

IV. FÍSICA DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR

EL SISTEMA cardiovascular está formado por el corazón, la sangre y los vasos sanguíneos; cada uno desarrolla una función vital en el cuerpo humano. Aquí hablaremos sólo de una parte de la física involucrada en su funcionamiento.

La función principal del sistema circulatorio es transportar materiales en el cuerpo: la sangre recoge el oxígeno en los pulmones, y en el intestino recoge nutrientes, agua, minerales, vitaminas y los transporta a todas las células del cuerpo. Los productos de desecho, como el bióxido de carbono, son recogidos por la sangre y llevados a diferentes órganos para ser eliminados, como pulmones, riñones, intestinos, etcétera.

Casi el 7% de la masa del cuerpo se debe a la sangre. Entre sus componentes hay células muy especializadas: los leucocitos o células blancas están encargadas de atacar bacterias, virus y en general a todo cuerpo extraño que pueda dañar nuestro organismo; las plaquetas son las encargadas de acelerar el proceso de coagulación, defensa del cuerpo cuando se encuentra una parte expuesta; los eritrocitos o células rojas llevan el oxígeno y el alimento a todas las células del cuerpo.

El corazón es prácticamente una doble bomba que suministra la fuerza necesaria para que la sangre circule a través de los dos sistemas circulatorios más importantes: la circulación pulmonar en los pulmones y la circulación sistemática en el resto del cuerpo. La sangre primero circula por los pulmones y posteriormente por el resto del cuerpo.

Comenzaremos la descripción del funcionamiento del corazón considerando la sangre que sale al resto del cuerpo, por el lado izquierdo del mismo. La sangre es bombeada por la contracción de los músculos cardíacos del ventrículo izquierdo a una presión de casi 125 mm de Hg en un sistema de arterias que son cada vez más pequeñas (arteriolas) y que finalmente se convierten en una malla muy fina de vasos capilares. Es en ellos donde la sangre suministra el O₂ a las células y recoge el CO₂ de ellas.

Después de pasar por toda la malla de vasos capilares, la sangre se colecta en pequeñas venas (vénulas) que gradualmente se combinan en venas cada vez más grandes hasta entrar al corazón por dos vías principales, que son la vena cava superior y la vena cava inferior. La sangre que llega al corazón pasa primeramente a un reservorio conocido como aurícula derecha donde se almacena; una vez que se llena se lleva a cabo una contracción leve (de 5 a 6 mm de Hg) y la sangre pasa al ventrículo derecho a través de la válvula tricúspide que se ilustra en la figura 9.

