

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRES DE FEBRERO**



## **PROCESAMIENTO DE SEÑALES ANÁLISIS DE SEÑALES ECG**

**DOCENTES: Presso Matías, Wainschenker  
Rubén**

**ALUMNO: Bellesi Nicolás**

**1° cuatrimestre 2024 – Ing. en Computación**

## Contenido

Introducción .....	4
Características de las señales ECG .....	4
Definición y utilidad clínica.....	4
• Evaluar el ritmo cardíaco y detectar arritmias: .....	4
• Diagnosticar trastornos del ritmo cardíaco: .....	4
• Detectar daño cardíaco: .....	4
• Evaluar la eficacia de tratamientos cardíacos:.....	4
• Identificar anomalías estructurales del corazón.....	4
Componentes de la señal ECG .....	4
• Onda P: .....	5
• Complejo QRS: .....	5
• Segmento ST: .....	5
• Onda T:.....	5
Duración del complejo QRS .....	6
Morfología del complejo QRS .....	6
Amplitud del complejo QRS.....	6
Intervalo PR y segmento ST .....	6
Algoritmo de Pan-Tompkins .....	7
Descripción del Algoritmo .....	7
Filtro pasa banda .....	8
Filtro derivativo.....	8
Cuadrado .....	9
Integración en ventana .....	9
Detección de picos R.....	9
Cálculo de los intervalos RR.....	10
Aplicaciones clínicas del algoritmo.....	11
Detección de arritmias .....	11
Detección de taquicardia.....	11
Detección de bradicardia.....	11
ECG fetal vs ECG de adulto .....	12
Características del ECG fetal .....	12
1. Frecuencia cardíaca más alta:.....	12
2. Amplitud más baja:.....	12
3. Interferencia materna:.....	12

4. Ruido y artefactos:.....	12
Diferencias en la aplicación del algoritmo de Pan-Tompkins .....	12
1. Ajuste de filtros:.....	12
2. Detección de picos R: .....	12
3. Eliminación de artefactos .....	12
Mejoras y variantes del algoritmo .....	12
• Ajuste de parámetros: .....	12
• Detección de ondas P y T:.....	13
• Adaptabilidad a la variabilidad del ritmo cardíaco: .....	13
Problemas y limitaciones del algoritmo .....	13
• Variabilidad de complejos QRS:.....	13
• Interferencia de ondas T:.....	13
• Ruido y artefactos:.....	13
Software implementado .....	14
Señal original: .....	14
Filtro pasa banda: .....	14
Filtro derivativo.....	15
Cuadrado de la señal .....	15
Media móvil:.....	16
Cálculo de la frecuencia cardíaca: .....	16
Taquicardia: .....	17
Bradicardia:.....	17
Resultados en un ECG fetal saludable .....	18
Espectrogramas obtenidos para cada caso en función del tiempo .....	18
Conclusiones.....	20
Fuentes .....	20

## Introducción

El electrocardiograma (ECG) es una herramienta esencial en la medicina moderna para evaluar y monitorear la actividad eléctrica del corazón. La correcta interpretación de estas señales permite identificar y diagnosticar diversas condiciones cardíacas, incluidas las arritmias. Este ensayo se centra en la teoría detrás del ECG, el algoritmo de Pan-Tompkins para la detección de complejos QRS, y una explicación matemática del procesamiento de señales implicado en este algoritmo. Además, se analizan los resultados de un programa desarrollado en Python que aplica dicho algoritmo a distintas muestras de señales ECG.

## Características de las señales ECG

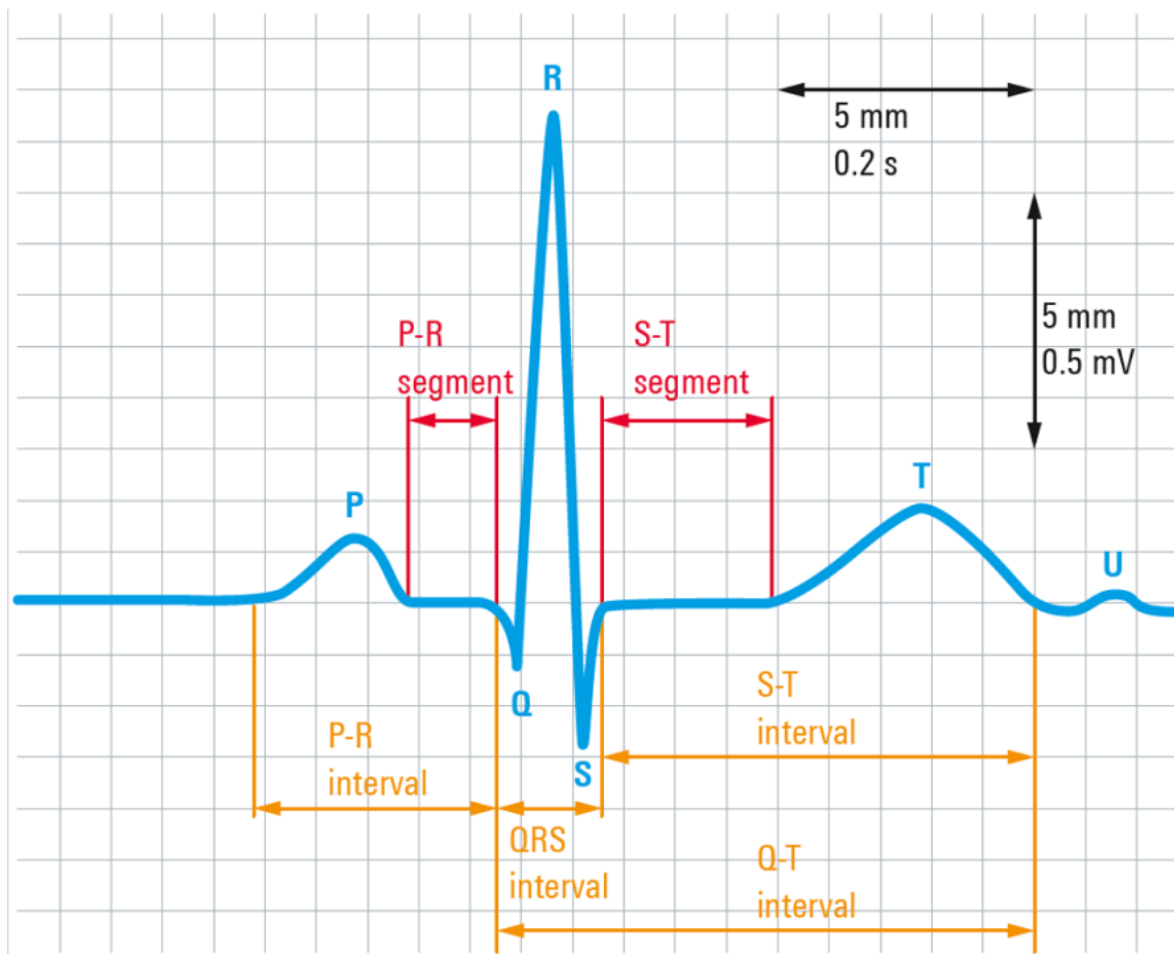
### Definición y utilidad clínica

El ECG es una técnica no invasiva que registra la actividad eléctrica del corazón. Los cambios en el potencial eléctrico del corazón, capturados a través de electrodos colocados en la superficie del cuerpo, proporcionan información crucial sobre su funcionamiento. Las señales de ECG son fundamentales para:

- **Evaluar el ritmo cardíaco y detectar arritmias:** Permite determinar la regularidad del ritmo cardíaco y detectar arritmias, como la fibrilación auricular, taquicardias o bradicardias.
- **Diagnosticar trastornos del ritmo cardíaco:** Proporciona información sobre el tipo y la gravedad de los trastornos del ritmo cardíaco.
- **Detectar daño cardíaco:** Identifica cambios característicos en las ondas y segmentos que pueden indicar daño cardíaco, como un infarto de miocardio.
- **Evaluar la eficacia de tratamientos cardíacos:** Permite evaluar la eficacia de tratamientos como marcapasos y controlar la respuesta del corazón a diferentes terapias.
- **Identificar anomalías estructurales del corazón:** Ayuda a identificar condiciones como hipertrofia ventricular o malformaciones congénitas.

### Componentes de la señal ECG

La señal de ECG tiene una forma de onda característica compuesta por varias partes principales:



- **Onda P:** Representa la despolarización de las aurículas.
- **Complejo QRS:** Representa la despolarización de los ventrículos y es el principal indicador de la actividad cardíaca, donde:
  - Onda Q: Es la primera deflexión negativa antes de la onda R.
  - Onda R: Es la deflexión positiva más prominente del complejo.
  - Onda S: Es la deflexión negativa que sigue a la onda R.
- **Segmento ST:** Representa la fase entre la despolarización y repolarización ventricular.
- **Onda T:** Representa la repolarización de los ventrículos.

Cada una de estas partes tiene una significancia clínica específica y su análisis puede proporcionar información detallada sobre la salud del corazón.

## Duración del complejo QRS

La duración normal del complejo QRS es de 60 a 100 milisegundos. Una duración prolongada puede indicar problemas en la conducción ventricular, como bloqueos de rama o hipertrofia ventricular. Una duración más corta de lo normal puede estar asociada con arritmias rápidas, donde los impulsos eléctricos se propagan más rápidamente a través del corazón.

## Morfología del complejo QRS

La morfología del complejo QRS también proporciona información valiosa. Los cambios en la forma del QRS pueden indicar daño al miocardio, como en el caso de un infarto de miocardio, donde se observan alteraciones específicas en la forma del QRS debido a la muerte del tejido cardíaco.

## Amplitud del complejo QRS

La amplitud del QRS puede variar entre individuos y depende de factores como la masa ventricular y la posición del corazón en el tórax. Una amplitud anormalmente alta puede indicar hipertrofia ventricular, mientras que una amplitud baja puede ser un signo de derrame pericárdico o enfisema pulmonar.

## Intervalo PR y segmento ST

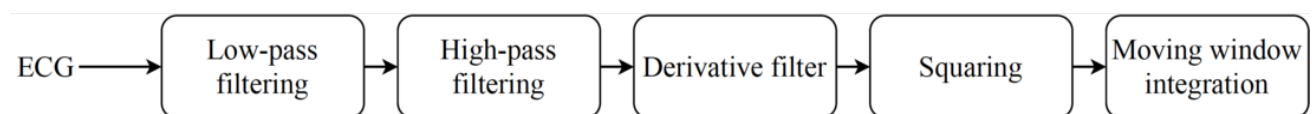
Además del complejo QRS, el intervalo PR y el segmento ST son componentes importantes del ECG. El intervalo PR representa el tiempo de conducción eléctrica desde las aurículas hasta los ventrículos y puede alargarse en casos de bloqueo cardíaco. El segmento ST proporciona información sobre la repolarización ventricular y puede elevarse o deprimirse en presencia de isquemia miocárdica o infarto.

## Algoritmo de Pan-Tompkins

El algoritmo Pan-Tompkins aplica una serie de filtros para resaltar el contenido de frecuencia de esta rápida despolarización cardíaca y elimina el ruido de fondo. Luego, cuadra la señal para amplificar la contribución del QRS, lo que hace que la identificación del complejo QRS sea más sencilla. Finalmente, aplica umbrales adaptativos para detectar los picos de la señal filtrada. El algoritmo fue propuesto por Jiapu Pan y Willis J. Tompkins en 1985, en la revista IEEE Transactions on Biomedical Engineering. El rendimiento del método se probó en una base de datos de arritmias anotada (MIT/BIH) y se evaluó también en presencia de ruido. Pan y Tompkins informaron que el 99,3 por ciento de los complejos QRS se detectaron correctamente.

### Descripción del Algoritmo

El algoritmo consta de varias etapas, cada una de las cuales desempeña un papel crucial en la detección precisa de los complejos QRS:



1. **Filtro pasa banda:** El objetivo es eliminar las frecuencias no deseadas y mejorar la calidad de la señal de ECG. Se utilizan filtros de paso alto y paso bajo para mantener las frecuencias de interés (5-15 Hz).
2. **Filtro derivativo:** Se calcula la derivada de la señal filtrada para resaltar los bordes de los complejos QRS. La derivada puede aproximarse utilizando diferencias finitas.
3. **Cuadrado:** La señal derivada se eleva al cuadrado para amplificar los componentes de alta frecuencia asociados a los complejos QRS.
4. **Integración en ventana:** Se aplica una ventana de integración para suavizar la señal y facilitar la detección de picos R. La integración puede realizarse utilizando una ventana móvil de tamaño N.
5. **Detección de picos R:** Se aplica un umbral adaptativo para identificar los picos R en la señal integrada. Este umbral se ajusta dinámicamente en función de la señal, utilizando técnicas como la media móvil o el percentil.

## Filtro pasa banda

El filtrado pasa banda es una técnica de procesamiento de señales que permite pasar únicamente las componentes de frecuencia dentro de un rango específico y atenúa las componentes de frecuencia fuera de ese rango. Matemáticamente, el filtrado pasa banda se puede representar mediante la convolución de la señal original  $x(t)$  con la respuesta al impulso del filtro pasa banda  $h(t)$ :

$$y(t) = x(t) * h(t)$$

En el dominio de la frecuencia, esto se traduce en una multiplicación simple:

$$Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

donde  $X(f)$  y  $H(f)$  son las transformadas de Fourier de la señal y del filtro, respectivamente. En el contexto del algoritmo de Pan-Tompkins, se utiliza un filtro de paso alto para eliminar las componentes de baja frecuencia (como el ruido de la línea base) y un filtro de paso bajo para eliminar las componentes de alta frecuencia (como el ruido electromagnético).

## Diseño del filtro

El diseño del filtro puede realizarse utilizando técnicas como el diseño de filtros FIR (Finite Impulse Response) o IIR (Infinite Impulse Response). Los coeficientes del filtro se determinan para que el filtro tenga las características de frecuencia deseadas. En la práctica, esto puede implicar el uso de herramientas de diseño de filtros digitales para obtener la respuesta al impulso adecuada.

