

LA FÍSICA EN LA CARRERA DE PARAMÉDICO. UNA APROXIMACIÓN SIMPLE A LOS FUNDAMENTOS FÍSICOS DE ALGUNOS EQUIPOS MÉDICOS

PHYSICS IN PARAMEDICS. A SIMPLE APPROXIMATION OF THE PHYSICAL FOUNDATIONS OF SOME MEDICAL TOOLS

Mojica R.¹, Crespo P. M.^{2*}

¹ Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Instituto Politécnico Nacional. Calz Legaria 694, Col. Irrigación, Miguel Hidalgo, 11500 Ciudad de México, CDMX.

² Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros, Calle de la Reforma 168, Col. Campestre La Paz, C.P. 74420, Izúcar de Matamoros, Puebla, México.

*Autor de correspondencia: moncbarrera@gmail.com

Recibido: 07/noviembre/2023

Aceptado: 05/enero/2024

RESUMEN

En esta contribución se describirán brevemente los fundamentos físicos de los termómetros, esfigmomanómetros y oxímetros/pulsómetros empleados continuamente por el personal de salud durante la evaluación del paciente, con la intención de explicar y motivar el estudio de la física dentro del programa de TSU en Paramédico de la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros.

Palabras clave: Principios físicos, Equipos médicos, Física en medicina

ABSTRACT

This contribution will briefly describe the physic foundation of thermometers, sphygmomanometers, and oximeters/heart rate monitors, used continuously by the health

personnel during patient evaluation. The main objective of this work is to explain and to motivate the study of Physics in the HUT in Paramedic in the Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros.

Key words: Physical principles, Medical tools, Physics in medicine

INTRODUCCIÓN

Una motivación de un número importante de jóvenes en la elección de una carrera profesional se asocia con la idea de evitar, en lo posible, programas que integren materiales relacionados con las matemáticas o la física. En este sentido, en principio, podría pensarse que la carrera de paramédico cumple con este criterio y que no tiene relación alguna ni con números ni principios físicos; sin embargo, principios físicos como **velocidad**, **energía cinética** y las **leyes de Newton** son indispensables para entender los choques de vehículos, o el funcionamiento de las poleas en un rescate vertical. Asimismo, quizá podría pensarse que un paramédico desempeña su actividad profesional satisfactoriamente sin necesidad de conocer los fundamentos de las principales herramientas de trabajo al momento de brindar la primera atención. Lo anterior es verdad hasta cierto punto, pero el grado de Técnico Superior Universitario (TSU) y el nivel de atención con que debe ser revisado el paciente, los diferencia ampliamente de los primeros auxilios convencionales y los obliga a contar con conocimientos más profundos de su área de especialidad. Así, en la profesionalización del TSU en Paramédico, se integra la formación y el conocimiento del funcionamiento de sus herramientas habituales, así como la relación de estas con el cuerpo humano y la lectura que se puede obtener de ellas sobre la gravedad de un paciente. Este conocimiento, implícitamente, se relaciona directamente con la física, pues muchas de las herramientas utilizadas en medicina se basan fundamentalmente en principios de la **física clásica**, como **temperatura**, **presión**, o la descripción de la **radiación** en ondas electromagnéticas como los Rayos X. En esta contribución, se describirá brevemente el funcionamiento de algunas herramientas empleadas por los paramédicos en la evaluación del paciente (termómetro, esfigmomanómetro y el pulsómetro), cuáles son los principios físicos que los rigen y cómo se relacionan estos con el cuerpo humano dando lugar a las diferentes lecturas que se interpretan en el diagnóstico de un paciente.

Termómetro

Durante la pandemia, este aparato representó un valioso equipo para el diagnóstico de pacientes enfermos por COVID-19. Este acercamiento de primera mano a este instrumento de medición, la mayoría podría asegurar que un termómetro mide la temperatura corporal de un individuo. Y esta aseveración, en principio, puede sonar muy normal e intuitiva, pero es importante cuestionarse sobre la naturaleza de la temperatura, qué es y cómo es que es posible medirla. De acuerdo con la **termodinámica** (una rama fenomenológica de la física), a nivel molecular, la temperatura es una medida indirecta de la energía cinética (energía de movimiento) de las partículas que constituyen el cuerpo que las contiene. En el caso del cuerpo humano, la temperatura puede entenderse como una medida de la energía cinética de las moléculas que nos forman. Sin embargo, el concepto de temperatura no debe confundirse con el término “*calor*”, el cual se refiere a la **transferencia de energía** entre el cuerpo y el medio que lo envuelve (González, 2003), aunque en el habla cotidiana la usemos para referirnos a esa sensación de “temperatura elevada” en el cuerpo y que nos hace transpirar.