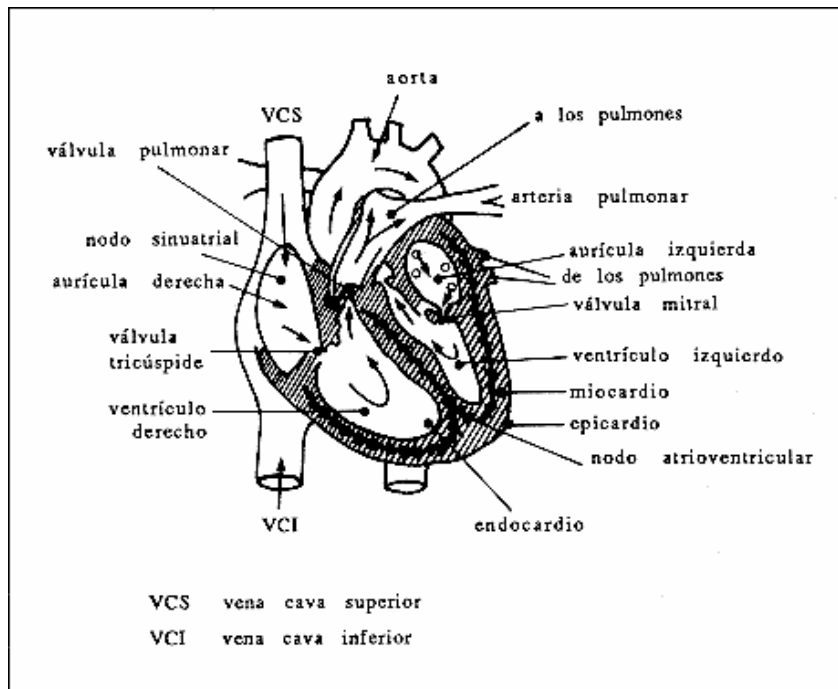


Figura 9. El corazón y sus partes principales

En la siguiente contracción ventricular, la sangre se bombea a una presión de 25 mm de Hg pasando por la válvula pulmonar a las arterias pulmonares y hacia los vasos capilares de los pulmones, ahí recibe O₂ y se desprende del CO₂ que pasa al aire de los pulmones para ser exhalado. La sangre recién oxigenada regresa al corazón por las venas de los pulmones, llegando ahora al reservorio izquierdo o aurícula izquierda. Después de una leve contracción de la aurícula (7 a 8 mm de Hg) la sangre llega al ventrículo izquierdo pasando por la válvula mitral. En la siguiente contracción ventricular, la sangre se bombea hacia el resto del cuerpo, y sale por la válvula aórtica. En un adulto el corazón bombea cerca de 80 ml por cada contracción.

Es claro que las válvulas del corazón deben funcionar en forma rítmica y acoplada, ya que de no ser así el cuerpo puede sufrir un paro cardíaco. Actualmente, las válvulas pueden sustituirse si su trabajo es deficiente.

De lo anterior, es obvio que el corazón realiza un trabajo. Las presiones de las dos bombas del corazón no son iguales: la presión máxima del ventrículo derecho llamada sístole es del orden de 25 mm de Hg, los vasos sanguíneos de los pulmones presentan poca resistencia al paso de la sangre. La presión que genera el ventrículo izquierdo es del orden de 120 mm de Hg, mucho mayor que la anterior, ya que la sangre debe viajar a todo el cuerpo. Durante la fase de recuperación del ciclo cardíaco o diástole, la presión típica es del orden de 80 mm de Hg. La gráfica de presión se muestra en la figura 10.

Durante una cirugía o en terapia intensiva, es frecuente que la presión venosa central de la sangre se mida en forma directa, para lo cual se introduce un catéter (tubo flexible delgado) por una de las venas del brazo hasta llegar a la aurícula, este catéter está además conectado a una botella de suero y a un tubo capilar graduado en centímetros, que colocado verticalmente a la altura del corazón mide la presión venosa. El suero sube por el capilar hasta alcanzar una altura entre 20 y 25 cm. en caso de un adulto.

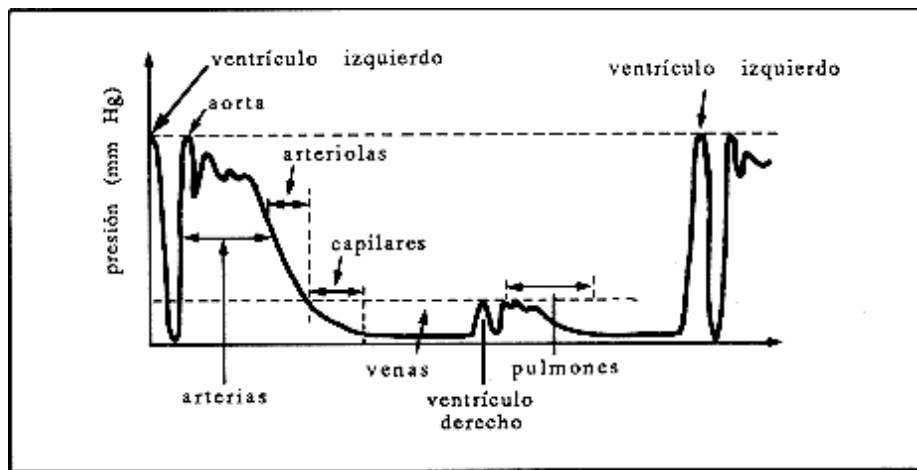


Figura 10. Gráfica que muestra cómo varía la presión en el sistema circulatorio. Nótese que la presión venosa es muy pequeña.

