

Aspectos Biofísicos de la Reoencefalografía y del Comportamiento del Tejido Sanguíneo *

Dr. Abraham Krivoy O.**

INTRODUCCION

La importancia que en clínica viene adquiriendo la reoencefalografía, obliga a un mejor conocimiento de las bases en las cuales se fundamenta el método. Por mencionar, entre otras indicaciones, las más genéricas del uso del reoencefalógrafo enumeraremos las siguientes:

- 1.—Diagnóstico de insuficiencias y trombosis cerebrales.
- 2.—En la insuficiencia y trombosis carotídeas.
- 3.—En las patologías extrínsecas e intrínsecas de las arterias vertebrales.
- 4.—Diagnóstico precoz y evolución de las arterioesclerosis cerebrales.
5. Estudios dinámicos de la participación vascular en enfermedades genéricas: diabetes, lupus, hipertensión arterial, peri-arteritis nudosa, etc.
- 6.—Estudios dinámicos de cefaleas vasculares y jaquecas.
- 7.—Estudio de potencial vasoreactivo cerebral bajo la influencia de la nitroglicerina o bien inhalada o sublingual, el Isordil, la hiperventilación, a la saturación de oxígeno, al aumento de tensión del CO₂, a los cambios posturales, a las compresiones carotídeas.
- 8.—Monitorización del paciente bajo anestesia, en unidades de cuidados intensivos, intervenciones de larga duración, combinación con registros poligráficos múltiples.
- 9.—Modificaciones vasculares en la hipertensión endocraneana, aneurismas arteriovenosos.
- 10.—Evaluación farmacológica de drogas vasoactivas.

* Trabajo leído en la Reunión Ordinaria de la Sociedad Venezolana de Neurocirugía. Martes 25 de Junio de 1974. Salón "B", Colegio Médico del Distrito Federal, Caracas.

** Miembro del Departamento de Cirugía, Hospital Privado Centro Médico de Caracas.

11.—Estudio profiláctico de las personas después de 53 años, para el manejo de automóviles, aviones y otras responsabilidades.

El comportamiento del tejido encefálico, bajo influencia de la corriente eléctrica de ciertas características, así como las modificaciones que se producen por el pasaje de la sangre del encéfalo a través del campo eléctrico mencionado, los valores de la impedancia y la conductancia, así como ciertas características biofísicas de la sangre serán desarrolladas en las subsiguientes líneas.

I M P E D A N C I A:

Dicho nombre deriva de la interpretación del fenómeno físico de impedir el paso de la corriente.

Si se recuerda el experimento de colocar en serie una bobina o bien con una lámpara o con un amperímetro térmico (ver fig. 1), al ir introduciendo un núcleo de hierro dentro del núcleo de la bobina, la lámpara se va apagando o el amperímetro va disminuyendo su valor e incluso se llega a anular, si la frecuencia es alta y el núcleo de hierro es grande.

El efecto de la impedancia se mide en ohmios por ser similares a una resistencia. En rigor, el efecto que produce el intercalar una bobina en un circuito, sin tomar en cuenta el valor de la resistencia del devanado, se llama **reactancia**, si a ésta le añadimos el de la resistencia del alambre de la bobina, se obtiene la impedancia.

La reactancia se representa por la letra X y se determina así:

$$X = 6.2832 \times f \times L.$$

f = frecuencia

L = inductancia de la bobina en henrios, de tal modo, por ejemplo que si una bobina de 100 microhenrios (0,000.100 H.) se coloca en un circuito cuya frecuencia es de 1.000.000 de ciclos por segundo, la reactancia será igual a 628,32 ohmios.

Conocida la reactancia X, la impedancia Z se determina así:

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2}$$

de modo que si se desea conocer la impedancia del circuito anterior, sabiendo que el devanado tiene 100 ohmios

$$Z = \sqrt{628,32^2 + 100^2} = \sqrt{404760} = 636 \text{ ohmios}$$

donde el valor de la impedancia es casi el mismo que la reactancia.