## Filtro derivativo

La derivada de una señal es una medida de su tasa de cambio. En el contexto del procesamiento de señales, la derivada puede realizarse utilizando diferencias finitas, que es una técnica simple y efectiva para aproximar la derivada de una señal discretizada. La derivada de la señal  $x(t)$  en el punto  $t$  puede aproximarse como:



$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

donde  $\Delta t$  es el intervalo de muestreo. Esta operación resalta los cambios rápidos en la señal, que corresponden a los bordes de los complejos QRS en la señal de ECG.

## Cuadrado

El siguiente paso en el algoritmo de Pan-Tompkins es elevar al cuadrado la señal derivada. Esta operación tiene el efecto de amplificar las componentes de alta frecuencia y hacer que todas las muestras sean no negativas:

$$y(t) = \left( \frac{dx(t)}{dt} \right)^2$$

Al elevar al cuadrado la señal derivada, se realzan las características de interés (los complejos QRS) y se facilita su detección en etapas posteriores del procesamiento.

## Integración en ventana

La integración en ventana es una técnica de suavizado que facilita la detección de picos en la señal. La señal elevada al cuadrado se integra sobre una ventana móvil de tamaño  $N$ , lo que se puede representar matemáticamente como:

$$y_w(t) = \sum_{i=0}^{N-1} y(t - i)$$

Esta operación suaviza la señal y resalta las regiones donde se encuentran los complejos QRS. La elección del tamaño de la ventana  $N$  es crucial y depende de la frecuencia de muestreo de la señal y de la duración típica de los complejos QRS.

## Detección de picos R

La detección de picos R se realiza aplicando un umbral adaptativo a la señal integrada. Este umbral se ajusta dinámicamente en función de las características de la

señal, utilizando técnicas como la media móvil o el percentil. Matemáticamente, la detección de picos R puede formularse como la búsqueda de puntos  $t$  en los que:

$$y_w(t) > \text{umbral}$$

El umbral se puede ajustar de manera que se minimicen los falsos positivos y negativos, garantizando la detección precisa de los picos R.

### Cálculo de los intervalos RR

El intervalo RR es el tiempo entre dos picos R consecutivos en la señal de ECG. Este intervalo es crucial para calcular la frecuencia cardíaca y detectar arritmias. Para calcular los intervalos RR, se siguen los siguientes pasos:

1. **Detección de picos R:** Utilizando el algoritmo de Pan-Tompkins, se identifican los picos R en la señal ECG.
2. **Cálculo de intervalos:** Se calcula la diferencia temporal entre picos R consecutivos. Si  $t_i$  es el tiempo del  $i$ -ésimo pico R y  $t_{i+1}$  es el tiempo del pico R siguiente, el intervalo RR se calcula como:

$$\text{Intervalo RR} = t_{i+1} - t_i$$

3. **Frecuencia cardíaca:** La frecuencia cardíaca se calcula como el inverso del intervalo RR promedio multiplicado por 60 para convertirlo a latidos por minuto (lat./min):

$$\text{Frecuencia Cardíaca} = \frac{60}{\text{Promedio de los Intervalos RR}}$$

### Ejemplo numérico

Supongamos que se detectan los siguientes tiempos de picos R en una señal de ECG:  $t_1 = 0.8$  segundos,  $t_2 = 1.6$  segundos,  $t_3 = 2.4$  segundos. Los intervalos RR serían:

$$\text{Intervalo RR}_1 = t_2 - t_1 = 1.6 - 0.8 = 0.8 \text{ segundos}$$

$$\text{Intervalo RR}_2 = t_3 - t_2 = 2.4 - 1.6 = 0.8 \text{ segundos}$$

El promedio de los intervalos RR es 0.8 segundos, y la frecuencia cardíaca sería:

$$\text{Frecuencia Cardíaca} = \frac{60}{0.8} = 75 \text{ bpm}$$

## Aplicaciones clínicas del algoritmo

### Detección de arritmias

Una de las principales aplicaciones del algoritmo de Pan-Tompkins es la detección de arritmias, que son irregularidades en el ritmo cardíaco. Las arritmias pueden clasificarse en varias categorías, entre las cuales las más comunes son:

- **Taquicardia:** Un ritmo cardíaco más rápido de lo normal, que puede ser fisiológico (como en el caso del ejercicio) o patológico.
- **Bradicardia:** Un ritmo cardíaco más lento de lo normal, que puede deberse a condiciones como el bloqueo cardíaco.

### Detección de taquicardia

La taquicardia se caracteriza por una frecuencia cardíaca elevada, generalmente superior a 100 latidos por minuto en adultos. La detección de taquicardia mediante el algoritmo de Pan-Tompkins implica el cálculo de la frecuencia cardíaca a partir de los intervalos RR. Si la frecuencia calculada excede el umbral predefinido, se diagnostica taquicardia.

Si la frecuencia cardíaca supera los 100 latidos por minuto, se puede diagnosticar taquicardia.

### Detección de bradicardia

La bradicardia se caracteriza por una frecuencia cardíaca baja, generalmente inferior a 60 latidos por minuto en adultos. Similar a la detección de taquicardia, la bradicardia se diagnostica calculando la frecuencia cardíaca a partir de los intervalos RR y comparándola con un umbral predefinido.

Si la frecuencia cardíaca es menor de 60 latidos por minuto, se puede diagnosticar bradicardia.

## ECG fetal vs ECG de adulto

El ECG fetal presenta desafíos únicos en comparación con el ECG de un adulto debido a varias diferencias fisiológicas y técnicas.

### Características del ECG fetal

1. **Frecuencia cardíaca más alta:** La frecuencia cardíaca fetal es significativamente más alta que la de un adulto, generalmente entre 120 y 160 latidos por minuto.
2. **Amplitud más baja:** La señal ECG fetal tiene una amplitud más baja debido a la inmadurez del corazón fetal y la mayor distancia entre el corazón fetal y los electrodos de la madre.
3. **Interferencia materna:** La señal ECG fetal está contaminada por la señal ECG materna, lo que hace más difícil la separación y análisis de la señal fetal.
4. **Ruido y artefactos:** La presencia de ruido y artefactos, como el movimiento fetal y los cambios en la posición de la madre, complican aún más el análisis del ECG fetal.

### Diferencias en la aplicación del algoritmo de Pan-Tompkins

El algoritmo de Pan-Tompkins puede adaptarse para el análisis del ECG fetal con algunas modificaciones:

1. **Ajuste de filtros:** Los filtros de paso alto y paso bajo deben ajustarse para adaptarse a las características de frecuencia más altas de la señal ECG fetal.
2. **Detección de picos R:** La detección de picos R debe ser más sensible para capturar la frecuencia cardíaca más alta del feto.
3. **Eliminación de artefactos:** Se deben implementar técnicas adicionales para eliminar el ruido y los artefactos específicos del entorno fetal.

## Mejoras y variantes del algoritmo

A lo largo del tiempo, se han propuesto diversas mejoras y variantes del algoritmo de Pan-Tompkins para adaptarse a diferentes contextos clínicos y abordar desafíos específicos:

- **Ajuste de parámetros:** Ajuste de umbrales de detección y filtros según las características de la señal.

