

# Modelización de la actividad neuroeléctrica

---

Modeling of the neuroelectric activity

Laura Yllera Rancaño

Septiembre de 2017

Trabajo de Fin de Grado tutorizado por H. F. Cruz Valentín

# INDICE

<b>Resumen</b> .....	2
<b>Abstract</b> .....	2
<b>Introducción</b> .....	2
<b>Objetivos</b> .....	4
<b>Contexto teórico</b> .....	4
• <b>La neurona</b> .....	4
• <b>Potencial de reposo</b> .....	6
• <b>Sumación espacial y temporal</b> .....	8
<b>Modelización</b> .....	9
<b>Propiedades electro pasivas de la membrana y analogías electrónicas</b> .....	9
• <b>Resistencia</b> .....	9
• <b>Capacitancia</b> .....	12
• <b>Circuito RC</b> .....	12
<b>Circuito equivalente</b> .....	15
<b>Parte experimental</b> .....	17
<b>Resultados</b> .....	25
<b>Discusión</b> .....	29
<b>Conclusiones</b> .....	31
<b>Conclusions</b> .....	31
<b>Bibliografía</b> .....	32

## **Resumen**

El ser humano está dotado de mecanismos nerviosos, a través de los cuales integra información sobre procesos internos y externos, la analiza y en función de esto ejecuta las acciones que promueven la supervivencia del organismo. La información se transmite en el cuerpo humano mediante pulsos eléctricos a través de las neuronas. Mediante este trabajo llegaremos a un modelo de circuito eléctrico equivalente que nos permitirá describir la dinámica de voltaje a través de la membrana en un régimen pasivo, creando una analogía entre un fenómeno biológico y un modelo electrofísico.

Palabras clave: **Potencial de reposo, Circuito equivalente, Circuito RC, Ley de Ohm**

## **Abstract**

The human is endowed with nervous mechanisms, through which he integrates information on internal and external processes, analyzes it and, in function of this, executes the actions that promote the survival of the organism. The information is transmitted in the human body by electrical pulses through the neurons. Through this work we will arrive at an equivalent electric circuit model that will allow us to describe the voltage dynamics across the membrane in a passive regime, creating an analogy between a biological phenomenon and an electrophysical model.

Key words: **Resting potential, Equivalent circuit, RC circuit, Ohm law**

## **Introducción**

La actividad del sistema nervioso se origina cuando receptores de la zona distal de la neurona son estimulados. Estas señales viajan por los nervios periféricos hacia la médula espinal, donde son transmitidos al encéfalo, a modo de mensajes, donde se procesan e integran con información almacenada en varios conjuntos neuronales, dando lugar a la señal que genera una respuesta eferente motora, como puede ser la contracción de músculo estriado, cardiaco o liso, y la secreción de glándulas endocrinas o exocrinas.

La información se transmite en el cuerpo humano mediante pulsos eléctricos en fibras nerviosas llamadas axones. El pulso eléctrico en la membrana para la comunicación se da mediante los llamados potenciales de acción, respuesta transitoria de tipo “todo o nada” que no disminuye en magnitud con la distancia. Los potenciales de acción crean una onda de excitación a lo largo de la membrana para la comunicación y el transporte del impulso por cambios conformacionales de proteínas estructurales de la membrana plasmática, los canales iónicos, que provocan variaciones en la permeabilidad selectiva de la membrana a los iones.

Sin embargo, una propiedad importante de las células excitables es que presentan un umbral de excitación que determina las respuestas activas dadas por los potenciales de acción, solo generándose cuando éstas alcanzan un valor crítico, un umbral, mientras que para valores subumbrales de potencial de membrana hablaremos de respuestas pasivas, sin implicación de canales iónicos o cambio de permeabilidad.

Las respuestas pasivas se dan como respuesta a estímulos débiles, sin cambios significativos en el potencial de membrana más allá de unos pocos milímetros a partir de ese punto, al contrario de los potenciales de acción.

La propagación pasiva de señales eléctricas en la membrana celular es de gran importancia funcional en las membranas, ya que determinan la extensión espacial de la propagación (sumación espacial) y el curso temporal de las respuestas subumbrales (sumación temporal), influyendo en la probabilidad de que se de o no un potencial de acción.

La descripción del comportamiento de la membrana celular para respuestas pasivas se puede simplificar usando modelos eléctricos que imitan su comportamiento, los llamados circuitos equivalentes. Para la respuesta activa de la membrana no es posible hacer un circuito equivalente, ya que la respuesta pasiva se rige por las caídas de voltaje con respecto al movimiento de la corriente y el potencial de acción no decrece en magnitud.

En este trabajo creamos un circuito equivalente para la membrana en reposo y en respuesta a estímulos débiles, pudiendo operar con elementos físicamente bien definidos, pero no hondamos en el impulso eléctrico producido por el las respuestas activas.

## **Objetivos**

- Entender la actividad eléctrico pasiva de la membrana en reposo y a valores subumbrales
- Relacionar un proceso biológico como uno electrofísico mediante la modelización de las propiedades pasivas de la membrana como un circuito eléctrico RC
- Comprobar la caída de voltaje descrito por la Ley de Ohm
- Demostrar la diferencia de potencial con respecto al tiempo en condensadores en circuitos RC
- Crear un modelo experimental mediante un circuito eléctrico RC donde se reflejan las propiedades pasivas de la membrana del circuito equivalente

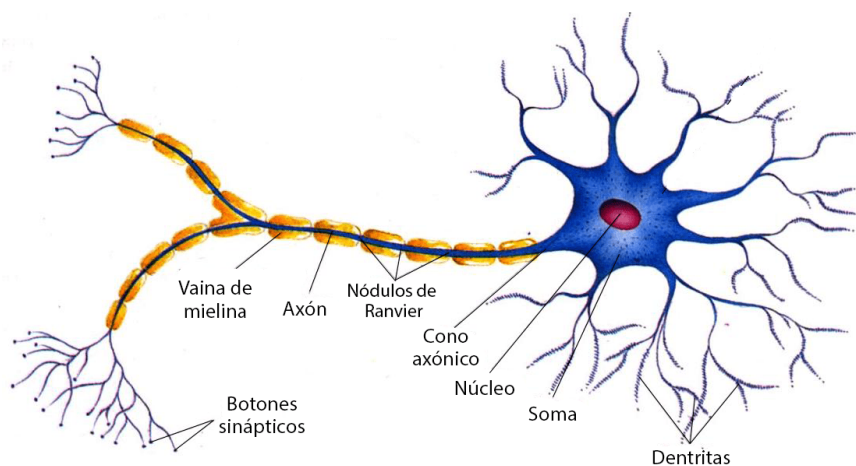
## **Contexto teórico**

Para comprender el comportamiento de la neurona en sus propiedades pasivas con la intención de crear un circuito equivalente a esta es importante comprender diferentes bases biológicas de la neurona, así como su estructura, diferencias de las concentraciones iónicas, potenciales en el interior y exterior del axón, potencial de reposo y los fenómenos de sumación espacial y temporal.

- **La neurona**

La neurona es la unidad fundamental del sistema nervioso encargada de recibir, integrar, conducir y transmitir las diferentes señales a otras células.

Presenta un cuerpo central, cuerpo celular, o soma, donde se realizan todas las funciones metabólicas, que contiene el núcleo y la maquinaria de síntesis proteica de la célula, así como la mayoría de los orgánulos. De este cuerpo central o soma irradian unas protuberancias llamadas dendritas, así como una estructura larga y fina denominada axón. Las dendritas son las encargadas de percibir las señales entrantes, convirtiendo éstas en una señal eléctrica en forma de cambio de potencial de la membrana y transmitiendo la señal al cuerpo celular. Tanto el cuerpo celular como las dendritas contienen una membrana plasmática con receptores, participando en la detección de señales. Después nos encontramos con el cono axónico, encargado en la integración de señales, que determina si se da o no un potencial de acción dependiendo si se traspasa un umbral en este punto dando lugar a un pulso nervioso. La cuarta parte la integra el axón, especializado en la conducción de señales, pudiendo estar recubierto por una vaina de mielina, ayudando a la amplificación de la conducción de la señal, o desnudo, ambos acabando en el denominado terminal axónico encargado de la transmisión de señales a las células diana; en este punto la señal eléctrica se traduce en señal química en forma de neurotransmisor, dándose un contacto funcional con otra neurona en puntos denominados sinapsis.