FRECUENCIAS USADAS:

Se conoce que las altas frecuencias penetran los tejidos más fácilmente que las bajas frecuencias usando una conducción iónica y son capaces de producir calor en dichos tejidos si la densidad de la corriente es alta.

En relación a los conductores metálicos homogéneos, se ha probado que cuando se utiliza una corriente de alta frecuencia, dicha corriente tiende a viajar por la periferia del conductor, produciendo el llamado "efecto de piel".

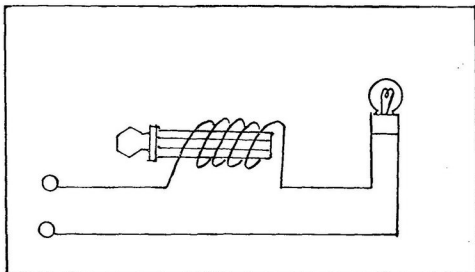


Fig. 1 - Circuito de una lámpara eléctrica con una bobina en serie de no menos 500 espiras. Para demostrar el efecto de la impedancia, se introduce las láminas de hierro dentro del núcleo de la bobina. Se observará la disminución gradual de la luz en proporción a la penetración de las láminas de hierro, que impide el paso de la corriente de altas frecuencias.

En los conductores iónicos biológicos, las corrientes de alta frecuencia se distribuyen uniformemente en la medida que dicha frecuencia aumenta hasta un determinado límite.

Se ha probado que la resistencia eléctrica del cerebro es mucho menor que la resistencia que presenta el cráneo y el cuero cabelludo, por lo que el llamado "efecto de la piel" no se ha probado en tal tipo de composición tan heterogénea como es la cabeza.

En la utilización de un puente de Wheatstone modificado tipo puente Schering (7) permite observar que las frecuencias alrededor de 20 mHz, la impedancia entre los dos electrodos cefálicos, es alrededor de 20 ohmios; con variaciones mayores de la frecuencia, la impedancia aumenta hasta 32Mc. para luego disminuir y de nuevo aumentar, según la frecuencia.

Por encima de 1 mHz no existe una dependencia apreciable de la frecuencia, pero por encima de ella, la reoconductancia disminuye (6).

Cuando se trabaja con señales de radiofrecuencia no hay problema de polarización de los electrodos, por lo que el material con el cual se construye éstos, no requiere especiales exigencias. Igualmente, con frecuencia por encima de 20 mHz el tamaño de los electrodos no es un factor crítico.

CONDUCTANCIA:

Cuando se conectan 2 o más resistencias eléctricas en paralelo, habrá más facilidad al paso de corriente a través de ellas, que si se colocaran en serie; ésto se hace más comprensible si usamos el símil hidráulico, es decir, pasará más litros de líquido por unidad de tiempo, por varias cañerías en paralelo que por una

sola; luego, esa facilidad del pasaje de la corriente, que es lo contrario de la resistencia, se llama conductancia y es igual a la suma de la inversa de las resistencias.

$$\text{CONDUCTANCIA} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \text{ etc.}$$

En las resistencias en serie, el resultado total en ohmios será igual a la suma de ellas y la intensidad es la misma en todas ellas, mientras que en paralelo, dicha intensidad se comporta inversamente proporcional a la resistencia dada (ver fig. 2 y 3).

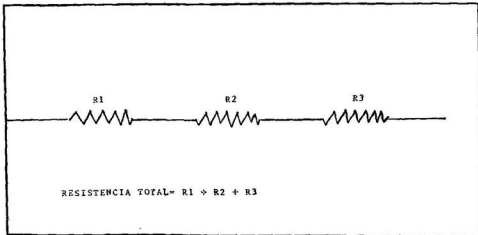


Fig. 2 - Representación esquemática de 3 resistencias en serie y el total de ohmios que se logra cuando existe esta disposición.

