



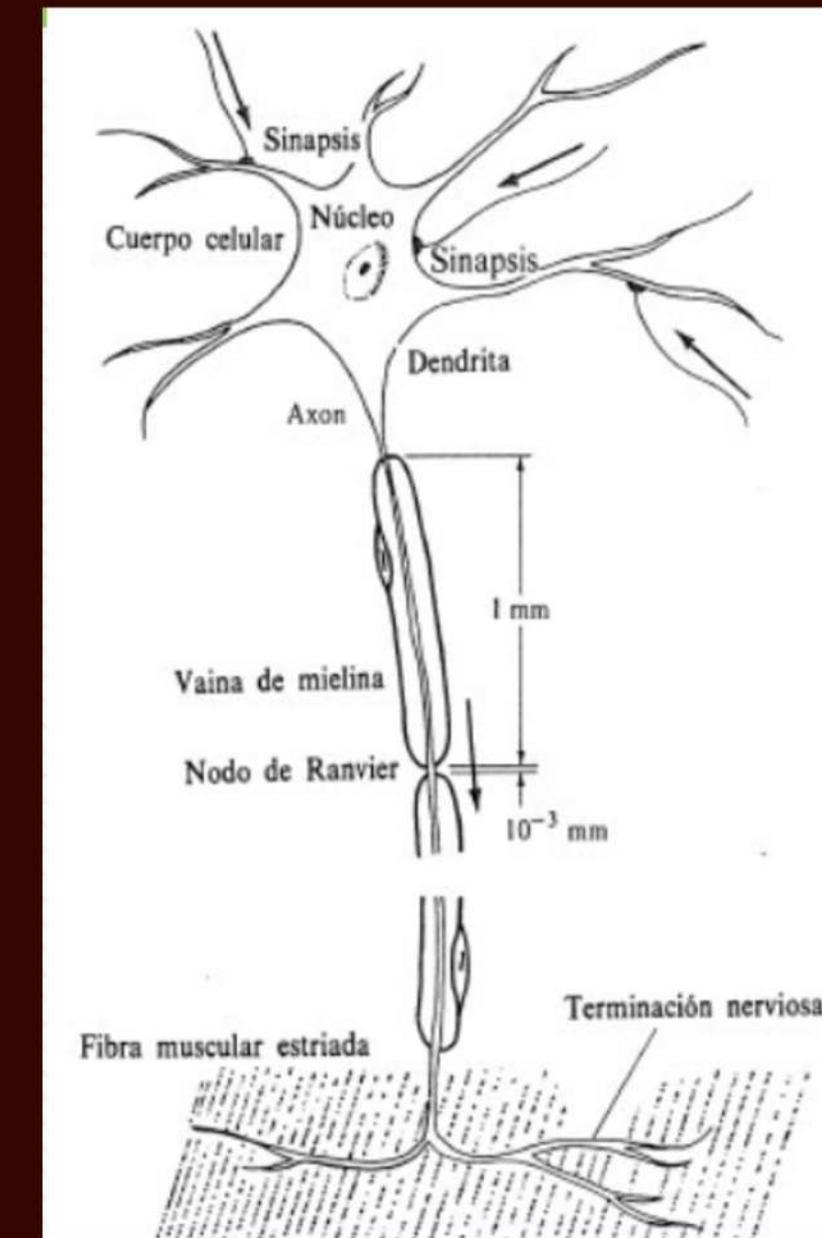
CONDUCCION NERVIOSA

GIANNINA SALATI

estructura de las células nerviosas

Nervio típico: flechas indican las direcciones de conducción de los pulsos nerviosos

que elementos conforman a las células nerviosas?



- Axones diámetro de 1 a 20 micras (μm) y largo desde 1 mm hasta más de 1 m.
- células de Schwann: rodean los axones de algunos animales formando las vainas de mielina. La distancia entre las mismas de 1 μm (nodos de Ranvier), donde el axón está en contacto con el líquido intersticial circundante y donde se lleva a cabo la amplificación en las neuronas con mielina

que función cumplen las vainas de mielina?

que función cumplen las vainas de mielina?

reducen capacidad eléctrica de la
membrana y aumentan resistencia
eléctrica!!!

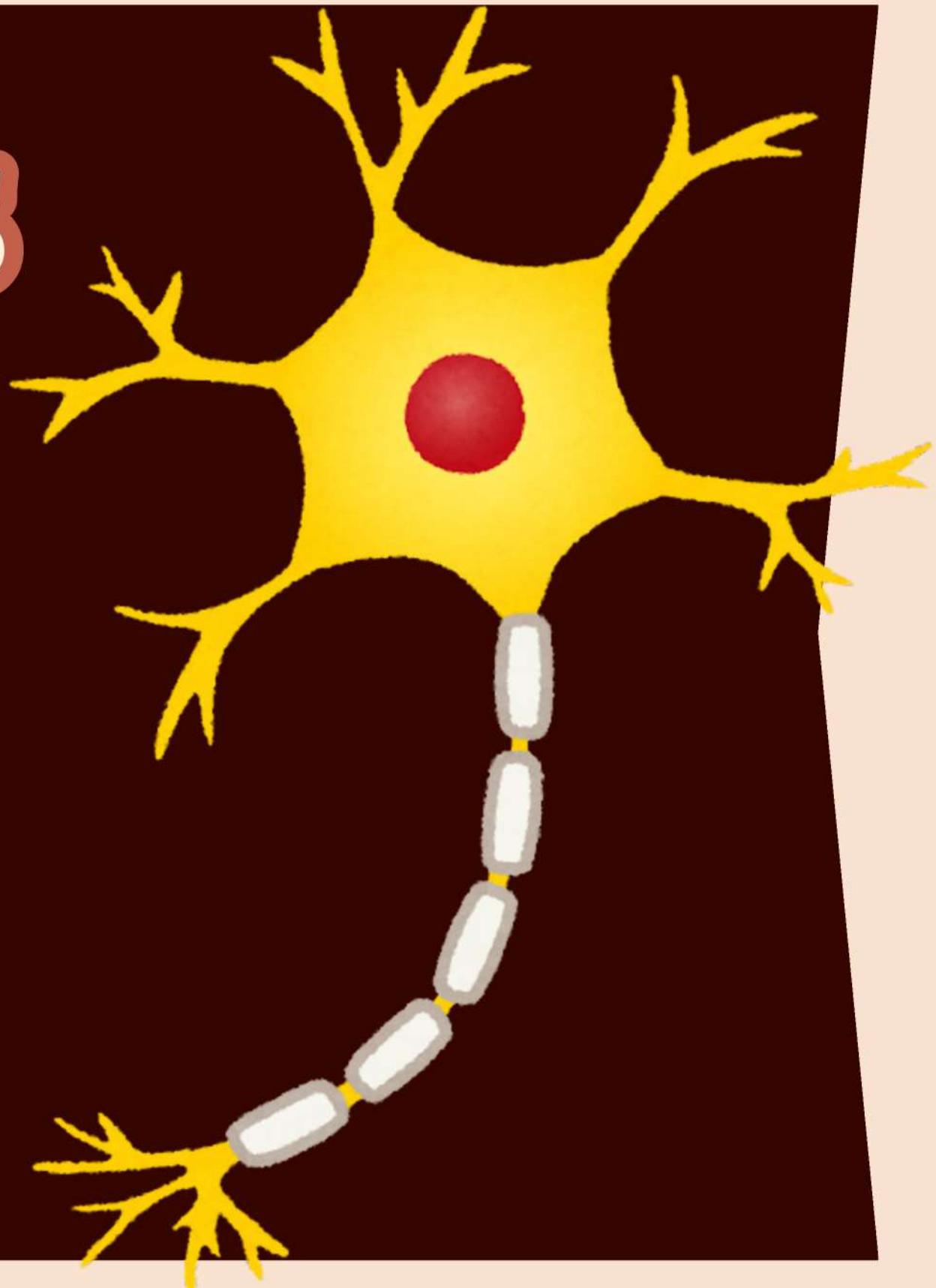
por que sera importante esto?

- Permite una propagación mayor del pulso eléctrico sin necesidad de amplificación
- reduciendo la energía metabólica necesaria

por que sera importante esto?

- En axones sin mielina las señales se debilitan a distancias cortas y requieren amplificación
- Esto no es muy conveniente metabolicamente.....

que seres vivos
presentan
vainas de
mielina?

