

Fundamentos eléctricos de la bioimpedancia

Andrés Sánchez-Iglesias¹, Milagros Fernández-Lucas², José L. Teruel²

¹ Profesor de Física. Colegio Valdeluz. Madrid

² Servicio de Nefrología. Hospital Universitario Ramón y Cajal. Madrid

Nefrología 2012;32(2):133-5

doi:10.3265/Nefrologia.pre2012.Jan.11310

El análisis de impedancia bioeléctrica proporciona información relacionada con el grado de nutrición e hidratación del cuerpo humano. No es de extrañar que en los últimos años se haya generalizado el uso de monitores de bioimpedancia en los pacientes con enfermedad renal crónica. Dos excelentes editoriales publicadas recientemente en NEFROLOGÍA revisaron los sistemas de bioimpedancia disponibles y la información clínica que se puede obtener de éstos^{1,2}. Sin embargo, los fundamentos de la bioimpedancia son difíciles de entender para un médico cuyos conocimientos de electricidad quedaron limitados a los que aprendió en un bachillerato realizado hace muchos años. Este editorial pretende hacer un recordatorio de los principios de electricidad necesarios para comprender el funcionamiento de un monitor de bioimpedancia.

Un circuito eléctrico de corriente alterna está definido por cuatro parámetros: intensidad, voltaje, impedancia y frecuencia de alternancia. La impedancia expresa la oposición del circuito al paso de la corriente y su unidad de medida es el ohmio. La unidad de medida de la intensidad es el amperio, la del voltaje es el voltio y la de la frecuencia es el hercio (ciclos por segundo). La ley fundamental de electricidad que relaciona la impedancia con la intensidad y el voltaje es la ley de Ohm: impedancia = voltaje/intensidad.

Cuando la corriente eléctrica alterna circula por un medio, la impedancia depende en parte de la facilidad del medio para conducir la corriente, y es proporcional a la resistividad o mala conductividad del medio. Si el circuito eléctrico contiene además condensadores (sistemas constituidos por placas separadas por un medio aislante, en los que se acumula la carga eléctrica, que se libera cuando el sistema se satura), la impedancia también depende del número de condensadores que tenga que atravesar la corriente y de la facilidad de carga y descarga de éstos (capacidad). El componente de la impedancia (Z) debido a la mala conductividad del medio se denomi-

na resistencia (R) y el componente debido a la acción de los condensadores recibe el nombre de reactancia capacitiva (X_c), que en adelante denominaremos simplemente reactancia. La ecuación que las relaciona es:

$$(Z)^2 = (R)^2 + (X_c)^2 \text{ (ecuación 1)}$$

El comportamiento de un circuito de corriente alterna está definido por dos ondas que tienen distinta amplitud pero la misma frecuencia: la onda de intensidad y la onda de voltaje. Si coinciden los picos de ambas ondas, se dice que la intensidad está en fase con el voltaje. Cuando en el circuito hay condensadores, la carga y descarga de éstos provoca un retraso de la onda del voltaje con respecto a la onda de intensidad, y se dice que la corriente está desfaseada. Este desfase se expresa en forma de ángulo y se denomina ángulo de fase (φ) (figura 1). La tangente de φ es X_c/R (ecuación 2).

La bioimpedancia representa la oposición de un medio biológico al paso de una corriente alterna, y tiene los componentes de resistencia y reactancia comentados previamente. La resistencia está condicionada por la resistividad de los diferentes tejidos a la conducción de la corriente eléctrica: los tejidos graso y óseo son malos conductores y la corriente circula mejor por los fluidos intra y extracelulares, que son soluciones electrolíticas. La reactancia es debida al efecto aislante de las membranas celulares, que se comportan como condensadores que se cargan y descargan al paso de la corriente.

El sistema de bioimpedancia más común es el de cuerpo entero con cuatro electrodos: dos colocados en la extremidad inferior (dorso del pie y tobillo) y los otros dos en la extremidad superior (dorso de la mano y muñeca). Entre los electrodos distales circula una corriente alterna estable cuya intensidad es muy baja (del orden de decenas o centenas de microamperios). Entre los electrodos proximales el monitor realiza la lectura del voltaje (figura 2). El monitor maneja el voltaje y la intensidad de la corriente, y es capaz de detectar el desfase entre ambos (ángulo de fase). Con el voltaje y la intensidad calcula la impedancia (por la ley de Ohm). Con la impedancia y el ángulo de fase, el monitor calcula la resistencia y la reactancia mediante las ecuaciones 1 y 2^{3,4}.

