

Física para estudiantes de Medicina XXI

Electricidad

Edgar Anibal Cifuentes Anléu
 Facultad de Ciencias Médicas
 Universidad de San Carlos de Guatemala

Enero de 2,006

1 Electricidad

En la tabla periódica de los elementos, Figura 1, podemos observar que en la parte inferior al símbolo correspondiente al elemento se encuentra la **masa atómica** que nos sirve para diferenciar un elemento de otro; además la masa es la respuesta de la materia a una de las Fuerzas fundamentales de la naturaleza: **La Gravedad**.

Existe otro número en la esquina superior del cuadrado que nos sirve para ordenar y también para diferenciar a los elementos, el **número atómico**. Éste está relacionado con la otra propiedad fundamental clásica de la materia que recibe el nombre de **Carga eléctrica**, y es la respuesta de la materia a la segunda de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la **electromagnética**.

Todos los elementos de la Tabla periódica están formados por tres tipos de (componentes) partículas elementales que son el protón, el neutrón y el electrón, cuyas propiedades se dan en la tabla *Partículas elementales*.

Todos los elementos están formados por un núcleo que contiene a los protones y los neutrones y una *nube* formada por electrones alrededor del núcleo. La composición de los primeros elementos de la tabla periódica en términos de estas partículas aparecen a continuación:

1 H 1.00797				2 He 4.0026
3 Li 6.939	4 Be 9.0122	5 B 10.811	6 C 12.01115	10 Ne 20.183

Figure 1:

Elemento	Protones	Neutrones	Electrones
H	1	0	1
He	2	2	2
Li	3	4	3
Be	4	5	4
B	5	6	5
C	6	6	6
Ne	10	10	10

Esto significa que un átomo de Litio está formado por un núcleo con 3 protones y 4 neutrones más 3 electrones que se encuentran alrededor del núcleo.

Nombre	Masa [kg]	Carga [C]
Protón	1.6726×10^{-27}	$+1.6021 \times 10^{-19}$
Neutrón	1.6749×10^{-27}	0
Electrón	9.1094×10^{-31}	-1.6021×10^{-19}

Si nos fijamos sólo en el núcleo podemos notar que el número de protones corresponde al *número atómico* $3 = 3$ y la suma del número de protones más el

número de neutrones es igual a 7, ($3 + 4 = 7 \sim 6.939$) y prácticamente igual a la *masa atómica*.

Ejemplo 1

¿Cuál es la masa del átomo de hidrógeno con tres cifras significativas?

$$m_H = (1.6726 \times 10^{-27} + 9.1094 \times 10^{-31}) \text{ kg}$$

$$m_H = 1.6735 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

y notamos que al usar solo 3 cifras podemos despre-
ciar la masa del electrón; lo que haremos de aquí en
adelante.

Ejemplo 2

Un mol contiene $N_A = 6.0221367 \times 10^{23}$ partículas.
¿Cuál será la masa de un mol de Hidrógeno?

$$m = (6.0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})$$

$$m = 1.0057 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \simeq 1.00 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

tal como nos informan en los cursos de química un
mol de Hidrógeno tiene una masa de un gramo como
lo indica la masa atómica.

De forma semejante, como hacemos con la masa,
podemos expresar la carga en unidades del Sistema
Internacional. En este sistema la unidad de medida
es el Coulomb [C] y de acuerdo a la tabla la carga del
núcleo de un átomo de hidrógeno es $e = +1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$. Por supuesto la carga de un mol de H es cero
porque tiene el mismo número de cargas positivas que
de cargas negativas.

Ejemplo 3

¿Cuál es la carga del núcleo del átomo de carbono?

El número atómico del carbono es 6, entonces

$$q = 6 \times 1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$q = 9.6126 \times 10^{-19} \text{ C}$$

2 Carga y Fuerza Eléctrica

Entre dos partículas cargadas siempre se ejerce una
fuerza eléctrica que tiene las siguientes característi-
cas:

- Es proporcional al tamaño del producto de las
cargas, es decir que mientras más carga más
fuerza.
- Es de atracción, si las cargas son de signo op-
uesto
- Es de repulsión, si las cargas son de igual signo
- Es inversamente proporcional a la distancia de
separación de las cargas. En otras palabras
mientras más se alejen las cargas, unas de otras,
la fuerza va disminuyendo.

