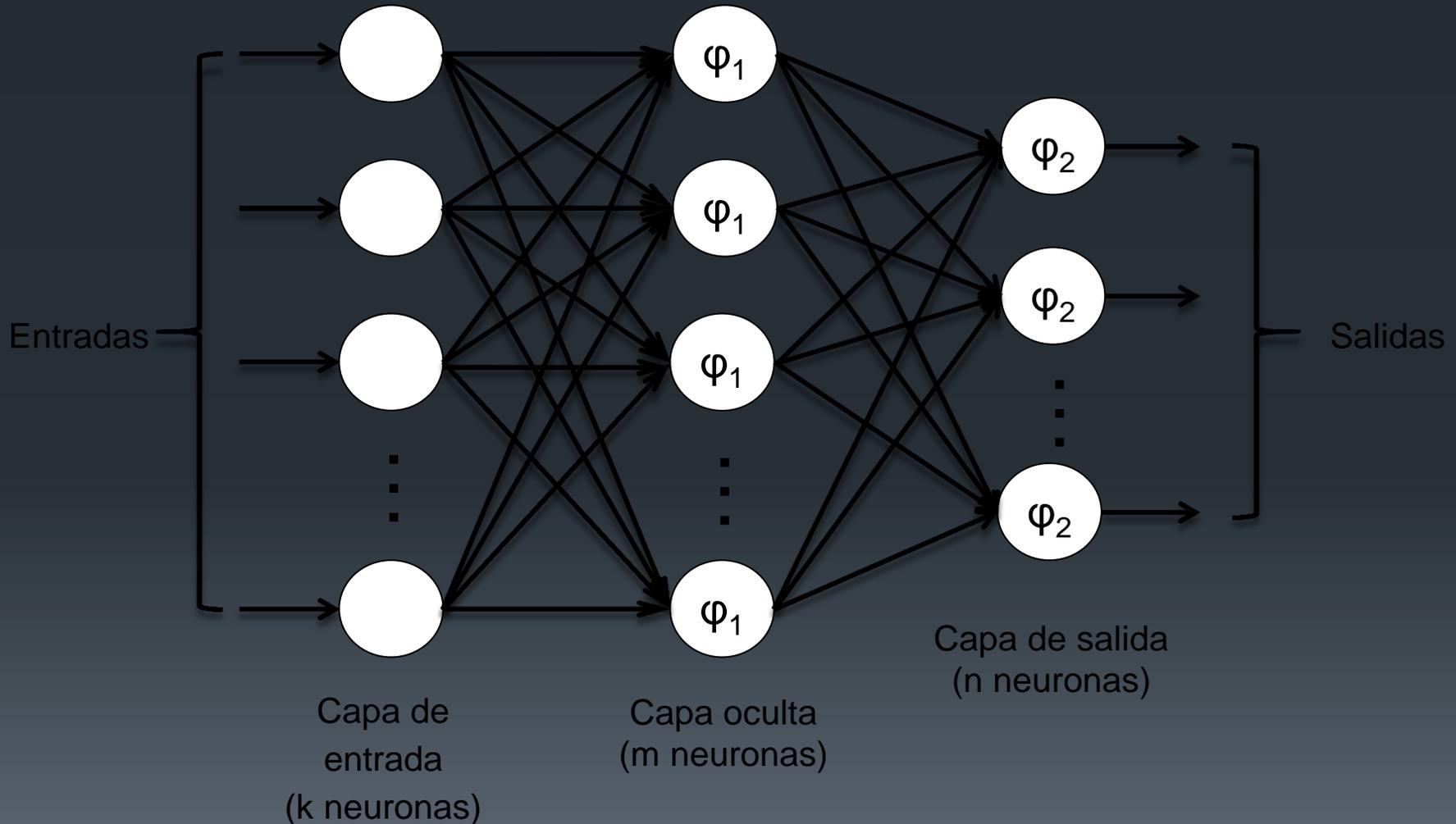
Herramientas Utilizadas: Redes Neuronales

- Una red neuronal es un sistema de procesamiento de la información, formado por múltiples procesadores sencillos conectados de manera específica, que tiene la capacidad de adquirir conocimientos del entorno mediante un proceso de aprendizaje.
- La salida de cada una de las neuronas que constituyen la red es función de la entrada:

$$y_k = \varphi(u_k + b_k)$$
$$u_k = \sum_{j=0}^n x_j w_{kj}$$

- Existen diversas arquitecturas de redes neuronales.

Herramientas Utilizadas: Redes Neuronales

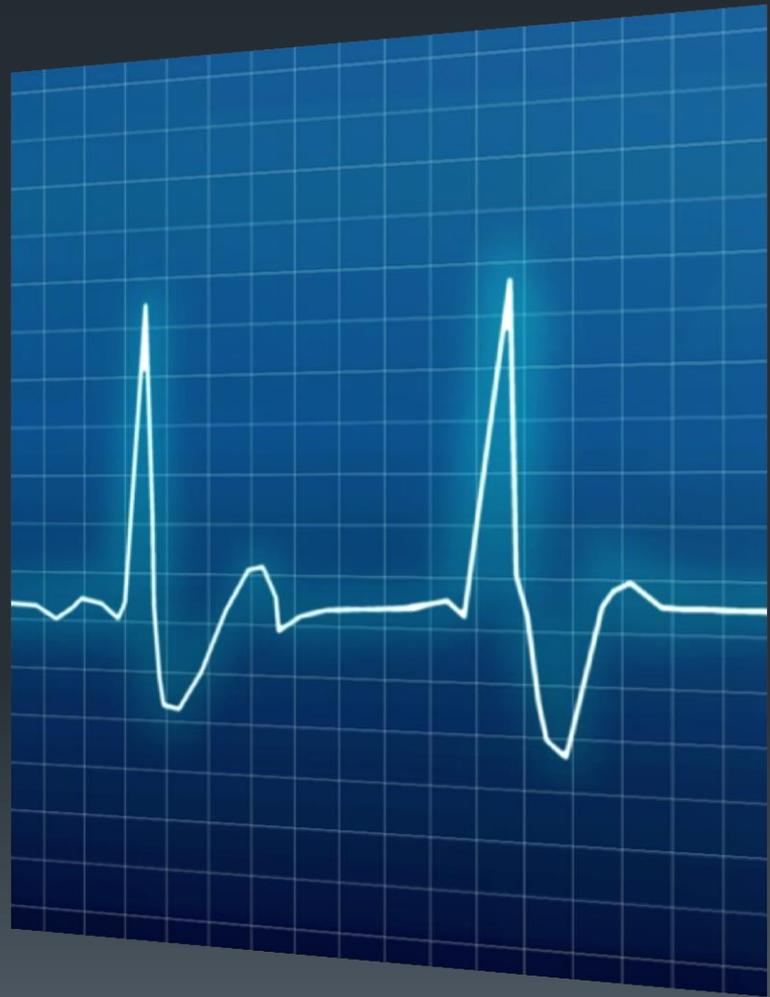


MIT – BIH Arrhythmia Database

- Base de datos de distribución gratuita, formada por 48 estudios electrocardiográficos, de dos canales, de media hora de duración. Todos los estudios fueron anotados a mano por dos o más cardiólogos.
- Contiene un total de 110.159 intervalos RR, de los cuales el 97,21% pertenecen a alguno de los grupos de eventos que se pretenden clasificar.

Tipo de Latido	Base de datos completa	Estudios seleccionados
Normal	68,13 %	63,12 %
Contracción auricular prematura	2,31 %	3,34 %
Contracción ventricular prematura	6,47 %	7,29 %
Bloqueo de rama izquierda	7,33 %	10,48 %
Bloqueo de rama derecha	6,59 %	9,37 %
Marcapasos externo implantable	6,38 %	5,73 %
Otros	2,79 %	0,67 %
Cantidad Total de Latidos	110159	63145 (57,32 %)

Algoritmo Propuesto



Algoritmo Propuesto

Pre procesado de la
señal

Extracción de
características

Clasificación



Etapa de pre – procesado de la señal

- Eliminación del ruido e interferencias presentes en la señal.
- Segmentación de la señal en fragmentos representativos.

Filtrado de la señal



- Interferencias electromagnéticas – ruido de línea.

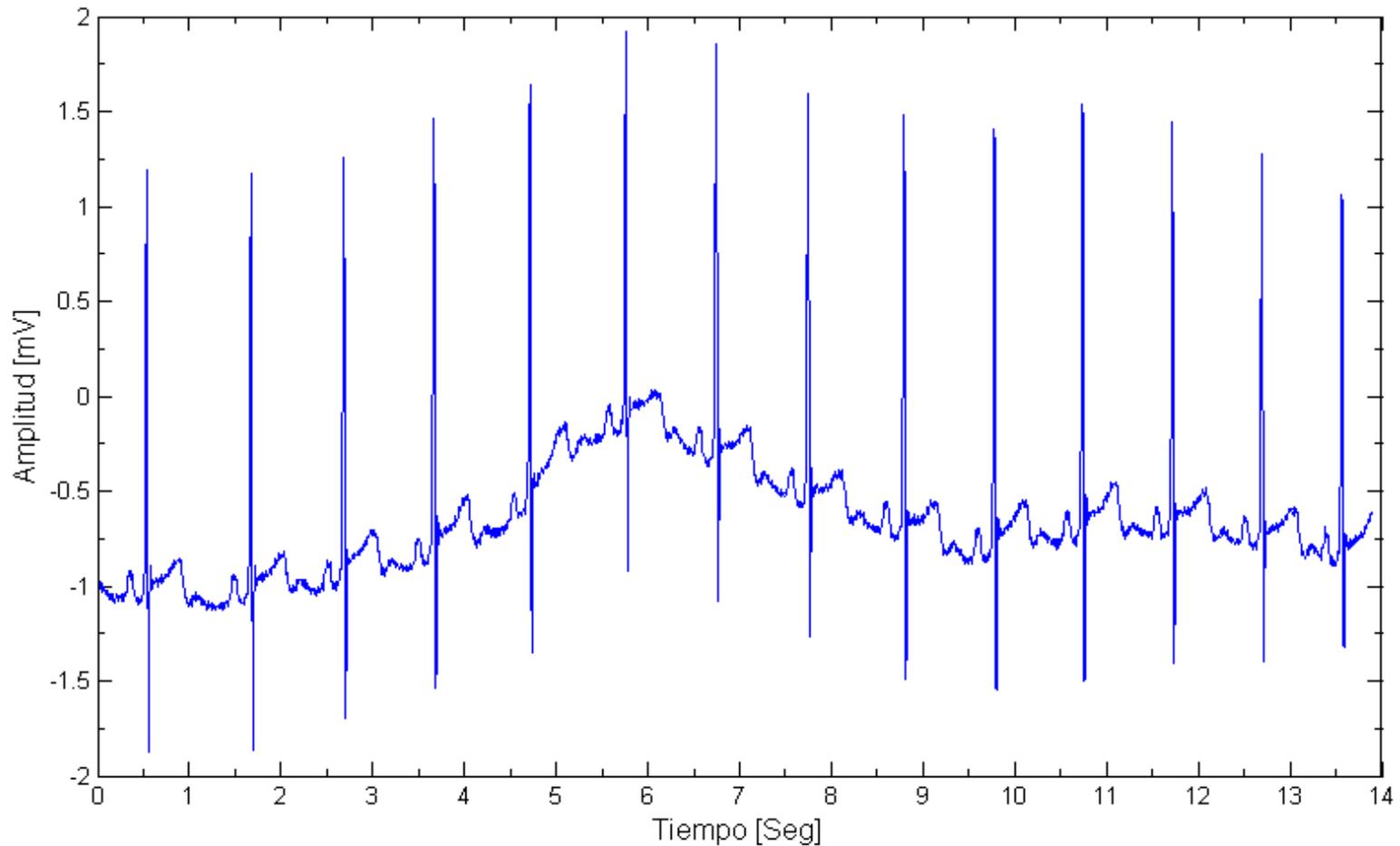


- Corrimiento de línea de base.