**Imagen 1. Estructura de una neurona mielinizada motora de vertebrado.**

El proceso global de la señalización en la membrana, por tanto, implica una recepción de la señal entrante, la conversión de esa señal en un cambio de potencial de membrana, el disparo de los potenciales de acción que conducen

la señal a grandes distancias y la transmisión de la señal a la célula diana en forma de neurotransmisor.

Nosotros en nuestro trabajo nos centraremos en aquellos estímulos que no llegan al cambiar el potencial de membrana como para disparar el potencial de acción, nos centramos en las respuestas pasivas.

- **Potencial de reposo**

En todas las células en general y en particular las excitables, existe una diferencia de potencial transmembrana más o menos constante, el potencial de reposo, determinado por la distribución asimétrica de los distintos iones que da lugar a una diferencia de potencial en la membrana. Esta distribución asimétrica de los iones se debe a la existencia de gradientes de concentración iónica a ambos lados de la membrana y a diferencias de la permeabilidad relativa de la membrana celular a las distintas especies iónicas.

**Tabla 1. Diferencias de concentraciones y potenciales entre el interior ( $c_i$ ) y exterior del axón ( $c_o$ )**

<i>Potencial (mV)</i>	<i>Fluido exterior del axón <math>c_o</math></i>		<i>Fluido interior del axón <math>c_i</math></i>	
	$V_o = 0$	TOTAL	$V_i = -70$	TOTAL
<i>Concentración moles/cm<sup>3</sup></i>				
$Na^+$	145		12	
$K^+$	4	149	155	167
$Cl^-$	120		4	
<i>(otros)<sup>-</sup></i>	29	149	163	167

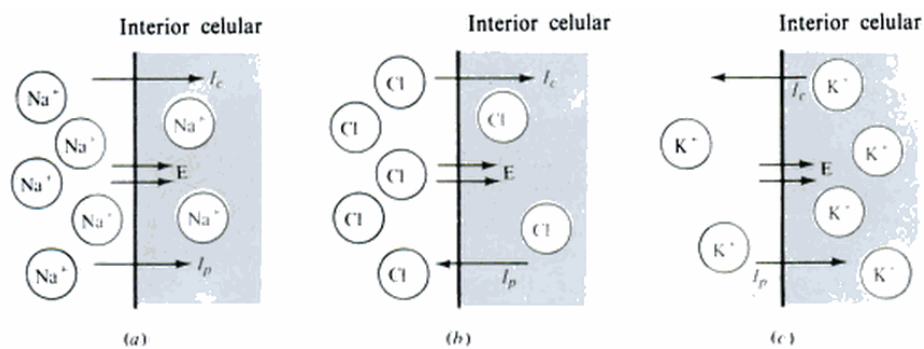
En la tabla 1 se da una lista de las concentraciones de varios iones en el interior  $c_i$  y en el exterior,  $c_o$ , de un axón en reposo. De los iones que pueden atravesar la membrana, el sodio ( $Na^+$ ) y el cloro ( $Cl^-$ ) son mucho más numerosos en el exterior, mientras que el potasio ( $K^+$ ) tiene una mayor concentración en el interior.

Se observa que hay el mismo número de iones positivos que negativos en el interior y exterior de la célula. Sin embargo, hay una diferencia de potencial a través de la membrana, de modo que ha de haber cargas netas  $\pm Q$  a cada lado de la membrana. Existe un exceso de iones negativos sobre iones positivos en el interior de la célula, y un número igual de iones positivos de exceso en el fluido intersticial. Estos iones de exceso forman finas capas de carga a cada

lado de la membrana, dando lugar al potencial de membrana. Luego veremos que estas propiedades de la membrana la hacen poder modelizarla como un condensador en un circuito eléctrico.

La distribución asimétrica de los iones en la membrana se da principalmente por la bomba  $\text{Na}^+\text{-K}^+$ , un mecanismo que, mediante ATP metabólico, bombea la entrada de 2  $\text{Na}^+$  por cada 3  $\text{K}^+$  expulsados, de modo que ejerce una fuerza en contra de las fuerzas eléctricas y los efectos de concentración para mantener desequilibradas las concentraciones de los diferentes iones en la membrana y mantener el potencial de reposo.

El potencial de membrana en reposo implica un flujo pasivo de iones  $\text{Na}^+$  hacia el interior del axón y de iones  $\text{K}^+$  fuera del axón debido a la difusión y a las fuerzas eléctricas. Los iones se mueven a través de la membrana según un gradiente de concentración y un gradiente iónico de la manera que se observa en la imagen 2, el cloro no tiene movimiento neto, ya que la diferencia de las concentraciones se ve exactamente contrarrestado por la diferencia de potencia de reposo.



**Imagen 2. Corrientes iónicas  $I_c$  debidas a las diferencias de concentración e  $I_p$  debidas a las diferencias de potencial**

Cuando se llega al equilibrio, el flujo neto de iones es cero, y hablamos de que llego a un potencial de equilibrio para el ion. Considerando el potencial de equilibrio para cada ion por la ecuación de Nernst:

$$E_{i\acute{o}n} = \frac{RT}{zF} \times \ln\left(\frac{[ion]_o}{[ion]_i}\right)$$



El potencial de reposo de la membrana puede ser representado por un ajuste en esta ecuación, la ecuación de Goldman:

$$E_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{P_K [K^+]_o + P_{Na} [Na^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i}{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o}$$

Donde  $E_m$  representa el potencial de membrana,  $R$  la constante general de los gases,  $T$  la temperatura en grados kelvin,  $F$  la constante de Faraday,  $[ion]_o$  y  $[ion]_i$  las concentraciones de ese ion fuera y dentro de la célula respectivamente, y  $P_K, P_{Na}, P_{Cl}$  son las permeabilidades de la membrana a esos iones.

Por convenio, el potencial eléctrico  $V_o$  del flujo en el exterior de la célula se toma igual a cero. El potencial en el interior del axón resulta ser 70mV menor, por lo cual  $V_i = -70mV$ , esto se debe a que el  $K^+$  es mucho más permeable que el  $Na^+$ , por lo que el potencial de membrana en reposo se encuentra más cercano al potencial de equilibrio para el  $K^+$ , que es alrededor de -90mV, que al del  $Na^+$ , que es alrededor de +50mV

Un aumento de la permeabilidad selectiva de la membrana a los iones y su distribución asimétrica dará lugar a corrientes iónicas que median las modificaciones del potencial de membrana.

- **Sumación espacial y temporal**

Cuando se da respuesta a estímulos débiles, menores de un umbral crítico, que en humanos suele ser alrededor de -55mV (con respecto a los -70mV del potencial de reposo), el potencial de membrana cambia desde su estado de reposo a unos pocos mV por abajo o por arriba sin producir cambios importantes en la membrana.

En cambio, existen dos fenómenos de la membrana, sumación espacial y sumación temporal, que pueden dar lugar a sumatorio de diferentes cambios de potencial mínimos creando uno que sobrepase el potencial umbral, y por

tanto dar lugar al potencial de acción con cambios conformacionales en los canales iónicos voltaje dependientes (apertura).

Las dendritas y el cuerpo celular de la membrana presentan receptores en muchos sitios de la membrana, por lo que se pueden generar muchos estímulos débiles en diferentes sitios de la membrana a la vez, éstos viajan en distancias cortas desde las dendritas al cuerpo celular, pudiendo interactuar entre sí para influir en la carga neta del potencial de membrana en el cono axónico, dando lugar en última instancia al potencial de acción que producirá el impulso eléctrico a lo largo del axón de la neurona. A este fenómeno se le conoce como sumación espacial.