Esto quiere decir que los protones que se encuen-
tran en el interior del núcleo se repelen unos a otros
sin embargo no se separan entre sí porque existe
otra fuerza fundamental, **la fuerza nuclear**, que los
mantiene dentro del núcleo. Por el contrario los elec-
trones se repelen entre sí y tratan de mantenerse lo
mas lejos posible unos de otros, pero al mismo tiempo
se sienten atraídos hacia el núcleo porque éste tiene
la carga del signo opuesto; pero en lugar de *caer* di-
rectamente hacia el núcleo se quedan dando vueltas
alrededor de éste, de manera semejante a como los
planetas giran alrededor del sol debido a la fuerza de
atracción gravitacional.

Un átomo, según se ve en la tabla 2, tiene la misma
cantidad de protones que de electrones por los que la
suma total de sus cargas es cero; por lo tanto no
existe fuerza de atracción entre un átomo y otro¹. Si
ionizamos los átomos la situación cambia.

2.1 Iones

Ionizar un átomo significa quitarle o agregarle elec-
trones, si le quitamos un electrón a un átomo quedará
con una carga positiva demás (ión positivo) y si le
agregamos un electrón quedará con una carga neg-
ativa demás (ión negativo). Cuando tenemos un
ión positivo y otro negativo entonces si se ejerce
una fuerza de atracción entre ellos de tal forma que
podemos formar compuestos, etc.

¹En realidad existe una pequeña fuerza de atracción lla-
mada Fuerza de Van der Waals que solo puede notarse en los
Gases ideales, pero por ser tan pequeña, aquí la despreciamos.

Los electrones se distribuyen por capas alrededor del núcleo habiendo 2 en la primera, 8 en las tres sucesivas capas, dos en la siguiente, 8 en la siguiente y luego sigue.

$$2 + 8 + 8 + 8 + 2 + 8 + \dots$$

El átomo de Cloro (Número atómico $N = 17$) tiene entonces

$$2 + 8 + 7 = 17$$

siete electrones en su última capa por lo que le falta uno para completarla, en tanto que el átomo de Sodio ($N = 11$) tiene

$$2 + 8 + 1 = 11$$

solamente un electrón en su última capa. Es más favorable energéticamente que un átomo tenga llena o casi llena su última capa por lo que cuando juntamos a los dos átomos anteriores podemos decir que el Cloro roba un electrón al Sodio o bien que el Sodio cede un electrón al Cloro. Como consecuencia de ello el Cloro se queda con 18 electrones y el Sodio con 10, entonces la carga neta de ambos será

$$\begin{aligned} q_{Cl} &= +17e - 18e = -1e \\ q_{Na} &= +11e - 10e = +1e \end{aligned}$$

por lo que el cloro quedara con carga neta negativa y el sodio con carga neta positiva y ahora los llamamos respectivamente Ion negativo y Ion positivo. Y ahora al tener cada uno de ellos carga neta de distinto signo entonces se atraeran y podrán formar cristales de sal.

Ejemplo 4

Un cristal está formado por átomos de Potasio y de Cloro. ¿Qué carga tiene cada uno de los iones dentro del cristal?

Encontramos en la tabla que $N_K = 19$ y que $N_{Br} = 17$ respectivamente

$$\begin{aligned} q_K &= 2 + 8 + 8 + 1 = 19 \\ q_{Cl} &= 2 + 8 + 7 = 17 \end{aligned}$$

entonces el Potasio pierde su último electrón y se vuelve un ion K^+ y el Bromo gana un electrón para completar su última capa y se vuelve un ion Cl^-

Ejemplo 5

¿Un átomo de Calcio tiene la tendencia a volverse Ca^+ o Ca^- ?

El número atómico del Calcio es 20 entonces

$$q_{Ca} = 2 + 8 + 8 + 2 = 20$$

por lo tanto es más fácil que pierda los dos que tiene a que gane los 6 que le faltan por lo tanto será Ca^+ .

3 Conductores y aislantes

Los electrones pueden viajar de un átomo a otro con facilidad o con dificultad, cuando se da el primer caso denominamos a los materiales **conductores** y en el segundo **aislantes**. Por lo tanto los átomos que suelen ceder electrones pueden transportarlos de unos a otros con cierta facilidad, entonces tenderán a ser conductores, en tanto que aquellos que tienden a atrapar los electrones tienen más dificultad para transportarlos, entonces tenderán a ser aislantes.