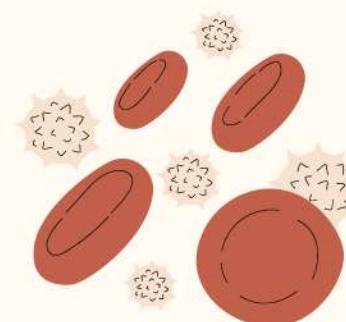


- Vertebrados:

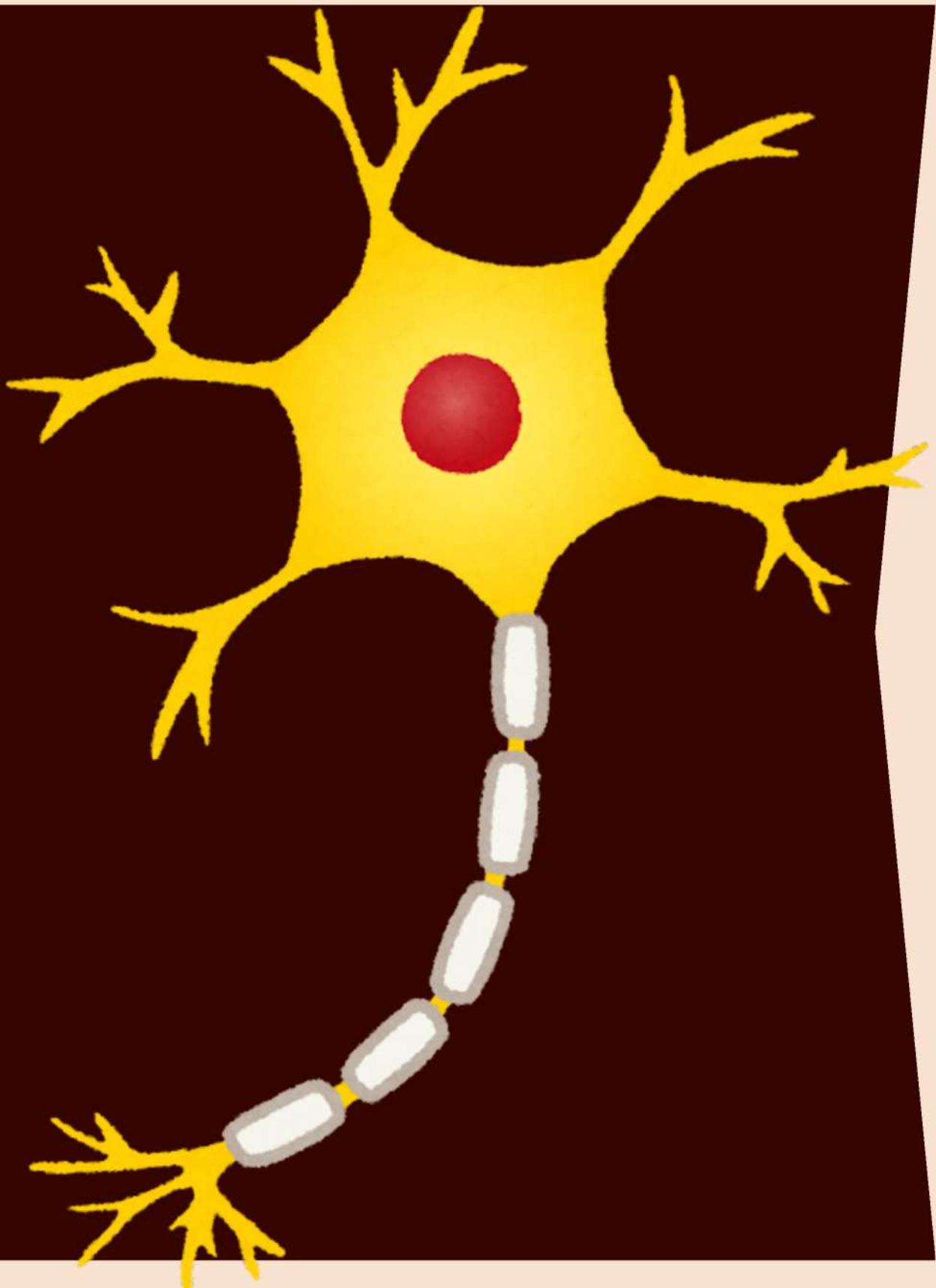
la mielina es un avance evolutivo, aunque algunos mamíferos presentan muchas fibras del sistema nervioso autónomo (simpático y parasimpático) son sin mielina.

- Invertebrados:

hidras, medusas, gusanos, insectos, moluscos, crustáceos) tienen sistemas nerviosos sin mielina.



Modelo "Electricico"