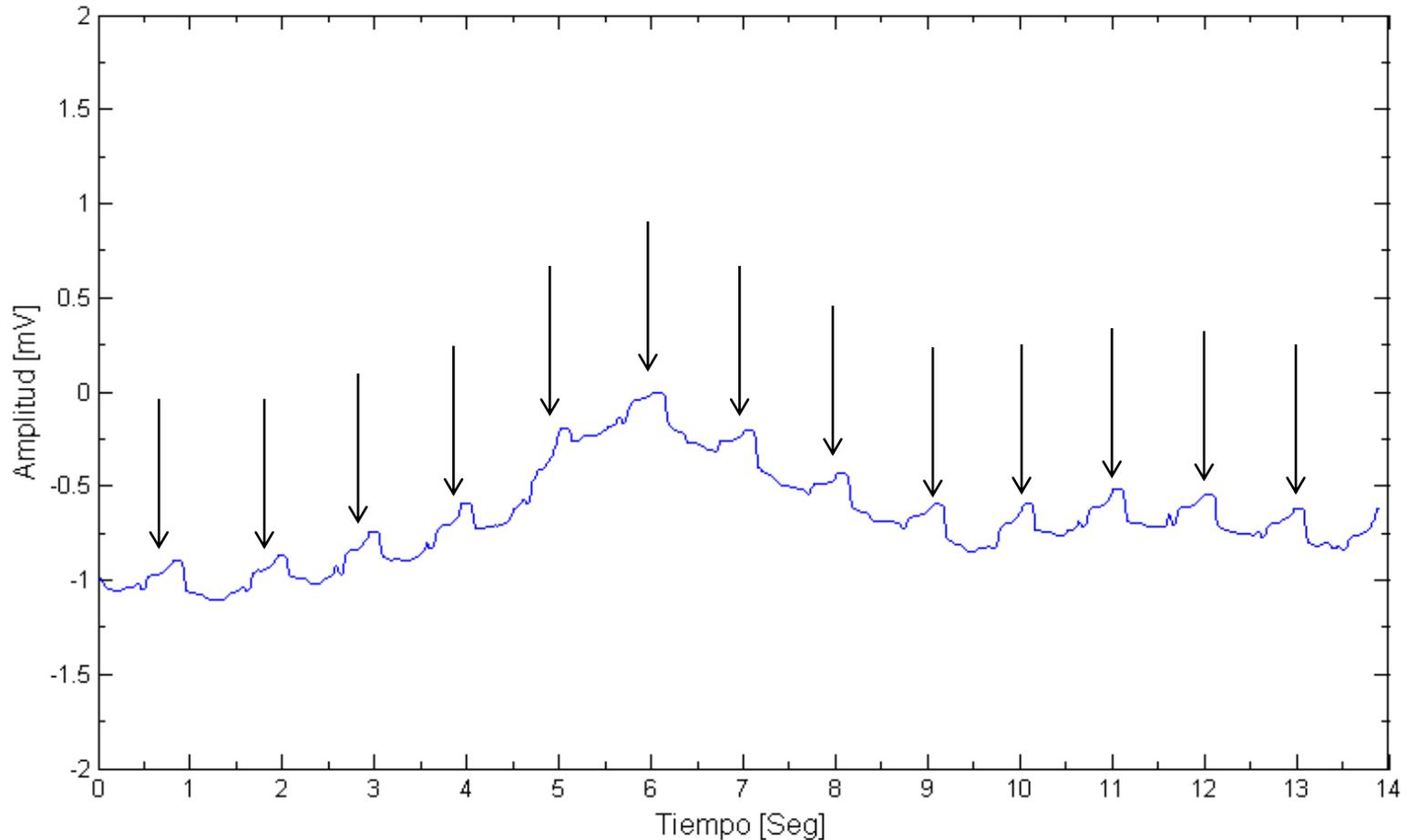
- Ruido muscular.

Eliminación del corrimiento de línea de base



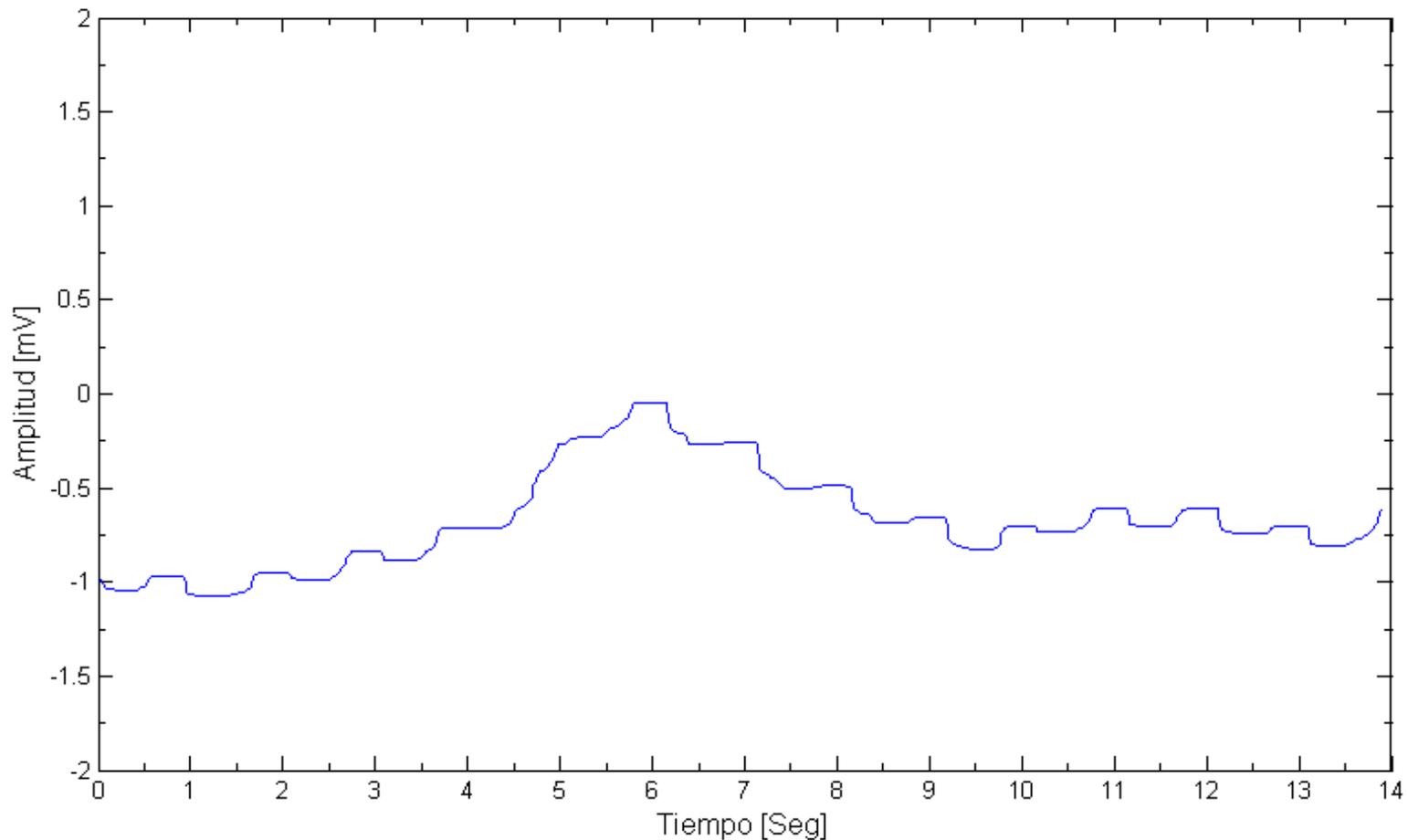
Eliminación del corrimiento de línea de base

1. Filtrar la señal con un filtro de mediana móvil de 200 milisegundos de ventana.



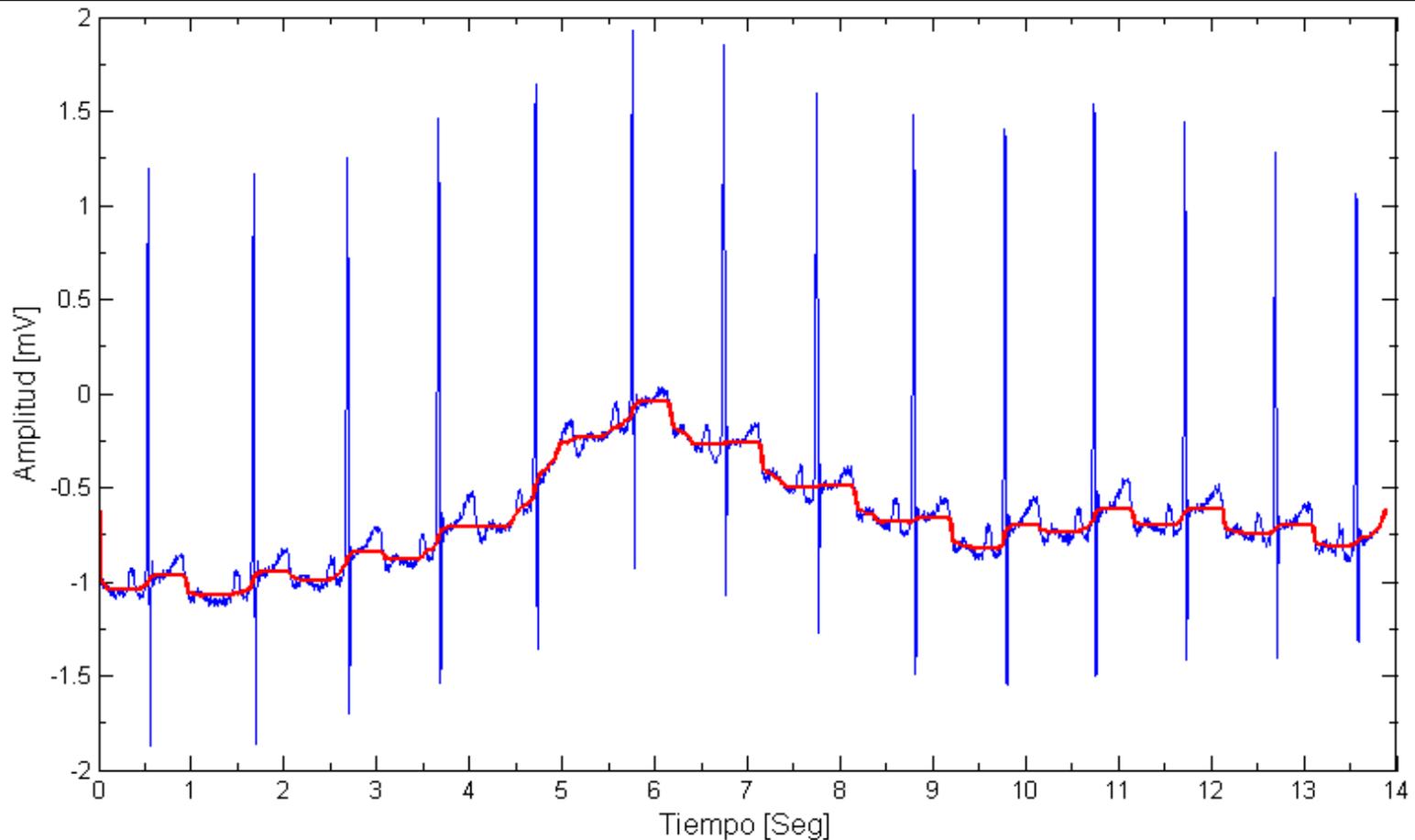
Eliminación del corrimiento de línea de base