Un método para medir la presión arterial sistólica y diastólica es usar el esfigmomanómetro, que consiste en un manguito inflable de aproximadamente 13 cm. de ancho, que se coloca alrededor del brazo, conectado a un manómetro (medidor de presión) de mercurio, tubo que tiene un depósito de mercurio en su parte inferior y está graduado en milímetros. La presión de aire en el manguito se eleva hasta sobrepasar la presión sistólica, logrando así colapsar la arteria humeral e impidiendo el flujo de sangre por ella. Si se deja salir lentamente el aire del manguito, cuando la presión sobre la arteria alcance el valor de la presión sistólica la sangre comenzará a fluir a través de la arteria, lo cual se puede detectar por medio del sonido que produce. La sangre fluirá en forma intermitente hasta alcanzar la presión diastólica, lo cual se detecta porque el sonido desaparece.

La sangre tiene una densidad de 1.04 g/cm^3 , muy cercana a la del agua que es de 1.00 g/cm^3 , por lo que podemos hablar del sistema circulatorio como un sistema hidráulico donde las venas y las arterias son similares a mangueras. Como sucede con cualquier circuito hidráulico, la presión en el sistema circulatorio varía a través del cuerpo, la acción de la gravedad es muy notoria en las arterias donde la presión varía de un punto a otro.

Sabemos de la física, que los líquidos en reposo transmiten íntegramente y en todas direcciones las presiones que se les aplican, lo que no sucede así cuando éstos se hallan en movimiento a través de un tubo. Este último es el caso cuando consideramos el sistema circulatorio: el fluido es la sangre y las arterias y venas los tubos del circuito. Si el líquido fluye por un tubo recto en forma rítmica, el flujo es laminar, es decir que puede imaginarse como un conjunto de láminas concéntricas que se deslizan una sobre otra, la central será la de mayor velocidad mientras que la que está tocando al tubo tendrá la mínima velocidad. Si consideramos las velocidades de las diferentes capas de líquidos en un tubo tendremos que el fluido que está en contacto con la pared del tubo que lo contiene prácticamente no se mueve, las moléculas del fluido que se mueven a mayor velocidad son las que se encuentran en el centro del tubo.

La energía necesaria para que el líquido viaje por el tubo debe vencer la fricción interna de una capa sobre otra. Si el líquido tiene una viscosidad η el flujo sigue siendo laminar, siempre y cuando el valor de la velocidad del fluido V por el diámetro del tubo d dividido entre el valor η no exceda de un valor crítico conocido como número de Reynold si Re es mayor que 2 000, la corriente laminar se rompe y se convierte en turbulenta, es decir, forma remolinos, chorros y vórtices.

La energía requerida para mantener una corriente turbulenta es mucho mayor que la necesaria para mantener una corriente laminar. La presión lateral ejercida sobre el tubo aumenta. Aparecen vibraciones que pueden ser detectadas como sonido. En la circulación humana normal el flujo es laminar, rara vez es turbulento, con

excepción de la aorta y bajo condiciones de ejercicio intenso.

Los glóbulos rojos de la sangre en una arteria no están uniformemente distribuidos, hay más en el centro que en los lados, lo cual produce dos efectos: uno, cuando la sangre entra a un conducto pequeño a un lado del conducto principal, el porcentaje de glóbulos rojos que pasan será ligeramente menor que en la sangre que se encuentra en el conducto principal; el segundo efecto es más importante, debido a que el plasma sanguíneo se mueve más lentamente a lo largo de las paredes de los vasos que los glóbulos rojos, la sangre en las extremidades tiene un porcentaje mayor de glóbulos rojos que cuando deja el corazón, el cual es aproximadamente del orden de un 10%.

En el estudio del movimiento de los líquidos, el gasto o caudal es una cantidad importante. El gasto Q es el volumen de líquido V que fluye por el conducto estudiado dividido entre el tiempo t que tarda en fluir: . Para un tubo rígido dado, de radio r y longitud l , el volumen del líquido de viscosidad h está relacionado con el gradiente de presión de un extremo a otro del tubo ($P_1 - P_2$). El matemático francés Poiseuille encontró que el gasto está relacionado con estos parámetros así:

como la resistencia R al paso del líquido es el gradiente de presión entre el gasto, la ecuación puede expresarse como:

donde $P_1 - P_2$ está en N/m^2 , en l y R están en m .