- **Detección de ondas P y T:** Incorporación de la detección de ondas P y T para una evaluación más completa del ECG.
- **Adaptabilidad a la variabilidad del ritmo cardíaco:** Ajuste dinámico de los umbrales y parámetros de detección para manejar variaciones en el ritmo cardíaco.

## Problemas y limitaciones del algoritmo

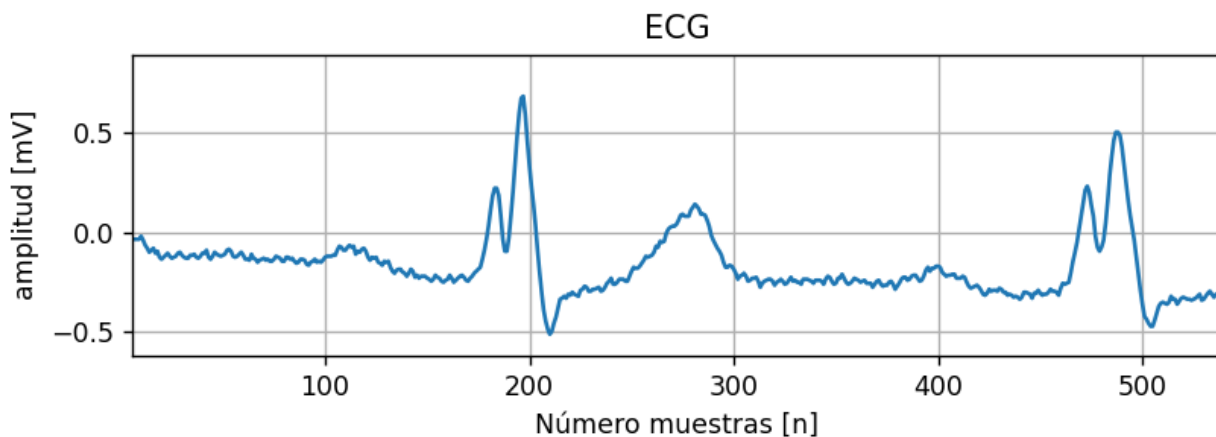
A pesar de su eficacia, el algoritmo de Pan-Tompkins presenta ciertas limitaciones:

- **Variabilidad de complejos QRS:** La banda de frecuencia del complejo QRS puede variar entre sujetos e incluso entre latidos del mismo sujeto, lo que puede afectar la precisión de la detección.
- **Interferencia de ondas T:** La discriminación entre las ondas T y R puede ser problemática, especialmente cuando las ondas T tienen amplitudes similares a los complejos QRS.
- **Ruido y artefactos:** La presencia de ruido y artefactos en la señal ECG puede dificultar la detección precisa de los picos R.

## Software implementado

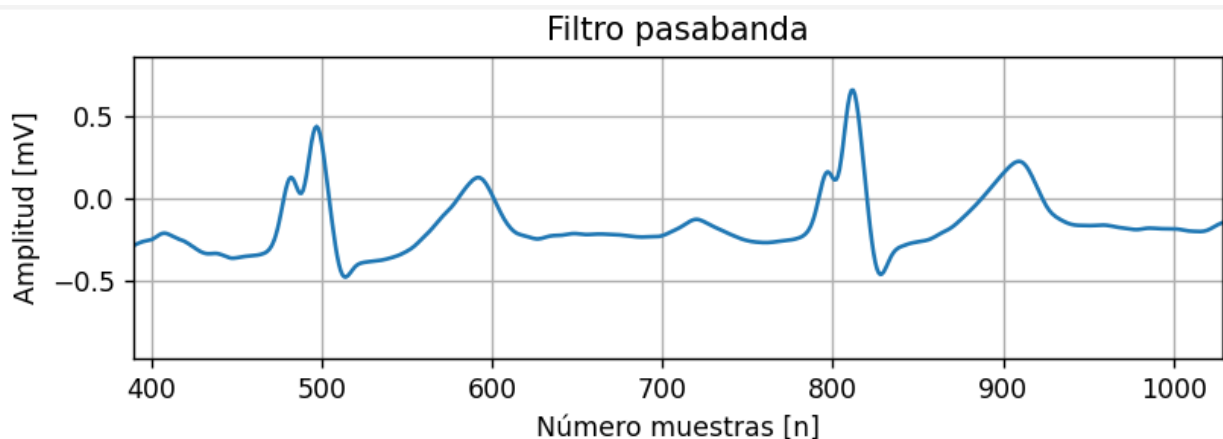
Se realizó un desarrollo en Python 3.12 para analizar diferentes muestras de ECG tomadas de PhysioNet, y mediante la aplicación del algoritmo mencionado, determinar y graficar la señal que emiten tanto un corazón saludable adulto, como uno con arritmia taquicardia o bradicardia, y un corazón fetal.

Señal original:



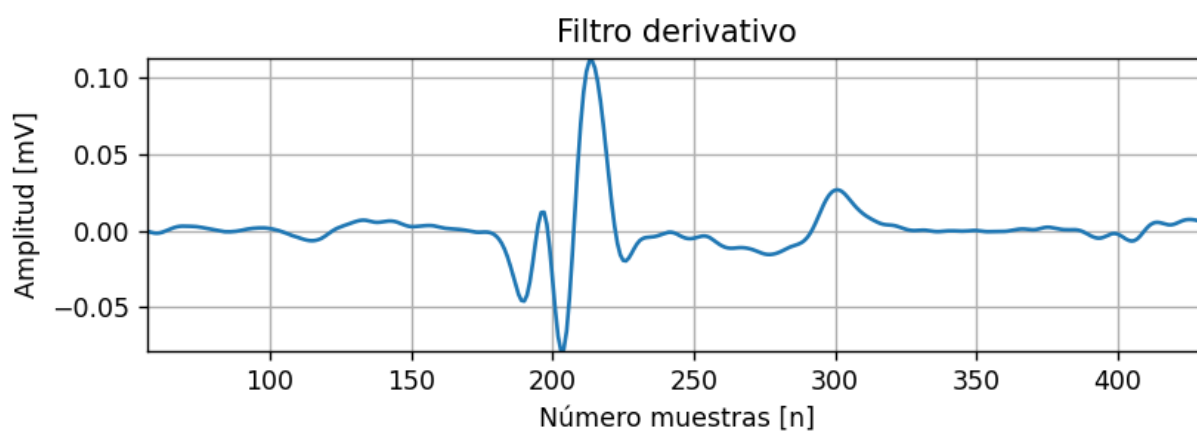
Como se puede observar, esta señal posee componentes de alta frecuencia alrededor de los complejos QRS, a continuación, se mostrará como cada fase del algoritmo permite un mejor análisis de la condición del corazón.