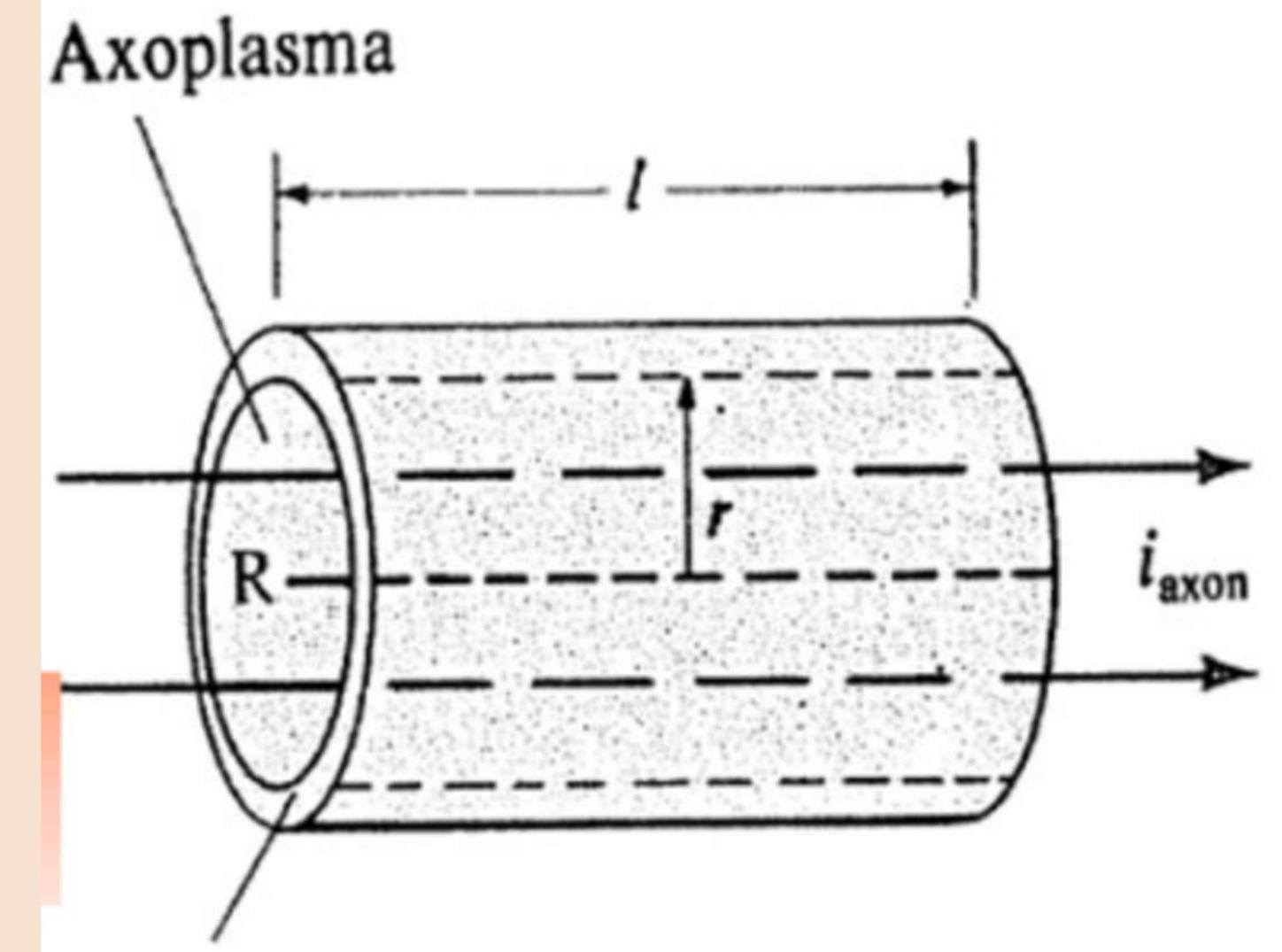


AXON

- membrana cilíndrica
- líquido conductor: AXOPLASMA

Con una resistividad de $\rho_a = 2\Omega \cdot m$

- Circula una corriente por el axón i_a

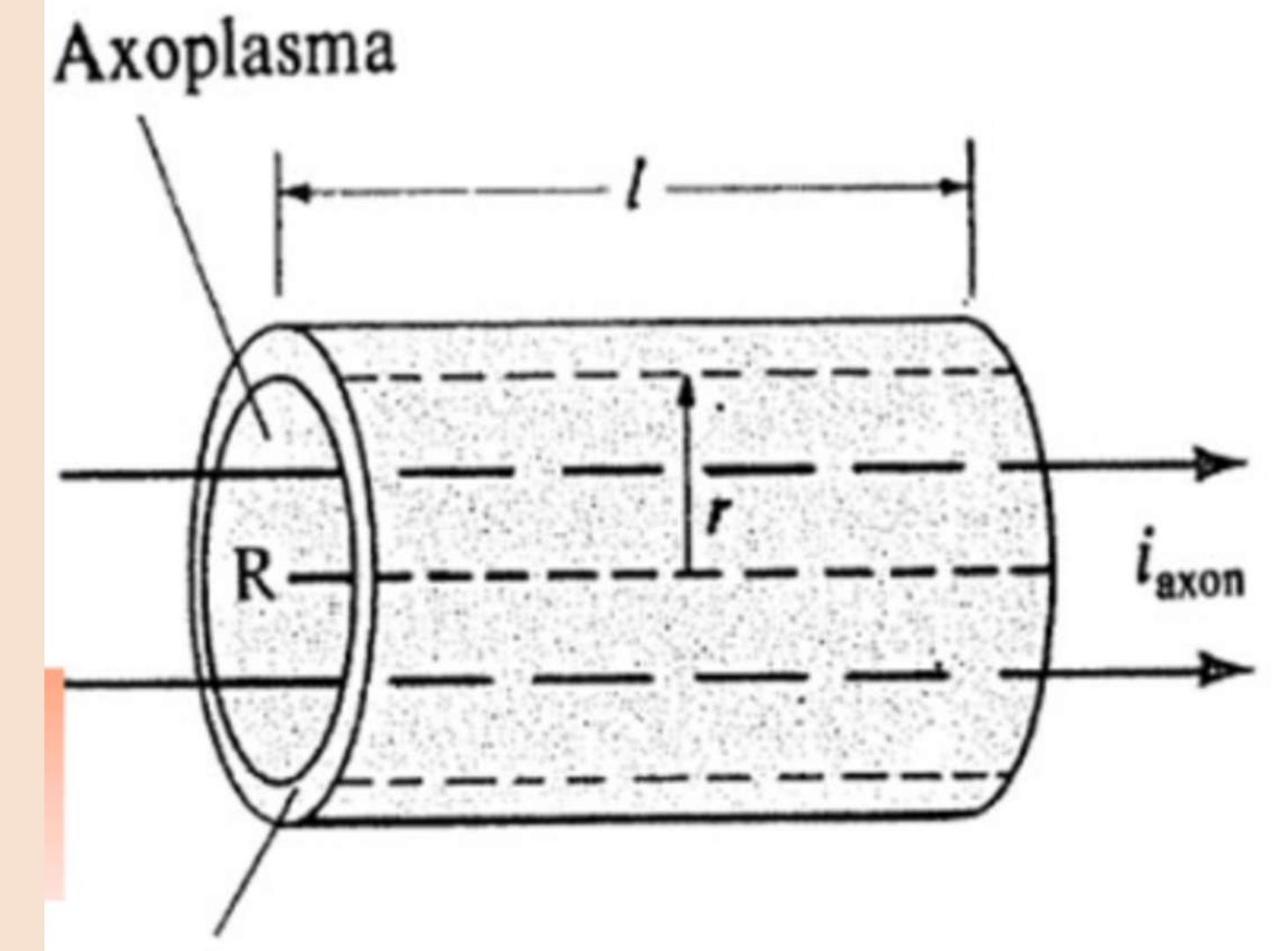


AXON

- Resistencia axon

$$R = \frac{\rho_a \cdot l}{A}$$

$$A = \pi \cdot r^2$$



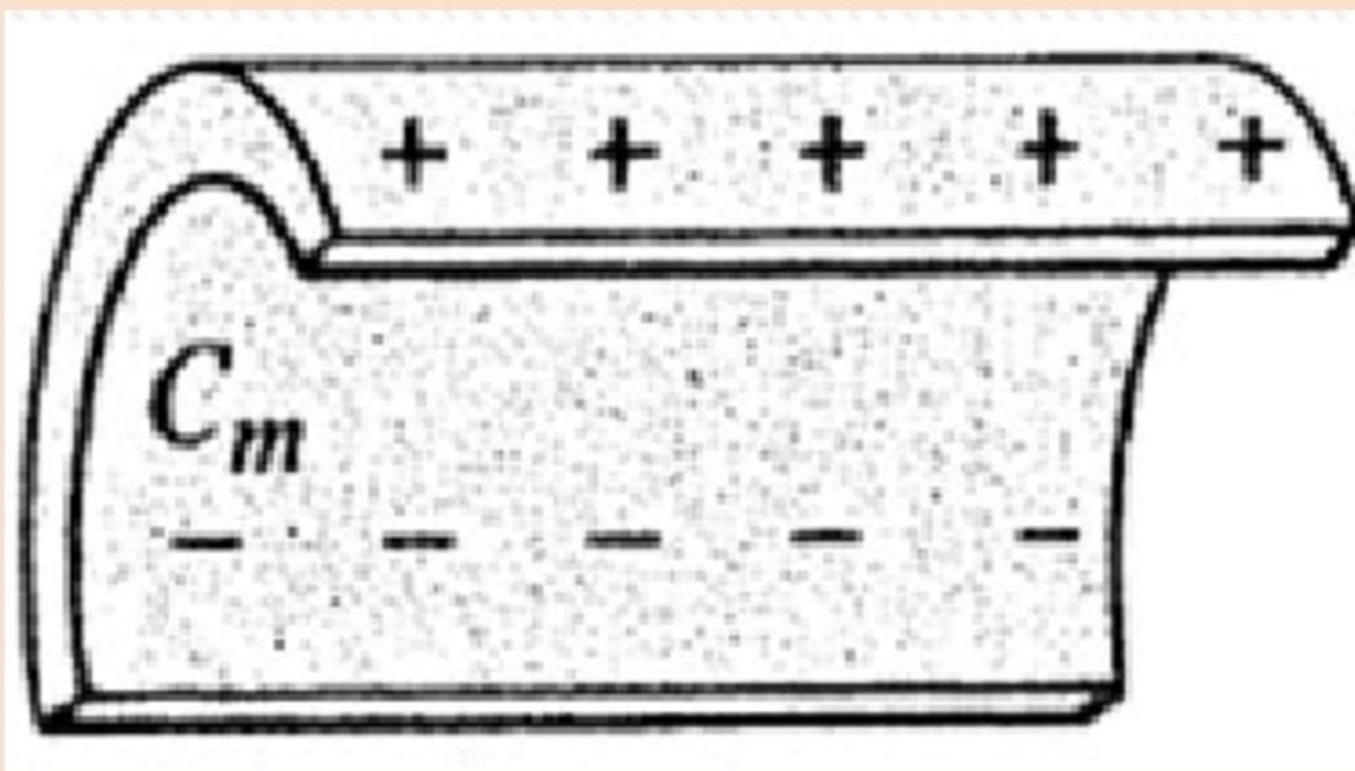
Seria el area de la seccion transversal!

