

# SEÑALES BIOLÓGICAS

Línea de Telemedicina  
Universidad Nacional de Colombia

## 1. Introducción

### ¿Qué es una señal?

Una señal es una secuencia de estados dentro de un sistema que puede representarse mediante un modelo matemático y que expresa su comportamiento, o bien, el comportamiento de la información que dentro de éste circula.

Son magnitudes físicas observables y medibles que permiten representar información y se propagan por un medio de transmisión; puede ser también la variación de una corriente eléctrica u otra magnitud física que se utiliza para transmitir información.

## 2. Clasificación de las señales

Existen varias formas de clasificar las señales. De acuerdo a su tipo, las señales se clasifican en las siguientes categorías:

- **Naturales:** Temperatura, presión, movimientos cardiacos.
- **Mecánicas:** Sonido, olas.
- **Eléctricas:** Voltaje, corriente.

Por otra parte, las señales se clasifican de forma general en:

- **Señales determinísticas:** Son aquellas que se modelan mediante una función que representa su comportamiento; se dice que son determinísticas porque tienen comportamiento predecible y se conocen sus variables y la forma en que se correlacionan. Además, una señal determinística es una señal en la cual cada valor está fijo y puede ser determinado por una expresión matemática, regla, o tabla. Los valores futuros de esta señal pueden ser calculados usando sus valores anteriores teniendo una confianza completa en los resultados.
- **Las señales no determinísticas,** por el contrario, se caracterizan por tener un comportamiento aleatorio. Por tanto, los valores futuros de una señal aleatoria no se pueden predecir con exactitud, solo se pueden basar en los promedios de conjuntos de señales con características similares.

A continuación se muestra una señal determinística y una señal no determinística:

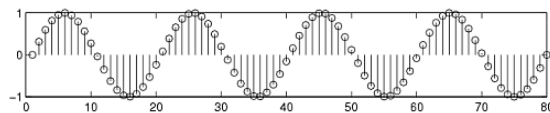


Figura 1: Señal determinística.

- **Señales periódicas:** Su comportamiento se repite continuamente y satisface las características de un modelo ondulatorio, dado por la fórmula general:  $f(t) = f(t + T)$

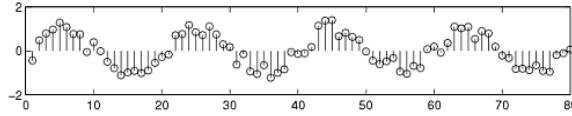


Figura 2: Señal No determinística.

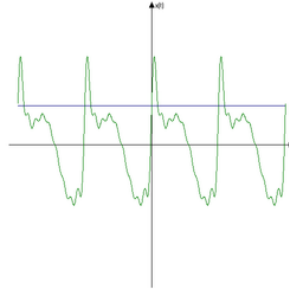


Figura 3: Señal Periódica.

Es decir, para todos los valores de  $t$ . La constante mínima  $T$  que satisfice la relación, se llama el período de la función. Mediante la repetición de  $f(t) = f(t + T)$ , se obtiene:

$$f(t) = f(t + nT), n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

**Ejemplo 1:** Encontrar el periodo de la función

$$f(t) = \cos \frac{t}{3} + \cos \frac{t}{4}$$

Si la función  $f(t)$  es periódica con un periodo  $T$ , entonces, de  $f(t) = f(t + T)$  se tiene:

$$\cos \frac{1}{3}(t + T) + \cos \frac{1}{4}(t + T) = \cos \frac{t}{3} + \cos \frac{t}{4}$$

puesto que

$$\cos(\theta + 2m\pi) = \cos(\theta)$$

para cualquier entero  $m$  se tiene que

$$\frac{1}{3}T = 2m, \frac{1}{4}T = 2n\pi$$

donde  $m$  y  $n$  son enteros.

Por consiguiente  $T = 6m\pi$ ; cuando  $m = 4$  y  $n = 3$ , se obtiene el mínimo valor de  $T$ . (esto se puede ver mediante el procedimiento de ensayo y error). De donde,  $T = 24\pi$ . En general, si la función

$$f(t) = \cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t$$

es periódica con período  $T$ , entonces es posible encontrar dos enteros  $m$  y  $n$  tales que  $\omega_1 T = 2nm$  y  $\omega_2 T = 2nm$ , entonces se tiene  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{m}{n}$ . Es decir es decir, la relación  $\frac{\omega_1}{\omega_2}$  debe ser un número racional.