Filtro pasa banda:



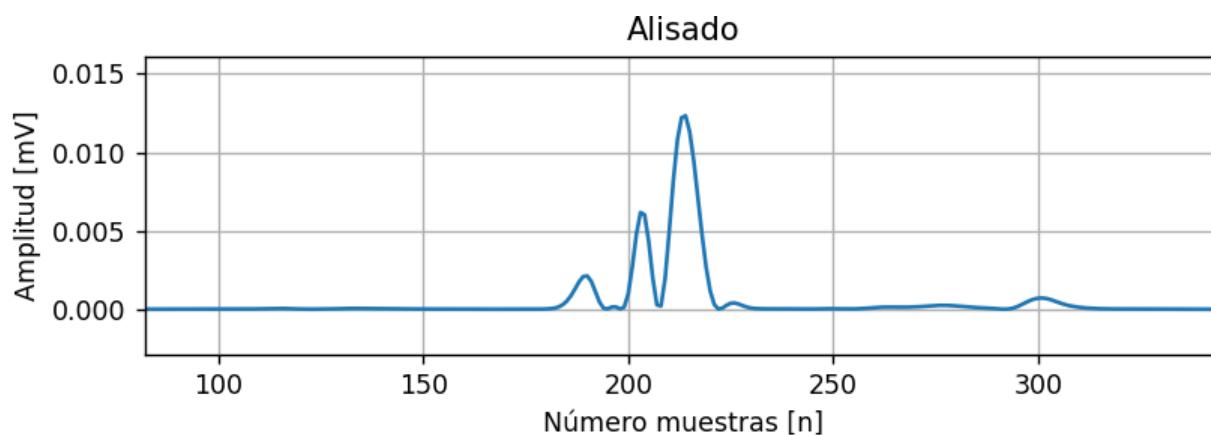
El objetivo del filtro de paso banda es eliminar el ruido de baja y alta frecuencia en la señal ECG, manteniendo las frecuencias de interés que corresponden a los complejos QRS. Al aplicarlo, se puede observar como la señal ya no tiene dichas componentes de alta frecuencia.

## Filtro derivativo



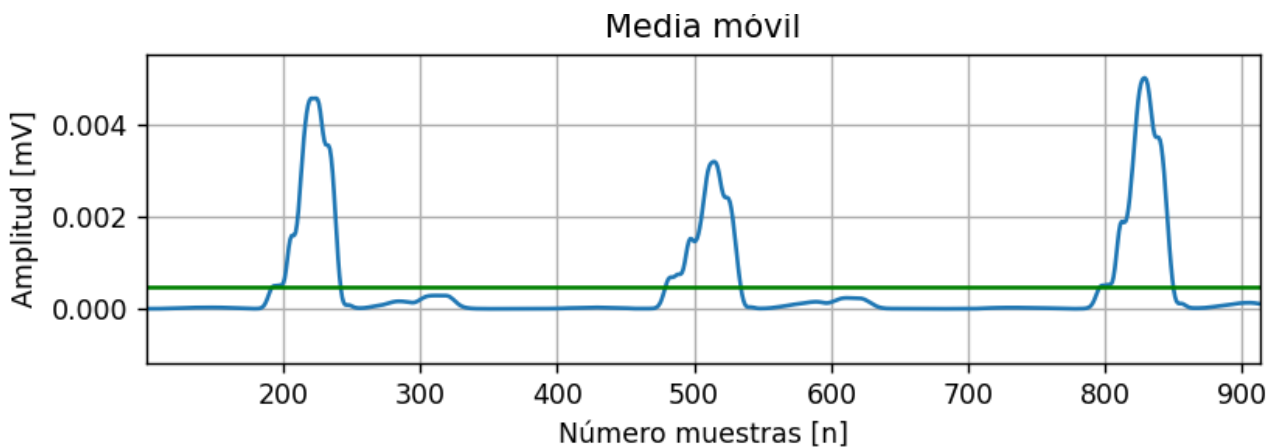
Al aplicar esta técnica, se resaltan las pendientes pronunciadas en la señal ECG, que corresponden a los complejos QRS, ayudando a distinguirlos de otras características de la señal.

## Cuadrado de la señal



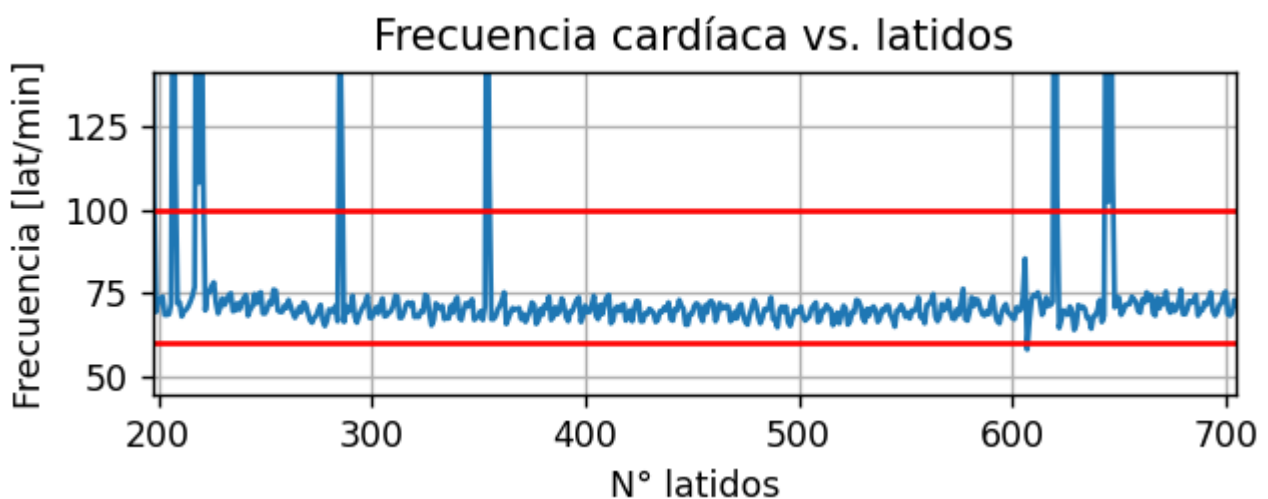
La etapa de cuadratura eleva al cuadrado cada muestra de la señal derivada, lo que amplifica las partes positivas y suprime las negativas, facilitando la detección de los picos QRS.

Media móvil:



La aplicación de la media móvil se utiliza para suavizar la señal derivada y cuadrada, facilitando así la detección de los picos QRS. Durante la detección de picos, se utiliza una línea verde en los gráficos para representar el umbral dinámico calculado a partir de la media móvil. Este umbral se utiliza para identificar los intervalos donde la señal supera el umbral, indicando la presencia de picos QRS.