- Si lo calculamos para medidas de axones reales:

$$R = \frac{2.0.01}{5.0 \times 10^{-6}} = 2.5 \times 10^8 \Omega$$

Qué largo debería tener un conductor de cobre del mismo diámetro para tener esa resistencia?

$$\rho_{Cu} = 1.78 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \quad \text{Hagamos la cuenta!}$$



- capacidad por unidad de área de la membrana

$$C_m = \frac{(Q/A)}{\Delta V}$$

MEMBRANA

La membrana también tiene capacidad eléctrica, ya que a ambos lados se acumulan cargas eléctricas de signo opuesto!

$$C_m = 5,0 \times 10^{-5} F/m^2$$

$$C_m = 1,0 \times 10^{-2} F/m^2$$

• Axones con mielina

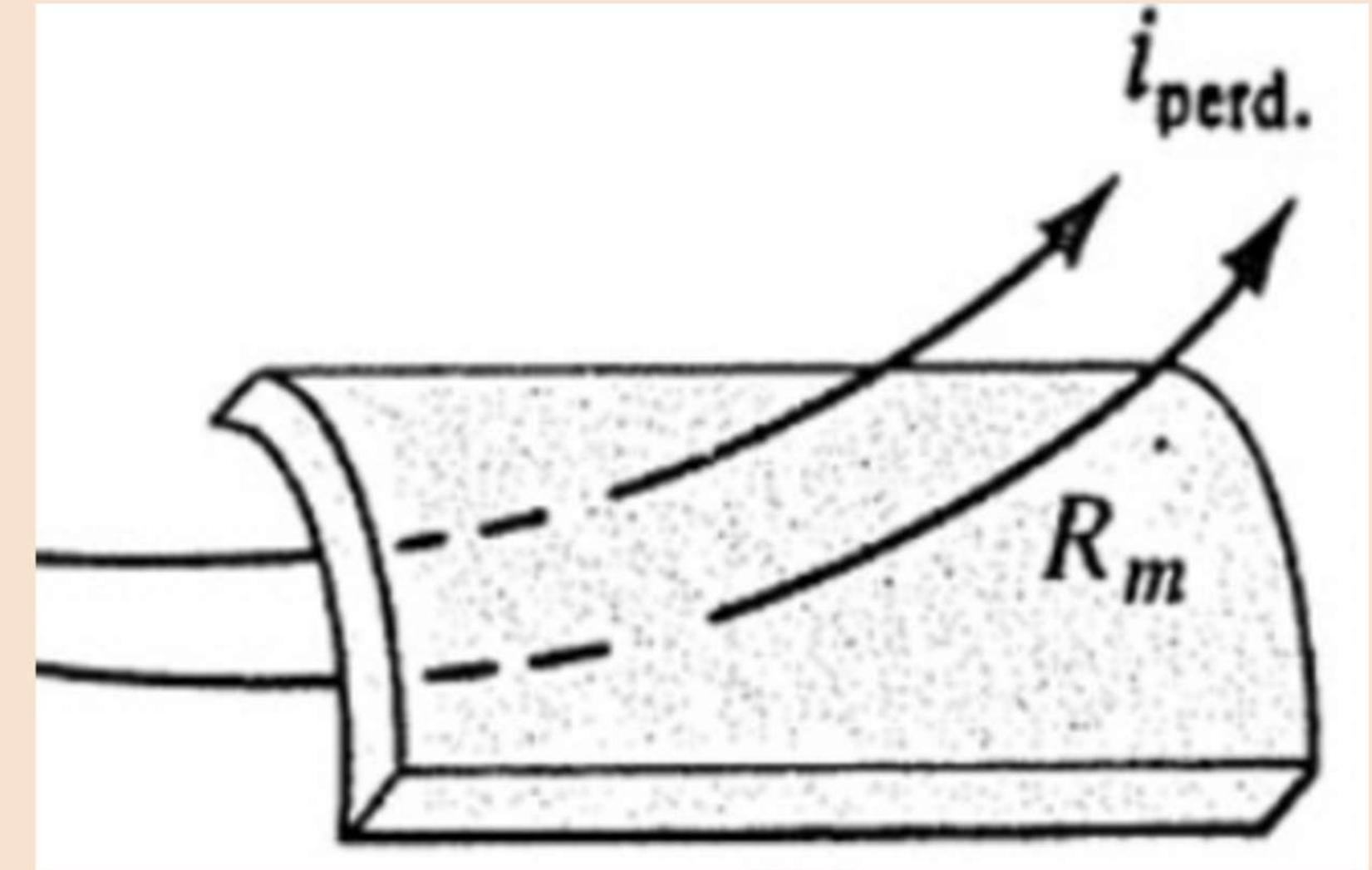
• Axones sin mielina

MEMBRANA

La membrana no es un aislante perfecto y parte de la carga escapa del axoplasma al líquido intersticial.

La corriente que a través de la membrana se denomina corriente de pérdida i_p

la resistencia de una unidad de área de membrana a la corriente de pérdida



$$R_m = 0,20 \Omega \cdot m^2$$

$$R_m = 40 \Omega \cdot m^2$$

- Axones sin mielina
- Axones con mielina

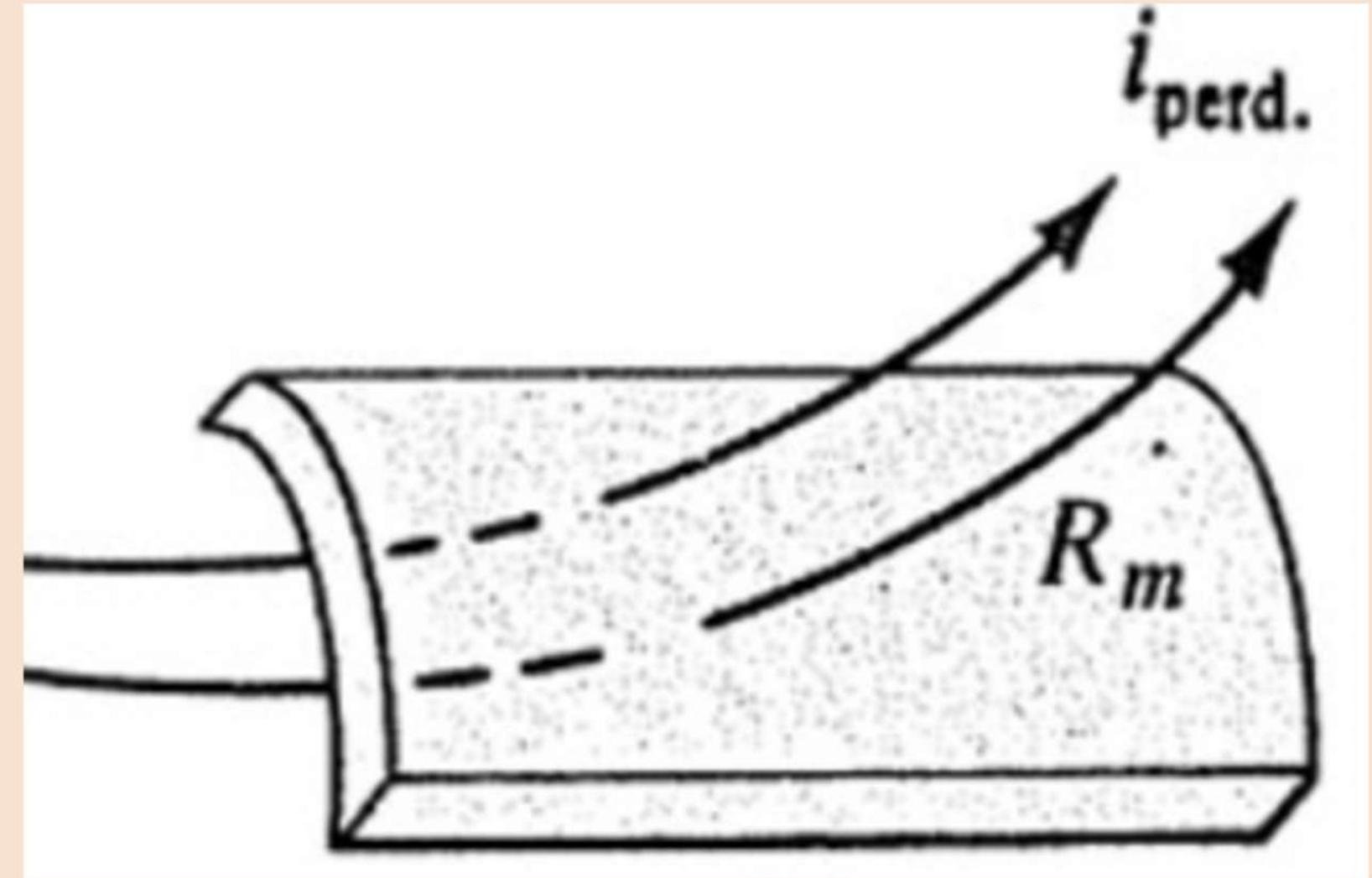
MEMBRANA

Resistencia de pérdida por la membrana R' es:

$$R' = \frac{R_m}{A_l}$$

$$A_l = 2\pi \cdot l \cdot r$$

cuanto seria la resistencia perdida para un trozo de axon sin mielina de radio $0,5 \mu\text{m}$ y 1 cm de largo?