**Ejemplo 2:** Decir si la función:

$$f(t) = \cos 10t + \cos(10 + \pi)t$$

es una función periódica.

Aquí  $\omega_1 = 10$  y  $\omega_2 = 10 + \pi$ . Puesto que  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{10}{10 + \pi}$ . Es decir, no es un número racional, por tanto, es imposible encontrar un valor  $T$  que satisfaga  $f(t) = f(t + T)$ . Por consiguiente,  $f(t)$  no es una función periódica.

En la siguiente función se muestra un ejemplo de señal No periódica:

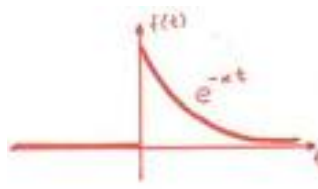


Figura 4: Señal No periódica.

- **Señales analógicas:** Son aquellas cuya función es continua en un intervalo  $[a,b]$ , y puede tomar infinito número de valores dentro del mismo. En la naturaleza, el conjunto de señales que percibimos son analógicas, así la luz, el sonido, la energía etc, son señales que tienen una variación continua. Incluso la descomposición de la luz en el arcoiris vemos como se realiza de una forma suave y continúa.

Una onda senoidal es una señal analógica de una sola frecuencia. Los voltajes de la voz y del video son señales analógicas que varían de acuerdo con el sonido o variaciones de la luz que corresponden a la información que se está transmitiendo.

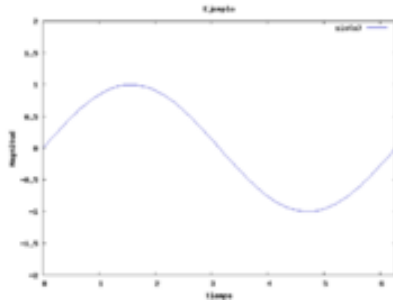


Figura 5: Señal Análoga.

### *Señal eléctrica analógica*

Señal eléctrica analógica es aquella en la que los valores de la tensión o voltaje varían constantemente en forma de corriente alterna, incrementando su valor con signo eléctrico positivo (+) durante medio ciclo y disminuyéndolo a continuación con signo eléctrico negativo (-) en el medio ciclo siguiente.

El cambio constante de polaridad de positivo a negativo provoca que se cree un trazado en forma de onda senoidal.

### *Desventajas en términos electrónicos:*

Las señales de cualquier circuito o comunicación electrónica son susceptibles de ser modificadas de forma no deseada de diversas maneras mediante el ruido, lo que ocurre siempre en mayor o menor medida. Para solucionar esto la señal suele ser acondicionada antes de ser procesada.

La gran desventaja respecto a las señales digitales es que en las señales analógicas cualquier variación en la información es de difícil recuperación, y esta pérdida afecta en gran medida al correcto funcionamiento y rendimiento del dispositivo analógico. Un sistema de control (ya pueda ser un ordenador, etc.) no tiene capacidad alguna para trabajar con señales analógicas, de modo que necesita convertirlas en señales digitales para poder trabajar con ellas. Por tal razón, se necesita trabajar con un conversor análogo-digital.

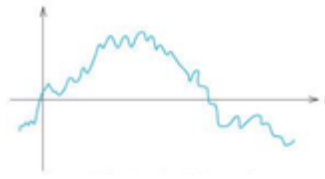


Figura 6: Señal de Ruido.

- **Señales digitales:** Son aquellas que están definidas en un período determinado y que puede tomar un número de valores finitos discretos en él.

La señal digital es un tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético en que cada signo que codifica el contenido de la misma puede ser analizado en término de algunas magnitudes que representan valores discretos, en lugar de valores dentro de un cierto rango. Por ejemplo, el interruptor de la luz sólo puede tomar dos valores o estados: abierto o cerrado, o la misma lámpara: encendida o apagada.

Los sistemas digitales, como por ejemplo el ordenador, usan lógica de dos estados representados por dos niveles de tensión eléctrica, uno alto, H y otro bajo, L (de High y Low, respectivamente, en inglés). Por abstracción, dichos estados se sustituyen por ceros y unos, lo que facilita la aplicación de la lógica y la aritmética binaria. Si el nivel alto se representa por 1 y el bajo por 0, se habla de lógica positiva y en caso contrario de lógica negativa.