2. Filtrar la señal resultante del paso anterior con un filtro de mediana móvil de 600 milisegundos de ventana.



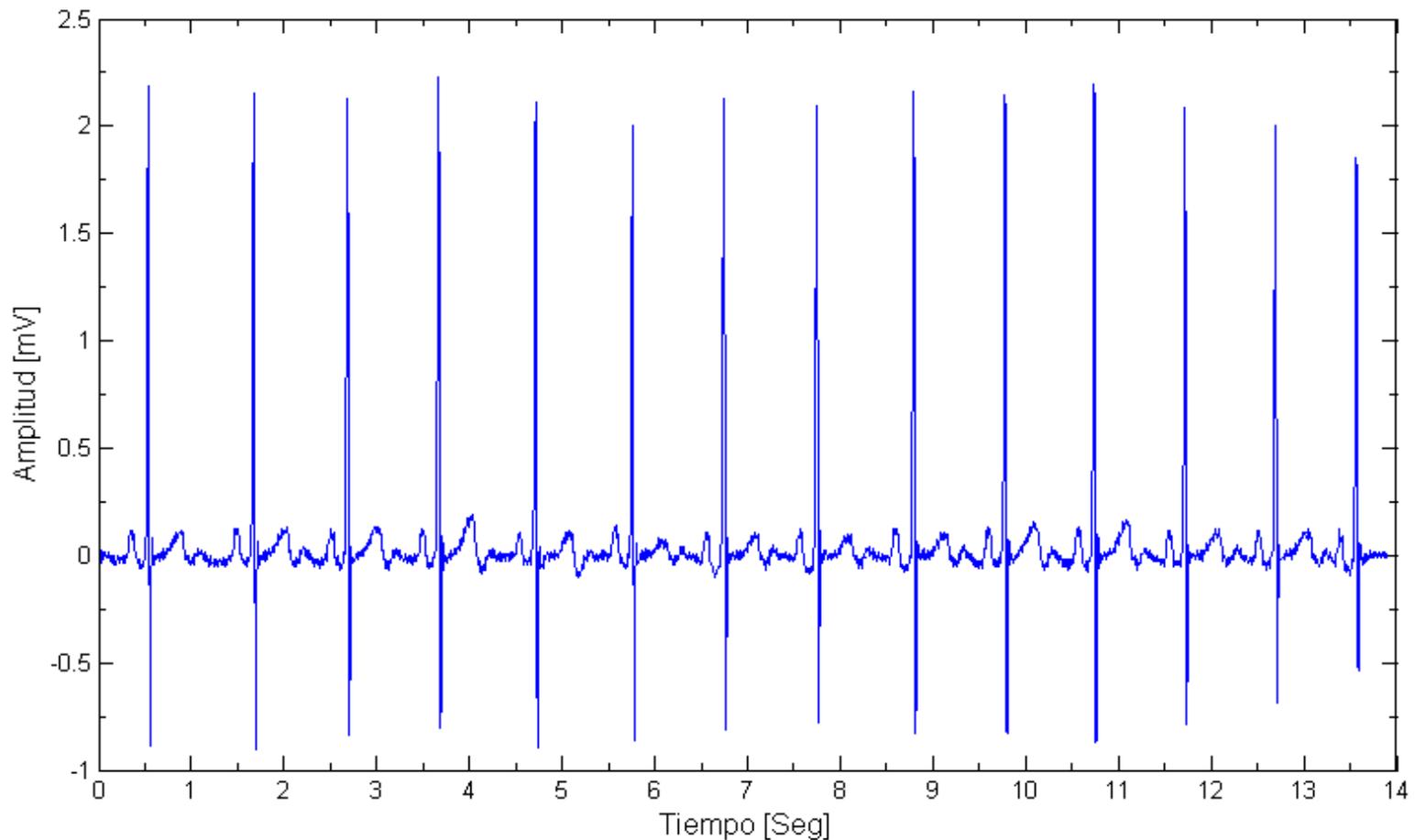
Eliminación del corrimiento de línea de base

3. Restar la aproximación de la línea de base de la señal original.



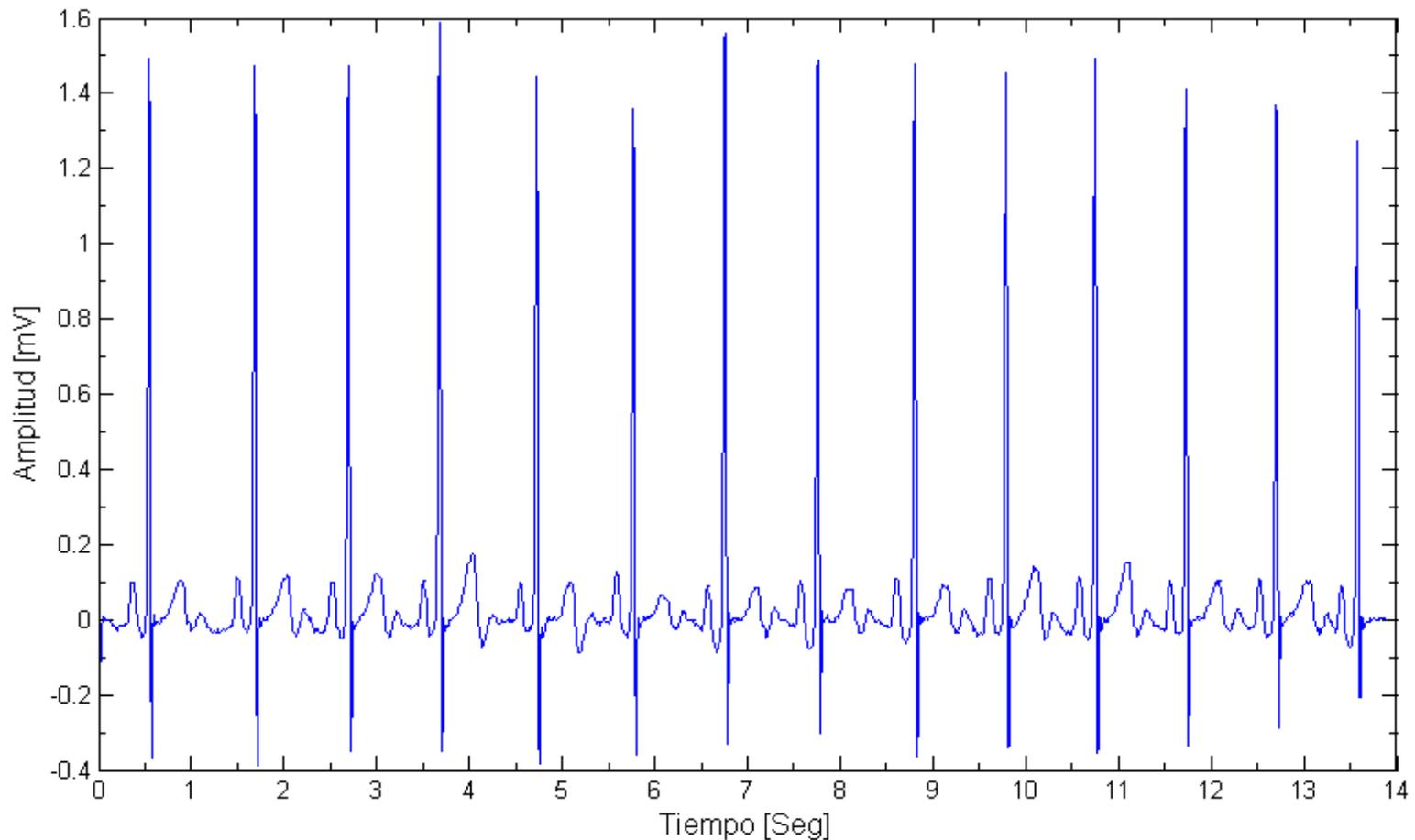
Eliminación del corrimiento de línea de base

Resultado:



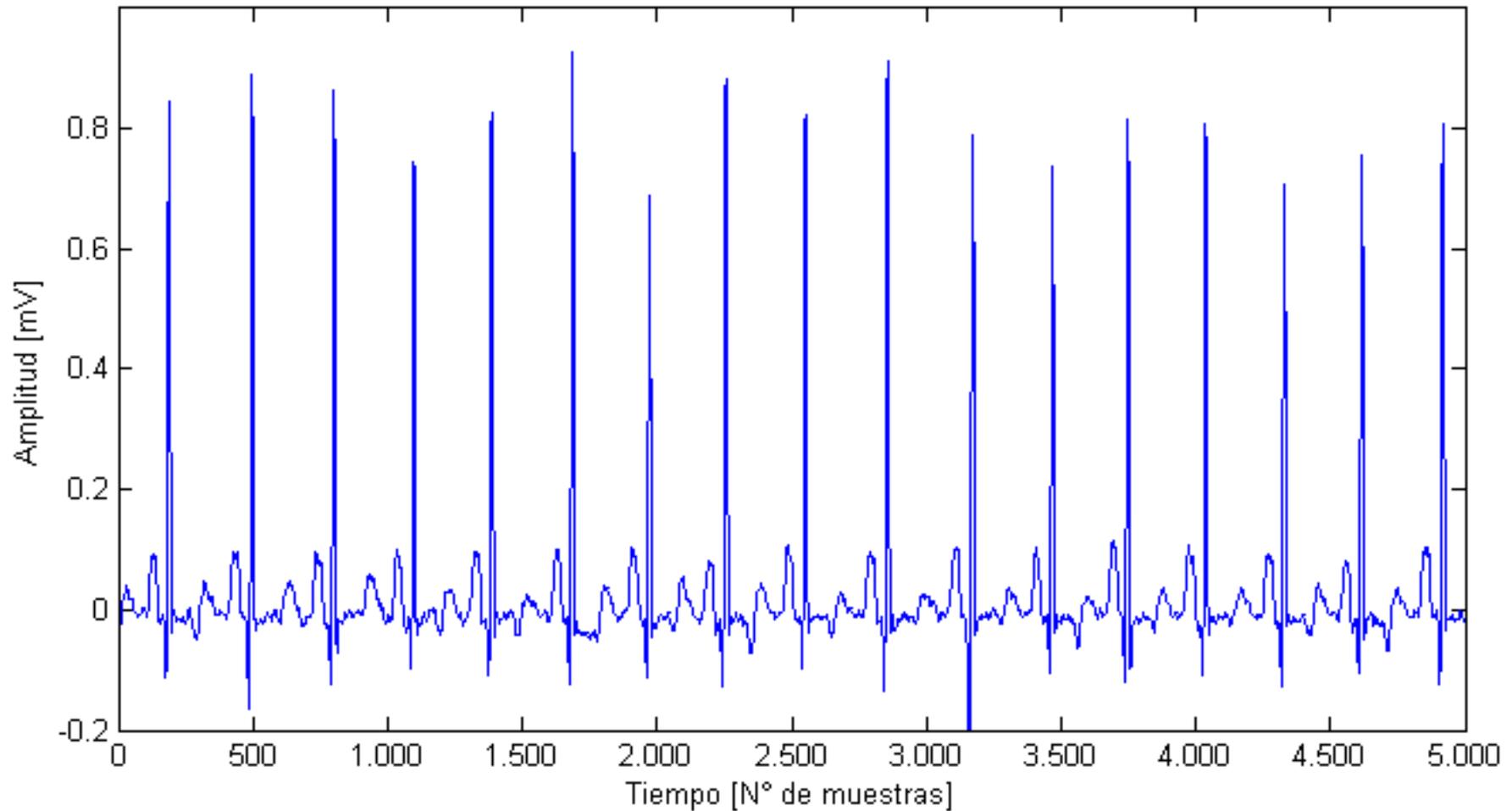
Eliminación del ruido de línea

Aplicación de filtro de media móvil.