Estudiar el comportamiento de éstos desde el punto de vista de los electrones individuales es muy complicado por lo que a partir de ahora lo haremos de una manera más simple.

Ejemplo 6

¿Es el potasio un buen conductor?

En el ejemplo 4 obtuvimos que $q_K = 2 + 8 + 8 + 1$ lo que significa que cede fácilmente su último electrón lo que significa que es un buen conductor?

3.1 Corriente eléctrica:

Si se cuenta el número de electrones que pasan a través de un alambre, un conductor, por unidad de tiempo se tiene la corriente eléctrica

$$I = \frac{ne}{\Delta t} = \frac{q}{\Delta t} = \frac{C}{s} = A$$

la unidad de medida de la corriente se llama Ampere (A). La corriente es una cantidad física muy útil porque es posible medirla con un instrumento llamado Amperímetro.

3.2 Diferencia de Potencial

Un cuerpo que se encuentra a una altura h puede moverse por sí solo desde el lugar donde tiene mayor energía potencial gravitacional ($U_g = mgh$) hasta donde ya no la tiene ($U_g = 0$). Esta energía potencial está relacionada, como puede notarse, con la masa de la partícula y la fuerza de la gravedad. De la misma manera también existe una energía potencial eléctrica que está relacionada con la carga y que provoca que ésta se mueva de la región de mayor energía potencial a la región de menor energía potencial. La energía potencial eléctrica esta dada por²:

$$U_E = qV$$

dónde q es la carga medida en Coulombs y V recibe el nombre de **Potencial Eléctrico** que se mide en $\frac{\text{Joules}}{\text{Coulomb}}$ cociente al que se le asigna el nombre de **Volt** (V) y como en el caso del ampere existe un aparato de medición que nos puede registrar el valor de la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos $\Delta V = V_f - V_i$. Esta diferencia de potencial puede ser positiva o negativa dependiendo de si el punto final tiene más potencial que el punto inicial. Esto es fácil de comprender si observamos una batería comercial, éstas tienen dos extremos uno con un signo (+) y otro con un signo (-), si medimos $\Delta V = V_+ - V_-$ obtendremos una diferencia de $+1.5 V$, pero si medimos $\Delta V = V_- - V_+$ obtendremos $-1.5 V$. En la batería de un automóvil esta diferencia es de $12 V$.

3.3 La Ley de Ohm

En forma experimental se ha encontrado una relación entre las dos cantidades anteriores ΔV e I que es denominada la Ley de Ohm:

$$\Delta V = I \times R$$

dónde R es una constante, mientras no haya variaciones muy grandes de ΔV ó I . La constante R recibe el nombre de **Resistencia** y se mide en Volts×Ampere que ha recibido el nombre de Ohm

²Cuando el mínimo de energía potencial eléctrica se fija en $U_E = 0$.

y se denota con la letra griega omega (Ω). La resistencia depende del material (tipo, longitud y área seccional) que se encuentre entre el punto inicial y el punto final. La resistencia puede ser calculada a través de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

donde ρ es la resistividad, l es la longitud y A es el área. La resistividad de algunos materiales se da en la tabla:

Conductores	$\rho(\Omega m)$
Aluminio	2.82×10^{-8}
Cobre	1.70×10^{-8}
Hierro	10×10^{-8}
Nicrome	100×10^{-8}
Platino	10×10^{-8}
Plata	1.59×10^{-8}
Tungsteno	5.6×10^{-8}

Semiconductores	$\rho(\Omega - m)$
Silicio	2.5×10^2
Germanio	4.6×10^{-1}
Carbón	3.6×10^{-5}

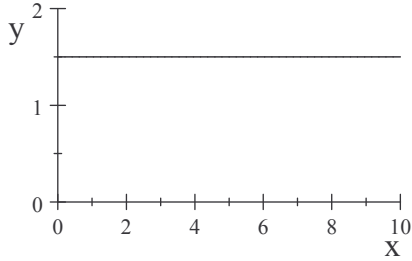
Aislantes	$\rho(\Omega - m)$
Vidrio	10^{12}
Caucho	10^{15}
Madera	10^{10}