Cabe mencionar que, además de los niveles, en una señal digital están las transiciones de alto a bajo y de bajo a alto, denominadas flanco de subida y de bajada, respectivamente. En la siguiente figura se muestra una señal digital donde se identifican los niveles (bajo=1 y alto=2) y los flancos (3 y 4).

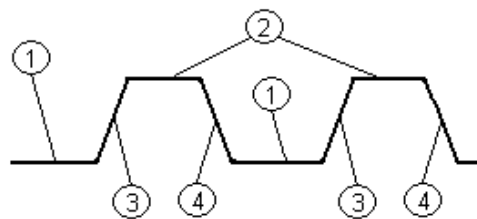


Figura 7: Señal Digital.

#### ***Ventajas de las señales digitales:***

1. Ante la atenuación, puede ser amplificada y reconstruida al mismo tiempo, gracias a los sistemas de regeneración de señales.
2. Cuenta con sistemas de detección y corrección de errores, en la recepción.
3. Facilidad para el procesamiento de la señal. Cualquier operación es fácilmente realizable a través de cualquier software de edición o procesamiento de señal.
4. Permite la generación infinita sin pérdidas de calidad. Esta ventaja sólo es aplicable a los formatos de disco óptico; la cinta magnética digital, aunque en menor medida que la analógica (que sólo soporta como mucho 4 o 5 generaciones), también va perdiendo información con la multigeneración.
5. Las señales digitales se ven menos afectadas a causa del ruido ambiental en comparación con las señales analógicas.

### Inconvenientes de las señales digitales

1. Necesita una conversión analógica-digital previa y una decodificación posterior en el momento de la recepción.
2. Requiere una sincronización precisa entre los tiempos del reloj del transmisor con respecto a los del receptor.
3. La señal digital requiere mayor ancho de banda que la señal analógica para ser transmitida.
4. En la transformación de una señal analógica a una digital siempre existirá un margen de error ya que una señal analógica continua tiene valores infinitos, y una señal digital actualmente su número de valores es finito.

### 3. Parámetros de una señal

- **Amplitud (A):** Es el valor que toma la señal en cada instante de tiempo. Se le conoce también como voltaje pico.
- **Frecuencia (f):** Es la cantidad de ciclos o períodos de la señal durante una unidad de tiempo (generalmente segundos). La unidad de medida es el Hertz (Hz).
- **Velocidad angular ( $\omega$ ):** Equivale a  $2f\pi$ .
- **Período (T):** Es la cantidad de tiempo que transcurre mientras la señal cumple un ciclo o período completo. Es equivalente al inverso multiplicativo de la frecuencia, es decir,  $\frac{1}{f}$ .
- **Ángulo de Fase:** Es una constante (en radianes) que mide el desfase de una señal con respecto al origen.

En la siguiente gráfica se muestran los parámetros de una señal:

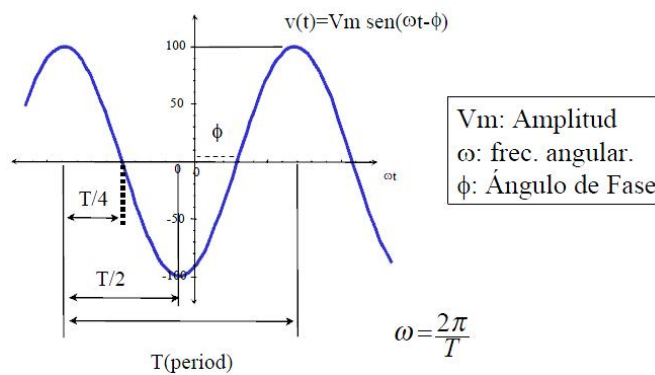


Figura 8: Parámetros de una señal.

### 4. Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier se encarga de transformar una señal del dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia, de donde se puede realizar su antitransformada y volver al dominio temporal.

Un ejemplo de representación en frecuencia, puede ser el ecualizador de un equipo de música: las barras que suben y bajan indican las diferentes componentes frecuenciales de la señal sonora que se pueden escuchar. Esto lo hace un circuito integrado que realiza la transformada de Fourier de la forma más rápida posible.