También se puede dar el caso de que estímulos débiles se den en dos tiempos ligeramente distintos y que interacciones entre ellos para dar lugar al potencial de acción, a este fenómeno se le conoce como sumación temporal y es debido a que la membrana actúa como un condensador, propiedad pasiva de la membrana que se explicará más adelante.

## **Modelización**

### ***Propiedades electro pasivas de la membrana y analogías electrónicas***

En funcionamiento fisiológico neuronal depende de las características de su membrana celular, considerando que las células neuronales pueden conducir señales eléctricas, las membranas celulares poseen propiedades eléctricas pasivas tales como la capacitancia y la resistencia.

La diferencia de voltaje entre dos puntos es una medida de la energía disponible, por lo que la diferencia de potencial en la membrana se puede modelar como una pila eléctrica.

- **Resistencia**

La resistencia es una medida de la fuerza que se opone al flujo de la corriente, al contrario que la diferencia de voltaje que es una medida de la energía disponible para mover la carga de un punto a otro.

Dentro de las propiedades pasivas de la membrana podemos encontrarnos dos tipos de resistencias, una resistencia debido a canales iónicos permanentemente abiertos, llamados canales de fuga (no voltaje dependientes), que corresponderían a la resistencia de pérdida de la membrana  $R'$  ( $R_m$  en la imagen); y resistencia debido a la longitud del axón,  $R$ , que depende de la resistividad dada por el líquido conductor intracelular ( $\rho_a$ ), el axoplasma.

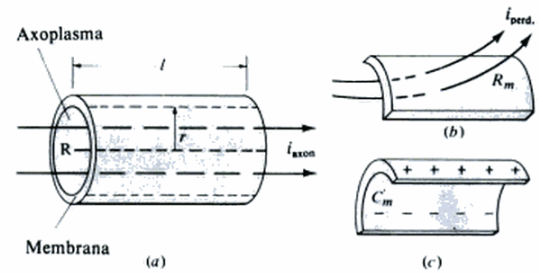


Imagen 3. Resistencias en la membrana

Como ya se comentó antes, para estímulos débiles, el cambio de potencial por la membrana disminuye con la distancia a lo largo del axón. Este cambio de potencial de la membrana se mide como la caída de voltaje a través de la membrana y es una consecuencia directa de la resistencia del material. La caída de voltaje, junto con la intensidad y la resistencia se pueden correlacionar mediante la Ley de Ohm, tal que:

$$V = IR$$

Donde  $I$  es la corriente en amperios (A),  $V$  es la caída de voltaje a través del circuito en voltios (V) y  $R$  es la resistencia del circuito en ohmios ( $\Omega$ )

Con esta fórmula podemos deducir que cuanto mayor sea la resistencia en el circuito, resistencia longitudinal en el citoplasma del axón  $R$ , más rápidamente caerá el voltaje con la distancia. Debido a los canales de fuga de los diferentes iones, se reduce la corriente que fluye por el axón, que dependerá de la resistencia de la membrana,  $R'$ , y a su vez del área de la membrana, ya que a una mayor área de membrana celular tendrá una mayor cantidad de canales iónicos pasivos.

Por tanto, cuando la resistencia en la membrana es alta, el flujo a través de ella será pequeño, y se perderán menos cargas. A más velocidad habrá menos resistencia y más pérdidas con la distancia.

Hay una cierta distancia,  $\lambda$ , a la cual las resistencias  $R$  y  $R'$  son iguales ya que la resistencia del axoplasma,  $\rho_a$ , es proporcional a la longitud  $l$  del segmento del axón, y la resistencia de pérdida  $R'$  es proporcional a  $1/l$ . Suponiendo que los axones son circulares al igual que un cable, la resistencia de un alambre de longitud  $l$ , área de sección transversal  $A = \pi r^2$ , área superficial de la membrana  $2\pi r l$ , resistividad  $\rho_a$  es  $R = \rho_a l / A$ , la resistencia de un axón de una longitud dada para la distancia a la cual se igualan  $R$  y  $R'$ , será:

$$\frac{\rho_a l}{\pi r^2} = \frac{R}{2\pi r \lambda}$$

O lo que es lo mismo

$$\lambda = \sqrt{R/R'}$$

Esta distancia,  $\lambda$ , denominada parámetro espacial o constante de longitud, indica que distancia recorre una corriente para un estímulo débil antes de que la mayor parte de ella se pierda a través de la membrana. A partir de esta ecuación es fácil ver que  $\lambda$  será mayor cuando la resistencia de membrana sea grande y la resistencia intracelular del citoplasma pequeña.

Es posible resolver la ecuación llegando a esta otra:

$$V_x = V_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

Donde  $V_0$  es la despolarización en  $x = 0$  (punto de inyección de corriente),  $e$  es la constante exponencial ( $\pm 2.71828$ ) y  $V_x$  es la diferencia de potencial a una determinada distancia  $x$  de  $x = 0$ . Si  $\lambda$  es 0.05 cm, un valor típico para un axón sin mielina, entonces  $V_x$  disminuye  $V_0 e^{-1} = 0.37 V_0$ , tras 0.05 cm, será 0.135  $V_0$ , y así sucesivamente, por tanto en la membrana neuronal se disminuye en distancia a razón del 37% de la diferencia de potencial inicial  $V_0$ , por lo que se confirma que existe una caída de voltaje a través de la neurona por los estímulos débiles con la distancia (ley de Ohm)

- **Capacitancia**

La membrana se comporta como un condensador eléctrico (se dice que muestra un comportamiento 'capacitivo') debido a que, como se dijo con anterioridad, presenta cargas netas a cada uno de sus lados.

Un condensador está constituido por dos superficies conductoras separadas por un aislante o dieléctrico. En la célula, los conductores son los medios intra y extracelular, y el dieléctrico es la parte lipídica sin canales iónicos de la membrana celular.

Cuando conectamos un condensador a una batería provocamos un movimiento de cargas desde el extremo positivo de la batería hacia una de las placas del condensador, acumulándose y provocando que se desplacen las cargas positivas al otro lado por magnetismo, a esto se le conoce como capacitancia.

Por tanto, la capacitancia ( $C$ ) es la cantidad de carga que se necesita para crear una diferencia de potencial entre las superficies de un condensador. La carga  $q$  que adquieren las placas de un condensador será proporcional al voltaje aplicado  $V$  por la capacitancia, tal que:

$$q = CV$$

La membrana es muy fina, por lo que una pequeña sección parece plana. Esto nos permite usar la fórmula de la capacidad eléctrica para un condensador plano. La capacidad es proporcional al área de las placas,  $A$ . Una longitud  $l$  de membrana tiene un área superficial de  $A = 2\pi rl$ . La carga por unidad de superficie dividida por la diferencia de potencial resultante es la capacidad eléctrica por unidad de área,  $C_m$ , por lo que la capacidad eléctrica de un trozo del axón de longitud  $l$  es:

$$C = C_m(2\pi rl)$$

- **Circuito RC**

Debido a que nos encontramos tanto resistencias (resistencia de longitud,  $R$ , y resistencia de fuga,  $R'$ ) como condensadores (membrana,  $C$ ), se puede modelar las propiedades pasivas de la membrana como un circuito RC, donde

se encuentra un condensador  $C$  en paralelo con la resistencia de membrana  $R'$  ( $R_m$  en la imagen) y esto en serie con una resistencia a la longitud del axón  $R$  (no aparece en la imagen 5).

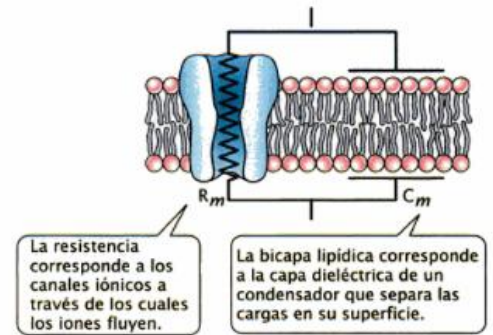


Imagen 4. Análogo membrana  $C$  y resistencia  $R$

Cuando se hace pasar un pulso de corriente por este circuito el condensador se carga (de acuerdo a la ecuación  $q = CV$  vista anteriormente) admitiendo cargas negativas y positivas a ambos lados del dieléctrico durante el pulso.