3.4 Corriente Alterna

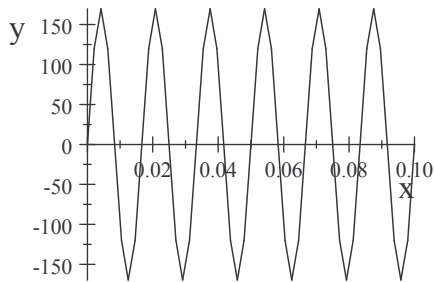
La diferencia de potencial también llamada Voltaje puede ser constante en el tiempo como en el caso de la Batería de $1.5 V$ o variable como en el caso de los tomacorrientes que hay en casa de $120 V^3$, En las Figuras 1 y 2

pueden verse los dos casos

³El voltaje efectivo, es decir el que los aparatos "sienten", es 120 aunque el máximo y el mínimo son $\pm 169.7 V$.



2. Voltaje Directo



3. Voltaje Alterno

Debido a la ley de Ohm $\Delta V = R \times I$ como R es constante entonces si ΔV varía también lo hará i y en este caso a ésta se le llama corriente alterna. Note en la figura 3 que el voltaje cambió 6 veces en el tiempo de 0.1 seg. eso significa que cambiará 60 veces en un segundo y esa es la frecuencia $f = 60$ Hz. En todas las ciudades se usa corriente alterna porque es éste el tipo de corriente que es proporcionado por las compañías de electricidad.

3.5 Potencia

La potencia eléctrica es igual a la energía eléctrica por unidad de tiempo que se ha usado para realizar un trabajo y es igual.

$$P = \Delta V \times I = E \times t$$

y según la ley de Ohm también podemos escribirla de la las siguientes formas:

$$P = R \times I^2 = \frac{\Delta V^2}{R}$$

como podemos comprobar las dimensionales de P son las habituales

$$V A = \frac{J}{C} \times \frac{C}{s} = W$$

el tipo de unidad que se usa para cobrarnos la energía es el Kilowatt-hora que corresponde a

$$(1 \text{ kWh}) \left(\frac{1000 \text{ W}}{\text{kWh}} \right) \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

Se puede calcular el precio a pagar por la energía eléctrica mediante la siguiente ecuación:

$$Pago = Consumo \times Tarifa$$

el consumo está dado en kWh y la tarifa en $\frac{\text{Quetzales}}{\text{kWh}}$ de tal forma que el pago está en Quetzales. El consumo típico de algunos aparatos electrodomésticos a (120 V) está en la siguiente tabla:

Aparato	Potencia
Calentador	4.5 kW
Televisor	0.1 kW
Estufa	4.5 kW
Refrigerador	0.5 kW
Bombilla	0.1 kW
Tostador	0.95 kW
Secadora de pelo	1.2 kW

Ejemplo

Una bombilla de 100 Watts (0.1kW) que se mantenga encendida durante 4 horas diarias durante un mes habrá estado encendida un tiempo de $4 \times 30 = 120$ h, por lo tanto si el costo de la energía eléctrica es de Q $1.348 \frac{Q}{\text{kWh}}$, entonces:

$$\begin{aligned} Pago &= (120 \text{ h} \times 0.1 \text{ kW}) \times 1.348 \frac{Q}{\text{kWh}} \\ &= Q 16.18 \end{aligned}$$

3.6 Circuitos en serie y en paralelo

Un circuito es la unión de una o varias fuentes con una o varias resistencias por medio de conectores. El

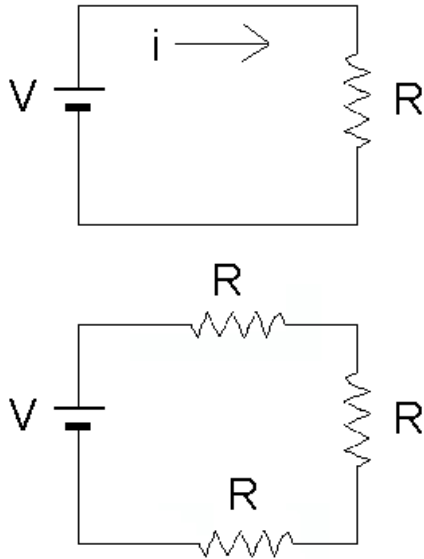


Figure 2:

ejemplo más sencillo de un circuito es el que está en la Figura 2a.