El trabajo con la señal en frecuencia no solo sirve como información sino que se puede modificar, de forma que es ampliamente utilizada en filtros, procesamiento de imágenes y sonido, comunicaciones (modulaciones, líneas de transmisión, etc) y otro tipo de aplicaciones más curiosas: estadística, detección de fluctuaciones en los precios, análisis sismográfico, etc.

## 5. Modulación

El proceso de modulación implica una forma de adaptación de la señal al medio de transmisión por el cual va a propagarse. Normalmente implica la alteración de su banda de frecuencias para transmitir la señal en una gama de frecuencias más adecuada.

La necesidad de modular viene dada por la imposibilidad de la propagación de la señal en su banda de frecuencias *base*, o en superar las dificultades que representa esta propagación. En general, se pretenden conseguir estos objetivos en el proceso de modulación:

- **Posibilidad de multiplexión:** es decir, enviar varios canales de información de una manera conjunta por el mismo medio de transmisión.
- **Facilitar la propagación de la señal por ese medio de transmisión adaptándola a él:** El ejemplo típico es la radiación de señales por ondas de radio. Exige utilizar antenas de longitud aproximada  $\lambda/2$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal. Para señales de voz limitadas a 4 KHz, la longitud de antena a utilizar sería de unos 75Km, totalmente desproporcionada. Entonces, para emitir señales de radio es necesario una modulación previa para convertir la señal a frecuencias fácilmente radiables.
- **Reducción del ruido e interferencia:** Empleando el método de modulación adecuado se puede reducir el ruido e interferencias que sufre la señal durante su transmisión, con relación a la transmisión banda base.
- **Superar limitaciones de equipos:** Los equipos electrónicos utilizados en los sistemas de telecomunicación pudieran tener unas frecuencias de utilización óptimas, que deberán usarse para mejorar la calidad de la transmisión.

En todo proceso de modulación existen una serie de señales propias del proceso de modulación. Se llama moduladora a la señal que contiene toda la información que se quiere enviar al receptor.

Existe también una señal encargada de *trasladar* al otro extremo de la comunicación esa información que contiene la moduladora. Esta señal que se encarga de llevar la información de la moduladora se denomina portadora. El resultado del proceso será una señal llamada modulada.

En general, la modulación va a consistir en la alteración sistemática de algún parámetro de la señal portadora a cargo de la señal moduladora, que es la que originalmente contiene la información.

El objetivo de modular una señal, es tener un control sobre la misma. El control se hará sobre ciertos elementos característicos de una oscilación continua; estos son modificados según la forma de onda de la señal que se desea transmitir.

El parámetro a modificar de la portadora puede ser la amplitud, la frecuencia, la fase, la posición o la duración del pulso. Según sea la naturaleza de la señal modulada, así se denominará el tipo de modulación.

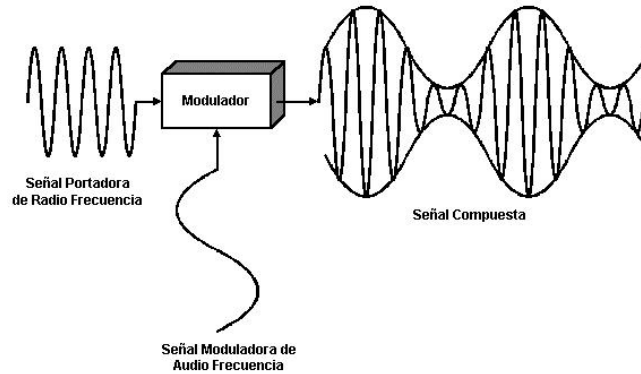


Figura 9: Modulación de una señal.

## 5.1. Modulación por onda corta

### Modulación por amplitud (AM)

Es el proceso de cambiar la amplitud de una portadora de frecuencia relativamente alta de acuerdo con la amplitud de la señal modulante (información). Las frecuencias que son lo suficientemente altas para radiarse de manera eficiente por una antena y propagarse por el espacio libre se llaman comúnmente radiofrecuencias (RF).

Con la modulación de amplitud, la información se imprime sobre la portadora en la forma de cambios de amplitud. La modulación de amplitud es una forma de modulación relativamente barata y de baja calidad de transmisión, que se utiliza en la radiodifusión de señales de audio y vídeo.