El cuerpo humano tiene una temperatura promedio de entre 36.1 y 37.2 °C (MedlinePlus, 2023), y varía de acuerdo al sexo, edad, si se está realizando actividad física y con la ingesta de alimentos o bebidas (Gobierno de México, 2015). Sin embargo, la experiencia personal también nos muestra que la temperatura de nuestro cuerpo sube cuando estamos enfermos, lo cual se conoce como **fiebre**. De hecho, decir “tengo temperatura” no es un indicativo de tener una temperatura elevada, sino de existir, porque todos los objetos vivos -y no vivos- tienen temperatura. Pero, volviendo al punto, la fiebre se produce como una señal de que el cuerpo está pasando por un proceso infeccioso o alguna enfermedad, y subir la temperatura corporal ayuda a matar al virus o bacteria que ha producido dicha infección, pero también ayuda a activar el sistema inmunitario (MedlinePlus, 2023). Dicho lo anterior, y regresando un poco a la física, debe entenderse el incremento de la temperatura corporal, con respecto a la temperatura normal, como una medida indirecta del aumento de la energía cinética de los constituyentes de nuestro cuerpo. Es decir, indica el gasto de energía extra que el cuerpo está utilizando para combatir una enfermedad, como respuesta a una

lesión o agente infeccioso, o incluso como resultado de alguna reacción de hipertermia, entre otras muchas causas.

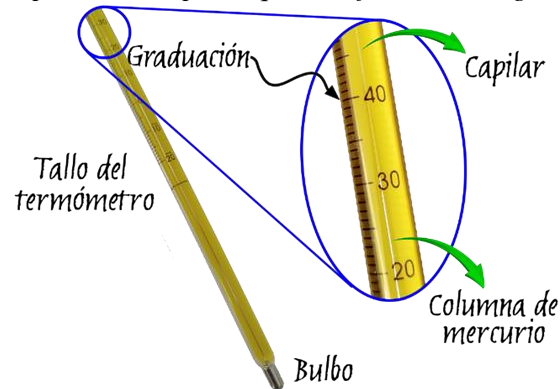
El registro de la temperatura corporal puede hacerse con alguno de los dos tipos de termómetros más comunes: el analógico o de mercurio, que actualmente empieza a caer en desuso debido a los riesgos a la salud debido al mercurio, o el digital, que puede funcionar mediante termopares o por infrarrojo. A continuación, se describirán los principios físicos de cada uno.

1. Termómetro de mercurio

Este tipo de termómetros, usados ampliamente hace unos años, se caracterizan por aprovechar el alto coeficiente de expansión térmica (CET) del mercurio (Serway y Jewett, 2005), el cual se desliza, con una muy baja interacción, sobre un sistema capilar de vidrio. El CET es el grado en el que un material se expande en ciertas direcciones ante la presencia de calor. Esto significa que mediante la transferencia de energía (calor) de una persona con una “temperatura alta” hacia el mercurio (del termómetro), este, que se encuentra confinado al fondo del termómetro en un espacio en forma de burbuja (bulbo), empieza a expandirse prácticamente sin fricción en la única dirección disponible a lo largo del capilar que se extiende por el termómetro de vidrio (Figura 1). Entre muchos materiales que existen en la tierra, el mercurio se expande en volumen de forma isotrópica (de la misma forma en todas direcciones) y lineal en 0.018% por cada grado centígrado que eleva su temperatura (Centro Mario Molina, 2023). Esto explica por qué se ha utilizado ampliamente como medio para medir la temperatura corporal con gran precisión.

Teniendo en cuenta estas propiedades del mercurio, surge la pregunta sobre la escala o grados con los que se mide la temperatura, que en México corresponden con los grados centígrados. Nótese que este escalamiento se realiza mediante pruebas de contracción y expansión del mercurio del termómetro cuando este se expone al punto de congelamiento (0 °C) y evaporación (100 °C) del agua pura a presión de 1 atmósfera, respectivamente.