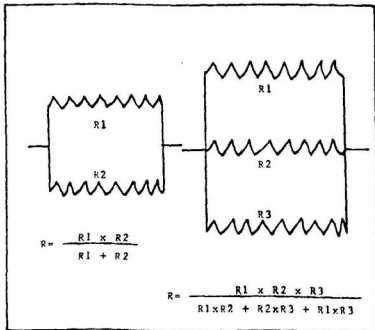


Fig. 3 - Resistencia en paralelo y valores de la resistencia resultante.

Se entiende por conductancia reográfica los cambios eléctricos de la conductancia causados por los movimientos de la sangre (3). Dado que los cambios de la conductancia dependen de la velocidad de la sangre, es posible registrar los cambios de la velocidad del flujo sanguíneo global.

El tiempo de circulación puede ser medido de una manera similar al método que utiliza los isótopos radioactivos.

Se conoce bien que la conductancia de la sangre es mayor que la de los tejidos circundantes.

Como casi todos los órganos de la economía están irrigados por los capilares sanguíneos, su resistencia eléctrica dependerá de su flujo sanguíneo; a la inversa, los órganos exangües o anémicos poseen las más altas resistencias eléctricas.

COMPORTAMIENTO BIOFISICO DE LA SANGRE EN RELACION A LA REOGRAFIA:

La reografía es un método de medida de la resistencia o impedancia. Hoy se conoce que con este método del proceso de la pulsación, no solo el efecto pletismográfico o volumétrico es el responsable de la formación de la curva, sino que dicha curva involucra también la composición de la sangre y su velocidad.

Resumiendo, hay tres factores, hasta este momento incriminados en la formación de la curva reográfica, a saber:

- 1.—El efecto pletismográfico o volumétrico de la sangre, mediante la dilatación o latido vascular.
- 2.—La composición de la sangre.
- 3.—La velocidad de la sangre.

Se sabe que con sangre fresca, se produce diferencia de conductancia según que la sangre se encuentra en reposo o en movimiento. A este cambio de conductancia se le llamó reoconductancia (3) y se probó que dependía del número de glóbulos rojos por unidad de volumen y de la velocidad del flujo sanguíneo.

Los cambios de la conductancia no indican la dirección de la corriente sanguínea (3).

Se conoce que la sangre con los eritrocitos destruidos, no produce la reoconductancia, por lo que los eritrocitos actúan como partículas biológicas produciendo un comportamiento en la sangre como un conductor electrolítico.

Si los glóbulos rojos actúan como esferas iónicas se puede aplicar la ley de Stoke (1) en relación a la fricción de las esferas en fluidos viscosos, donde la resistencia de la fricción es proporcional a la velocidad. Por otro lado la viscosidad de todos los solventes disminuyen con el aumento de la temperatura. Debe agregarse que la carga electrostática del ión de por sí, tiene una acción adherente en la solución molecular.

La ley de Ohm es aplicable a la conducción electrolítica, con la pequeña salvedad de que la conductividad es independiente de la intensidad del campo a temperatura constante; o sea, que esta conductividad está relacionada con el transporte de los solutos iónicos; donde la cantidad de electricidad es transportada por la carga eléctrica del ión.

En un experimento de un tubo rígido con membranas elásticas en sus extremos y sangre fresca en su interior, la máxima velocidad se obtiene en el centro del tubo, disminuyendo a medida que se acerca a la pared y llegando a cero en el contacto con la pared. El eritrocito se comporta como una partícula electrolítica de gran tamaño y su superficie es de 163 micrones cuadrados, que hace de la sangre un comportamiento particular en lo que a conductancia se refiere en relación a otras soluciones electrolíticas típicas. La organización estructural de la sangre se semeja a una arquitectura cristalina en enrejado, donde el glóbulo rojo es rodeado por una atmósfera de carga contraria. Dicha estructura se rompe cuando alguna fuerza de desplazamiento se produce en su seno. Esta fuerza produce un cambio en la movilidad y por ende, en la conductancia. (6)

Se ha probado que a mayor cantidad de eritrocito mayor es el cambio en la conductancia, la cual depende de la velocidad, lo que significa que a mayor densidad eritrocítica, mayor es la ruptura de la casi cristalina arquitectura del enrejado iónico de la sangre.