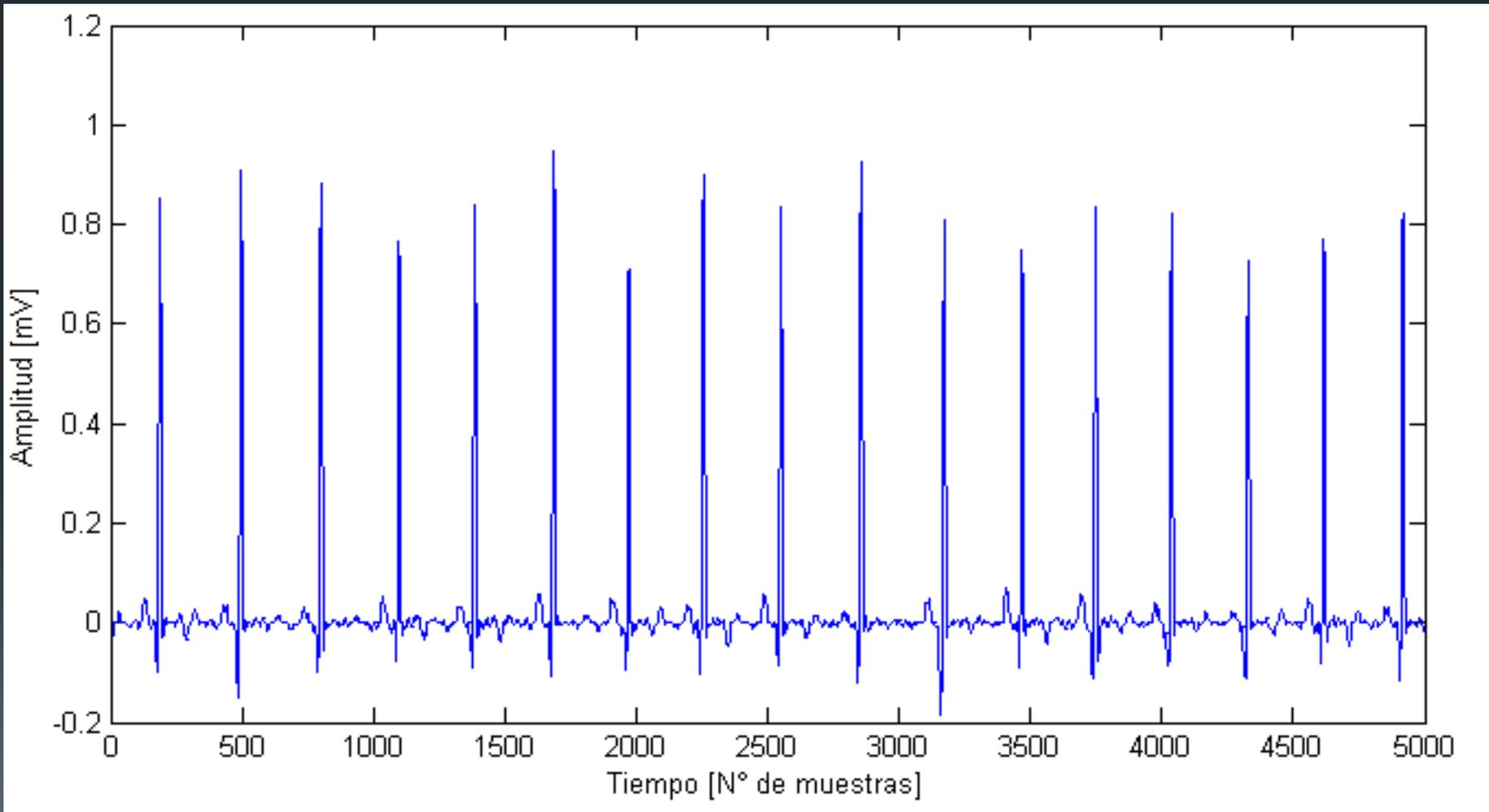
Segmentación

Señal original:



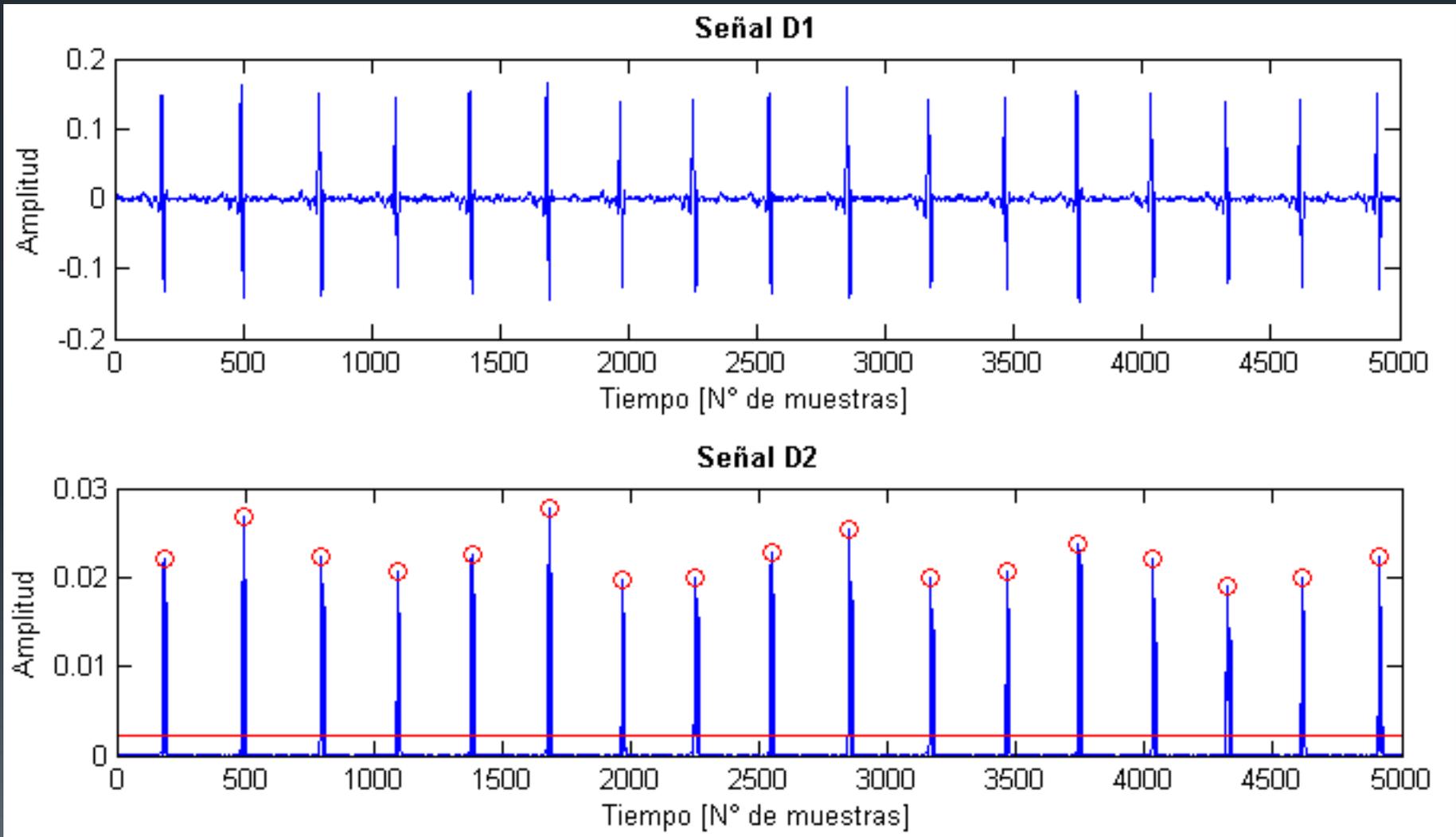
Segmentación

1. Eliminar la información de las ondas P y T (filtro de mediana móvil de 200 milisegundos)



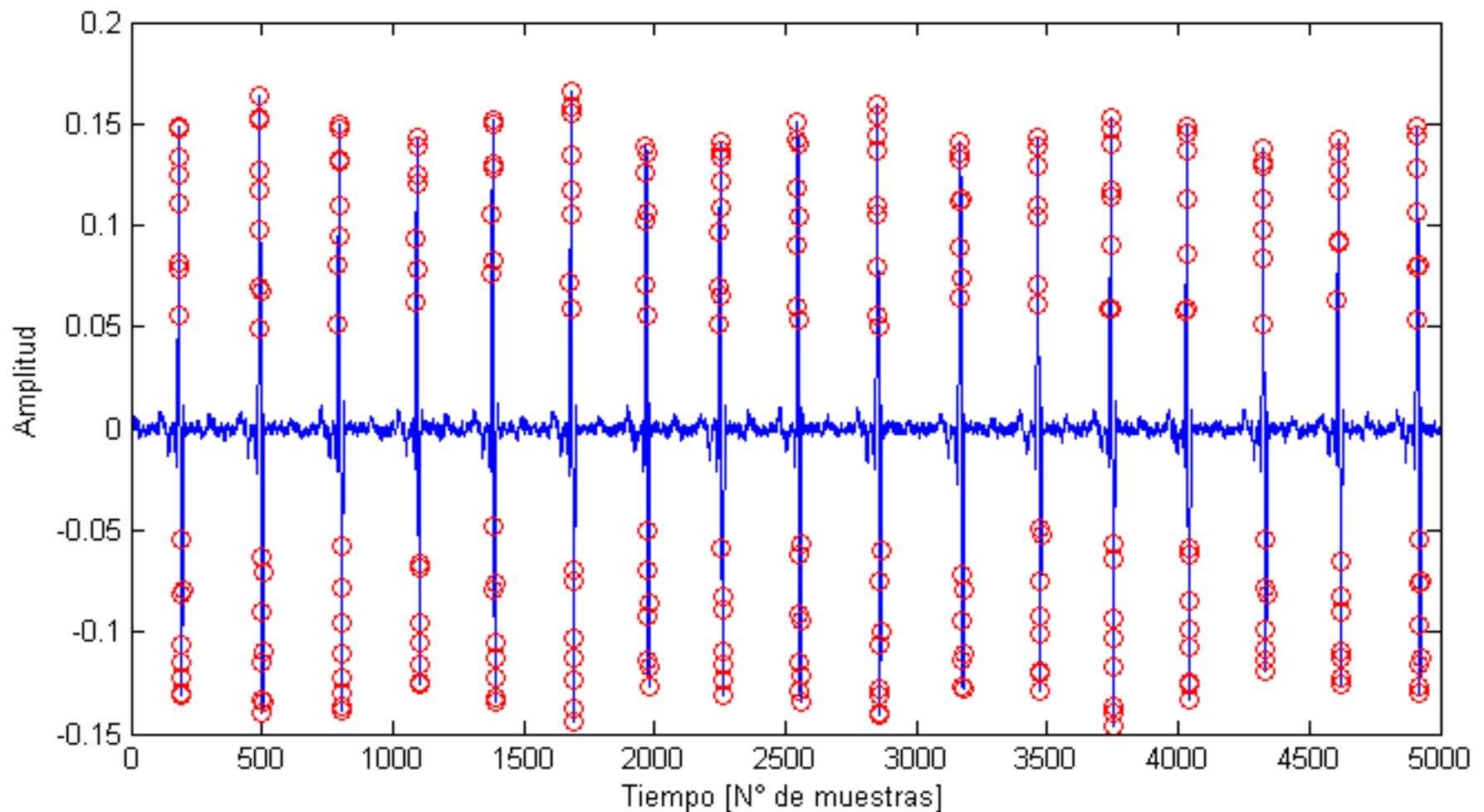
Segmentación

2. Obtener las señales D1 y D2, y calcular el valor umbral.



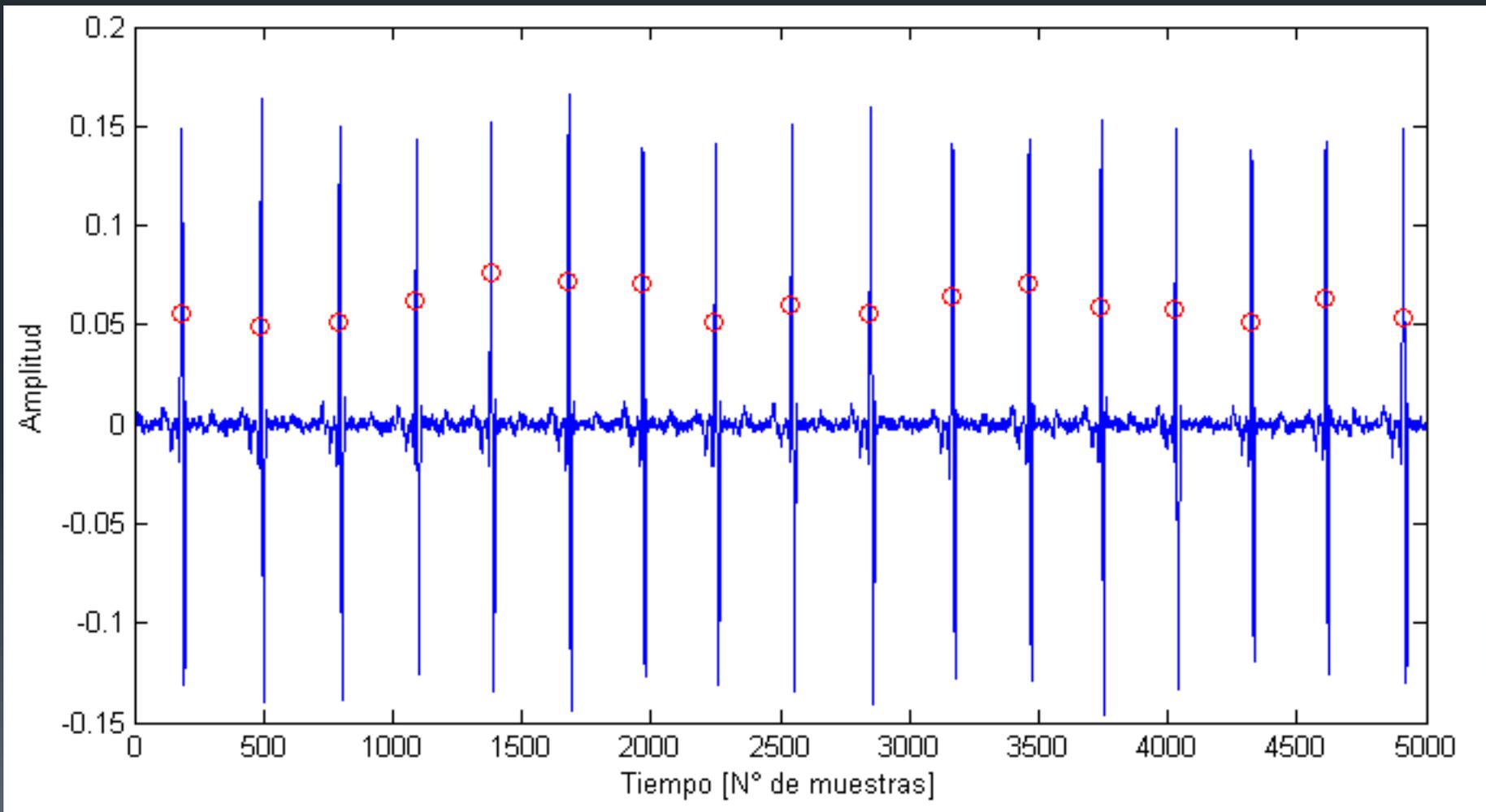
Segmentación

- Determinar los puntos en que D2 supera el valor umbral.