Esta ecuación nos dice que si duplicamos el radio del tubo dejando iguales los otros parámetros, el gasto aumenta 16 veces; esto es muy importante aun cuando es sólo una aproximación en el caso del flujo sanguíneo, ya que la ecuación es válida para el caso de tubos rígidos y las arterias tienen paredes elásticas las cuales se expanden ligeramente con cada pulso cardiaco, además, la viscosidad de la sangre cambia ligeramente con la velocidad del flujo.

Como se indica en la figura 10, la caída de presión más alta en el sistema cardiovascular ocurre en la región de las arteriolas y capilares. Los capilares tienen paredes muy delgadas que permiten la difusión del oxígeno y del dióxido de carbono de manera fácil. Para entender por qué no revientan, debemos ver cómo se relaciona la presión dentro del tubo P , con el radio del tubo R y la tensión que siente debido al fluido T en sus paredes. La presión es la misma en las paredes, de modo que la fuerza por unidad de longitud que empuja hacia fuera es RP . Por otro lado, existe una fuerza de tensión T por unidad de longitud que mantiene unido al tubo. Debido a que el sistema (pared-fluido) está en equilibrio se debe cumplir: $T = RP$ así si el radio del tubo es muy pequeño, la tensión también lo es.

Las enfermedades del corazón son una de las mayores causas de mortandad en el mundo. Muchas de ellas incrementan la carga de trabajo del corazón o reducen su habilidad para trabajar a la velocidad normal.

El trabajo hecho por el corazón es aproximadamente la presión promedio por el volumen de sangre bombeado. Aquello que incrementa la presión o el volumen de sangre bombeado incrementará el trabajo hecho por el corazón; por ejemplo, una alta presión sanguínea (hipertensión) causa que la tensión muscular se incremente en proporción a la presión, o bien una rápida actuación del corazón (taquicardia) también incrementa la carga de trabajo.

Un ataque cardiaco se produce por el bloqueo de una o más arterias al músculo cardiaco causando que una porción del corazón quede sin irrigación y muera (infarto).

Otra enfermedad del corazón es la falla por congestión, caracterizada por agrandamiento del corazón y reducción de su capacidad para proporcionar una circulación adecuada cosa que puede explicarse por lo visto anteriormente, ya que si el radio del músculo cardiaco aumenta al doble, la tensión en el músculo debe aumentar al doble para mantener constante la presión, sin embargo, debido a que el músculo cardiaco está

distendido, no se produce la fuerza suficiente para una circulación normal. El tratamiento médico consiste en reducir la carga de trabajo del corazón, o bien remplazarlo ya sea por otro o por uno artificial.

Cuando las señales eléctricas que activan el músculo cardíaco son inadecuadas, se puede ayudar al enfermo con un marcapasos que sirve para regular el ritmo cardíaco.

Otro problema frecuente es el mal funcionamiento de las válvulas cardíacas. Hay dos tipos de defectos: cuando la válvula no abre lo suficiente (estenosis) o cuando no cierra bien (insuficiencia). En el caso de la estenosis el trabajo se incrementa ya que gran parte de él se hace contra la obstrucción de la abertura estrecha y se reduce el suministro de sangre a la circulación general; en el caso de insuficiencia, parte de la sangre bombeada fluye hacia atrás reduciendo la sangre en la circulación. Estos problemas son ahora corregidos por medio de válvulas artificiales o bien remplazándolas por válvulas humanas que previamente han sido esterilizadas por radiación.

Es importante aclarar que en caso de tener que introducir cualquier dispositivo al cuerpo humano, éste tiene que ser compatible, es decir, debe estar hecho con un material que no cause rechazo del organismo, lo cual ha dado lugar a numerosas investigaciones sobre nuevos materiales que cumplan con los requisitos necesarios.

Otro tipo de enfermedades del sistema cardiovascular tiene que ver con los vasos sanguíneos; quizá el más problemático es la formación de un aneurisma, sobre todo si éste se presenta en el cerebro. Un aneurisma es un pequeño globo que se forma al incrementarse el diámetro de una arteria en alguna sección, como resultado de un debilitamiento de las paredes de la arteria. El incremento en el diámetro aumenta la tensión en la pared. El rompimiento del aneurisma frecuentemente es mortal, especialmente si esto ocurre en el cerebro.