La descripción de la curva de la conductancia en un movimiento individual de los glóbulos rojos es como sigue: un ascenso rápido, empinado al comienzo, luego una meseta o línea plana, mientras la velocidad del desplazamiento es constante y luego un comienzo del descenso brusco seguido de un descenso muy lento al valor inicial, el cual corresponde al tiempo que toman los iones en la reorganización del estado de equilibrio previo.

La sangre es un tejido complejo donde sus componentes se hallan separados unos de otros por una superficie marginal por lo que desde el punto de vista físico-químico la sangre constituye un sistema y sus componentes integrantes individualmente se denominan fases. Estas fases son diferentes en su composición por lo que la sangre constituye un sistema heterogéneo.

La superficie marginal de dichas fases poseen un potencial que explicaría el fenómeno de cataforesis.

Desde el punto de vista funcional, los componentes sanguíneos a considerar son:

- a - glóbulos rojos
- b - glóbulos blancos
- c - plaquetas
- d - los constituyen del plasmas.

En la Tabla I puede observarse el alto contenido de Potasio en los eritrocitos en relación al Sodio, situación inversa al contenido plasmático. La gravedad específica de los glóbulos rojos varía entre 1090 a 1105 contra la del plasma que oscila entre 1025 a 1029.

La constitución de las membranas celulares eritrocíticas se supone formada por dos fases lipídicas y una protéica. La carga superficial eritrocítica, de polaridad negativa, constituye el factor más importante en cuanto al mantenimiento de la suspensión estable de ellas en el plasma.

TABLA I
COMPOSICION DE LOS GLOBULOS ROJOS Y DEL
PLASMA SANGUINEO

	grs./lt.	
	Glóbulos rojos	Plasma sanguíneo
Agua	639	910
Sólidos	361	90
Hemoglobina	340	—
Proteínas	40	75
Colesterol	1,7	1,6
Lecitina	4,0	1,9
Glucosa	1,1	1,0
Sodio	0,5	3,2
Potaslo	3,6	0,2
Calcio	—	0,1
Magnesio	0,04	0,02
Cloruros	1,9	3,4
Bicarbonato	2,1	1,6
Sulfato	0,05	0,016
Fosfato inorgánico	0,70	0,037

El intercambio iónico según Mayr (5) a través de la membrana eritrocítica tienen un requerimiento energético de 8,45 K. cal. por hora y por 1.000 cc. de eritrocitos. La actividad biológica de la membrana eritrocítica está supeditada a la vida media de dicho elemento figurando que se considera alrededor de 120 días. A pesar de la carga eléctrica negativa de la membrana eritrocítica, dicha membrana presenta la particularidad de ser permeable a los aniones como los cloruros, que pueden acumularse en la célula.

Se ha probado experimentalmente, que los leucocitos y los trombocitos no poseen actividad reográfica conductiva a pesar de su alta actividad metabólica, pero de una vida media muy corta.

Experimentalmente se ha probado de que no existe ninguna alteración de conducción reográfica cuando se utiliza el plasma sanguíneo solo o cuando se utilizan soluciones electrolíticas o substitutos de sangre exclusivamente, o suero sanguíneo, ni sangre hemolizada, ni suspensiones de diferentes composiciones. Lo

anterior permite concluir que la compleja composición del plasma en relación a los eritrocitos es de particular importancia desde el punto de vista reográfico ya que su interrelación, particularmente en medio iónico, el sistema buffer y la viscosidad, juegan papel notable.