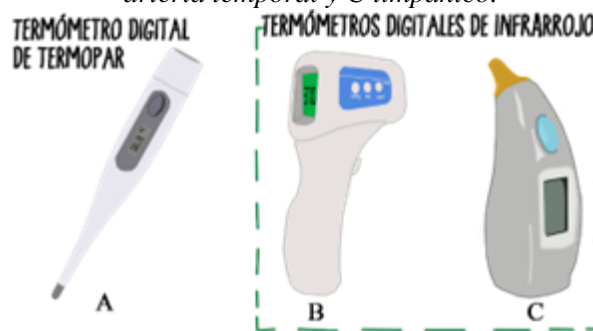
Figura 1. Partes del termómetro de mercurio. La columna de mercurio se forma dentro del capilar. Por fines didácticos, el termómetro de esta imagen es un termómetro de laboratorio, con escala de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, con el fin de apreciar el capilar, que es difícil de distinguir en un termómetro clínico.



Fuente: elaboración propia.

Contrariamente a lo que se podría pensar, la conductividad térmica, que no es alta en el mercurio con relación a otros metales como el cobre, no juega un papel importante (Wikipedia, 2023). Es decir, una alta conductividad permitiría una mayor disipación de energía en forma de calor por las paredes del termómetro afectando las mediciones de temperatura. El desuso de estos termómetros se debe principalmente a los riesgos de intoxicación y manejo de desechos que conlleva el mercurio (Organización Panamericana de la Salud, 2023).

Figura 2. A. Termómetro digital de contacto (de termopar) y termómetros digitales de infrarrojo B de la arteria temporal y C timpánico.



Fuente: elaboración propia.

2. Termómetro digital (termopar)

Los termómetros digitales son termómetros de contacto que se basan en los termopares. Los termopares consisten en la unión de dos metales diferentes con una forma específica (rectangular o en forma de cables) y que se encuentran unidos por un extremo, donde se produce una diferencia de potencial muy pequeña (voltaje) como consecuencia del cambio de temperatura (gradiente) en el extremo de dicha unión (Anatychuk, 1998) cuando entra en contacto con el cuerpo humano. A este fenómeno físico se le conoce como **efecto Seebeck**. Estos pequeños voltajes (del orden 0.001 V) pueden asociarse con diferentes gradientes de temperatura generando una escala en el rango de temperaturas del cuerpo humano en función de la naturaleza de los diferentes metales que se empleen para construir el termómetro (Gurevich y Ortiz, 2003). Normalmente, los materiales empleados para la producción de estos termómetros son el cromel (aleación de Níquel-Cromo) y el alumen (aleación de Níquel-Aluminio) los cuales tienen una sensibilidad que permite mediciones de temperatura corporal bastante precisas.

Los pequeños voltajes generados por la diferencia de temperatura entre los extremos de la unión pueden ser interpretados mediante la incorporación de la electrónica (tarjeta) en los termómetros. Con lo cual su funcionamiento se basa en una combinación entre fenómenos mecánicos (el efecto Seebeck) y electrónicos.

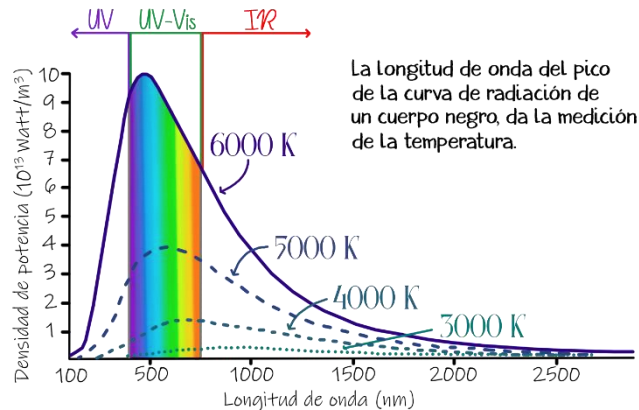
Este tipo de termómetros (Figura 2) incluyen termómetros rectales, axilares y orales, siendo la temperatura axilar la menos precisa (Mayo Clinic, 2023).