Un circuito un poco más complejo es el circuito en serie, el cual se encuentra representado en la Figura 2b.

En este circuito puede notarse que la corriente que pasa por cada una de las resistencias es la misma; ésta es la característica distintiva de los circuitos en serie. Las “series ” de los árboles de navidad reciben ese nombre debido a que están conectadas de esta forma y que la corriente que pasa por cada una de las resistencias (foquitos) es la misma; lo podemos comprobar con el hecho de que basta que se rompa (queme) una de ellas para que no haya corriente a través de las demás. Este circuito puede resolverse fácilmente sustituyendo las tres resistencias por lo que llamaremos la resistencia equivalente mediante la siguiente ecuación:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

entonces la Ley de Ohm para este circuito da:

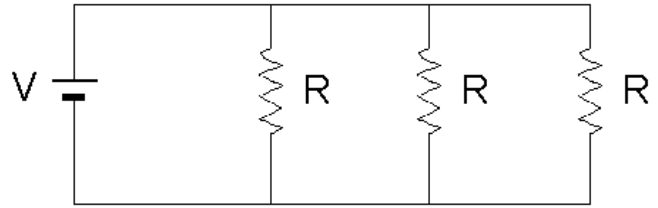


Figure 3:

$$\Delta V = I \times R_{eq}$$

El otro tipo de circuito es el circuito en paralelo en el cual todas las resistencias se encuentran con sus extremos sometidos a la misma diferencia de potencial como lo muestra la figura 3.

En este caso también podemos sustituir las tres o más resistencias por una equivalente que está dada por:

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1}$$

puede notarse en la figura que la corriente que pasa por cada resistencia es diferente. Este tipo de conexión es el que hay entre los aparatos de una casa, por eso es que cada uno de ellos puede estar conectado independientemente.

Ejemplo

Si colocamos una a continuación de otra tres resistencias de $3.3 \times 10^3 \Omega$ ¿cuál será la resistencia total?

$$R_{eq} = 3.3 \times 10^3 \Omega + 3.3 \times 10^3 \Omega + 3.3 \times 10^3 \Omega$$

$$R_{eq} = 3 \times (3.3 \times 10^3 \Omega)$$

$$R_{eq} = 9900 \Omega$$

Ejemplo

Las resistencias $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 8 \Omega$ y $R_3 = 6 \Omega$ están conectadas en paralelo, ¿Cuánto vale la resistencia equivalente?

$$\begin{aligned} R_{eq} &= \left(\frac{1}{5\Omega} + \frac{1}{8\Omega} + \frac{1}{6\Omega} \right)^{-1} \\ &= \frac{120}{59} \Omega = 2.0339 \Omega \end{aligned}$$

Ejemplo

Si las resistencias del problema anterior las conectamos en serie ¿Cuánto vale la resistencia equivalente?

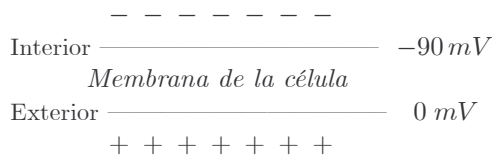
$$\begin{aligned} R_{eq} &= 5\ \Omega + 8\ \Omega + 6\ \Omega \\ &= 19\ \Omega \end{aligned}$$

4 Bioelectricidad

La membrana de una célula viva almacena energía eléctrica manteniendo el interior de la membrana a un pequeño potencial negativo con respecto al exterior. Este potencial de reposo es mantenido básicamente controlando las diferencias de concentración de los iones de potasio, de sodio o de cloro. Este potencial de reposo o equilibrio recibe el nombre de *Potencial de Nernst* y es igual a:

$$V = -61.4 \log \left(\frac{c_i}{c_e} \right) \text{ mV}$$

donde c_i y c_e representan la concentración de iones en el interior y en el exterior de la célula respectivamente.