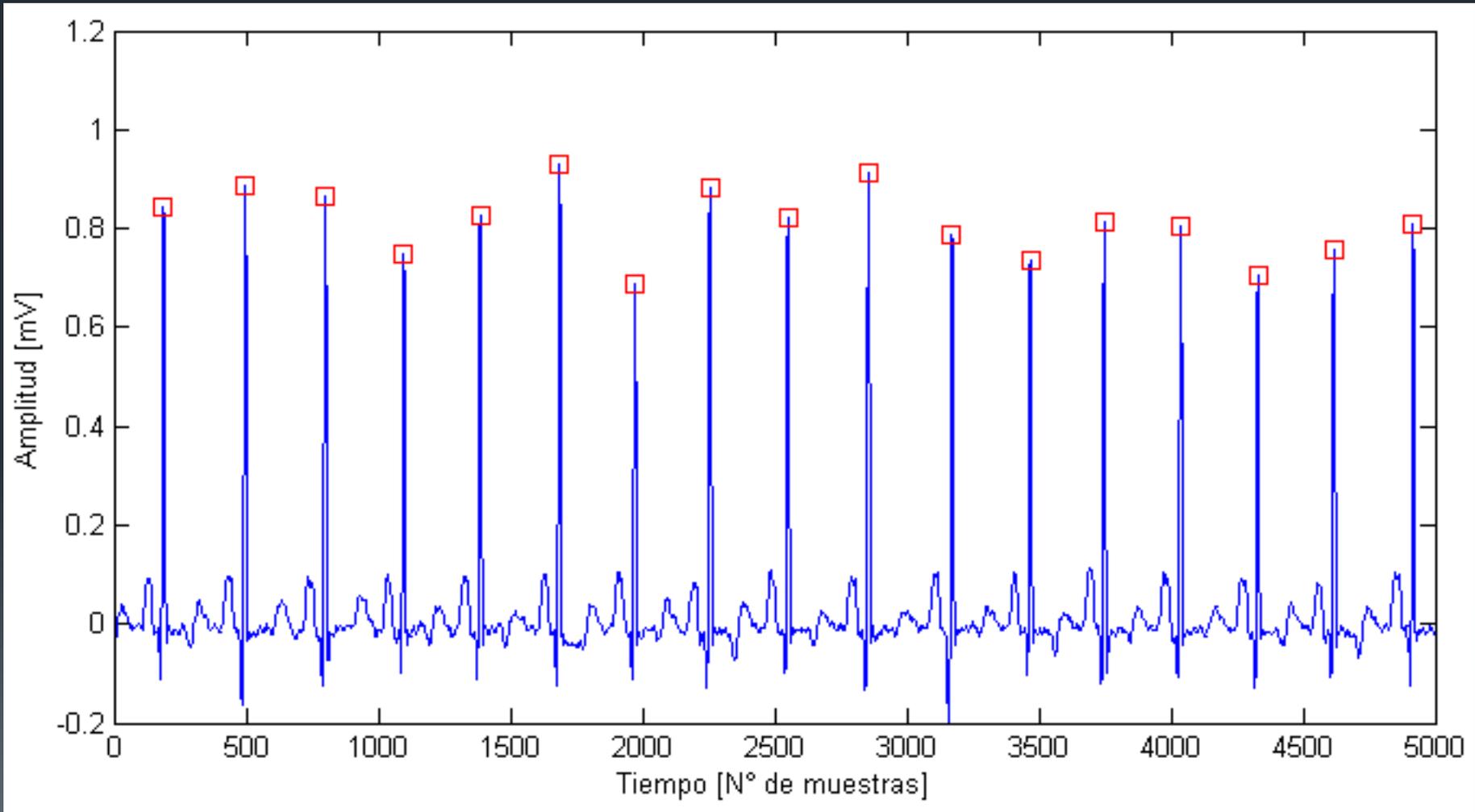
Segmentación

4. Verificar que los puntos del paso anterior estén separados más de 200 milisegundos.



Segmentación

- Determinar el primer paso por cero de la señal D1 como la posición del valor máximo del complejo QRS.



Segmentación: Determinación del valor umbral

Porcentaje Umbral	Error
1 %	49,35 ± 43,15 %
5 %	7,69 ± 17,63 %
10 %	0,23 ± 0,71 %
25 %	- 0,77 ± 1,52 %
50 %	- 4,02 ± 5,30 %
75 %	- 13,22 ± 10,97 %
100 %	- 66,97 ± 11,55 %

Etapa de extracción de características

- Construir un vector de características que permita la distinción entre clases de intervalos RR.

Etapa de extracción de características

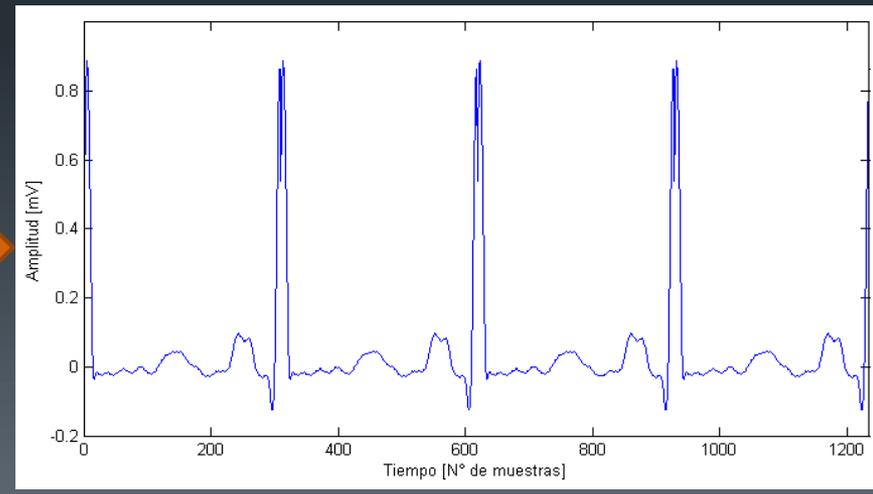
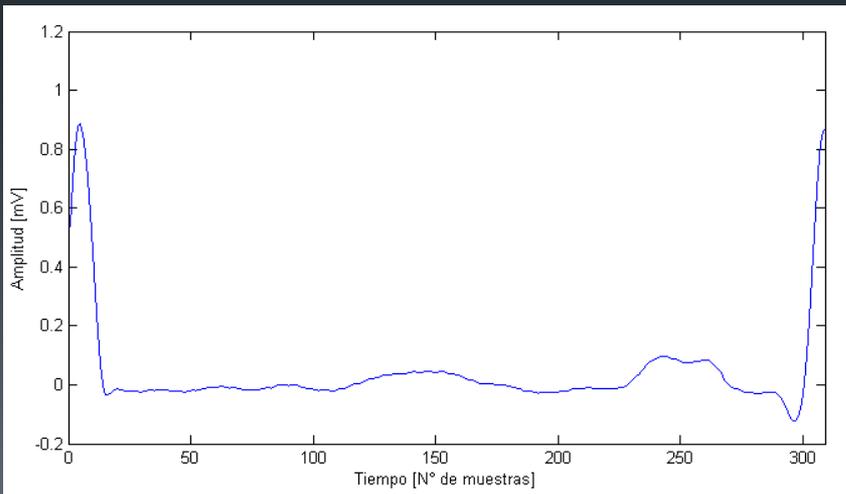
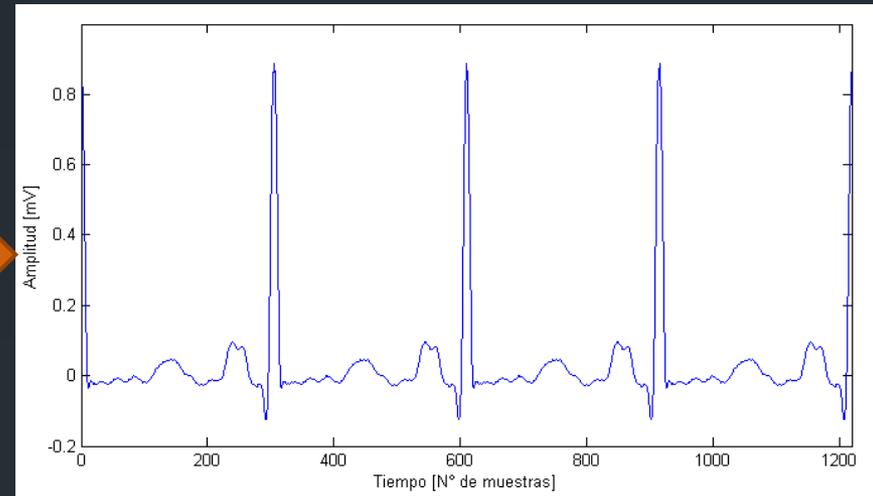
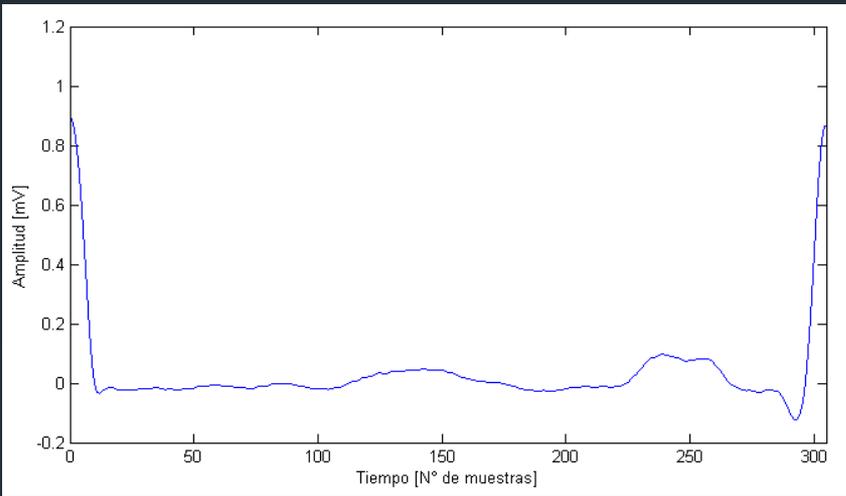
Los vectores características fueron armados a partir de las siguientes características:

1. Duración del intervalo RR actual.
2. Relación entre la duración del intervalo RR actual y el anterior.
3. Relación entre la duración del intervalo RR actual y el siguiente.
4. Media.
5. Mediana.
6. Moda.
7. Desviación estándar.
8. Desviación absoluta de la media.
9. Desviación absoluta de la mediana.
10. Mínimo.
11. Relación mínimo / máximo.

Etapa de extracción de características

- Para que las características extraídas del dominio de la transformada fueran representativas, se realizó la extensión periódica de la señal.
- En esta etapa es de gran importancia una correcta segmentación.