La distancia a la que se igualan la resistencia del axón y la resistencia de pérdidas ($R = R'$) se conoce como parámetro espacial (λ)

$$R = R'$$

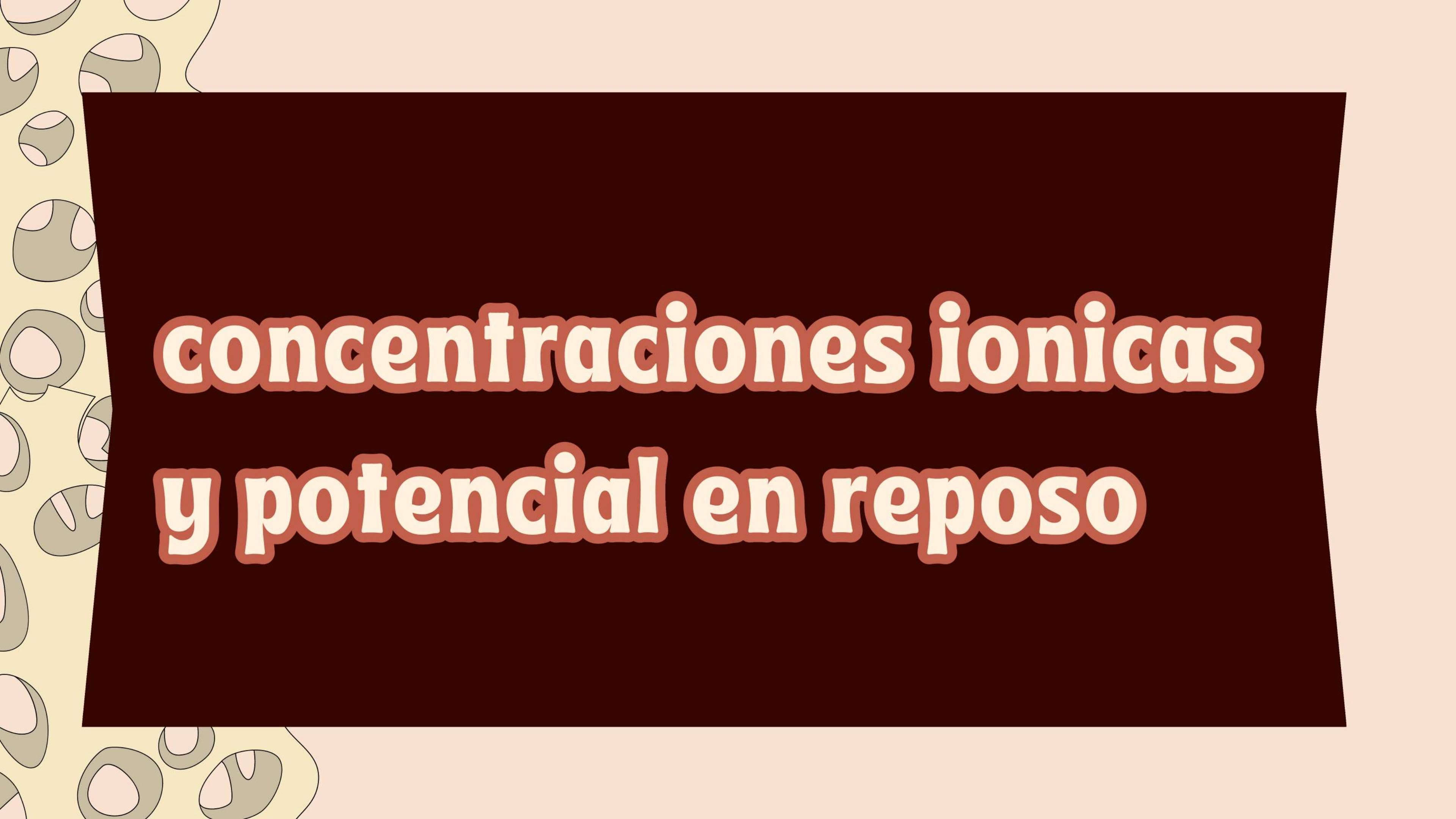
$$\frac{\rho_a \lambda}{\pi r^2} = \frac{R_m}{2\pi r \lambda}$$

$$\rho_a \lambda^2 = \frac{r R_m}{2}$$

MEMBRANA

indica qué distancia recorre la corriente antes de que la mayor parte se pierda en la membrana.

$$\lambda = \sqrt{\frac{r R_m}{2 \rho_a}}$$



concentraciones ionicas y potencial en reposo



QUE HAY FUERA DEL AXON?

Liquido conductor ya que cuenta con iones!



QUE HAY DENTRO DEL AXON?