La banda de radiodifusión comercial AM abarca desde 535 a 1605 kHz. La radiodifusión comercial de televisión se divide en tres bandas (dos de VHF y una de UHF). Los canales de la banda baja de VHF son entre 2 y 6 (54 a 88 MHz), los canales de banda alta de VHF son entre 7 y 13 (174 a 216 MHz) y los canales de UHF son entre 14 a 83 (470 a 890 MHz).

La modulación de amplitud también se usa para las comunicaciones de radio móvil de dos sentidos tal como una radio de banda civil (CB) (26.965 a 27.405 MHz) o los aviones con los aeropuertos (118 a 136 Mhz).

Un modulador de AM es un aparato no lineal con dos señales de entrada: una señal portadora de amplitud constante y de frecuencia única y la señal de información.

La información *actúa sobre o modula* la portadora y puede ser una forma de onda de frecuencia simple o compleja compuesta de muchas frecuencias que fueron originadas de una o más fuentes. Debido a que la información actúa sobre la portadora, se le llama señal modulante. La resultante se llama onda modulada o señal modulada.

### Modulación por Frecuencia (FM)

El proceso de modulación implica una forma de adaptación de la señal al medio de transmisión por el cual va a propagarse. Normalmente implica la alteración de su banda de frecuencias para transmitir la señal en una gama de frecuencias más adecuada.

La necesidad de modular viene dada por la imposibilidad de la propagación de la señal en su banda de frecuencias *base*, o en superar las dificultades que representa esta propagación. En general, se pretenden conseguir estos objetivos en el proceso de modulación: Este es un caso de modulación donde tanto las señales de transmisión como las señales de datos son analógicas y es un tipo de modulación exponencial.

En este caso la señal modulada mantendrá fija su amplitud y el parámetro de la señal portadora que variará es la frecuencia, y lo hace de acuerdo a como varíe la amplitud de la señal moduladora.

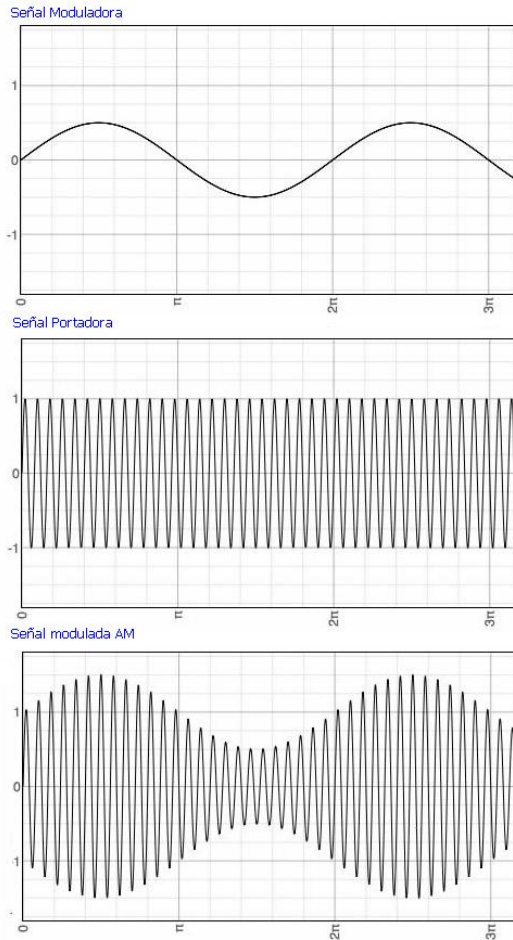


Figura 10: Esquema de Modulación AM.

## 6. Aplicaciones biomédicas

El procesamiento de señales tiene una gran importancia en medicina. Está presente en las más modernas técnicas (TAC, escáner, etc..) para construir imágenes tridimensionales a partir de imágenes bidimensionales.

También se utiliza el procesamiento de imágenes para su aplicación al estudio de imágenes de microscopio electrónico (estudio de células, etc).

Una de las primeras áreas en las que se comenzó a utilizar el procesamiento de señales fue en su aplicación al estudio de señales biomédicas (EEG, ECG, etc.).