Etapa de extracción de características



Etapa de extracción de características

- Una vez obtenidos, los vectores característicos fueron normalizados mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$x'_{nk} = \tanh \left(\frac{x_{nk} - \overline{x_k}}{\sigma_{x_k}} \right)$$

Selección de la ondita madre óptima

Dado que la ondita madre óptima depende de la aplicación, las características del dominio de la transformada se obtuvieron para las siguientes familias de onditas madre:

- Haar.
 - Daubechies (1 a 12).
 - Symlets (1 a 12).
 - Coiflets (1 a 5).
 - Biorthogonal Spline (1.1 a 3.9).
- Para la selección de la ondita madre óptima, se empleó el análisis de varianza (ANOVA):

$$F = \frac{\textit{Varianza entre grupos}}{\textit{Varianza dentro de los grupos}}$$

Selección de la ondita madre óptima

- En primer lugar, se calculó el valor F medio de las características, para todas las onditas madres, y se seleccionaron las 5 mejores.

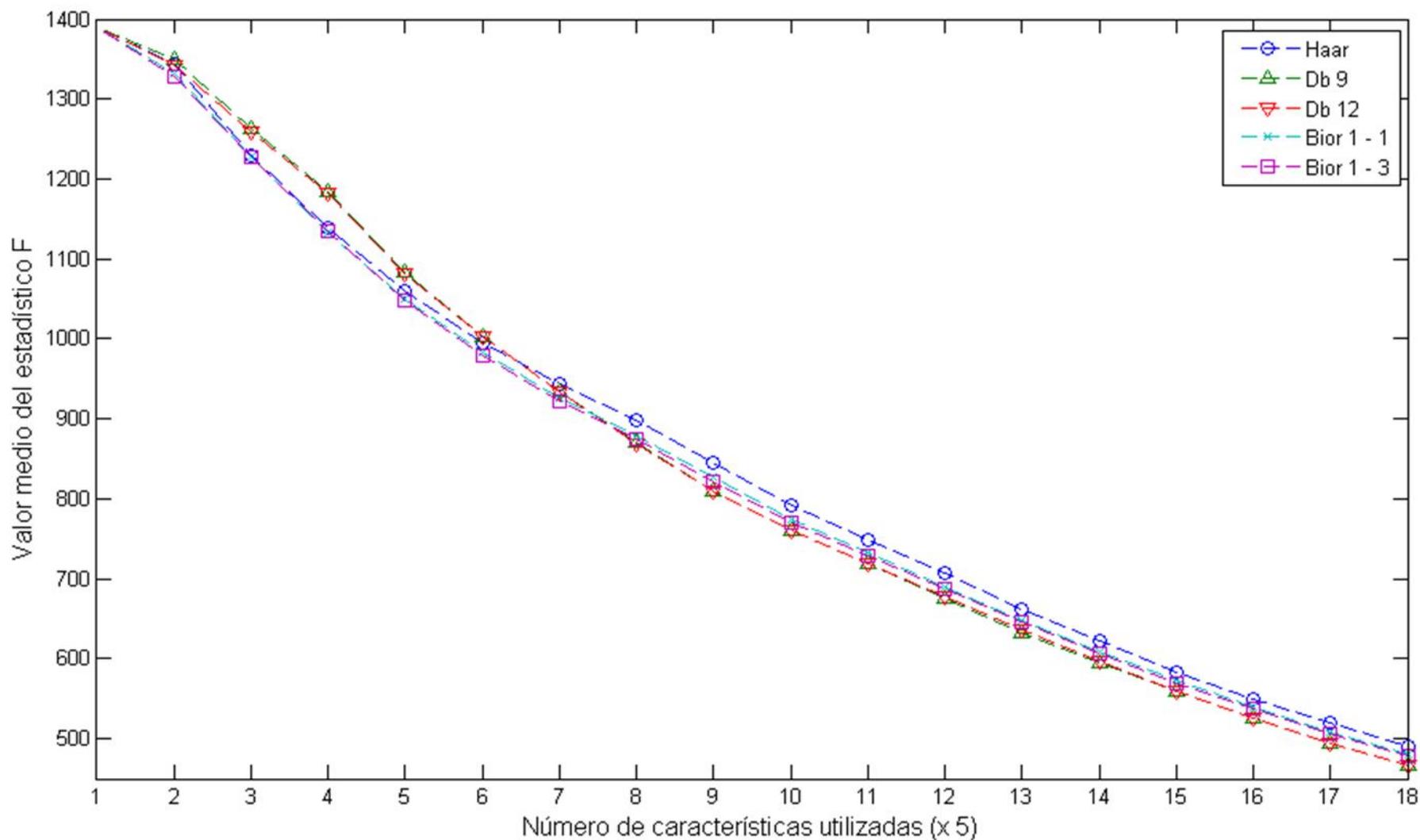
Ondita Madre	F Medio
Haar	463,71
Biorthogonal Spline 1 – 1	454,07
Biorthogonal Spline 1 – 3	452,57
Daubechies 9	440,74
Daubechies 12	440,51

Selección de la ondita madre óptima



- Luego, se evaluó la variación del valor F medio, según el número de características utilizadas.

Selección de la ondita madre óptima



Selección del subconjunto óptimo de características

- Para la selección del subconjunto óptimo de características a utilizar, se implementó un algoritmo de búsqueda secuencial hacia atrás.

Selección del subconjunto óptimo de características

Nivel	Descomposición		Señal Original
	Detalles	Aproximaciones	
1	<ul style="list-style-type: none"> - Mediana. - D. Estándar. - D. Abs. Media. 	<ul style="list-style-type: none"> - D. Estándar. - Relación min / máx. 	
2	<ul style="list-style-type: none"> - D. Estándar. - D. Abs. Media. - D. Abs. Mediana. 	<ul style="list-style-type: none"> - D. Estándar. - D. Abs. Media. - Mínimo. - Relación min / máx. 	
3	<ul style="list-style-type: none"> - D. Abs. Media. - D. Abs. Mediana. - Mínimo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Media. - D. Estándar. - D. Abs. Mediana. - Mínimo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Duración del latido actual. - Relación duración actual / duración anterior. - Relación duración actual / duración siguiente.
4	<ul style="list-style-type: none"> - D. estándar. - D. Abs. Media. - D. Abs. Mediana. - Mínimo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Media. - Mediana. - D. Abs. Media. - D. Abs. Mediana. - Mínimo. - Relación min / máx. 	<ul style="list-style-type: none"> - Moda. - D. Estándar. - D. Abs. Media. - Relación min / máx.
5	<ul style="list-style-type: none"> - Media. - D. Estándar. - D. Abs. Mediana. - Mínimo. - Relación min / máx. 	<ul style="list-style-type: none"> - D. Estándar. - D. Abs. Media. - D. Abs. Mediana. - Mínimo. - Relación min / máx. 	

Etapa de clasificación

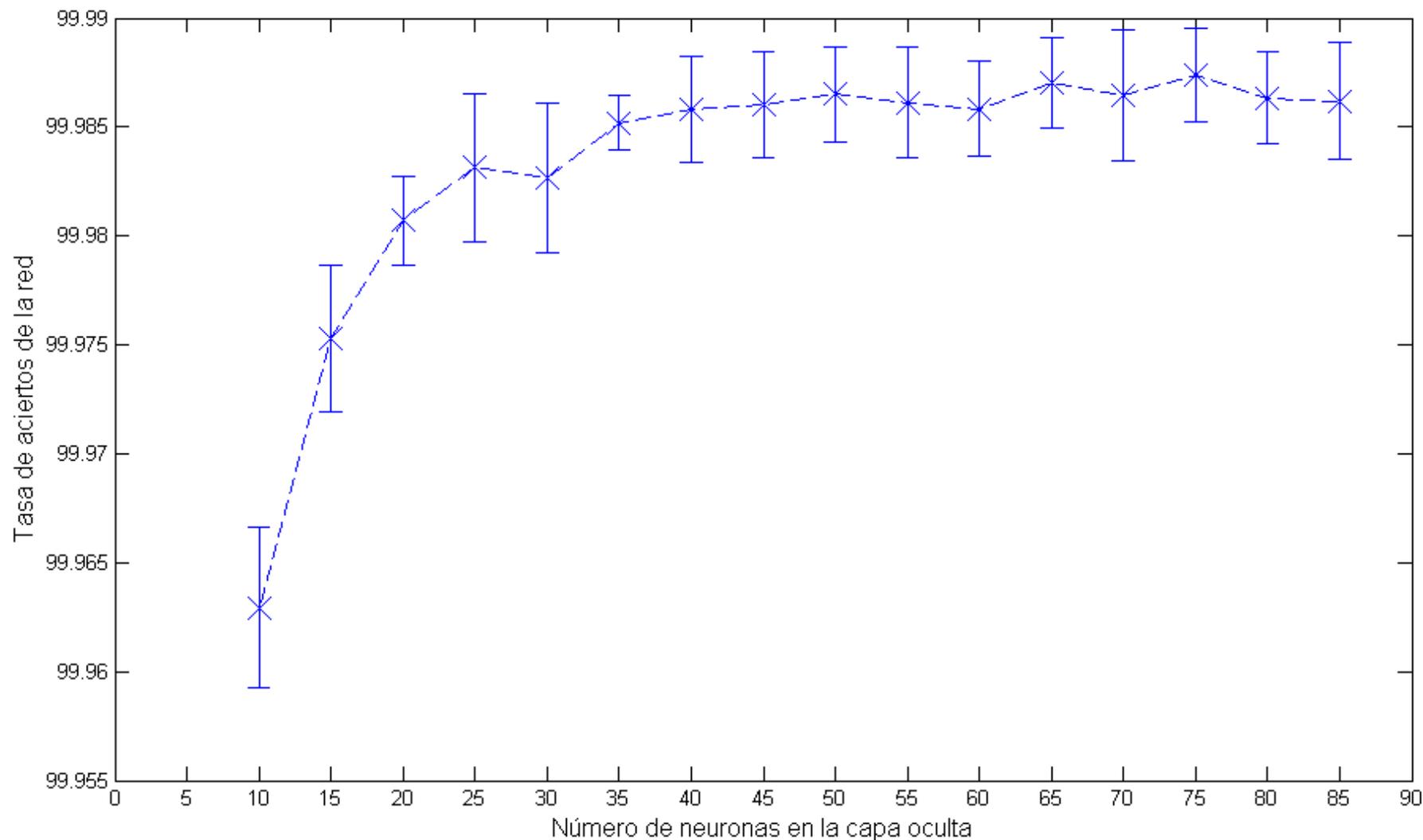
- Clasificar los vectores de características provenientes de la etapa anterior, en uno de los seis tipos de latidos que se pretende reconocer.

Etapa de clasificación

- La determinación del tamaño de la red neuronal a utilizar (N° de neuronas ocultas) se realizó empíricamente.