En experimentos reográficos realizados con corrientes muy bajas, la movilidad electroforética del glóbulo rojo en un medio buffer adecuado es perfectamente mensurable. Su carga negativa establecida en 0,00734 unidades electrostáticas migran al polo positivo.

Ha quedado demostrado experimentalmente (3) que la conducción reográfica disminuye en la sangre alterada y desaparece en la sangre hemolizada. Igualmente, la solución de hemoglobina, en los experimentos con tubos rígidos no muestran ningún cambio de la conducción reográfica. Todo lo anterior permite inferir que los valores de conducción reográfica tienen como requisito la presencia de los eritrocitos con su correspondiente potencial de membrana, y que estos eritrocitos se hallen en condiciones normales desde el punto de vista funcional. Igualmente se ha demostrado la relación directa entre la cantidad de eritrocitos y el valor de la conducción reográfica que exterioriza el proceso de tipo circulatorio registrado por el examinador.

Experimentalmente está demostrado (3) que el valor de la conducción reográfica llega a su máximo, dentro de los promedios de baja velocidad, como ocurre con las bajas velocidades del flujo sanguíneo en condiciones biológicas normales. El valor de la conducción disminuye en la medida que la velocidad promedio del flujo aumenta. El valor de la conducción reográfica se mantiene absolutamente paralelo cuando la velocidad del flujo se mantiene uniforme. Recordar que los valores al comienzo del cambio del flujo son inmediatos y que cuando el flujo cesa, dichos valores caen más lentamente que la modificación de comienzo y que dicho retardo en la parte final de la inscripción a la línea basal de la impedancia depende de la velocidad que la sangre tenía previamente a su detención. En el experimento de Lechner la dependencia del valor de la conducción reográfica respecto a la frecuencia aplicada al campo del experimento no muestra diferencias hasta 1,5 mHz. Para frecuencias más elevadas el valor de la conducción reográfica comienza a disminuir continuamente.

La comprobación del factor volumétrico fue demostrado por Geyer en sus experimentos realizados a tal fin: tomó un segmento de carótida como parte de un tubo en U, todo lo cual estaba inmerso en un vaso en una solución y donde existía una cámara de expansión volumétrica con una llave que se puede abrir y cerrar a voluntad.

Los electrodos se aplicaron en forma circular a la parte rígida del tubo (ver fig. 4).

En un primer tiempo, para que la carótida no se expandiera, la cámara de expansión volumétrica se mantuvo cerrada y se pasó sangre fresca por el tubo en U, con una frecuencia similar al pulso y el aparato registraba adecuadamente la conductividad reográfica, si se pasaba sangre vieja o hemolizada, no se producía ningún registro, como era lógico esperar.

En un segundo tiempo, se abrió la cámara de expansión volumétrica, y el reografo realizaba su trabajo de registro adecuado con sangre fresca o cualquier

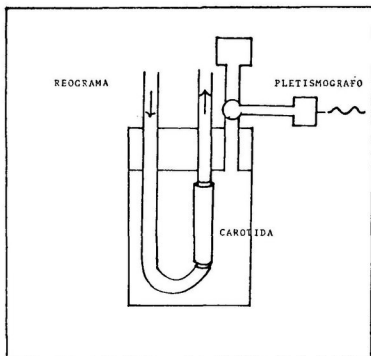


Fig. 4 - Diseño experimental para la comprobación del efecto volumétrico o pletismográfico en la formación de la curva reoencefalográfica habitual. Una rama del tubo en U ha sido substituido por un fragmento de carótida.