### 6.1. Electroencefalograma

En primer lugar, es necesario registrar la señal digitalmente. Por tanto no son válidos los viejos registros en papel. En su lugar, hoy en día, los electroencefalógrafos digitales han desplazado completamente a los analógicos.

El primer aspecto a tener en cuenta es que permiten representar la señal en diferentes escalas y diferentes regiones a voluntad. La aplicación de algunos métodos matemáticos como la transformada corta de Fourier



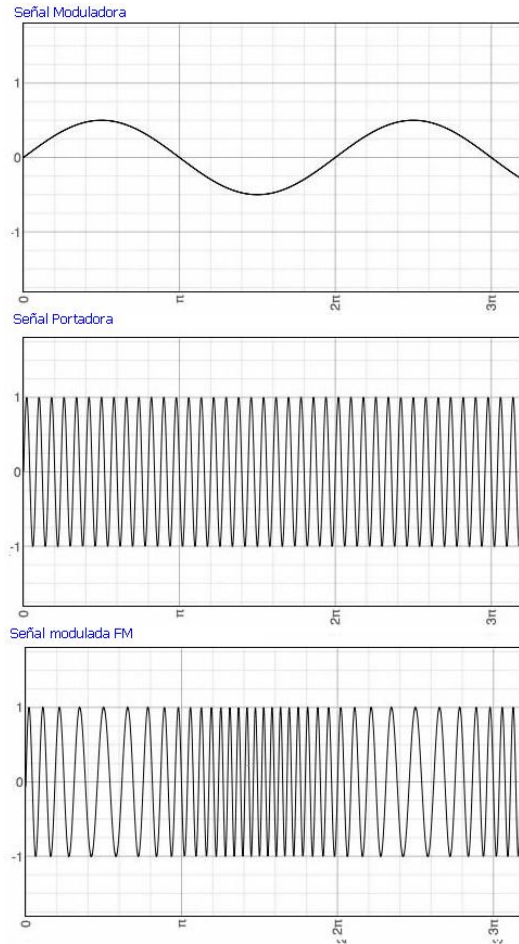


Figura 11: Esquema de Modulación FM.

permiten ver las frecuencias activas en cada instante de tiempo. Por otro lado, se puede estudiar la evolución de bandas de frecuencia (regiones de varios Hz de ancho).

## 6.2. Fonocardiograma

La fonocardiografía es el registro de los sonidos cardiacos desarrollada para mejorar los resultados obtenidos con el estetoscopio acústico tradicional.

Mediante el fonocardiograma, las ondas sonoras procedentes del latido cardíaco pueden ser captadas, registradas, medidas y representadas gráficamente usando la instrumentación adecuada. El fonocardiograma permite documentar la temporización, intensidad relativa, frecuencia, calidad, tono, timbre y localización precisa de las diferentes componentes del sonido cardíaco, de una forma objetiva y repetible.

Es uno de los métodos más valiosos de la exploración cardiológica y a pesar de ser el oído humano un aparato prodigioso, es un instrumento muy pobre para la auscultación cardiaca debido a las características de los ruidos cardiacos.

La auscultación cardiaca debe hacerse con el estetoscopio explorador en la región precordial y saliéndose de ellas, para auscultar todas las regiones, las subclaviculares, la axila izquierda, el epigastrio, los vasos del cuello, y la

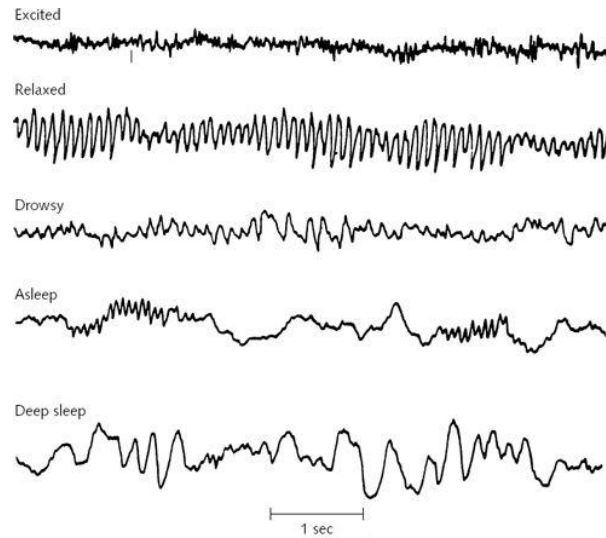


Figura 12: Características de las señales de un Electroencefalograma

cara posterior del tórax, especialmente en la región interescapular izquierda. Ante todo debe ponerse atención a las áreas de auscultación cardiaca que se muestran a continuación:

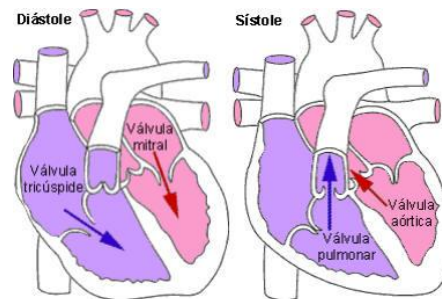


Figura 13: Puntos de auscultación para un fonocardiograma

### 6.3. El latido cardíaco

Un latido cardíaco es una acción de bombeo en dos fases que toma aproximadamente un segundo. A medida que se va acumulando sangre en las cavidades superiores (las aurículas, derecha e izquierda), el marcapasos natural del corazón (el nódulo SA) envía una señal eléctrica que estimula la contracción de las aurículas.

Esta contracción impulsa sangre a través de las válvulas tricúspide y mitral hacia las cavidades inferiores que se encuentran en reposo (los ventrículos derecho e izquierdo). Esta fase de la acción de bombeo (la más larga) se denomina diástole.

### 6.4. Origen del sonido cardíaco

Los fenómenos acústicos, normalmente advertibles, están producidos bien por la contracción de la musculatura cardíaca, y por el cierre de las válvulas de los orificios auriculoventriculares y arteriales. En la fase sistólica se

distingue un componente muscular y uno valvular; en la fase diastólica actúa un componente arterial y valvular.

La contracción auricular, habitualmente no produce fenómenos acústicos advertibles. Cada sístole cardíaca produce dos tonos: el primero correspondiente a la contracción de los ventrículos, que al generar el empuje del contenido sanguíneo sobre las válvulas que comunican las aurículas con los ventrículos producen un pandeo al cierre de las mismas, y el segundo al cierre de las válvulas semilunares de los orificios arteriales aórtico y pulmonar.

Los tonos se escuchan en determinados puntos del tórax, llamados focos de auscultación; el foco mitral, sobre la región del latido de la punta (y en el que se tiene en cuenta principalmente la actividad del ventrículo izquierdo); el foco pulmonar, en el segundo espacio intercostal izquierdo, en las proximidades del esternón (en el que se advierte la actividad de la válvula pulmonar y en parte la de la aórtica); y el foco aórtico, en el extremo esternal del segundo espacio intercostal derecho (en el que se advierte la actividad aórtica).

A estos focos se une habitualmente la auscultación sobre el centrum cordis (en el extremo esternal del cuarto y tercer espacio intercostal izquierdo); existen además otros puntos de auscultación externos a la superficie de proyección cardíaca, que pueden estar en todas las regiones del tórax.

Durante el ciclo cardíaco el corazón vibra en su totalidad, provocando una onda acústica que se propaga a través de la pared torácica. La componente principal de la onda acústica es el ritmo cardíaco, pero además cada estructura del corazón mismo tiene una constitución particular con sus propias características biomecánicas: frecuencias naturales, elasticidad, amortiguamiento e impedancias mecánica y acústica.

Esto hace que, tanto la vibración del corazón, como la onda acústica que produce, abarquen un amplio espectro de frecuencias, que puede ir desde 1 Hz o menos hasta superar los 1500 Hz. La amplitud de la señal acústica está en torno a los 80 dB.

El instrumento utilizado clásicamente para captar los sonidos cardíacos es el estetoscopio o fonendoscopio, que tiene por objeto transmitir los sonidos cardíacos con la menor distorsión y pérdida de amplitud posible. Consta de una campana de un "diafragma", que pueden ser intercambiados de forma reversible. El diafragma y la campana tienen diferentes propiedades acústicas, lo que permite compensar la relativa insensibilidad del oído humano a bajas frecuencias.