Número de neuronas ocultas	Error porcentual
10	$3,71 \pm 0,37 \times 10^{-2}$
15	$2,47 \pm 0,33 \times 10^{-2}$
20	$1,93 \pm 0,21 \times 10^{-2}$
25	$1,69 \pm 0,34 \times 10^{-2}$
30	$1,73 \pm 0,34 \times 10^{-2}$
35	$1,48 \pm 0,13 \times 10^{-2}$
40	$1,42 \pm 0,25 \times 10^{-2}$
45	$1,40 \pm 0,24 \times 10^{-2}$
50	$1,35 \pm 0,22 \times 10^{-2}$
55	$1,39 \pm 0,25 \times 10^{-2}$
60	$1,42 \pm 0,22 \times 10^{-2}$
65	$1,30 \pm 0,21 \times 10^{-2}$
70	$1,35 \pm 0,30 \times 10^{-2}$
75	$1,26 \pm 0,22 \times 10^{-2}$
80	$1,37 \pm 0,21 \times 10^{-2}$
85	$1,38 \pm 0,27 \times 10^{-2}$

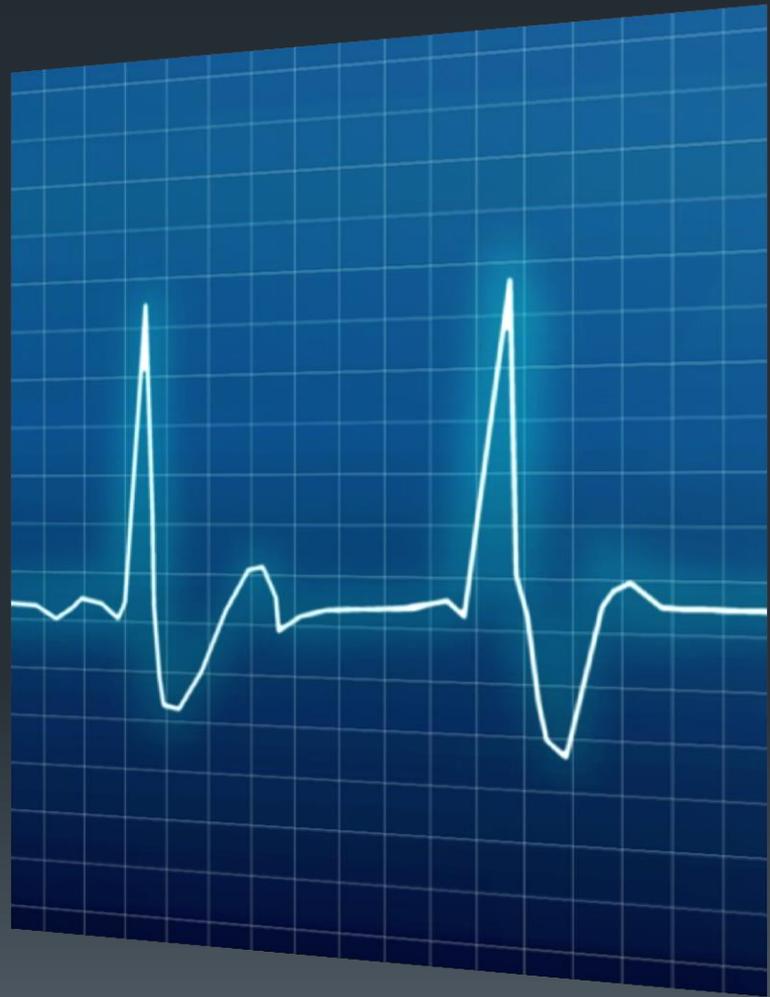
Etapa de clasificación



Etapa de clasificación

		NOR	CAP	CVP	BRI	BRD	MEI			
Resultados	NOR	492 16.4%	4 0.1%	4 0.1%	1 0.0%	2 0.1%	1 0.0%	97.6%	2.4%	
	CAP	4 0.1%	493 16.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	99.2%	0.8%	
	CVP	0 0.0%	3 0.1%	495 16.5%	2 0.1%	0 0.0%	2 0.1%	98.6%	1.4%	
	BRI	3 0.1%	0 0.0%	1 0.0%	497 16.6%	0 0.0%	1 0.0%	99.0%	1.0%	
	BRD	1 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	498 16.6%	0 0.0%	99.8%	0.2%	
	MEI	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	496 16.5%	100%	0.0%	
		98.4%	98.6%	99.0%	99.4%	99.6%	99.2%	99.0%	1.0%	
		1.6%	1.4%	1.0%	0.6%	0.4%	0.8%	1.0%		
		Objetivos								

Resultados Obtenidos



Performance del sistema

- El sistema fue probado con 216 segmentos de señal de buena calidad, para un total de 52.078 latidos clasificados, obteniendo los siguientes resultados:

	Red					Media
	1	2	3	4	5	
Sensibilidad NOR.	97,4 %	95,9 %	97,6 %	97,8 %	96,9 %	97,9 %
Sensibilidad C.P.A.	86,6 %	90,5 %	88,8 %	90,2 %	82,8 %	89,5 %
Sensibilidad C.P.V.	96,7 %	95,7 %	94,8 %	96,4 %	97,2 %	97,0 %
Sensibilidad B.R.I.	99,0 %	98,5 %	99,4 %	99,0 %	99,3 %	99,3 %
Sensibilidad B.R.D.	97,4 %	96,2 %	95,5 %	97,0 %	96,8 %	96,7 %
Sensibilidad M.E.I.	97,8 %	98,1 %	97,2 %	97,2 %	98,0 %	97,8 %
Especificidad	97,2 %	96,2 %	97,1 %	97,5 %	96,8 %	97,6 %

Performance del sistema

- Respecto de las tasas de falsos positivos:

	Red					
	1	2	3	4	5	Media
Falso positivo NOR.	0,9 %	1,2 %	1,1 %	1,0 %	0,9 %	0,9 %
Falso positivo C.P.A.	1,9 %	4,3 %	1,4 %	2,2 %	2,0 %	2,0 %
Falso positivo C.P.V.	5,8 %	3,2 %	2,4 %	5,6 %	8,1 %	4,1 %
Falso positivo B.R.I.	9,1 %	16,9 %	12,8 %	8,1 %	12,6 %	9,1 %
Falso positivo B.R.D.	6,1 %	3,0 %	2,4 %	3,6 %	3,2 %	2,6 %
Falso positivo M.E.I.	0,7 %	1,2 %	0,8 %	1,0 %	2,1 %	0,9 %

Performance del sistema

- En cuanto a la seguridad en las clasificaciones:

Tipo de Latido	Seguridad correcta		Seguridad incorrecta	
	Media	Std.	Media	Std.
NOR.	94,77 %	10,95 %	64,29 %	24,93 %
C.P.A.	85,71 %	16,49 %	54,74 %	25,33 %
C.P.V.	98,69 %	5,41 %	77,63 %	23,55 %
B.R.I.	97,63 %	5,26 %	74,34 %	21,17 %
B.R.D.	95,36 %	6,89 %	72,24 %	21,31 %
M.E.I.	98,54 %	3,76 %	79,38 %	18,80 %

Influencia del ruido

- Influencia sobre la segmentación.
- Influencia sobre las características extraídas.

Influencia del ruido en la segmentación

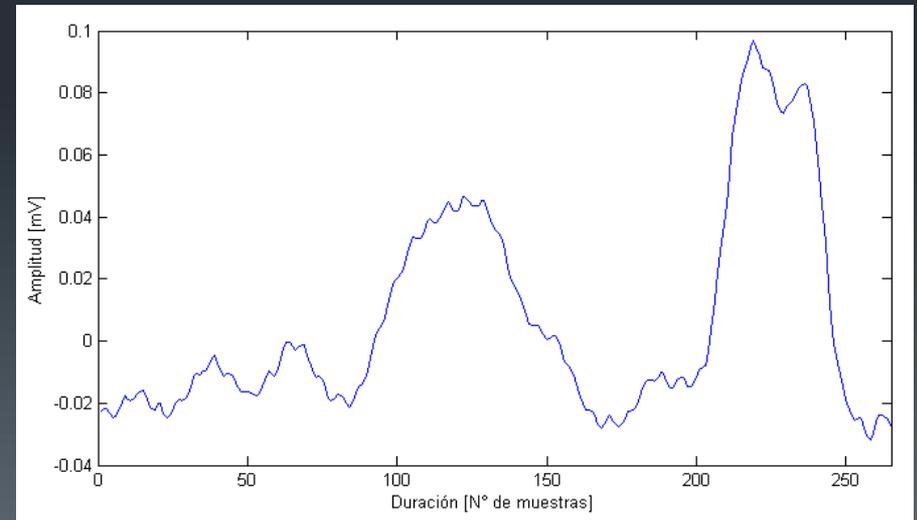
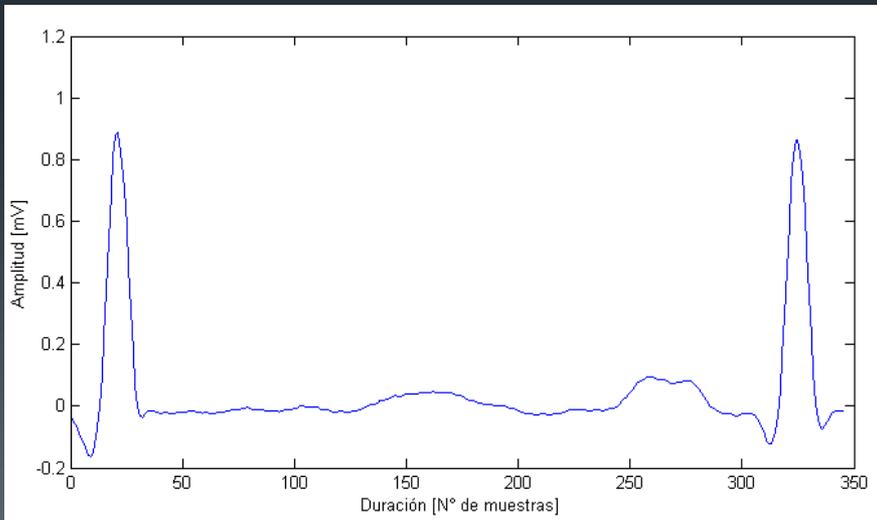
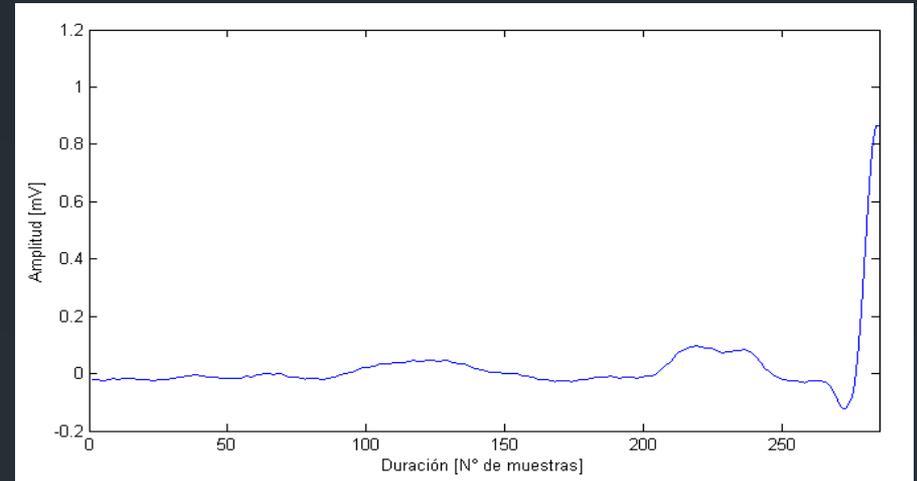
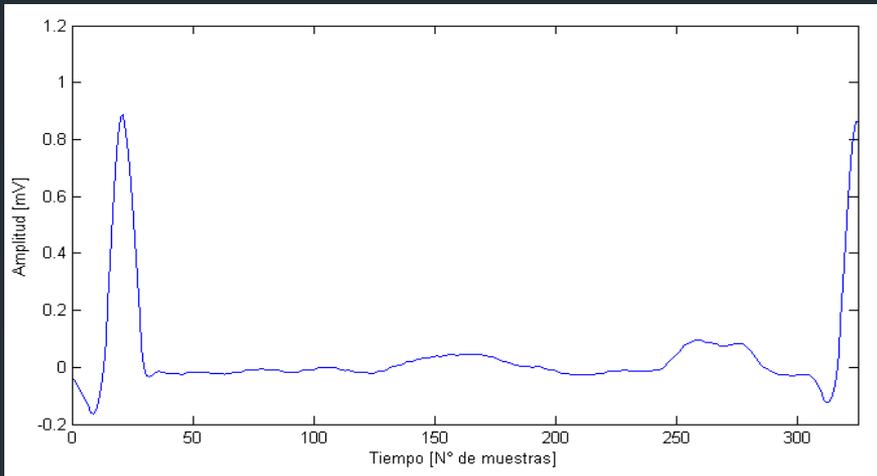
Relación Señal Ruido	Tasa de Error
1	181,30 ± 41,58 %
10	110,08 ± 85,09 %
25	48,05 ± 69,81 %
50	37,14 ± 54,37 %
75	7,28 ± 10,21 %
100	4,16 ± 6,02 %

Influencia de la segmentación sobre la clasificación

Se trabajó con cuatro casos hipotéticos de malas segmentaciones:

1. Se agregaron 55 milisegundos de señal al principio de cada intervalo.
2. Se quitaron 55 milisegundos de señal al principio de cada intervalo.
3. Se agregaron 55 milisegundos de señal al principio y fin de cada intervalo.
4. Se quitaron 55 milisegundos de señal al principio y fin de cada intervalo.