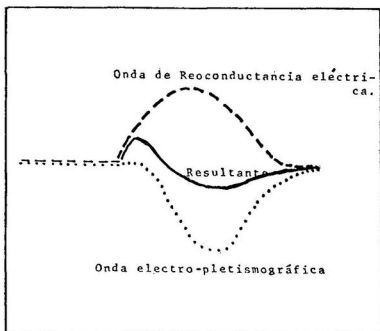


Fig. 5 - Factores que intervienen en la composición de la onda reográfica clásica.

otro líquido, sangre vieja, sangre hemolizada, plasma, siempre y cuando el valor de conducción del líquido periférico no fuera nunca igual al perfundido, ya que de así suceder, no se produciría ningún registro. Esta segunda parte del experimento habla del componente volumétrico o pletismográfico de la reografía.

En resumen existe en la onda reográfica dos componentes bien definidos.

- 1.—Un componente debido a factores de conductancia eléctrica pura.
- 2.—Un factor dependiente del efecto electropletismográfico.

De tal forma que la curva reográfica obtenida es una suma algebraica de las dos, como pudiera esquematizarse en la figura 5. Factores adicionales que integran la formación de estas curvas son motivo aún de intensos estudios y no existe aún una respuesta clara a esta posibilidad.

COMENTARIOS FINALES:

Debido al puesto que ocupa hoy en las estadísticas de morbilidad y mortalidad los accidentes cerebrovasculares se hace necesario buscar métodos que dentro de su inocuidad, revele la exactitud de datos que se solicitan en cuanto a circulación cerebral se refiere.

La reoencefalografía constituye una de las más valiosas contribuciones del diagnóstico funcional de la circulación cerebral mediante las variaciones de la impedancia eléctrica y su actual ubicación en la búsqueda de diagnósticos precoces dentro de la patología circulatoria encefálica, así como la verificación en la evolución y los efectos farmacológicos terapéuticos a las que se someta el paciente (3).

El conocimiento apropiado de las bases biofísicas en las que se fundamenta el método es un requisito indispensable para la buena interpretación de los gráficos de uso clínico (ver fig. .) así como también para el estímulo de nuevas investigaciones.

En nuestro país (3) se ha comenzado a utilizar el método y muchos de sus resultados se vienen cotejando con los otros métodos disponibles para el estudio de la circulación encefálica tales como la angiografía en primer lugar, así como la centigrafía dinámica, el E.E.G., oftalmodinamometría, equilibrio ácido básico en sangre y en L.C.R., etc.

BIBLIOGRAFIA

- 1.—Joos, G.: (1959), Lehrbuch der theoretischen Physik. Geest and Portig K. G., Leipzig.
- 2.—Krivoy, A.: Reoencefalografía. Trabajo presentado en la Sociedad Venezolana de Neurocirugía, en su reunión ordinaria del Martes 25 de Junio, 1974.
- 3.—Lechner, H.; Rodler, H. and Geyer, N. (1963), Theoretical aspects of the nature of the rheoencephalogram. In: Rheoencephalographic, Editors: F. Martin and H. Lechner, P. 19. Verlag der Wiener Medizinischen Akademie, Vienna.
- 4.—Lifshitz, K.: An investigation of electrode guarding and frequency effects in rheoencephalography. Proceedings of the Second International Symposium Graz, Austria, 19-22 April 1967 Excepta Medica Foundation 1969. Amsterdam, pág. 10-16.

- 5.—Mayr, F.: The Behaviour of blood in an electric field. Proceedings of the Second International Symposium Graz, Austria, 19-22 April 1967. Excerpta Medica Foundation 1969. Amsterdam.
- 6.—Rodler, H.: The physical principles of rheography. Proceedings of the Second International Symposium Graz, Austria, 19-22 April 1967. Excerpta Medica Foundation 1969. Amsterdam.
- 7.—Vaney, P.: New instrumental development. Proceedings of the Second International Symposium Graz, Austria, 19-22 April 1967. Excerpta Medica Foundation 1969. Amsterdam.
- 8.—Vransky, V. K., and Emanulov, I (1966): On the determination of the electrical impedance of human skin. Med. and Biol. Engineering, 4: 6 05.