Cálculo de la frecuencia cardíaca:



Luego del paso anterior, es posible calcular los picos QRS, es decir, cada latido del corazón. Con estos datos, se obtiene en primer lugar el intervalo RR, que representa el tiempo entre dos picos, y luego la frecuencia cardíaca (latidos/min) con la fórmula

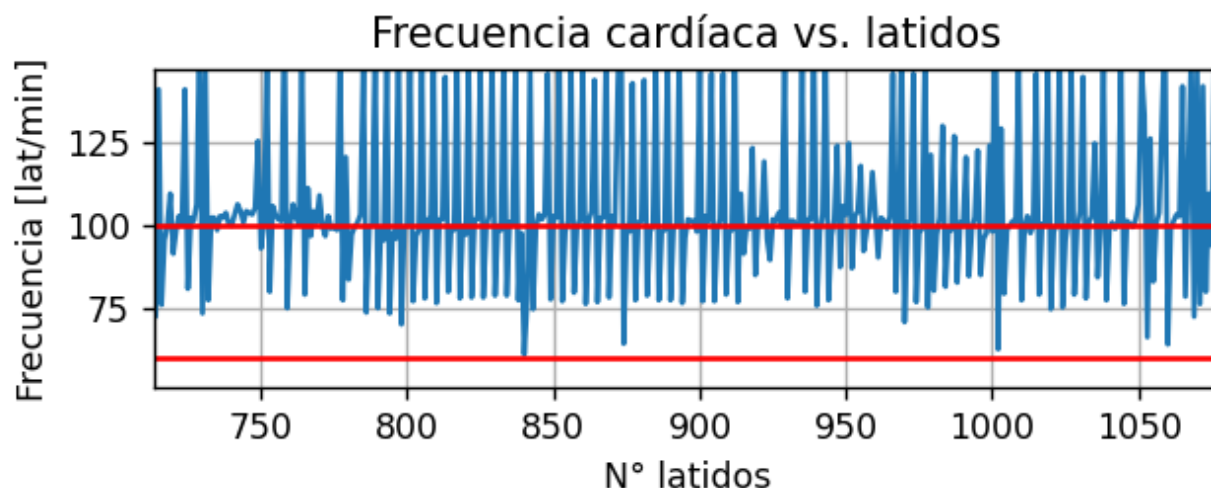
$$\text{Frecuencia Cardíaca (HR)} = \frac{60}{\text{Intervalo RR en segundos}}$$



Para un corazón saludable, la frecuencia normal es entre 60 y 100 latidos por minuto, esta región se encuentra marcada en color rojo.

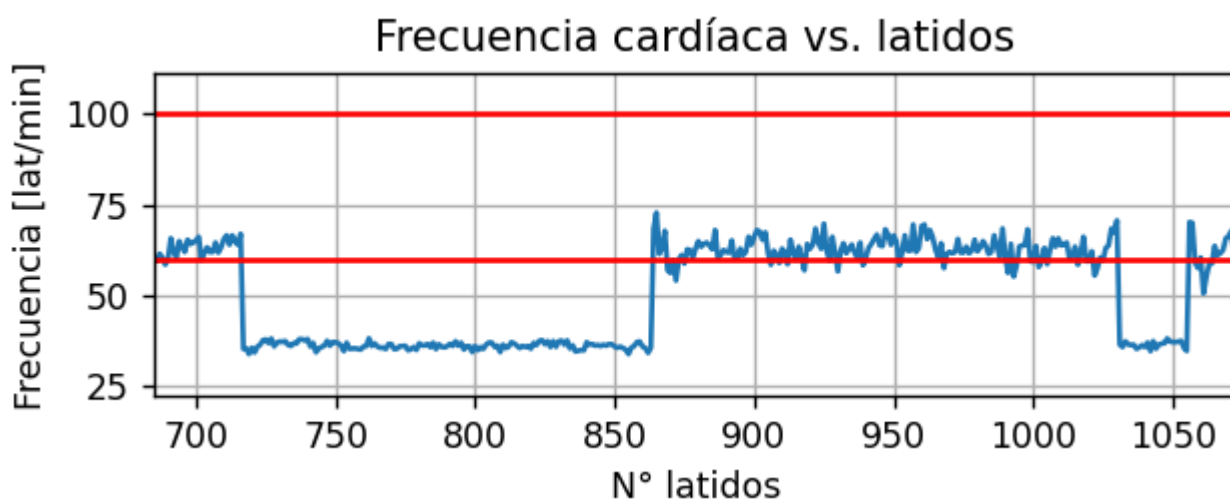
Ahora, se analizarán los resultados de ECG en pacientes no saludables.

Taquicardia:



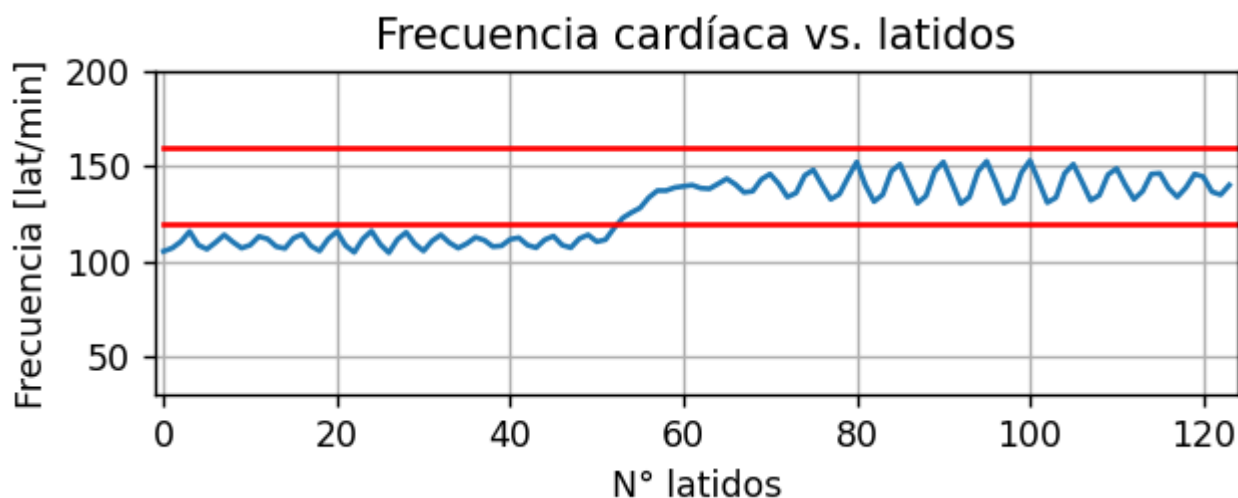
En este caso, la frecuencia media es de 107, lo cual corresponde a una taquicardia, es decir una frecuencia cardíaca superior al rango normal.