Influencia de la segmentación sobre la clasificación



Influencia de la segmentación sobre la clasificación

	Tipo de Segmentación				
	1	2	3	4	Correcta
Sensibilidad NOR.	51,5 %	80,0 %	89,0 %	2,5 %	97,8 %
Sensibilidad C.P.A.	54,4 %	45,5 %	28,4 %	85,5 %	90,2 %
Sensibilidad C.P.V.	76,3 %	78,3 %	65,8 %	53,1 %	96,4 %
Sensibilidad B.R.I.	44,8 %	60,1 %	94,5 %	77,5 %	99,0 %
Sensibilidad B.R.D.	9,4 %	7,6 %	80,9 %	25,5 %	97,0 %
Sensibilidad M.E.I.	81,3 %	86,0 %	97,8 %	8,3 %	97,2 %
Especificidad	49,3 %	69,0 %	86,2 %	19,5 %	97,5 %

Influencia de la segmentación sobre la clasificación

	Tipo de Segmentación				
	1	2	3	4	Correcta
Falso positivo NOR.	22,5 %	18,2 %	5,6 %	35,5 %	1,0 %
Falso positivo C.P.A.	0,5 %	0,3 %	3,8 %	91,0 %	2,2 %
Falso positivo C.P.V.	79,1 %	71,4 %	24,0 %	88,0 %	5,6 %
Falso positivo B.R.I.	82,8 %	57,6 %	28,3 %	77,4 %	8,1 %
Falso positivo B.R.D.	20,4 %	14,7 %	30,9 %	6,9 %	3,6 %
Falso positivo M.E.I.	6,9 %	3,7 %	16,1 %	8,8 %	1,0 %

Influencia de la segmentación sobre la clasificación

Tipo de Latido	Tipo de Segmentación							
	1		2		3		4	
	Corr. (%)	Inc. (%)	Corr. (%)	Inc. (%)	Corr. (%)	Inc. (%)	Corr. (%)	Inc. (%)
NOR.	92,67	89,56	92,74	89,85	89,81	74,51	48,70	80,03
	9,94	14,01	10,27	12,65	12,93	19,83	25,48	21,74
C.P.A.	66,67	69,48	97,23	65,61	72,39	79,64	96,85	90,35
	25,41	29,63	26,40	29,52	26,93	18,07	6,84	13,53
C.P.V.	96,95	83,59	98,18	91,47	90,17	74,54	85,64	76,37
	8,56	14,65	6,80	14,38	16,03	21,34	16,76	16,92
B.R.I.	95,82	92,94	92,86	90,62	92,28	75,18	87,58	79,12
	6,10	5,78	8,52	87,91	10,40	13,91	12,80	16,67
B.R.D.	87,86	71,79	94,25	77,75	87,48	87,19	86,41	81,29
	15,48	19,41	8,81	17,38	15,27	12,36	10,47	17,86
M.E.I.	88,48	85,26	89,89	86,31	96,44	86,48	84,30	95,01
	6,61	9,33	5,92	8,63	4,27	18,77	8,55	7,25

Influencia del ruido sobre la clasificación

Tipo de Latido	Relación Señal Ruido								
	0,01	0,25	0,5	0,75	1,0	2,5	5	7,5	10
NOR.	1,0	2,9	2,4	2,5	2,7	4,7	10,0	17,1	24,1
C.P.A.	0,0	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,8
C.P.V.	80,2	76,2	76,1	75,4	75,4	75,2	75,3	75,4	75,4
B.R.I.	11,0	74,5	92,7	96,2	97,9	99,3	99,7	99,9	99,9
B.R.D.	3,1	15,7	23,5	29,6	32,4	40,5	46,3	50,3	51,9
M.E.I.	81,7	78,7	98,4	61,7	56,8	51,9	61,0	70,7	79,3
Esp.	11,2	20,9	23,0	23,7	24,0	26,0	30,5	36,1	41,2

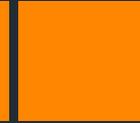
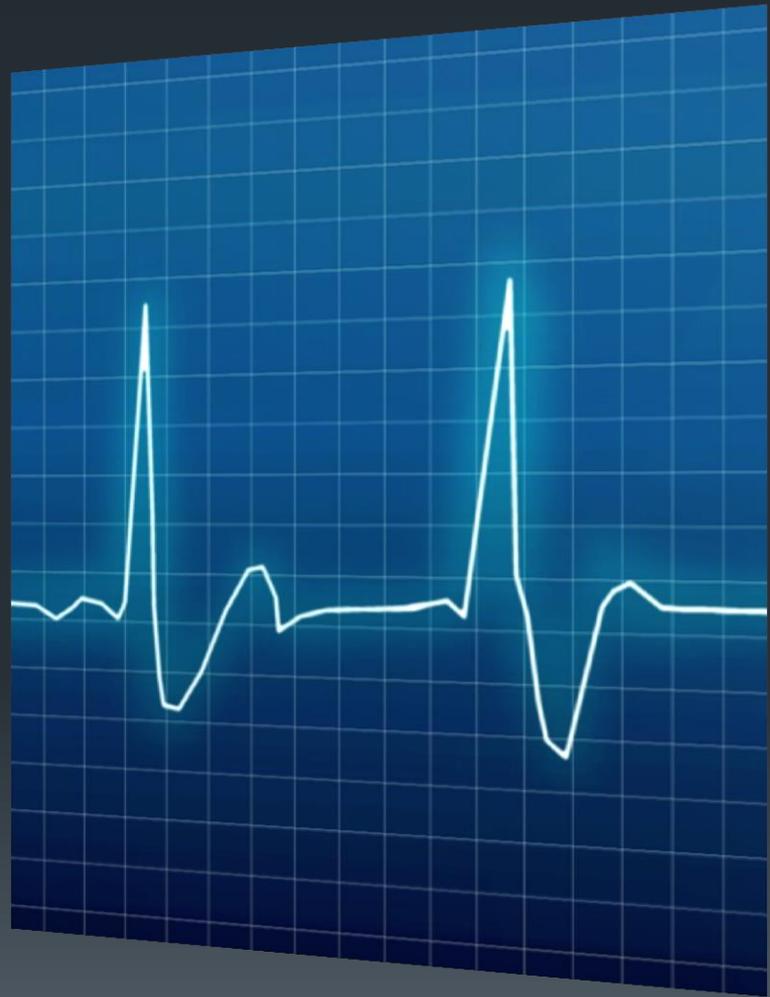
Influencia del ruido sobre la clasificación

Tipo de Latido	Relación Señal Ruido								
	0,01	0,25	0,5	0,75	1,0	2,5	5	7,5	10
NOR.	14.0	17.5	15.6	14.5	14.3	4.9	3.0	1.9	1.5
C.P.A.	-	96.7	83.3	50.0	80.0	16.7	20.0	28.6	7.1
C.P.V.	89.2	71.0	64.1	61.7	59.8	54.8	47.5	42.0	37.7
B.R.I.	85.9	78.8	80.4	82.2	83.1	84.8	84.5	83.6	82.5
B.R.D.	87.8	85.7	78.2	70.0	64.2	39.1	18.6	10.1	7.3
M.E.I.	90.1	84.7	79.3	73.2	66.8	28.5	9.6	5.1	3.3

Influencia del ruido sobre la clasificación

Tipo de Latido	Seguridad correcta		Seguridad incorrecta	
	Media	Std.	Media	Std.
NOR.	79,53 %	16,90 %	90,05 %	15,23 %
C.P.A.	40,64 %	19,53 %	83,39 %	20,97 %
C.P.V.	97,78 %	6,72 %	93,71 %	11,97 %
B.R.I.	99,83 %	1,25 %	78,26 %	19,88 %
B.R.D.	89,43 %	13,71 %	93,73 %	13,61 %
M.E.I.	87,09 %	7,15 %	86,80 %	8,54 %

Conclusiones



Conclusiones



- Las herramientas propuestas fueron adecuadas, logrando una especificidad del sistema cercana al 97,5 %, con sensibilidades no menores al 90 % para cada una de las arritmias reconocidas.
- Las clasificaciones propuestas por el sistema, son dadas con una seguridad superior al 85 %.
- Es posible establecer un criterio de revisión según la seguridad de las clasificaciones. El principal problema, se daría en los casos de señales muy ruidosas, en el cual se podrían pasar por alto clasificaciones incorrectas.
- El sistema desarrollado es inherentemente pesimista, ya que tiende a clasificar incorrectamente los intervalos RR analizados, como bloqueos de rama izquierda o contracciones ventriculares prematuras.

Mejoras propuestas

- Mejorar la etapa de pre procesamiento de la señal.
- Mejorar la etapa de extracción de características:
 - Tomar solo los primeros niveles de la transformada wavelet.
 - Tomar información solo de una porción del intervalo analizado.
- Agregar la opción de “latido no reconocido” en la red neuronal.
- Modificar el sistema de clasificación: utilizar distintos tipos de redes neuronales, maquinas comité, sistemas de clasificación tales como las máquinas de soporte vectorial, etc.

Futuros desarrollos

Implementar el algoritmo propuesto en un software o sistema de diagnóstico asistido:

- Implementar el algoritmo en otro lenguaje de programación.
- Agregar el reconocimiento de tipo de derivación analizada y el uso de múltiples derivaciones en la clasificación.
- Agregar el reconocimiento de otro tipo de arritmias frecuentes.
- Agregar una etapa de resaltado de segmentos a revisar.
- Agregar funciones: cálculo de ritmo cardíaco instantáneo y promedio, variabilidad de ritmo cardíaco.
- Agregar el reconocimiento de archivos de distinto formato.
- Optimizar el código.
- Crear una GUI amigable con el usuario.

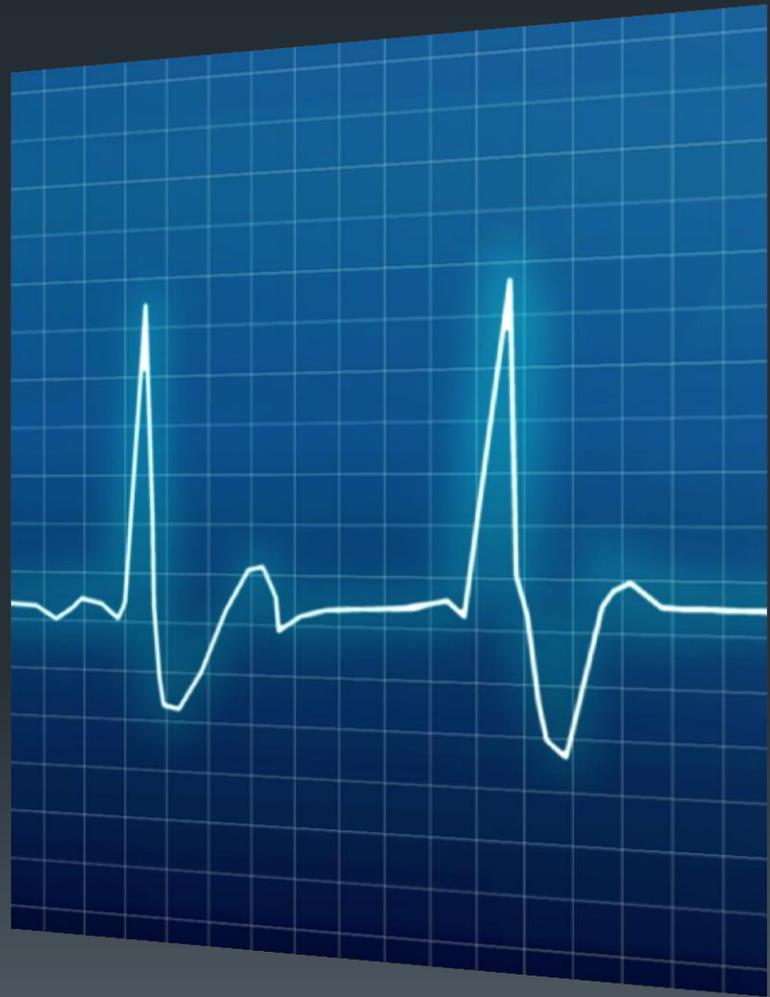
Futuros desarrollos



Implementar el algoritmo en un sistema de diagnóstico en tiempo real:

- Optimizar el código para su uso en un DSP, FPGA, sistema embebido, etc.
- Diseño y construcción del correspondiente circuito electrónico.
- Agregado de funciones propias, necesarias para el sistema desarrollado.

¿Dudas?
¿Consultas?



Muchas
Gracias