El tiempo de carga para que un condensador se cargue a un 63.2 % de la carga total (máximo voltaje) es proporcional a la resistencia eléctrica  $R$  y la capacidad  $C$  del condensador. El producto de la resistencia por la capacidad se llama constante de tiempo,  $T$ , y tendrá un papel muy importante en el comportamiento de este,

$$T = RC$$

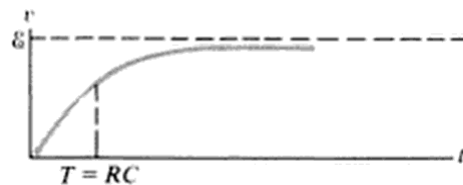
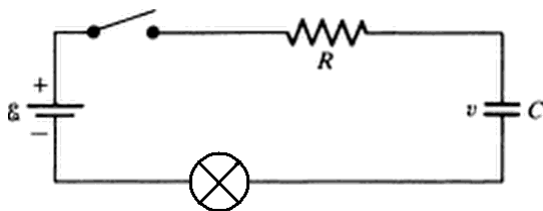


Imagen 5. Circuito RC básico

El circuito análogo al axón para las propiedades pasivas de la membrana neuronal se comprende más fácilmente si consideramos ante todo un circuito RC como el de la imagen 6, donde una resistencia se encuentra en serie con un condensador. En el instante en que comienza a pasar la corriente, el condensador está descargado, por lo  $R'$  es máxima. El circuito se comportara como un circuito con baterías y resistencias sencillo, pudiendo utilizarse la ley de Ohm básica para la caída de volta ( $V=IR$ ). Pasado un tiempo  $t$  el condensador se irá cargando hasta cargarse completamente. En este momento toda la fuerza electromotriz ( $\epsilon$ ) de la batería se encuentra en el condensador. Si llamamos  $q$  a la carga del condensador e  $i$  a la corriente en la malla en cierto momento  $t$ , habrá una caída de voltaje en la resistencia y en el condensador, de manera que:

*Caida de voltaje en la resistencia =  $iR$*

$$\text{Capacitancia: } C = \frac{q}{V}$$

$$\text{Caida de voltaje en el condensador} = \frac{q}{C}$$

Por lo que, aplicando la segunda ley de Kirchhoff, que dice que en un circuito cerrado la suma de todas las diferencias de potencial debe de ser cero, tenemos que:

$$\varepsilon - iR - \frac{q}{C} = 0$$

Despejando  $i$ ,

$$i = \frac{\varepsilon}{R} - \frac{q}{RC}$$

Si igualamos la diferencia de potencial en el condensador a la batería, en un tiempo  $t$ , entonces,

$$q_f = \varepsilon C$$

La carga y la corriente en un instante  $t$  cualquiera en expresión analítica serán:

$$q = q_f \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

Una vez el condensador se encuentre cargado por completo cesará la corriente en el circuito.

Un tiempo de respuesta típico para una neurona será de unos 20 milisegundos; en neuronas que están procesando información y que necesitan una respuesta rápida, los tiempos variaran de 1 a 2 milésimas de segundo.

El hecho de que el circuito equivalente a la membrana presente un condensador tiene la función de retrasar la variación de voltaje con respecto a la corriente transmembrana, esto tiene importancia funcional ya que otorga una

propiedad integradora fundamental, como es la suma temporal de potenciales, citada anteriormente, por la que diferentes estímulos subumbrales repetidos en el tiempo a intervalos suficientemente cortos se suman, y si son despolarizantes (más positivos que el potencial de reposo), puedan llegar a dar un potencial de acción si la suma pasa el umbral que lo dispara. Lo mismo pasaría si son estímulos hiperpolarizantes (más negativos) y despolarizantes en corto tiempo, que se sumarían compitiendo por el control del potencial de membrana.

### **Circuito equivalente**

Dado que el movimiento de iones puede verse como desplazamiento de carga, la corriente iónica y la corriente electrónica pueden estudiarse desde la física bajo las mismas leyes por lo que nos basamos en la identificación de las propiedades físicas de la membrana y en la correlación de algunos de sus componentes estructurales con dispositivos electrónicos como se ha visto en el apartado anterior. De esta manera, llegamos a la construcción de un circuito electrónico cuya dinámica es análoga a la de la membrana, llamado “circuito equivalente”.

Para un estímulo eléctrico menor de un cierto valor umbral crítico, la respuesta del axón es similar a una red análoga de resistencias y condensadores. Esto significa que podemos crear un modelo eléctrico de circuito RC de los estímulos débiles, aquellos que no presentan cambios en el potencia del axón más allá de unos pocos milímetros a partir de el punto donde se aplica el estímulo.

Creemos un modelo dividiendo el circuito análogo del axón en muchos segmentos cortos. Dentro de cada segmento podemos identificar los siguientes componentes, así tenemos:



- las bombas iónicas, que pueden modelarse como una pila eléctrica, ya que tienen la función de establecer una diferencia de potencial a través de la membrana,  $\epsilon$
- la capa bilípida de la membrana neuronal, que puede modelarse como un condensador debido a su estructura física y sus propiedades, y que, por lo tanto, posee una capacidad eléctrica,  $C$
- el fluido intersticial, modelándose como un conductor perfecto debido a su poca resistencia
- una resistencia al paso de la corriente por la longitud del axón  $R$
- una resistencia debido a la membrana, canales de fuga, con una corriente de pérdida  $i_{perd}$ ,  $R'$
- las corrientes iónicas que serán la corriente que fluye por el circuito análogo,  $i_{axón}$

Así, las unidades de carga (iones) pasan a través de dos resistencias (canales transmembranales y longitud del axón) y alteran la carga que se acumula en el condensador (membrana) por la acción de la pila (trabajo de las bombas iónicas).

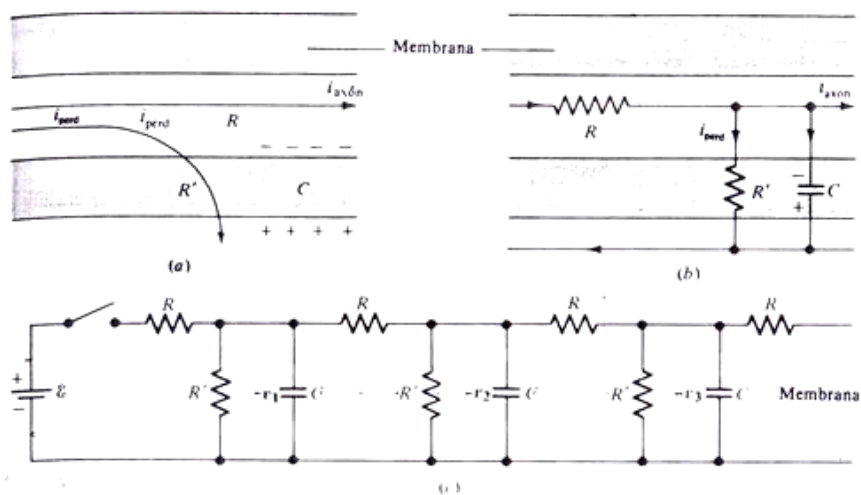


Imagen 6. Modelo análogo eléctrico al impulso nervioso

La imagen 7 muestra nuestro modelo análogo a un segmento del axón consistente en un circuito RC donde existen dos resistencias y un condensador. Una resistencia se encuentra en serie siendo la resistencia al paso de la corriente por su longitud (R); el condensador y otra resistencia están en paralelo, correspondiendo con la membrana (C) y los canales iónicos (R').

Para hacer la analogía con la membrana identificamos la parte del circuito por encima del condensador como el interior de la membrana, y la inferior con el exterior de la misma. El fluido intersticial que rodea al axón, la parte externa de la membrana, tiene muy poca resistencia y puede representarse como un conductor perfecto.

### **Parte experimental**

Esta parte experimental se dividirá en tres partes, cada una de ellas con la función de comprobar diferentes características de los circuitos eléctricos con la finalidad de en la tercera parte crear el circuito análogo a la respuesta a estímulos débiles producidos en la membrana del axón.