Bradicardia:



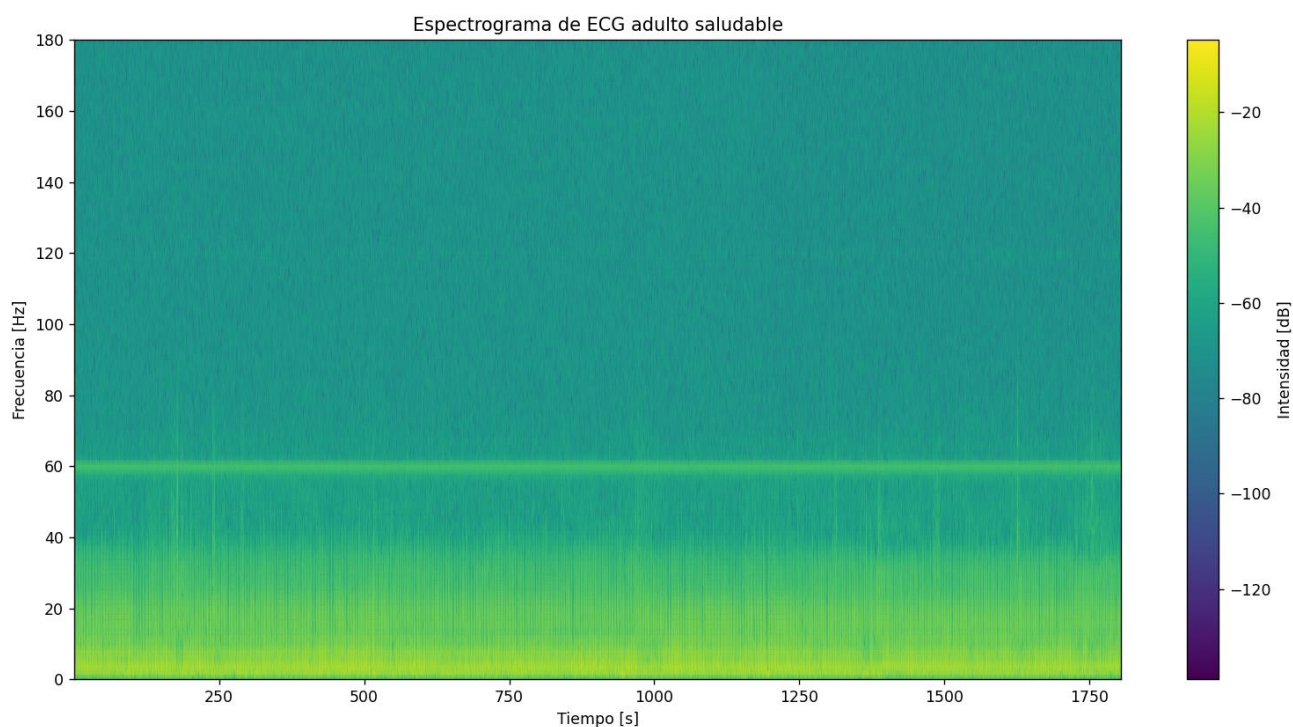
Por otro lado, cuando se tiene una frecuencia menor a 60 latidos por minuto, como en este caso, que se calcularon 57 lat./min, el paciente tiene arritmia bradicardia.

## Resultados en un ECG fetal saludable

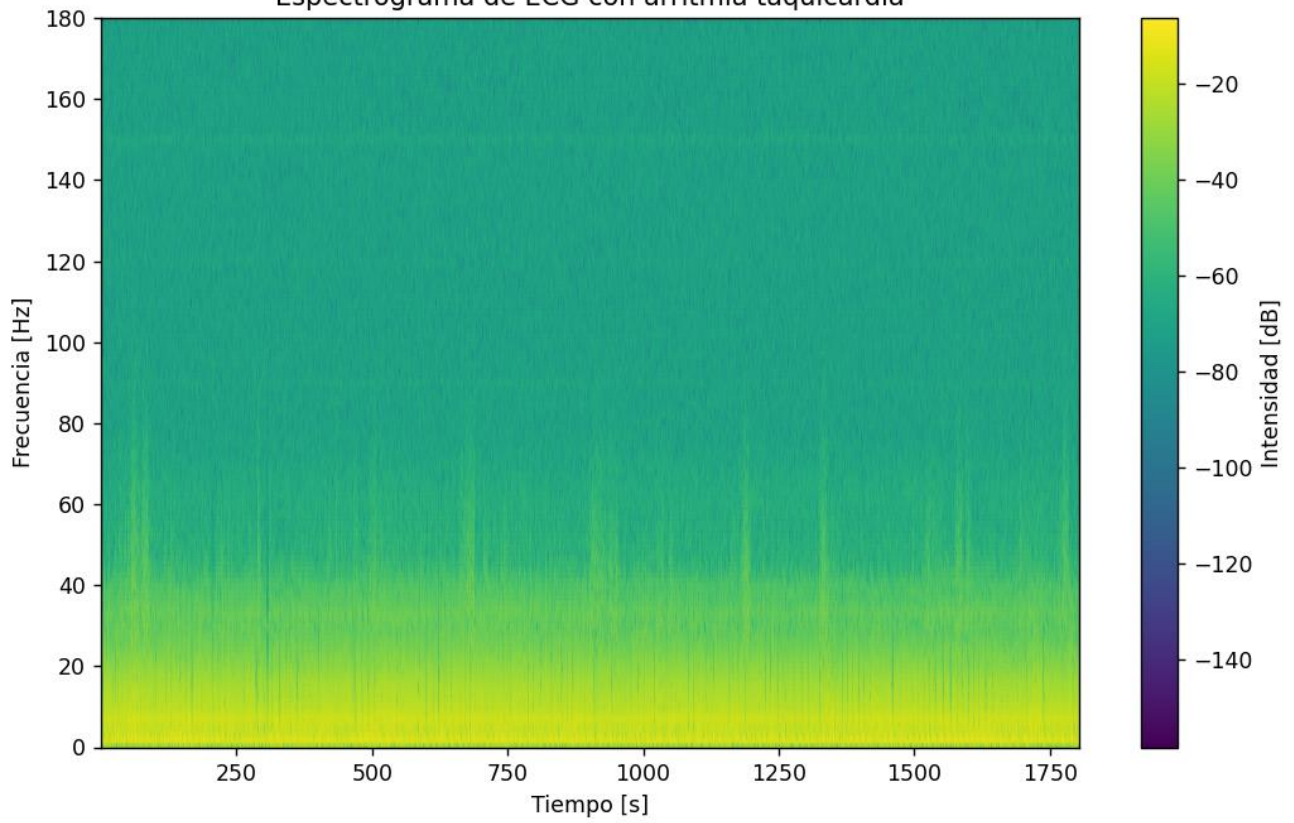


Finalmente se analizaron resultados en un ECG fetal, donde la frecuencia saludable es notablemente más alta que la de un adulto, entre 120 y 160 lat./min, y la amplitud es más baja, debido a la ubicación de los electrodos que se le colocan a la madre.