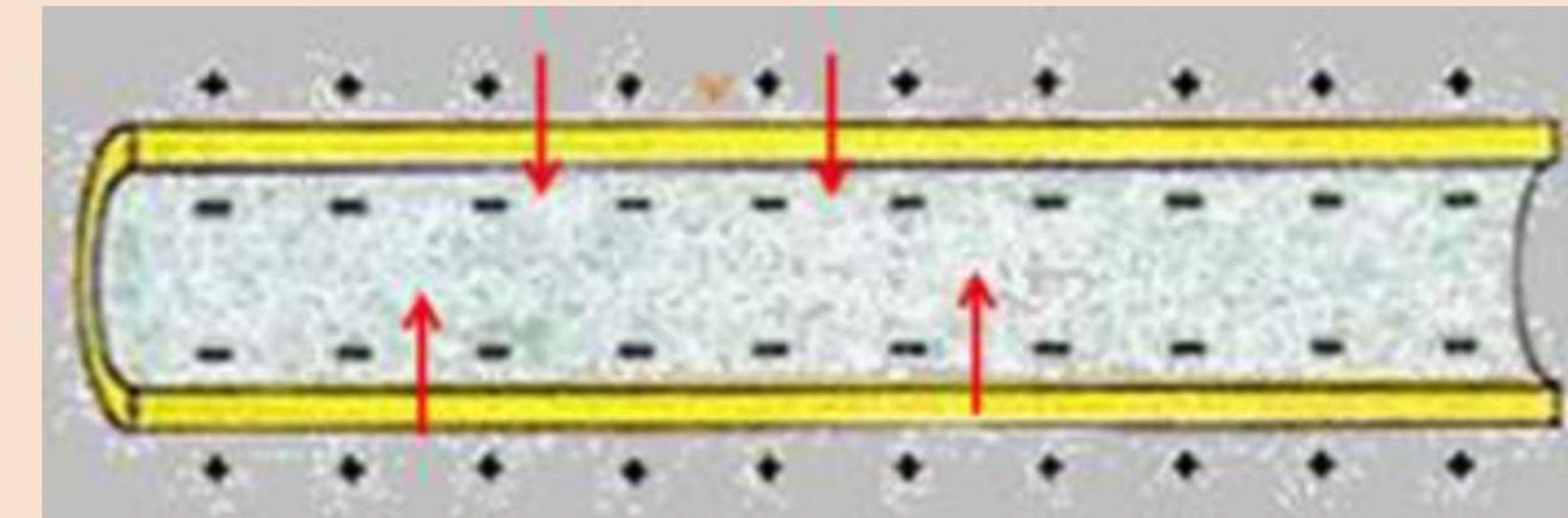
iones organicos anionicos

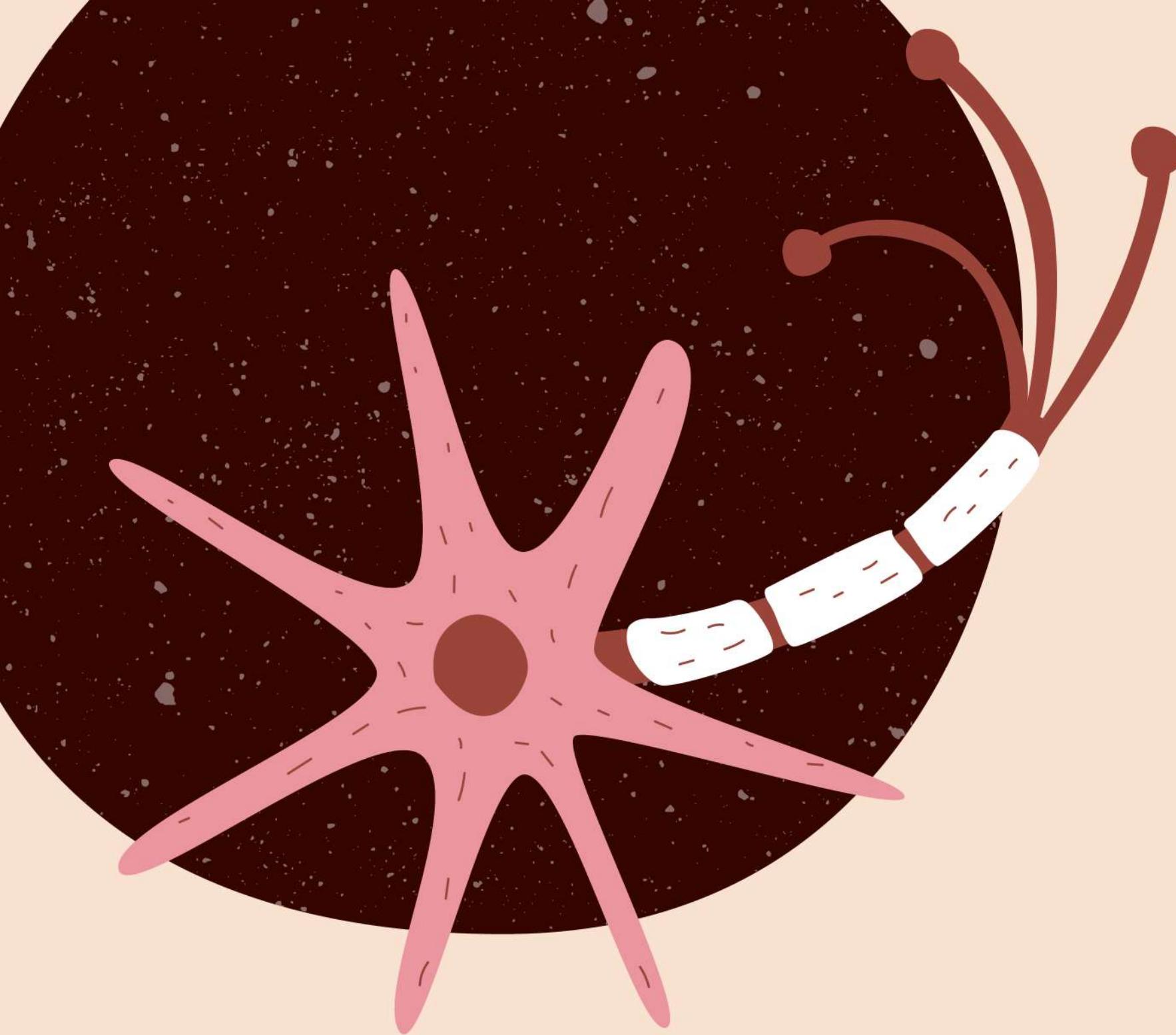




DIFUSION DE IONES

las concentraciones de iones de sodio y de potasio dentro y fuera del axón se igualan por difusión





DIFUSION DE IONES

Fluido exterior

Potencial: $V_0 = 0$ (por convenio)

Concentraciones en moles por metro cúbico

c_o		
Na^+	145	
K^+	4	
Cl^-	120	
(otros) $^-$	29	
		149

Fluido interior

$$V_t = -90 \text{ mV}$$

$$\begin{array}{r}
 c_f \\
 12 \\
 155 \\
 4 \\
 163
 \end{array}
 \leftarrow 167$$

Membrana

el campo eléctrico es entrante hacia el interior del axón

como hay un ΔV hay acumulación de cargas
ambos lados de la membrana

ECUACIÓN DE NERNST Y BOMBA NA-K

Se puede determinar si un ion está o no en equilibrio calculando el potencial teórico de reposo para el cual no habría flujo neto de dicho ion a través de la membrana celular

La diferencia de potencial de equilibrio para un ion puede obtenerse de la ecuación de Nernst

la energía potencial de un ion de carga=trabajo necesario para transportarlo a la zona de mayor concentración,

ECUACIÓN DE NERNST Y BOMBA NA-K

$$q \cdot (V_i - V_o) = k_B T \ln\left(\frac{C_o}{C_i}\right)$$

$$q = q_e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$T = 37 + 273 = 310 \text{ K}$$

$$\frac{k_B T}{e} = 26.7 \text{ mV}$$

$$\Delta V = \frac{k_B T}{q_e} \ln\left(\frac{C_o}{C_i}\right)$$

ECUACIÓN DE NERNST

- Calcula el potencial de difusión para un ion en particular
- asume que en el medio externo sólo existe un tipo de iones

Hay muchos iones a ambos lados de la membrana celular

PERO EN REALIDAD...

- debe incluir la difusión de varias especies iónicas.

ECUACIÓN DE GOLDMAN- HODGKIN-KATZ

$$V_m = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{p_K [K^+]_e + p_{Na} [Na^+]_e + p_{Cl} [Cl^-]_i}{p_K [K^+]_i + p_{Na} [Na^+]_i + p_{Cl} [Cl^-]_e} \right)$$

BOMBA DE SODIO Y POTASIO

- flujos pasivos: no requieren que la celula invierta energía para producir el pasaje de iones. Como es el caso de sodio hacia el interior de la célula y de potasio hacia el exterior.
- flujos activos: requieren uso de ATP ya que mantienen las concentraciones de iones en condiciones de no equilibrio:
 - bomba de sodio-potasio
 - trasnporte activo