En una primera parte comprobaremos la caída de voltaje a través de varios circuitos con resistencias en serie y paralelo mediante la ley de Ohm, después analizaremos los resultados y compararemos entre los diferentes circuitos como base para comprender la caída de voltaje en nuestro circuito modelo.

En la segunda parte crearemos un circuitos RC básico para comprobar como cambia el potencial de membrana con respecto al tiempo (constante de tiempo,  $T$ ) y utilizarlo también como base para nuestro circuito modelo.

Finalmente, en la tercera parte, crearemos un modelo análogo al axón descrito con anterioridad para dos segmentos de éste, aplicando lo anteriormente visto en el experimento, observando las diferencias de las caídas de voltaje para cada uno de los segmentos y la constante de tiempo  $T$  con respecto a las diferencias de voltaje.

#### **Materiales:**

- Placa board
- Polímetro
- Pila de 9 voltios (V),  $\epsilon$

- Conector pila
- 2 resistencias ajustables de 470 ohmios ( $\Omega$ ),  $R$
- 4 resistencias fijas de 100 ohmios ( $\Omega$ ),  $R'$
- 1 condensadores de 2200microfaraday ( $\mu\text{F}$ ),  $C$



- 2 condensadores de 1microfaaraday ( $\mu\text{F}$ ),  $C$
- 4 bombillas
- Interruptor
- Manguera de cable UTP de 4 pares de cobre
- Destornillador
- Tijeras



Imagen 7. Materiales

\*La placa board es una placa de prueba que consiste en un bloque de plástico perforada y numerosas láminas delgadas, de una aleación de cobre, estaño y fósforo, que unen dichas perforaciones, creando una serie de líneas de conducción paralelas. Nuestra placa está compuesta por 12 líneas, nombradas de la A a la L y 47 columnas numeradas. Las filas A y L corresponderán a las líneas de alimentación del circuito, el bloque esta dividido en dos con una separación para incluir circuitos integrados, que en nuestro caso no será utilizado. Está hecho de dos materiales, un aislante, en nuestro caso un plástico, y un conductor que conecta los diversos orificios entre sí. La corriente circulara de modo que se conecte un polo positivo en una de las líneas de alimentación y un polo negativo en la otra línea de alimentación, todos los componentes cuyos cables terminales introduzcamos por los orificios de una misma columna quedaran conectados entre sí.

\*Las bombillas y condensadores electrolíticos presentan polaridad por lo que deben tener un polo en el lado positivo y otro en el lado negativo de la placa; las resistencias no tienen influencia de positivo a negativo, no presentan polaridad, por lo que las podemos colocar como queramos.

\*Usamos el cobre debido a su gran poder de conductividad, como es el de la membrana neuronal.

Procedimiento base:

1. En primer lugar prepararemos diferentes longitudes de cable de cobre para usarlo como hilo conductor en nuestro circuito, para ello mediante las tijeras cortamos y desenroscamos los hilos de la manguera de cable UTP
2. Pelamos con las tijeras las diferentes medidas de hilo de cobre por ambos lados, alrededor de 1mm
3. Comprobamos que la pila presenta el voltaje esperado con el polímetro
4. Comprobamos los valores reales de las resistencias con el polímetro y vemos si se ajustan a los valores de tolerancia ajustados por el fabricante mediante el código de colores (imagen)

	1 <sup>er</sup> Dígito	2 <sup>o</sup> Dígito	Multiplicador	Tolerancia
NEGRO	0	0	$\times 10^0$	
MARRON	1	1	$\times 10^1$	$\pm 1\%$
ROJO	2	2	$\times 10^2$	$\pm 2\%$
NARANJA	3	3	$\times 10^3$	
AMARILLO	4	4	$\times 10^4$	
VERDE	5	5	$\times 10^5$	$\pm 0,5\%$
AZUL	6	6	$\times 10^6$	$\pm 0,25\%$
VIOLETA	7	7	$\times 10^7$	$\pm 0,1\%$
GRIS	8	8	$\times 10^8$	$\pm 0,05\%$
BLANCO	9	9	$\times 10^9$	
DORADO			$\times 0,1$	$\pm 5\%$
PLATEADO			$\times 0,01$	$\pm 10\%$

Imagen 8. Código de colores para resistencias

- **Primera parte:** *comprobación de la ley de Ohm*

En esta primera parte crearemos diferentes circuitos básicos, compuestos por un generador de tensión, en nuestro caso una pila de 9V,  $\epsilon$ , y 4 resistencias de  $100\Omega$ ,  $R$ , que conectaremos tanto en serie como en paralelo para demostrar la caída de voltaje a través del circuito mediante la ley de Ohm

Procedimiento:

1. Empalmamos la pila a la placa board y ponemos el interruptor en puente con ésta, de manera que los cables del interruptor estarán uno en la línea de alimentación y el otro en columna a la pila por el lado positivo; por el lado negativo la pila estará conectada a la línea de alimentación
2. Creamos los diferentes circuitos, todos ellos con el polo positivo en puente con el interruptor; con una bombilla en serie con el polo negativo a la línea de alimentación negativa, con o sin cable, con el final de las resistencias, para observar visualmente las diferencias en el potencial.
  - 1) Circuito de una resistencia en serie
  - 2) Circuito de dos resistencias en serie
  - 3) Circuito de 4 resistencias, de las cuales dos están en paralelo con una de ellas
3. Una vez creados los circuitos dejamos que corra la corriente de la pila a la resistencia cerrando el interruptor
4. Con el polímetro, uno a uno hechos los circuitos, medimos los valores de intensidad en mA; para ello desconectamos el final del circuito y el lado negativo del conector de la pila y unimos los polos correspondientes del polímetro
5. Comprobamos los valores reales con los esperados de voltaje, intensidad y resistencia total, teniendo en cuenta que la suma de circuitos en serie es diferente a la de paralelo, y realizamos los cálculos correspondientes para la comprobación de la ley de Ohm ( $V= IR$ )
6. Comparamos los diferentes circuitos entre ellos y como influye la colocación de las resistencias en la caída del voltaje.

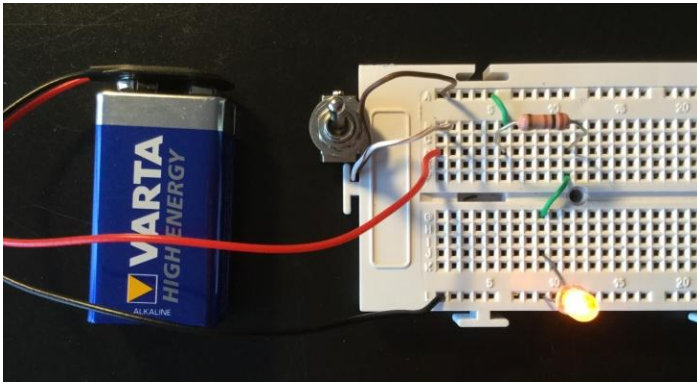


Imagen 9. Circuito una resistencia en serie

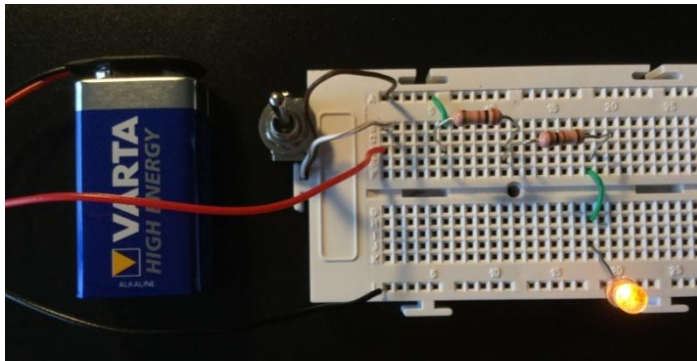
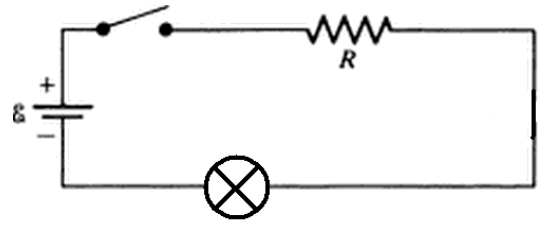