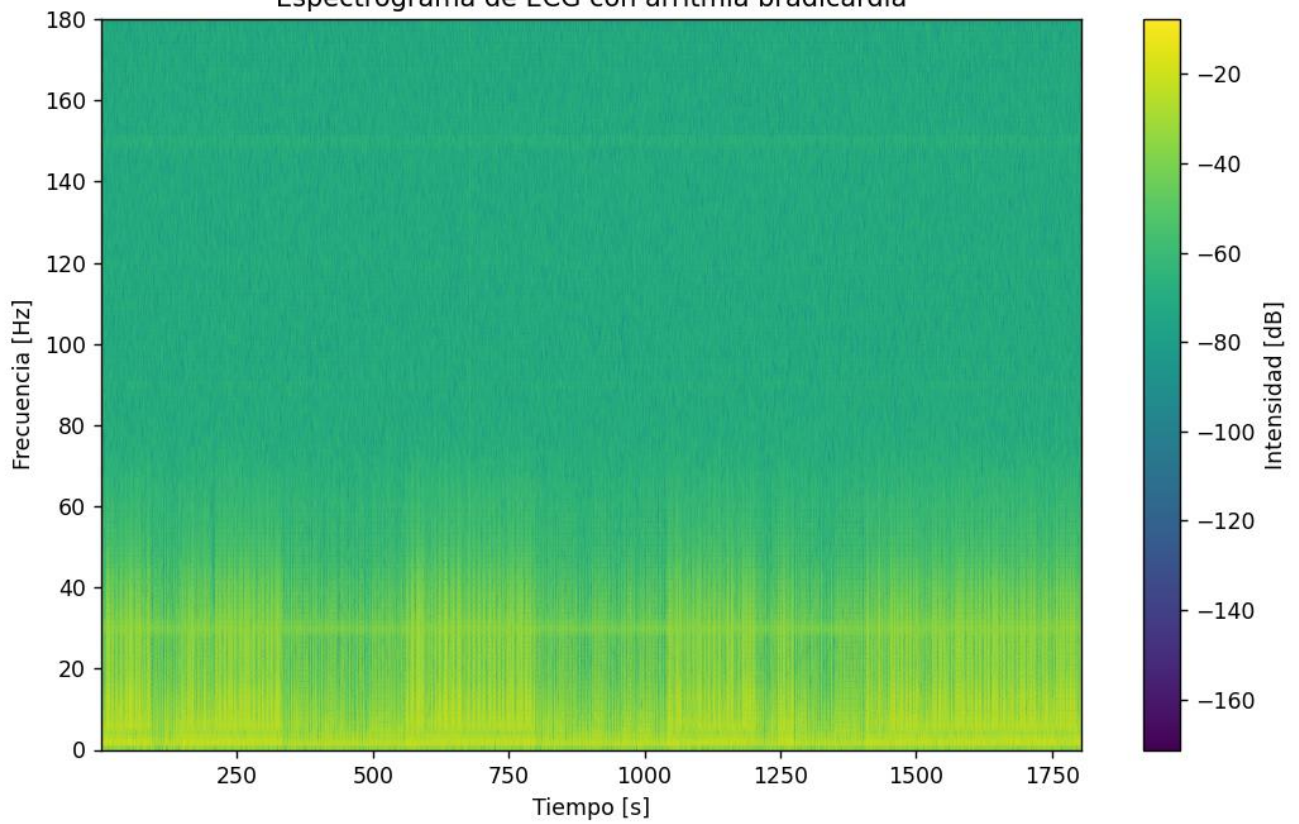
## Espectrogramas obtenidos para cada caso en función del tiempo

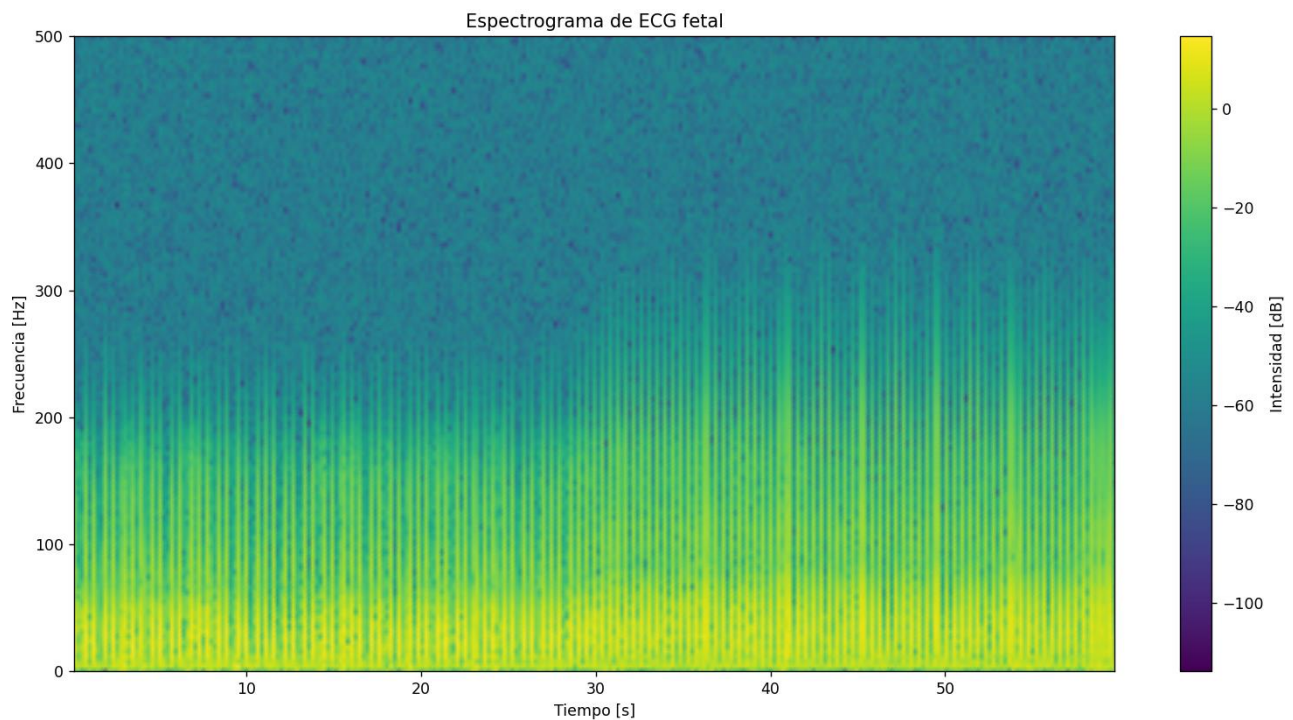


Espectrograma de ECG con arritmia taquicardia



Espectrograma de ECG con arritmia bradicardia





## Conclusiones

El algoritmo de Pan-Tompkins ha demostrado ser una herramienta robusta y eficiente para la detección de complejos QRS en señales de ECG. Su implementación, basada en una serie de filtros y transformaciones matemáticas, permite superar muchos de los desafíos asociados con el procesamiento de señales biomédicas.

La digitalización y el análisis automatizado de señales de ECG representan un avance significativo en el diagnóstico y monitoreo de enfermedades cardíacas, contribuyendo de manera significativa a la salud y el bienestar de los pacientes.

## Fuentes

1. Pan, J., & Tompkins, W. J. (1985). A real-time QRS detection algorithm. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, (3), 230-236.
2. PhysioNet. (n.d.). Retrieved from <https://physionet.org/>
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pan%E2%80%93Tompkins\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Pan%E2%80%93Tompkins_algorithm)
4. [https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/captura-de-se-ales-de-electrocardiogramas-peque-as-en-aplicaciones-m-dicas-ficha-de-aplicacion\\_56279-152385.html#media-gallery-5](https://www.rohde-schwarz.com/es/aplicaciones/captura-de-se-ales-de-electrocardiogramas-peque-as-en-aplicaciones-m-dicas-ficha-de-aplicacion_56279-152385.html#media-gallery-5)