La formación de placas escleróticas sobre las paredes de la arteria causa que el flujo sea turbulento, ya que angosta el interior del tubo provocando que aumente la velocidad de la sangre. Algunas veces, una placa puede desprenderse de la pared y viajar con la sangre hasta quedar atrapada en alguna arteria pequeña impidiendo así el paso del flujo para la irrigación de alguna parte del organismo. Cuando sucede en el cerebro, causa la muerte.

Otra enfermedad frecuente son las venas varicosas o várices que no sólo constituyen un problema de estética, sino que pueden causar complicaciones serias. Se deben a que las válvulas venosas, que deberían permitir el flujo de sangre sólo en un sentido (hacia el corazón), no funcionan bien y dejan que la sangre circule en ambos sentidos. Generalmente se presenta este problema en las venas largas de las piernas y se resuelve quitando estas venas: la sangre regresa al corazón por otras vías.

Actualmente, la ciencia y la técnica han alcanzado un desarrollo que permite no sólo detectar sino tratar las enfermedades del sistema cardiovascular. Tan sólo hace 25 años un ataque cardíaco no tenía remedio y una gran parte de la gente que lo sufría moría como consecuencia, ahora se cuenta con equipo que detecta el tipo de problema y equipo que lo resuelve.

El electrocardiograma es una de las herramientas más útiles en el diagnóstico de las enfermedades del corazón, es el registro sobre la piel de los potenciales eléctricos del corazón. Los nervios y los músculos, como ya vimos antes, trabajan por medio de corrientes eléctricas; los correspondientes al corazón están además encerrados en un conductor eléctrico que es el torso, de modo que a través de la piel podemos registrar en diferentes partes del cuerpo los potenciales eléctricos generados por el corazón.

Cada contracción del músculo cardíaco se lleva a cabo por un flujo de corriente el cual provoca una diferencia de potencial en la parte externa de las fibras del músculo y la superficie del cuerpo. La corriente se establece mientras el potencial de acción se propaga o durante el periodo de recuperación.

Las diferencias de potencial son registradas por medio de electrodos colocados sobre la piel y amplificadas

para poder graficarse dando como resultado el electrocardiograma (ECG). Si los electrodos se colocan en diferentes posiciones sobre el cuerpo, la señal registrada sufrirá cambios, es por ello que el registro del ECG se lleva a cabo en lugares anatómicos bien definidos.

Resulta muy interesante el desarrollo de los electrodos adecuados para el registro del ECG. No puede usarse cualquier metal. Actualmente se usan electrodos de plata con una capa de cloruro de plata depositada en la cara que está en contacto con la piel; presentan una baja resistencia y no producen señales de ruido indeseable para un buen registro.

En pacientes que han sufrido un ataque cardiaco puede presentarse un cambio repentino en el ritmo: el orden de las contracciones asociadas con el bombeo normal del corazón cambian produciendo una fibrilación (contracción no coordinada) ventricular que daña la acción de bombeo; el paciente puede morir en minutos a menos que sea desfibrilado.

La desfibrilación consiste en hacer pasar una corriente de 20 amperes a través del corazón durante 5 seg, como se muestra en la figura 11, para lograr que todas las fibras del músculo cardiaco se contraigan simultáneamente, después de lo cual el corazón puede iniciar de nuevo su ritmo normal.

La aurícula y el ventrículo están separados por una capa gruesa que no conduce electricidad ni propaga los pulsos nerviosos, es el nódulo atrioventricular el que tiene a su cargo la función de conducir los impulsos de la aurícula a los ventrículos, lo cual conforma la acción de bombeo del corazón. Si este nódulo es dañado, los ventrículos no reciben ninguna señal de la aurícula y como consecuencia no paran de bombear; sin embargo, hay centros de paso naturales en los ventrículos que proveen un pulso si no se ha recibido ninguno de la aurícula por un lapso de 2 segundos, el resultado es que el corazón trabaja a un ritmo de 30 pulsos-minuto. El paciente no se muere, pero lleva una vida de semiinválido.

Este problema ya tiene solución: actualmente se implanta a estos pacientes un marcapasos que consiste en un generador que proporciona 72 pulsos/minuto, colocándose como se muestra en la figura 12.