Imagen 10. Circuito dos resistencias en serie serie

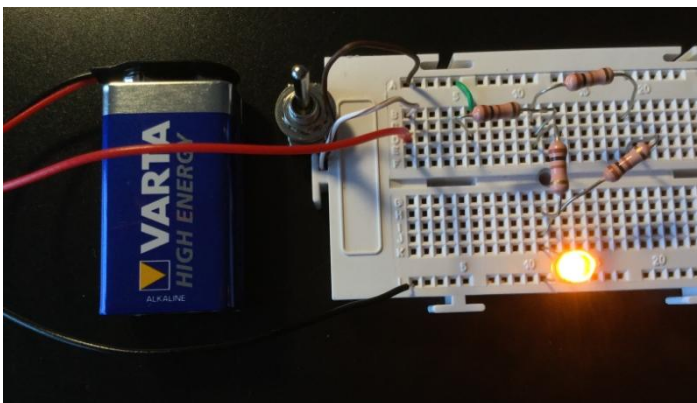
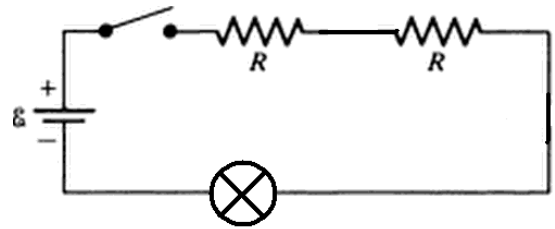
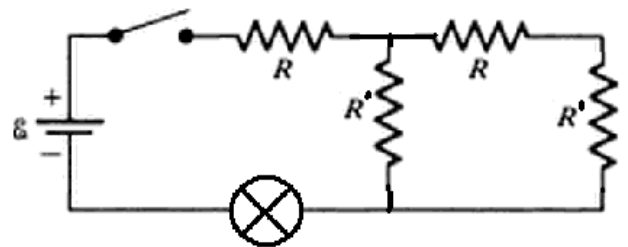


Imagen 12. Circuito de 4 resistencias, de las cuales dos están en paralelo con una de ellas



- **Segunda parte:** *circuito RC.*

Creamos un circuito con una resistencia y un condensador en serie (circuito RC básico) para observar la diferencia de potencial del condensador en función del tiempo.

Para este circuito utilizaremos una pila de 9V, una resistencia variable ajustadas a 470 ohmios  $R$ , y un condensador de  $2200\mu\text{F}$ ,  $C$

Procedimiento:

1. Colocamos los polos de la pila en las líneas de alimentación
2. Colocamos el interruptor de manera que un polo nos queda en la línea de alimentación positiva y el otro las líneas centrales para poder hacernos de puente de ser necesario
3. Creamos el circuito básico RC, donde la resistencia  $R$  esta colocada en serie con el condensador  $C$
4. Medimos la diferencia de potencial del condensador con respecto al tiempo colocando el polímetro a los lados de éste. De manera visual estimamos el tiempo de carga del condensador (disminución de intensidad de la bombilla)
5. Creamos la gráfica de diferencia de potencial con respecto a la constante de tiempo  $T$  basándonos en la ecuación  $T = RC$

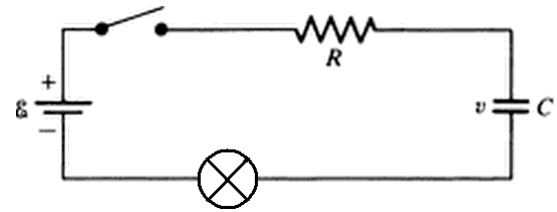
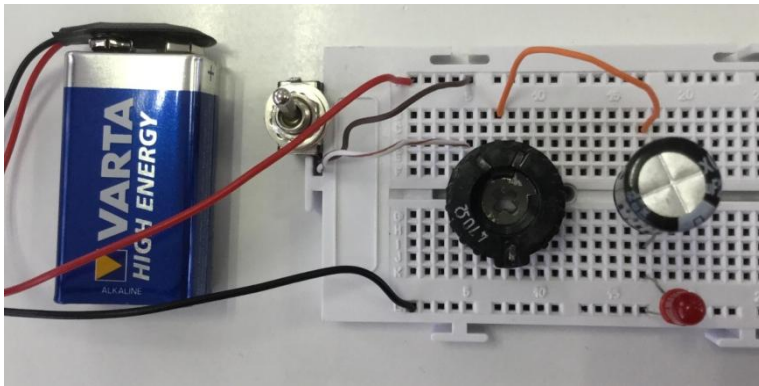


Imagen 11. Circuito RC básico

- **Tercera parte:** *circuito RC análogo al axón de la neurona*

Basándonos en el modelo el modelo análogo a un segmento del axón de una neurona expuesto anteriormente, creamos dicho circuito, en este caso dos segmentos del axón, cada uno de ellos con una resistencia  $R$  análoga a la resistencia al paso de la corriente por la longitud del axón, una resistencia de perdida del condensador  $R'$  análoga a los canales iónicos de fuga de los diferentes iones y un condensador  $C$  en paralelo con éste análogo a la membrana.

Los valores para los diferentes componentes serán: R, resistencia ajustable a  $470\Omega$ ; R', resistencia de  $100\Omega$ ; C, condensadores de  $1\mu\text{F}$ .

Procedimiento:

1. Conectamos la pila a la fuente de alimentación
2. Conectamos el interruptor de la misma manera que en el punto 2 del experimento anterior
3. Colocamos una resistencia en serie R con una resistencia de pérdida R' a un condensador  $C_1$  mediante puentes con cables de la manera que se observa en la foto, con una bombilla entre la resistencia de pérdida y el condensador, con el polo negativo haciendo de puente a la línea de alimentación
4. Repetimos el paso 3 para el segundo segmento del axón, siendo el condensador  $C_2$
5. Mediante un puente unimos ambos segmentos
6. Medimos la diferencia de potencial de los condensadores con respecto al tiempo de manera visual (bombillas)
7. Comprobamos visualmente la caída de voltaje a través del circuito fijándonos en las bombillas de éste
8. Creamos una grafica de diferencia de potencial con respecto a T para cada uno de los condensadores de los segmentos del axón, comparar



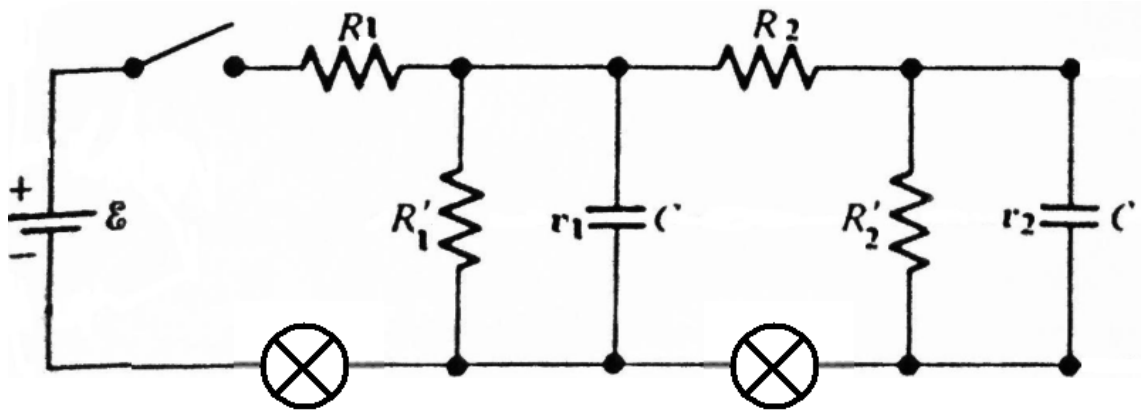
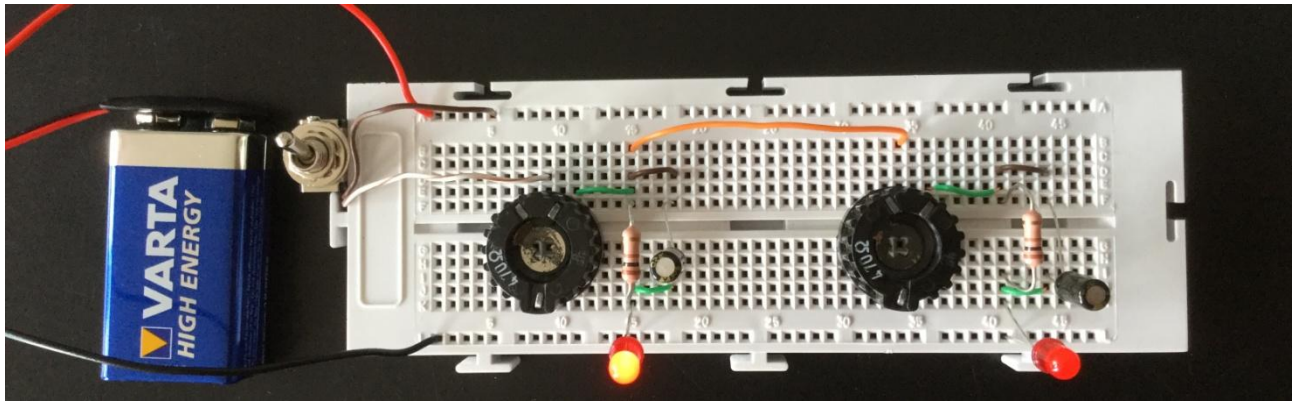