Correspondencia: Milagros Fernández Lucas
Servicio de Nefrología.
Hospital Universitario Ramón y Cajal. Madrid.
mfernandez.hrc@salud.madrid.or

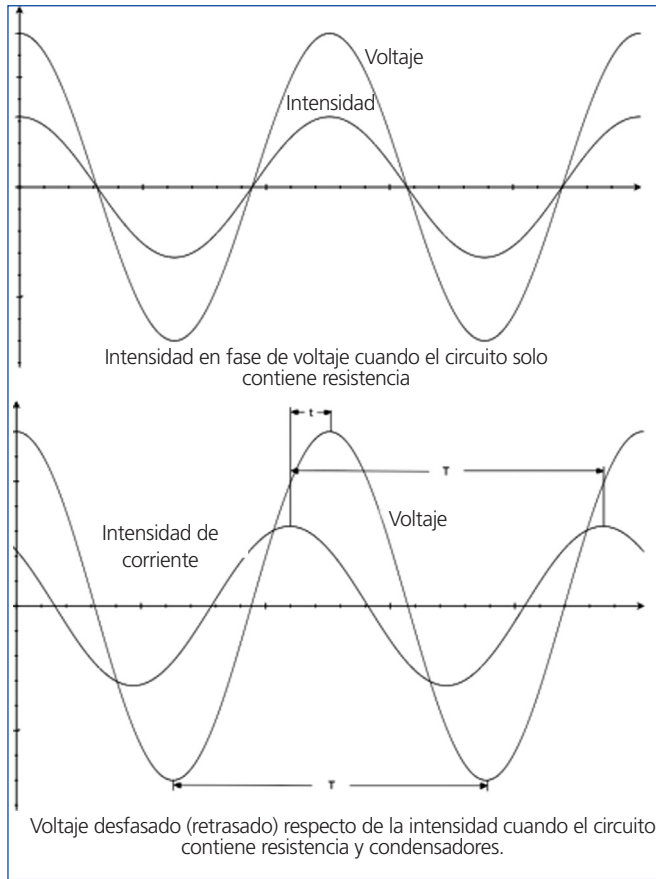


Figura 1. Voltaje e intensidad de corriente en circuitos de corriente alterna.

El desfase es un ángulo (ϕ) expresado en radianes (rad) que se relaciona con el retraso del voltaje de la siguiente manera: $\phi = 2\pi(t/T)$ rad.

t = tiempo de retraso de la onda de voltaje; T = tiempo entre dos picos.

Un radián es la medida de un ángulo central de una circunferencia, que abarca un arco igual al radio. Un ángulo completo, que abarca toda la circunferencia (360°), mide 2π rad. La equivalencia entre grados y radianes es: $1 \text{ rad} = 360^\circ/2\pi$.

Los valores de la resistencia, de la reactancia y del ángulo de fase dependen de la frecuencia de la corriente alterna. La resistencia es inversamente proporcional a la frecuencia, ya que la conductividad eléctrica de la mayoría de los tejidos aumenta si se incrementa la frecuencia. La relación de la reactancia y del ángulo de fase con la frecuencia es una curva parabólica: los valores máximos se obtienen con frecuencias de alrededor de 50 kHz y van disminuyendo conforme la frecuencia se aleja de dicho valor tanto si aumenta como si disminuye⁵. La frecuencia de la corriente alterna es fundamental para interpretar los valores de los parámetros bioeléctricos. Hay monitores de bioimpedancia que utilizan una única frecuencia de 50 kHz, y otros monitores realizan la lectura y el cálculo de los parámetros bioeléctricos con múltiples frecuencias.

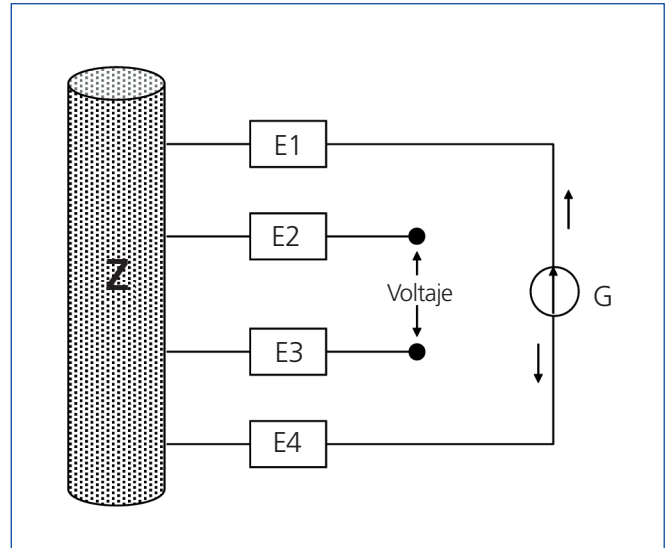


Figura 2. Esquema del modelo de bioimpedancia de cuatro electrodos.