3. Termómetro infrarrojo

Este termómetro se popularizó mucho durante la pandemia puesto que permite tomar mediciones de la temperatura corporal a distancia, evitando así el contacto físico. La base física de este tipo de termómetros suele ser un tanto más compleja que los anteriores, pues se fundamenta en la aproximación de **radiación de cuerpo negro**. Este tipo de radiación puede entenderse de manera general como la radiación electromagnética (luz) emitida por cualquier cuerpo debido a su agitación térmica (es decir, la energía cinética de sus moléculas constituyentes). En otras palabras, cualquier objeto material que se encuentre a temperatura ambiente emite luz en mayor o menor medida (Hacyan, 2016).

En el caso particular del cuerpo humano, en su rango de temperaturas posibles, emite luz infrarroja. Esta luz, que no es percibida por ojo humano dado que sale de su rango de visión biológico, puede aprovecharse para determinar la temperatura corporal a partir del espectro de emisión de cuerpo negro (Figura 3), el cual es constante para todos los cuerpos, mediante una aproximación que considera las características naturales de la propia piel (opacidad, rugosidad, constitución, etc) (Infrared Services, 2023). En este sentido, la luz que los cuerpos emiten naturalmente es interpretada por el termómetro electrónico infrarrojo, que se calibra bajo diferentes estándares, dando una lectura de la temperatura. La ley física que explica la radiación de un cuerpo negro es conocida como la **Ley de Stefan-Boltzmann**, a partir de la cual es posible calcular la temperatura de la superficie de la piel considerando la temperatura ambiental, la “cantidad de energía” que el cuerpo humano emite y el área del cuerpo humano. Sin embargo, la deducción de esta ley y su uso para calcular la emisión del cuerpo humano van más allá de los objetivos de este trabajo.

Figura 3. Espectro de emisión teórico de cuerpo negro. El espectro de la luz que nos llega del sol tiene componentes de radiación ultravioleta (UV), ultravioleta visible (UV-vis) que es la luz que nosotros podemos ver, e infrarrojo (IR). La emisión de energía del cuerpo humano está en la región del infrarrojo, y es ésta la que se usa para determinar la temperatura del cuerpo humano usando un termómetro infrarrojo. La temperatura, en esta gráfica, está en Kelvin (K).



Fuente: elaboración propia.

En resumen, la luz emitida por el cuerpo llega al termómetro, en el cual es transformada a un pulso eléctrico mediante un fotodetector, que puede ser interpretado por un procesador. Estos termómetros requieren de una electrónica más avanzada que sus análogos basados en termopares, lo que los hace tener ciertas limitaciones en caso de realizar mediciones bajo luz solar directa, mucho frío o en piel sudorosa (Mayo Clinic, 2023). La distancia entre el termómetro y la piel

también puede afectar las mediciones de un termómetro de la arteria temporal (Figura 2B) en la frente, y la presencia de cerumen o conductos auditivos pequeños puede interferir con un termómetro infrarrojo timpánico o de oído (Figura 2C).

Esfigmomanómetro

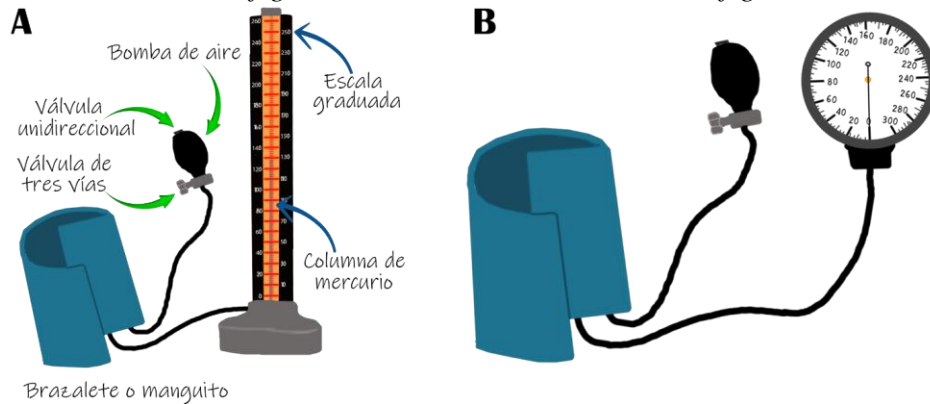
El equipo para monitorear la presión arterial (PA), mejor conocido como esfigmomanómetro o tensiómetro, es un instrumento que, como su nombre lo indica, es utilizado para medir, de forma indirecta, la presión arterial. Al igual que con los termómetros, existen los tensiómetros analógicos y los digitales. La PA es una medida de la fuerza con la que el corazón bombea la sangre y la presión que ésta ejerce sobre las paredes arteriales, además del volumen de sangre bombeada y la elasticidad de las arterias (Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud, 2020). Aunque es un valor que difiere mucho de persona a persona e incluso se ve afectado por la alimentación, la temperatura o la actividad física, una correcta medición de la PA puede ayudar a identificar y/o controlar la hipertensión al proporcionar valores confiables que ayuden al diagnóstico y tratamiento.