Estas membranas normalmente resisten una fuerte diferencia de potencial electroquímico que tiende a empujar el Na^+ hacia la célula, pero un estímulo apropiado convierte a la membrana permeable respecto del sodio. El flujo de sodio que entra cuando la membrana se encuentra permeable causa un cambio eléctrico conocido como depolarización y el restablecimiento del potencial de *Nernst* se conoce como repolarización. El proceso completo toma unos pocos milisegundos y produce un pulso eléctrico conocido como *Potencial de acción* de la célula. El potencial de acción de las células nerviosas y otros tipos de

células son básicos para los sistemas de control y comunicación del cuerpo. Estos potenciales de acción se propagan con gran eficiencia a lo largo de las redes nerviosas, pero también se propagan a través de los tejidos ordinarios. La medida de los potenciales de acción del corazón que se propagan por la piel (Electrocardiogramas) es de gran ayuda en los diagnósticos. Los electroencefalogramas, los electromiogramas y otras medidas de este tipo han resultado también de gran ayuda a la medicina. El marcapasos es uno de los aparatos que se han logrado construir mediante la comprensión de la importancia de las señales eléctricas en el cuerpo humano pues un pequeño impulso producido artificialmente por una batería sustituye al impulso que en forma natural el corazón ya no puede producir en forma regular.

Ejemplo

Si la membrana de las células fuera permeable a los iones de K^+ cuyas concentraciones intra y extracelular son respectivamente $0.011 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ y $0.148 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ ¿Cuál es el potencial de *Nernst* debido a estos iones?

$$\begin{aligned} V &= -61.4 \log \left(\frac{0.011}{0.148} \right) \text{ mV} \\ &= 69.313 \text{ mV} \end{aligned}$$

Ejemplo

Si el potencial externo de una célula permeable al Na^+ es de $V = 54 \text{ mV}$ y la concentración intracelular es de $0.06 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ ¿cuánto será la concentración intracelular?

$$\begin{aligned} 54 \text{ mV} &= -61.4 \log_{10} \left(\frac{0.16}{x} \right) \text{ mV} \\ -0.87948 &= \log \left(\frac{0.16}{x} \right) \\ 10^{-0.87948} &= \frac{0.16}{x} \\ x &= \frac{0.16}{10^{-0.87948}} \\ x &= 1.2123 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \end{aligned}$$

Ejemplo

La concentración intracelular de K^+ es de $0.141 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$. ¿Cuál debe ser la concentración extracelular si el potencial de *Nernst* debido al K^+ es 85 mV ?

$$\begin{aligned}
85 \text{ mV} &= -61.4 \log\left(\frac{x}{0.141}\right) \text{ mV} \\
-1.3844 &= \log\left(\frac{x}{0.141}\right) \\
10^{-1.3844} &= \frac{x}{0.141} \\
x &= (4.1267 \times 10^{-2})(0.141) \\
x &= 5.8186 \times 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{l}}
\end{aligned}$$

Si los iones en movimiento son negativos como el cloro Cl^- entonces la ley cambia de signo

$$V = +61.4 \log\left(\frac{c_i}{c_e}\right) \text{ mV}$$

Ejemplo

Si la membrana de las células fuera permeable a los iones de Cl^- cuyas concentraciones intra y extracelular son respectivamente $0.09 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ y $0.13 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$ ¿Cuál es el potencial de *Nernst* debido a estos iones?

$$\begin{aligned}
V &= 61.4 \log_{10}\left(\frac{0.09}{0.13}\right) \text{ mV} \\
&= -9.8056 \text{ mV}
\end{aligned}$$

EJERCICIOS

1. ¿Cuál es el número de neutrones que tiene el átomo de germanio? (41)
2. ¿Qué precio deberá pagar por mantener encendida durante 3 horas diarias una estufa eléctrica? (Q. 222.75)
3. ¿Cuál es la resistencia eléctrica de la estufa? (3.2 Ω)
4. ¿Qué corriente pasa a través del tostador de pan? (7.92 A)
5. ¿Cuánto cuesta mantener en funcionamiento 5 bombillas de 100 Watts durante $3\frac{1}{2}$ horas diarias, una estufa durante 2 horas diarias, un televisor 4 horas diarias y el calentador de agua durante 2 horas diarias, en el período de un mes? (Q. 338.52)

6. ¿Cómo se logra que el potencial de acción producido por el corazón puedan llegar a la superficie de la piel para producir la señal de los ECG?