La corriente eléctrica alterna se aplica por los electrodos distales (E1 y E4). El voltaje se detecta con los electrodos proximales (E2 y E3). G: generador de corriente alterna; Z: impedancia del medio biológico.

El sistema informático de los monitores utiliza una serie de ecuaciones para calcular los valores de los volúmenes y masas corporales a partir de los datos eléctricos. Estas ecuaciones de predicción incluyen otras variables, como peso, talla, edad y sexo, y en la mayoría de ellas el componente de reactancia es ignorado^{3,6-10}. Las ecuaciones están validadas con los métodos que se consideran de referencia para la determinación de los distintos componentes del cuerpo humano^{7,9-11}. Cada monitor usa ecuaciones distintas según el sistema de bioimpedancia, los modelos teóricos de análisis y el método de referencia elegido para su validación. En muchas ocasiones las ecuaciones son difíciles de conocer. La presentación de los resultados de la bioimpedancia como volúmenes y masas corporales se denomina bioimpedancia convencional. Otra forma de expresar los datos bioeléctricos es mediante la construcción de un vector de impedancia con la resistencia y la reactancia obtenidas a la frecuencia de 50 kHz (bioimpedancia vectorial). De la comparación de este vector con el correspondiente a una población sana se consigue información del estado de hidratación y nutrición³.

Podemos concluir que la intensidad, el voltaje y el ángulo de fase son los tres parámetros eléctricos que el monitor maneja en primera instancia. Con ellos, el monitor calcula la impedancia y sus dos componentes de resistencia y reactancia. Con los parámetros eléctricos y con otros datos del paciente, se calcula el valor de diversos volúmenes y masas corporales con ecuaciones de predicción.

CONCEPTOS CLAVE

1. Los monitores de bioimpedancia manejan una corriente alterna con intensidad fija que es introducida en el organismo por los electrodos distales. Los electrodos proximales son sensores que detectan el voltaje.
2. Con la intensidad y el voltaje se calcula la impedancia. El monitor es capaz de detectar el desfase entre la intensidad y el voltaje, y con este parámetro y con la impedancia obtiene los valores de la resistencia y la reactancia.
3. Con los parámetros bioeléctricos el monitor calcula el valor de los diferentes compartimentos corporales mediante ecuaciones de predicción que son diferentes para cada monitor.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés potenciales relacionados con los contenidos de este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. López-Gómez JM. Evolución y aplicaciones de la bioimpedancia en el manejo de la enfermedad renal crónica. *Nefrología* 2011;31:630-4.
2. Cigarrán Guldrís S. Aplicaciones futuras de la bioimpedancia vectorial (BIVA) en nefrología. *Nefrología* 2011;31:635-43.
3. Piccoli A, Nescolarde LD, Rosell J. Análisis convencional y vectorial de bioimpedancia en la práctica clínica. *Nefrología* 2002;22:228-38.
4. Kotanko P, Levin NW, Zhu F. Current state of bioimpedance technologies in dialysis. *Nephrol Dial Transplant* 2008;23:808-12.
5. Cole KS, Cole RH. Dispersion and absorption in dielectrics. Alternating current characteristics. *J Chem Phys* 1941;9:341-51.
6. Cooper BA, Aslani A, Ryan M, Zhu FYP, Ibels LIS, Allen BJ, et al. Comparing different methods of assessing body composition in end-stage renal failure. *Kidney Int* 2000;58:408-16.
7. Kyle UG, Bosaeus I, De Lorenzo AD, Deurenberg P, Elia M, Gómez JM, et al. Composition of the ESPEN Working Group: Bioelectrical impedance analysis-part I: review of principles and methods. *Clin Nutr* 2004;23:1226-43.
8. Kaysen GA, Zhu F, Sarkar S, Heymsfield SB, Wong J, Kaitwatcharachai Ch, et al. Estimation of total-body and limb muscle mass in hemodialysis patients by using multifrequency bioimpedance spectroscopy. *Am J Clin Nutr* 2005;82:988-95.
9. Moissl UM, Wabel P, Chamney PW, Bosaeus I, Levin NW, Bosy-Westphal A, et al. Body fluid volume determination via body composition spectroscopy in health and disease. *Physiol Meas* 2006;27:921-33.
10. Jaffrin MY, Morel H. Body fluid volumes measurements by impedance: A review of bioimpedance spectroscopy (BIS) and bioimpedance analysis (BIA) methods. *Med Eng Phys* 2008;30:1257-69.
11. Lukaski HC. Methods for the assessment of human body composition: traditional and new. *Am J Clin Nutr* 1987;46:537-56.