MODELO

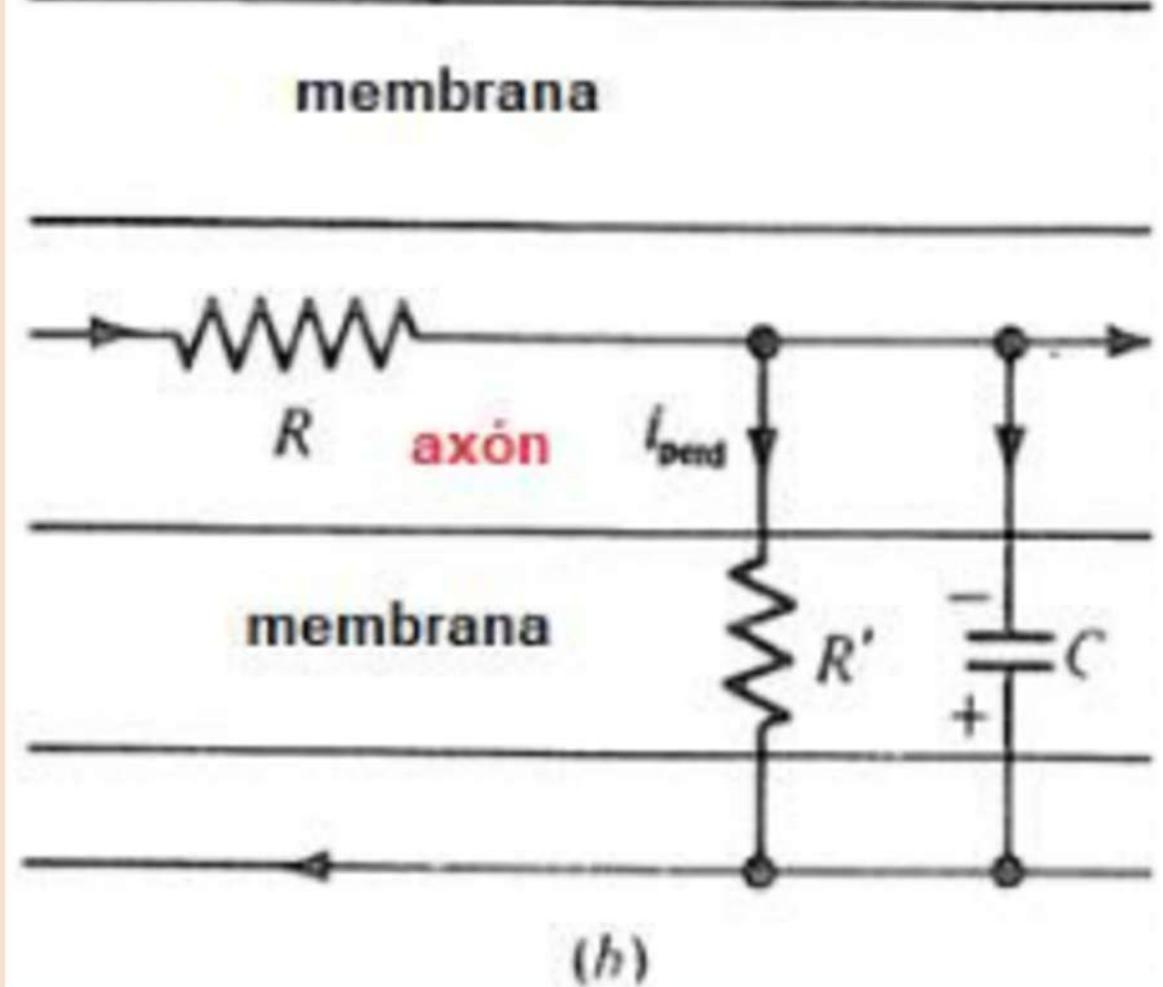
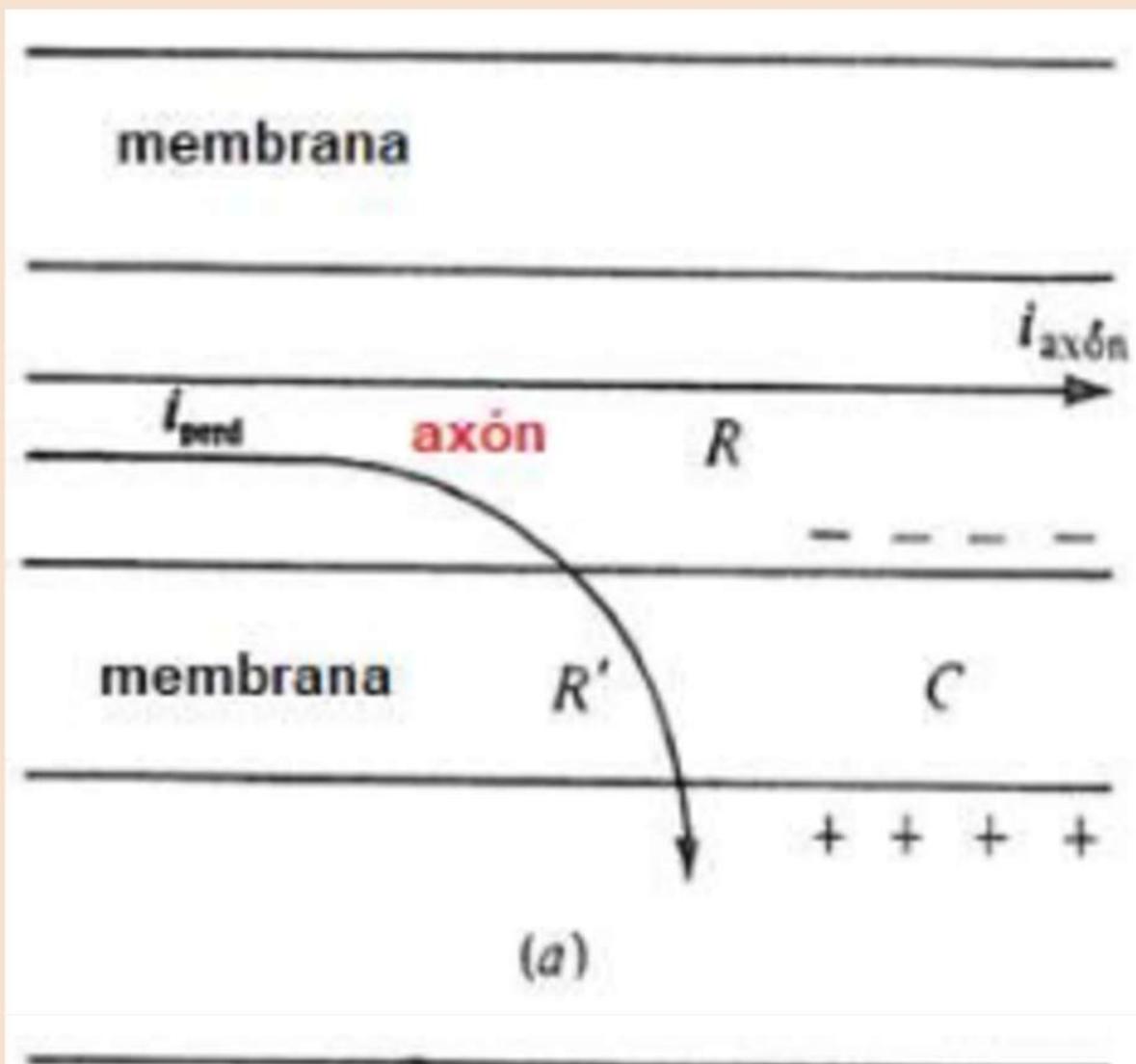
- Para un estímulo eléctrico menor que un cierto valor umbral crítico, la respuesta del axón es similar al de una red de resistencias y capacitores.
- Un estímulo superior al umbral, produce un pulso de corriente que recorre la longitud del axón sin atenuación

POTENCIAL DE ACCION

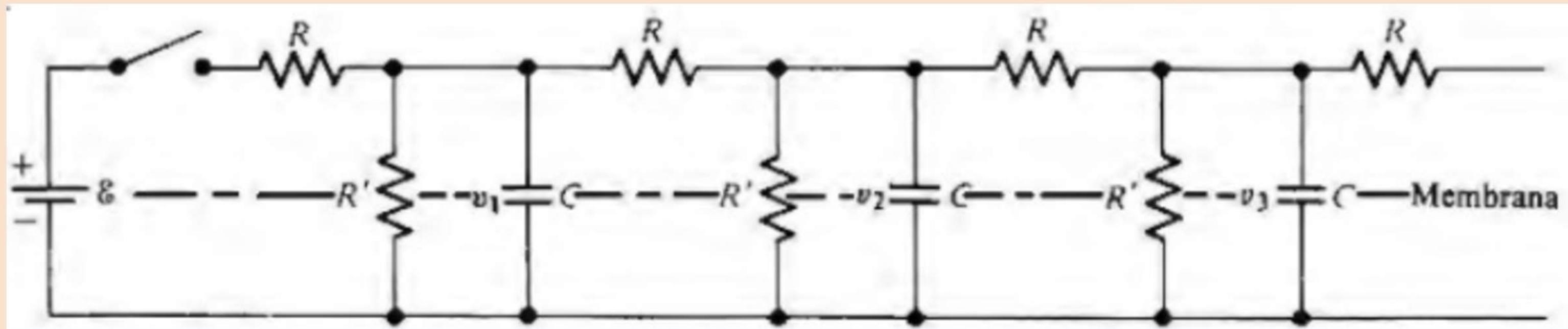
Podemos simular al axón como un circuito...

MODELO DE CIRCUITOS

- fluido intersticial: muy poca resistencia, se puede modelar como conductor perfecto
 - segmentos de axon: resistencias al pasaje de la corriente del axon
 - membrana: se la modela con una resistencia R' a la corriente de pérdida + capacitor