Antes de la invención del esfigmomanómetro, la PA era tomada de forma directa mediante una punción en las arterias. Los inconvenientes técnicos que esto representaba llevó a muchos médicos e investigadores a buscar alternativas para medir la PA y en 1896 Scipione Riva-Rocci describe la técnica de medición de la PA y las especificaciones técnicas del aparato con el que realizaba dicha medición (Calvo-Vargas, 1996): el esfigmomanómetro de mercurio (Figura 4A). Este tipo de aparatos son los que se usan para hacer las calibraciones de los esfigmomanómetros más actuales, pues durante su desarrollo, el valor de la PA dado por éste, fue comparado con las mediciones directas de la PA. Sin embargo, debido a la toxicidad del mercurio, se ha desaconsejado su uso en el sector médico (Romero-Ceballos *et al.*, 2023).

Una alternativa al esfigmomanómetro de mercurio es el esfigmomanómetro aneroide (Figura 4B), cuyo precursor es el esfigmomanómetro que inventó Samuel Siegfried Karl Ritter von Basch, cuya ineficiencia e inexactitud lo descalificó como alternativa en su época. El esfigmomanómetro aneroide requiere de un estetoscopio para medir la PA. El brazalete del esfigmomanómetro se coloca alrededor del brazo del paciente y se infla para generar una presión externa en las arterias, causando una obstrucción del flujo sanguíneo. Sin embargo, es importante mencionar que la

correcta colocación de este equipo es lo que garantiza la precisión de la medición. Para ello es necesario sentarse recto con la espalda recargada y los pies en el suelo. El brazo en el que se medirá la presión arterial debe estar descubierto y colocarse con el antebrazo a nivel del corazón. La parte inferior del manguito debe colocarse a 2.5 cm por encima del dobléz del codo (MedlinePlus, 2022).

Figura 4. A: Partes de un esfigmomanómetro de mercurio. **B:** Esfigmomanómetro aneroide



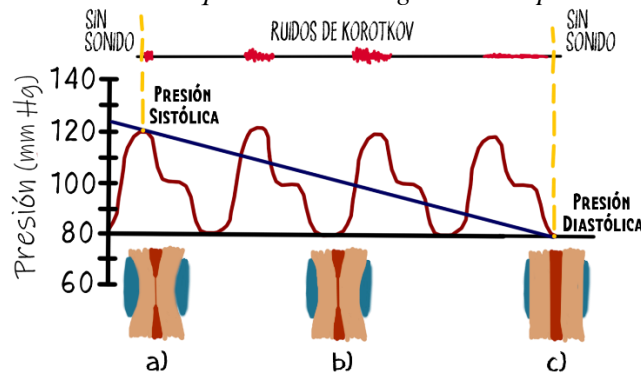
Fuente: elaboración propia.