Imagen 12. Circuito equivalente al axón

## Resultados

### Resultados base:

Comprobación de los valores de las resistencias y la pila

- Resistencias con código de 4 bandas: marrón-negro-marrón-dorado. Basándonos en el código de colores para las resistencias nuestras resistencias serán de 100 ohmios con 5% de tolerancia.
  - Los valores reales con medición de polímetro nos dan para las 4 resistencias un valor de  $98'7\Omega$ , por lo que se ajusta a los valores de tolerancia
- Resistencias de valor ajustable, ajustadas al máximo, donde el valor esperado es de  $470\Omega$ 
  - Los valores reales con medición del polímetro para las dos resistencias son de  $450\Omega$  ajustadas al máximo
- Pila de 9V
  - Valor real medido con polímetro de  $8'53V$  reales

Debido a estos resultados reales de los diferentes componentes del circuito, no haremos los cálculos de la comprobación de la ley de Ohm ni los potenciales del condensador con los valores esperados, sino con los reales, aunque todos los valores se nos ajustan a un margen de error permitido.

- **Primera parte:** comprobación de la ley de Ohm ( $V = IR$ )

1) Circuito de una resistencia en serie

R	$98'70\Omega$	R total = $98'70\Omega$	
$V_T$	V esp = $8'53V$	V real = $7'62V$	
$I = V/R$	I esp = $77'22mA$	I real = $75'00mA$	%error = $2'96\%$

2) Circuito de dos resistencias en serie

R	98'70Ω	R total = 98'70x2 = 197'40Ω	
V <sub>T</sub>	V esp = 8'53V	V real = 7'98V	
I = V/R	I esp = 40'22mA	I real = 40'00mA	%error = 0'55%

3) Circuito de 4 resistencias, de las cuales dos están en paralelo con una de ellas

R	98'70Ω	R total = 98'7+(1/(1/98'7+98'7)+(1/98'7)) R total = 148'5Ω	
V <sub>T</sub>	V esp = 8'53V	V real = 7'90V	
I = V/R	I esp = 53'20mA	I real = 47'50mA	%error = 12'00%

Resultados conjuntos:

	R <sub>T</sub> (Ω)	V <sub>T</sub> (V)	I (A)
Circuito 1	98'70	7,62	75'00
Circuito 2	197'40	7'98	40'00
Circuito 3	148'5	7'90	47'50

Observamos que a medida que aumentamos la cantidad de ohmios de las resistencias, la intensidad se hace menor a valores parecidos de diferencial de potencial, como esperaríamos debido a la ley de ohm, que dice que la intensidad es proporcional a la caída de voltaje partido de la resistencia ( $I=V/R$ ).

También observamos que a circuitos más largos (más componentes), el voltaje esperado disminuye, y el error de la intensidad por la ley de Ohm se hace más grande, rondando el 10% de error. Esto es debido a que los circuitos no son perfectamente conductores, y un poco de voltaje se pierde por estos (menos del 11% en nuestro circuito).

- **Segunda parte:** circuito RC (Constante de tiempo  $T=RC$ )

Gráfica del potencial de condensador con respecto al tiempo visualizado mediante intensidad de bombilla.

En el instante  $t=0$  el condensador se encontrará descargado y la diferencia de potencial en  $R$  será máxima, la intensidad por tanto obedece a la ley de ohm, por lo que con los datos experimentales:

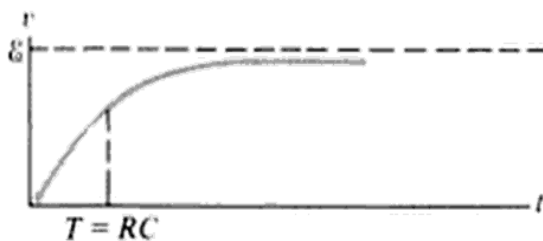
$$I = V/R, I = 8\text{ }60\text{V}/450\Omega = 0\text{'019 A, } 19\text{mA pasan por R en } t = 0$$

Pasado un tiempo el condensador se va cargando hasta quedar totalmente cargado, por lo que tendrá una diferencia de potencia igual a la pila  $\epsilon = V_c$ , y la diferencia en el potencial de la resistencia será 0. A medida que el condensador se va cargando se observa como la bombilla va descendiendo en intensidad de manera exponencial, una vez el condensador queda completamente cargado cesa la corriente (bombilla se apaga).

El tiempo necesario para que el condensador se cargue a un 63.2 % de su carga máxima (máximo voltaje,  $\epsilon$ ) responde a la constante de tiempo  $T$ , por lo que haciendo cálculos con los datos experimentales:

$$T = RC, T = 450\Omega \times (2\text{'2} \times 10^{-3})\text{F} = 0\text{'99s.}$$

El valor del tiempo es muy bajo debido a que tanto la resistencia tiene poca resistencia en sí, como el condensador tienen poca capacidad, por lo que en la gráfica no podemos sacar en números la diferencia de potencial del condensador con respecto al tiempo en la carga debido a la rapidez de esta; pero si pudiéramos contabilizar la diferencia de voltaje con respecto al tiempo



Gráfica 1. Diagrama de diferencia de potencial con respecto al tiempo para un circuito RC básico

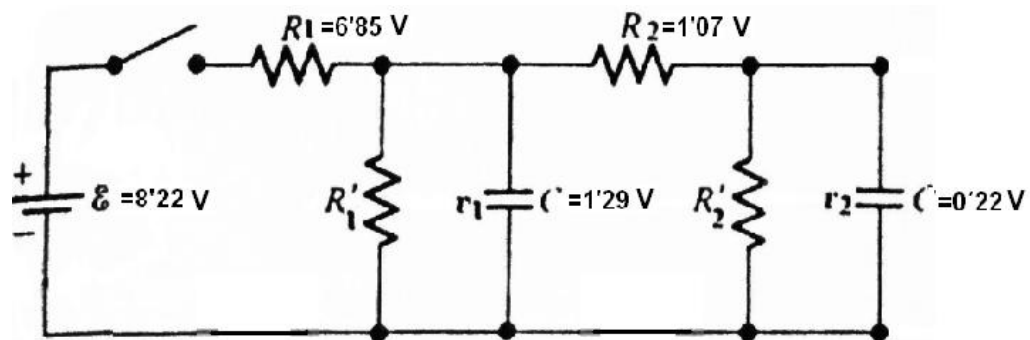
nos daría una grafica que respondería a la descrita en la grafica 1.