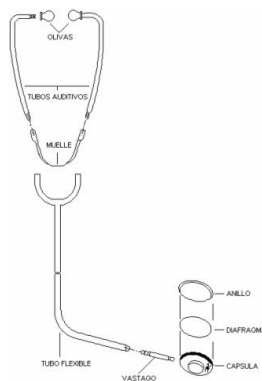


Figura 14: Esquema de un estetoscopio (o fonendoscopio)

## 6.5. Esquema de una fonocardiografía

Para realizar un fonocardiograma se necesita un transductor que transforme la onda acústica en una señal eléctrica proporcional. Para ello se utiliza un micrófono piezoeléctrico.

Dado que la señal eléctrica obtenida suele tener amplitud muy baja, se realiza una etapa preamplificada seguida de un filtrado activo para adecuar la señal en su espectro de frecuencia entre 10 - 100Hz respectivamente, y así de esta forma puede ser registrada y grabada en el computador.

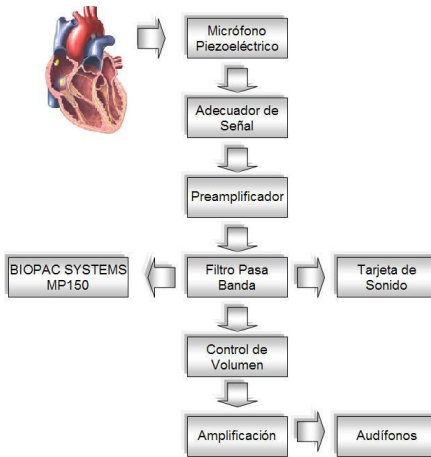


Figura 15: Diagrama de un fonocardiógrafo

## 6.6. Electrocardiograma

Es un procedimiento de diagnóstico con el que se obtiene un registro de la actividad eléctrica del corazón. Es la técnica más usada para el estudio electrofisiológico del corazón, debido a que es un método no invasivo y permite registrar la actividad eléctrica del corazón desde la superficie del cuerpo humano. Desde sus inicios el ECG ha sido interpretado a partir de la morfología de las ondas y complejos que componen el ciclo cardíaco y de las mediciones de intervalos de tiempo entre las diferentes ondas, complejos y segmentos.

Las contracciones rítmicas del corazón están controladas por una serie ordenada de descargas eléctricas que se originan en el nodo sinusal de la aurícula derecha y se propagan a los ventrículos a través del nodo aurículoventricular y del haz de His (un haz de fibras neuromusculares).

Mediante electrodos aplicados en varias regiones del cuerpo se puede obtener, tras amplificarlas, un registro de estas descargas eléctricas (transmitidas por los tejidos corporales desde el corazón hasta la piel): este registro se llama electrocardiograma.

El electrocardiograma (ECG) es el registro gráfico, en función del tiempo, de las variaciones de potencial eléctrico generadas por el conjunto de células cardíacas y recogidas en la superficie corporal.

## 6.7. Actividad eléctrica cardíaca

El sistema de conducción está constituido por diferentes estructuras. El nódulo sinusal, situado en la porción posterior y superior de la aurícula derecha muy próximo a la desembocadura de la vena cava superior, es el marcapasos cardíaco en condiciones normales. Ello es debido a que sus células son las que se despolarizan de forma más rápida. El impulso una vez generado se distribuye por la aurícula derecha y posteriormente por la izquierda, provocando la contracción de ambas aurículas.

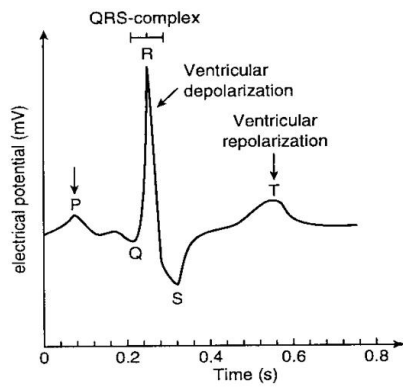


Figura 16: Registro de un Electrocardiograma

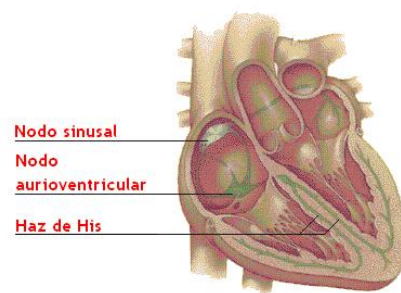


Figura 17: Actividad eléctrica cardiaca