La **presión** es una magnitud física causada por el choque de las moléculas de un fluido con la superficie que la rodea (Resnick *et al.*, 2009); un ejemplo es la presión atmosférica, que es la fuerza que el aire ejerce sobre nuestros cuerpos. De igual manera, por la **tercera ley de Newton**, nuestro cuerpo debe ejercer una fuerza de igual magnitud, pero en sentido contrario, es decir, “hacia afuera”, para soportar esa presión producida por el aire. Para entender esta idea, y el funcionamiento de los esfigmomanómetros, pensemos en un globo: cuando está desinflado, toda la presión atmosférica sobre él es suficiente para que el globo esté “aplastado” sobre sí mismo, pero cuando soplamos aire dentro de él, para inflarlo, la presión que el aire ejerce *dentro* del globo iguala a la presión atmosférica que empuja desde *afuera*, pero si dejamos de soplar, o no amarramos el globo para que el aire permanezca en el interior del globo, la presión externa (atmosférica) superará a la presión interna (el aire que nosotros soplamos) y el globo se desinflará.

De forma similar, cuando inflamos el brazaletes para tomar la PA, estamos ejerciendo una presión externa sobre el brazo, específicamente sobre la arteria braquial, impidiendo el flujo de sangre. El aire que fue bombeado al brazaletes está contenido a cierta presión, que es la que se verá reflejada

en la columna de mercurio (en milímetros de mercurio, mmHg). Al empezar a desinflar el brazalete (y, por tanto, liberar presión sobre la arteria), el reinicio del flujo sanguíneo producirá los sonidos de Korotkov (Figura 5), que son los que se usan para determinar la PA. Cuando se empieza a sacar el aire del brazalete, el primer sonido de Korotkov se escuchará cuando la presión que el brazalete ejerce a la arteria es un poco mayor que la presión que la que la sangre ejerce dentro de ella (hacia afuera, como en el caso del globo inflado), permitiendo un flujo suave de sangre, dando como resultado la medición de la presión sistólica. Conforme se sigue sacando aire del brazalete, la presión ejercida sobre las arterias disminuye, produciendo un flujo turbulento de sangre y, en consecuencia, los otros tres sonidos de Korotkov. Finalmente, cuando la presión ejercida por el brazalete iguala a la presión diastólica, estos sonidos dejarán de escucharse, y es entonces este valor de presión marcado por el aire que queda en el brazalete, el que se registra como presión diastólica, es decir, que la presión diastólica se toma cuando los sonidos desaparecen (Azpiroz Leehan y Godínez, 2002).

Figura 5. Representación gráfica de los ruidos de Korotkov y su relación con la medición de la presión arterial. Cuando la presión externa impide el paso de la sangre en la arteria, no hay ningún sonido, pero cuando se libera la presión sobre el brazo, se escucha el **a)** primer sonido de Korotkov, y en ese momento se registra la presión sistólica registrada por el manómetro. Conforme se sigue sacando el aire del brazalete, la presión sobre las arterias se va liberando, produciendo **b)** las fases 2, 3 y 4 de los ruidos de Korotkov. **c)** Una vez que toda la presión se libera, no hay ningún sonido, y es en ese momento -cuando se deja de escuchar sonido- que se toma el registro de la presión diastólica.



Fuente: elaboración propia.

Algunos de los esfigmomanómetros digitales funcionan con detectores de sonido para dar las lecturas de PA basándose también en los sonidos de Korotkov, pero los más comunes son los esfigmomanómetros digitales que funcionan por oscilometría. La medición de la PA mediante

oscilometría funciona bajo el mismo principio que el auscultatorio: las diferencias de presión. En este método, los sonidos de Korotkov son “sustituidos” por las oscilaciones (cambios, por así decirlo) del volumen de sangre durante los cambios de presión ejercidos por el brazalete. La PA es calculada usando un algoritmo que interpreta la gráfica de la amplitud de estas oscilaciones en el volumen de sangre contra la función de la presión externa ejercida por el brazalete.

Existen diversos algoritmos para realizar el cálculo de la PA pero los más usados son el de máxima amplitud, el de la derivada, y el de proporción fija (Chandrasekhar *et al.*, 2019). La descripción de estos algoritmos va más allá del objetivo de este trabajo. Sin embargo, todos ellos trabajan sobre tres suposiciones: 1) La arteria es elástica y tiene una relación $V = f(P)$ entre el volumen sanguíneo sigmoideo, V , y la presión transmural, P . 2) El tejido alrededor de la arteria es incompresible y 3) la relación entre la presión del brazalete y el volumen de aire es estática y lineal, de forma que las oscilaciones de la presión del aire en el brazalete sean proporcionales (por un factor constante k) a las oscilaciones del volumen de sangre en la arteria. Con estas tres condiciones, se construye el algoritmo que da pie a los tres algoritmos mencionados anteriormente. Es importante mencionar que, a pesar de ser un método confiable, es necesario garantizar que el esfigmomanómetro haya sido validado y además es importante tomar en cuenta que, debido a su funcionamiento, arritmias cardiacas pueden dar origen a lecturas erróneas (Rozas y Escobar, 2013).