Como ya hemos dicho, todos los dispositivos que se introducen en el cuerpo humano deben estar cubiertos por un material que no sea rechazado por éste, ni provoque infección; esto abre un campo de investigación para la búsqueda de materiales adecuados. Los marcapasos cardiacos están hechos de elementos electrónicos de la más alta calidad, ya que de ellos depende la vida del paciente, cubiertos por un armazón de acero con superficie de titanio. Las partes flexibles se recubren con silastic. Se ha encontrado que estos materiales no causan problemas y pueden permanecer en el interior del cuerpo por años, ya que tampoco los dañan los líquidos internos.

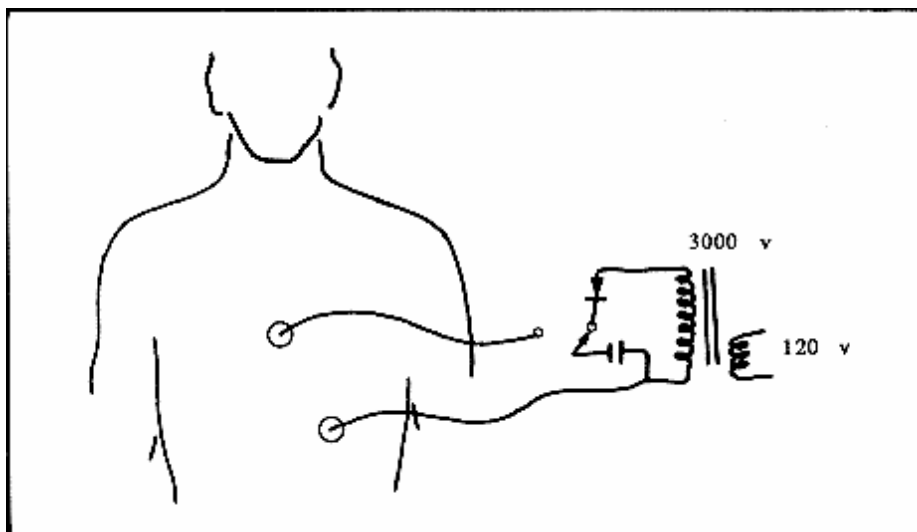


Figura 11. Aplicación de un desfibrilador.

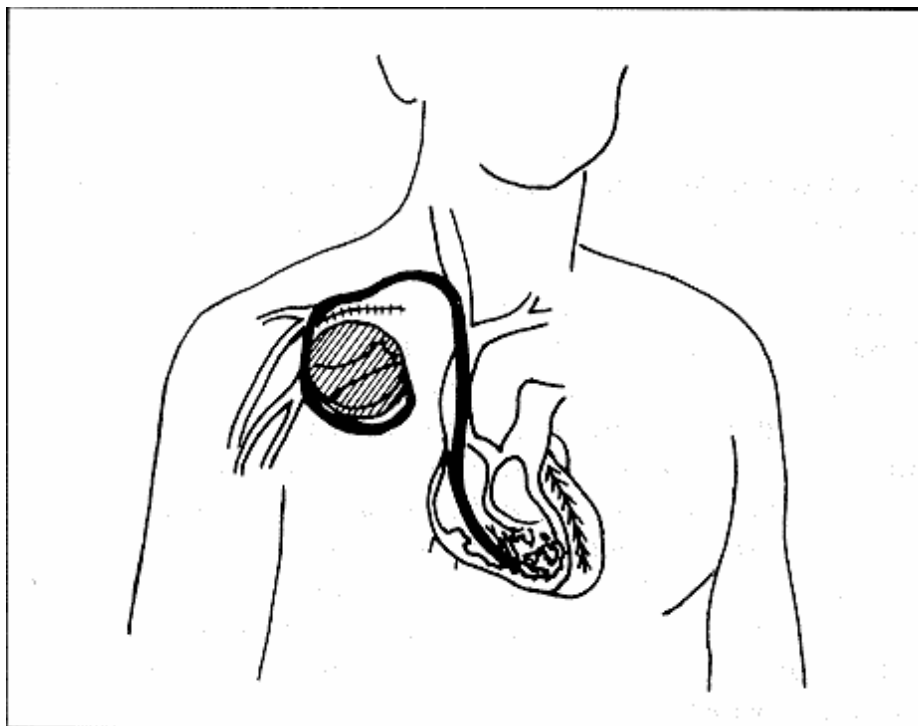


Figura 12. Colocación de un marcapasos cardiaco.