Comprobando la teoría, donde aumenta exponencialmente la diferencia de potencial con el tiempo en el condensador, los resultados son correctos.

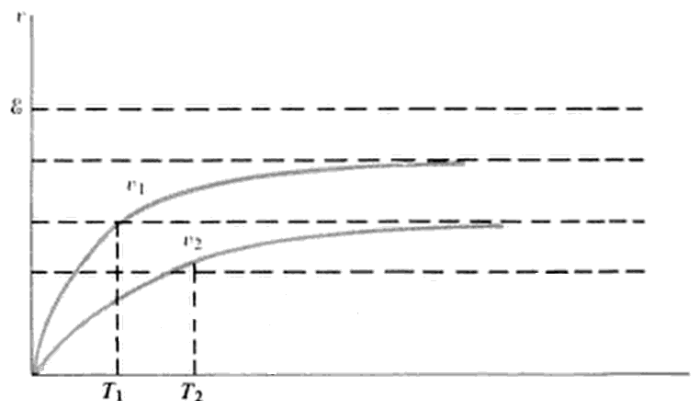
- **Tercera parte:** Circuito equivalente

Circuito equivalente dos segmentos de la membrana del axón.

1. Mediante el polímetro medimos los diferentes voltajes para cada uno de los componentes una vez los condensadores se han cargado del todo. El efecto de la resistencia de pérdida  $R'$  que se encuentra en paralelo con el condensador, hace que cuando el condensador se cargue por completo, la corriente no deje de circular, pasando por  $R$  y  $R'$  en vez de por el condensador. Así pues, cuando los condensadores se encuentran totalmente cargados existe una caída de potencial a través de  $R$  y  $R'$ , que responden a la ley de Ohm ( $V=IR$ ).



2. Creamos una grafica basándonos en la teoría de cómo cambiaría el potencial de cada uno de los condensadores con respecto al tiempo. La creación de la grafica, debido a los bajos valores de resistencias y condensadores, es hipotética en cuanto a la constante de tiempo  $T$ , ya que el tiempo de carga del condensador en nuestro circuito es apenas apreciable y no podemos contabilizarlo.



Gráfica 2. Gráfica de potenciales de condensadores de circuito análogo al axón

Cuando hay dos resistencias y dos condensadores como en nuestro circuito equivalente, el proceso de carga es más complicado que para el circuito anterior. Se observa que la diferencia de potencial en  $v_2$  en  $C_2$  crecerá más lentamente que la diferencia de potencial  $v_1$  a través de  $C_1$ , ya que el camino desde la batería hasta  $C_2$  y regreso presenta dos resistencias ( $2R$ ).

Los resultados realizados con el polímetro para los condensadores una vez cargados para  $C_1$  y  $C_2$  dan voltajes de 1'29V y 0'22V respectivamente, por lo que podemos decir que se cumple lo que esperábamos de la teoría.

Es de intuir que, cuantos más pares de RC se añadan a nuestro experimento modelo, la diferencia de potencial a través de cada condensador que se añada aumentará más lentamente.

## Discusión

Los resultados en la parte experimental nos explican la dinámica de la membrana a estímulos débiles, donde mediante la ley de Ohm ( $V=IR$ ), y la constante de tiempo  $T$  para circuitos RC, deducimos que a medida que pasa el tiempo y nos vamos alejando del estímulo habrá una caída de potencial, dando lugar a disminuciones en el potencial inicial, y finalmente disipándose. Se tiene que tener en cuenta que los valores para nuestro circuito modelo del axón no son los de la neurona, además de que la resistividad no será la del axón, sino la del cobre, que es mucho menor ( $\rho_{\text{cobre}} = 1,7 \times 10^{-8}$ )

Magnitud	Axón con mielina	Axón sin mielina
Resistividad del axoplasma, $\rho_a$	$2 \Omega \text{ m}$	$2 \Omega \text{ m}$
Capacidad por unidad de área de membrana, $C_m$	$5 \times 10^{-5} \text{ F m}^{-2}$	$10^{-2} \text{ F m}^{-2}$
Resistencia por unidad de área de membrana, $R_m$	$40 \Omega \text{ m}^{-2}$	$0,2 \Omega \text{ m}^{-2}$
Radio, $r$	$5 \mu\text{m} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$	$5 \mu\text{m} = 5 \times 10^{-6} \text{ m}$

Tabla 2. Valores de parámetros del axon para el circuito equivalente

Los valores típicos para un axón sin mielina son de  $5\mu\text{m}$  de radio y  $0.05\text{ cm}$  de longitud; aplicando las siguientes fórmulas deducidas anteriormente, tenemos los siguientes valores para este axón:

$$R = \frac{\rho_a l}{\pi r^2} = 2.5 \times 10^8 \Omega$$

$$R' = \frac{R}{2\pi r l} = 6.4 \times 10^5 \Omega$$

$$C = C_m(2\pi r l) = 3.1 \times 10^{-9} \text{F}$$

$$V = IR$$

$$T = RC$$

De estos resultados podemos decir que la membrana presenta una resistencia  $R$  enorme, pero ésta está compensada por el aislamiento que proporciona la membrana del axón, que es así mismo muy alto. El cobre, que es uno de los cables más conductores que hay en el mercado, puede aproximarse a los valores reales en cuanto a conductor y por ello lo utilizamos en nuestro modelo experimental.

En la neurona la resistencia de pérdida  $R'$  es mucho más baja que la del axoplasma  $R$ , de lo que se deduce que de la corriente que entra en el segmento del axón se pierde a través de las paredes en menos de  $1\text{ cm}$ .

Para un axón con mielina los valores serán diferentes, la capacitancia es 200 veces menor, por lo que el pulso de corriente podrá recorrer mucha más distancia.

Desde el punto de vista físico podemos decir que el circuito modelo expuesto en la parte experimental de este trabajo nos sirve como circuito equivalente para un axón neuronal, aunque los valores numéricos no sean los mismos.

## **Conclusiones**

Basándonos en el conocimiento biológico, y con la ayuda de un sencillo modelo físico derivado de circuitos eléctricos surge el denominado circuito equivalente. Este modelo nos permite comprender las propiedades funcionales más importantes de la neurona y consigue evaluar a la célula nerviosa desde varios puntos de vista. Esto ha permitido a la ciencia avanzar en la comprensión del funcionamiento de la membrana, importante en estudios de neurociencias como en diferentes aspectos médicos.

## **Conclusions**

Based on biological knowledge, and with the help of a simple physical model derived from electrical circuits, the so-called equivalent circuit arises. This model allows us to understand the most important functional properties of the neuron and manages to evaluate the nerve cell from several points of view. This has enabled the science to advance in the understanding of membrane function, important in studies of neurosciences as in different medical aspects.



## **Bibliografía**

- **Kane, J.W y Sternheim, M.M.** 2007. *Física*, Segunda edición, Ed. Reverté. Capitulo 17, 18.
- **Hill, Wyse, Anderson.** 2006. *Fisiología animal*, Ed. Panamericana. Capitulo 5.
- **Carrillo Martinez de la Escalera, Noelia.** 2010. Tesis doctoral: *Modelización de la actividad neuroeléctrica*, p.6-36
- **Radesca, Daniel.** 2009. *Inclusión de una célula nerviosa en un circuito electrónico de estimulación y medida*, p. 1-11
- **Bruño, W y Araque, A.** 2007. *Maestría en neurociencias y biología del comportamiento*, Instituto Cajal, CSIC, Madrid. Tema 4
- **Escobar-Soto, Oscar Javier.** 2009. *Propiedades eléctricas pasivas de las neuronas*, Universidad nacional de Colombia
- <http://juan.aguarondeblas.es/Informe1.pdf>
- <https://es.scribd.com/document/51180544/Funcionamiento-de-una-placa-board>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito\\_RC](https://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_RC)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Placa\\_de\\_pruebas](https://es.wikipedia.org/wiki/Placa_de_pruebas)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Potencial\\_postsin%C3%A1ptico](https://es.wikipedia.org/wiki/Potencial_postsin%C3%A1ptico)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa\\_cable](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_cable)