Oxímetro/Pulsómetro

Los oxímetros y pulsómetros, que por un lado permiten medir la saturación de oxígeno en la sangre (SpO_2) y por otro la frecuencia cardíaca, se basan en la **espectrofotometría de luz infrarroja** (López-Herranz, 2003). Esta **técnica óptica** mide la intensidad de luz transmitida a través de un conjunto de tejidos (piel, hueso, sangre, etc) a una longitud de onda determinada (en este caso infrarroja). Generalmente, en este proceso se pierde parte de la luz incidente debido a la absorción de esta por los tejidos, lo cual está mediado por el coeficiente de extinción específico (ϵ). Asimismo, la absorción de la luz a través de una sustancia (en este caso, hemoglobina) está linealmente relacionada con la concentración de esta en la sangre. Debido a que es una medición óptica, cualquier interferencia entre la luz emitida por el oxímetro y la piel puede afectar las

mediciones, como es el caso del esmalte para uñas, o las uñas postizas, la temperatura de la piel, mala circulación, pigmentación y grosor de la piel (NIH MedlinePlus, 2023).

Considerando lo anterior, la espectrofotometría se fundamenta en la **ley de Lambert-Beer**, una ley física que describe la atenuación de la luz, mediante absorción, cuando atraviesa un medio específico. La intensidad inicial conocida (I_0), producida por una fuente de luz que se localiza en un extremo del oxímetro, decrece exponencialmente con las distancias y es menor cuando se mide con un fotodetector (localizado en el extremo contrario del oxímetro). Esta relación se expresa en la ecuación 1. Donde I es la luz detectada una vez que ha pasado por el dedo, $\varepsilon(\lambda)$ es el coeficiente de extinción específico que depende de los tejidos y de la longitud de onda de la luz incidente ($\lambda \geq 600 \text{ nm}$), c es la concentración de la hemoglobina en sangre y d , la longitud de camino óptico que en este caso corresponde aproximadamente con el grosor del dedo (Bencomo *et al.*, 2016).

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon(\lambda)cd)$$

Ecuación 1. Ley de Lambert-Beer

Hasta este punto, la relación de Lambert-Beer describe el fundamento detrás de la detección de hemoglobina. Sin embargo, la lectura observada de SpO_2 suele ser más compleja en el sentido que involucra la medición de la concentración de oxihemoglobina y desoxihemoglobina con una relación entre ambas. No es el objetivo del presente artículo discutir el campo médico de dicha relación.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta, de forma breve y muy simplificada, los principios físicos detrás de tres equipos indispensables para los y las estudiantes de TSU en Paramédico, debido al nivel de conocimiento que su formación requiere y garantiza. Se invita, de este modo, a estudiar la física detrás del funcionamiento de las herramientas que utilizan con el objetivo de comprender su vínculo con la respuesta del cuerpo humano que da lugar a las diferentes lecturas que les permiten saber los signos vitales de un paciente y, en consecuencia, la gravedad del mismo. Asimismo, hasta

cierto punto, este conocimiento puede ayudarles a dar un mejor cuidado, mantenimiento y una correcta interpretación a estos equipos.

Aunque aquí se presentó de forma resumida, la física detrás de estos -y muchos otros- instrumentos empleados en el sector salud, suele ser más compleja, por lo que se invita a quien guste profundizar más, consultar la bibliografía citada o escribir al correo incluido en este artículo.

AGRADECIMIENTOS

P.M.C y R.M agradecen a CONAHCYT por el financiamiento proporcionado a través del programa Estancias Posdoctorales por México 2022 (1) y 2023 (1), respectivamente.

REFERENCIAS

- Anatychuk, L. I. (1998). *Physics of Thermoelectricity*. Instituto de Termoelectricidad.
- Azpiroz Leehan, J., & Godínez, R. (2002). Estudio comparativo entre la técnica oscilométrica y el método de Riva-Rocci para la medición no-invasiva de la presión arterial en el medio ambiente hospitalario. *XXIII(2)*, 74-80.
- Bencomo, S., Villazana, S., & Salas, B. (2016). Diseño y Construcción de un Oxímetro de Pulso. *Revista de Ingeniería de la Universidad de Carabobo*, *23(2)*, 162-171.
- Calvo-Vargas, C. G. (1996). Cien años de dos grandes acontecimientos en la historia de la medicina: Hiperpiesis y Esfigmomanómetro (1896-1996). *Gaceta Médica de México*, *132(5)*, 529-534.
- Centro Mario Molina. (2023). *Libro de Química (Programa de educación en cambio climático)*. <https://centromariomolina.org/libro/libros/LibrodeQuimica/37/>
- Chandrasekhar, A., Yavarimanesh, M., Hahn, J.-O., Sung, S.-H., Chen, C.-H., Cheng, H.-M., & Mukkamala, R. (2019). Formulas to Explain Popular Oscillometric Blood Pressure Estimation Algorithms. *Frontiers in Physiology*, *10*, 1415. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01415>
- Gobierno de México. (2015). La temperatura corporal normal oscila entre 36.5°C y 37°C. <https://www.gob.mx/salud/articulos/la-temperatura-corporal-normal-oscila-entre-36-5-c-y-37-c>
- González, A. (2003). Calor y trabajo en la enseñanza de la termodinámica. *Revista Cubana de Física*, *20*, 129-134.

- Gurevich, Y., & Ortiz, A. (2003). Fuerza termoelectromotriz en semiconductores bipolares: Nuevo punto de vista. *Revista Mexicana de Física*, 49, 115-122.
- Hacyan, S. (2016). *Mecánica cuántica para principiantes*. Fondo de Cultura Económica.
- Infrared Services. (2023). Emissivity Values For Common Materials. <https://web.archive.org/web/20070625060223/http://infrared-thermography.com/material-1.htm>
- López-Herranz, P. (2003). Oximetría de Pulso: A la vanguardia en la monitorización no invasiva de la oxigenación. *Revista Médica del Hospital General de México*, 66(3), 160-169.
- Mayo Clinic. (2023). Termómetros: Comprender las opciones. <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/fever/in-depth/thermometers/art-20046737>
- MedlinePlus. (2022). Medición de la presión arterial. <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/007490.htm>
- MedlinePlus. (2023). Temperatura corporal normal. <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/001982.htm>
- NIH MedlinePlus. (2023). Cómo obtener una lectura precisa con oxímetros de pulso. <https://magazine.medlineplus.gov/es/art%C3%ADculo/como-obtener-una-lectura-precisa-con-oximetros-de-pulso>
- Organización Panamericana de la Salud. (2023, octubre). Mercurio. <https://www.paho.org/es/temas/mercurio>
- Organización Panamericana de la Salud & Organización Mundial de la Salud. (2020). Especificaciones técnicas de la OMS para dispositivos automáticos de medición de la presión arterial no invasivos y con brazalete. Organización Mundial de la Salud. https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/53145/9789275323052_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Resnick, R., Walker, J., & Halliday, D. (2009). *Fundamentos de física* (8.a ed., Vol. 1). Patria.
- Romero-Ceballos, A. M., Zamora-Bladón, D. F., Cárdenas-Marulanda, D. C., Hincapie-Quinchia, M., Osorio-Grisales, S., & Vargas-Soto, M. C. (2023). Metrología biomédica: Importancia y aplicación en el instrumento esfigmomanómetro. *Sistema de Investigación, desarrollo tecnológico e innovación*. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/GRINNDA/article/view/5703/5731>

Rozas, M. F., & Escobar, M. C. (2013). Tipos de esfigmomanómetros. Recomendaciones. Enfermería APS. <https://www.enfermeriaaps.com/portal/tipos-de-esfigmomanómetros-recomendacion-minsal-chile-2012>

Serway, R., & Jewett, J. (2005). Principles of Physics: A Calculus-Based Text. Cengage Learning.

Wikipedia. (2023). Mercury (Element). [https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_\(element\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury_(element))