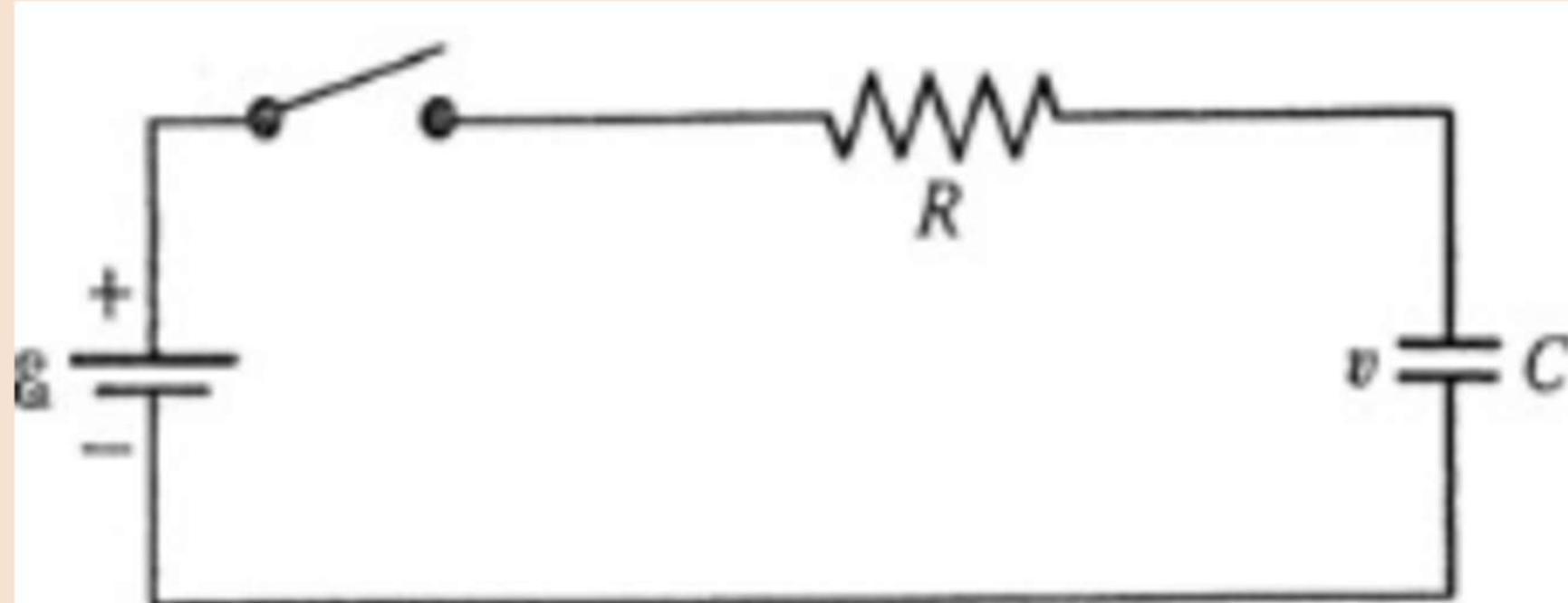
MODELO DE CIRCUITOS



El modelo del axon completo se ve como esta red de resistencias y capacitores

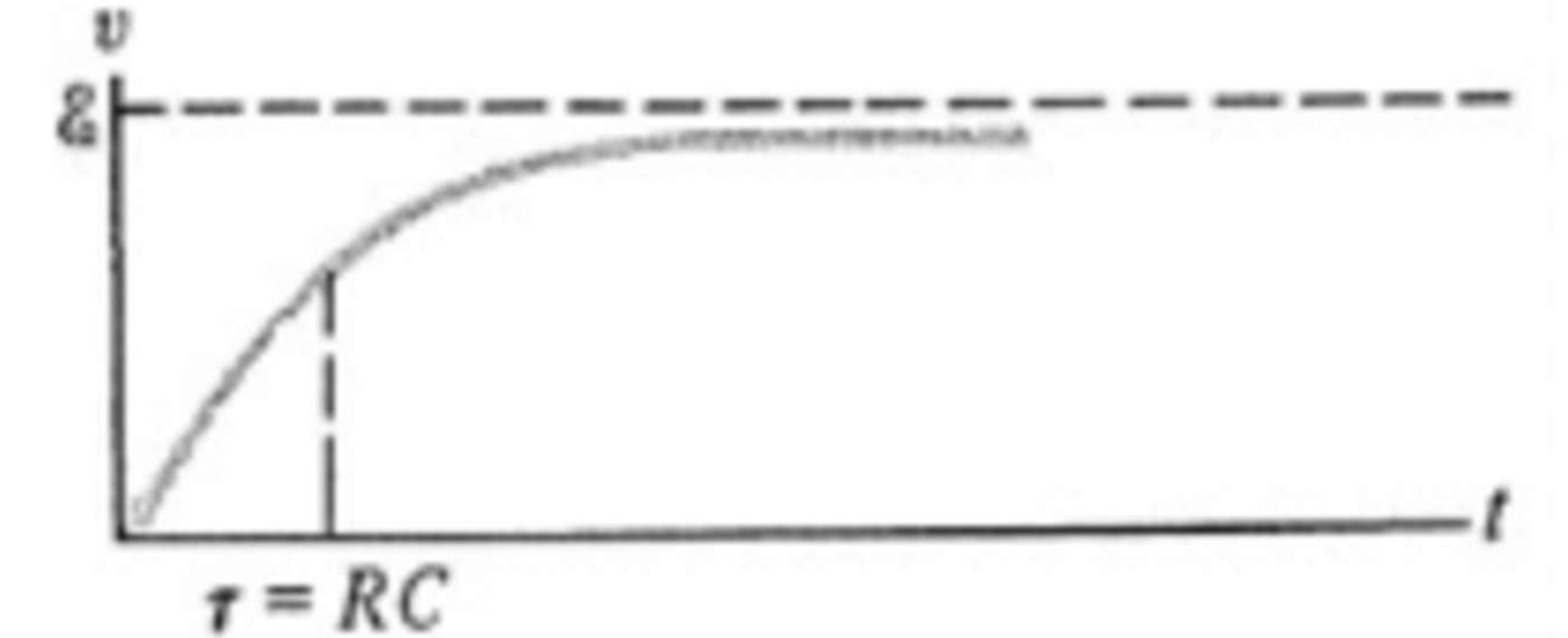
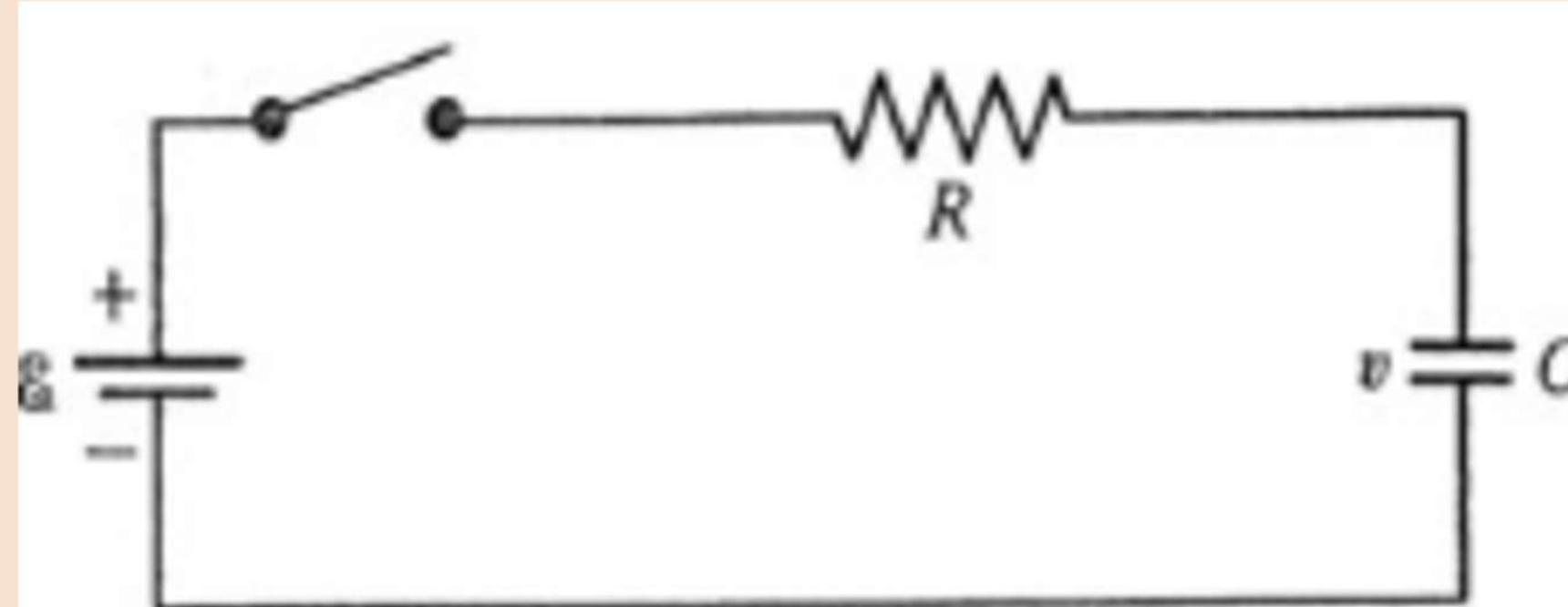
El funcionamiento del circuito es análogo al de un circuito RC

CIRCUITO RC



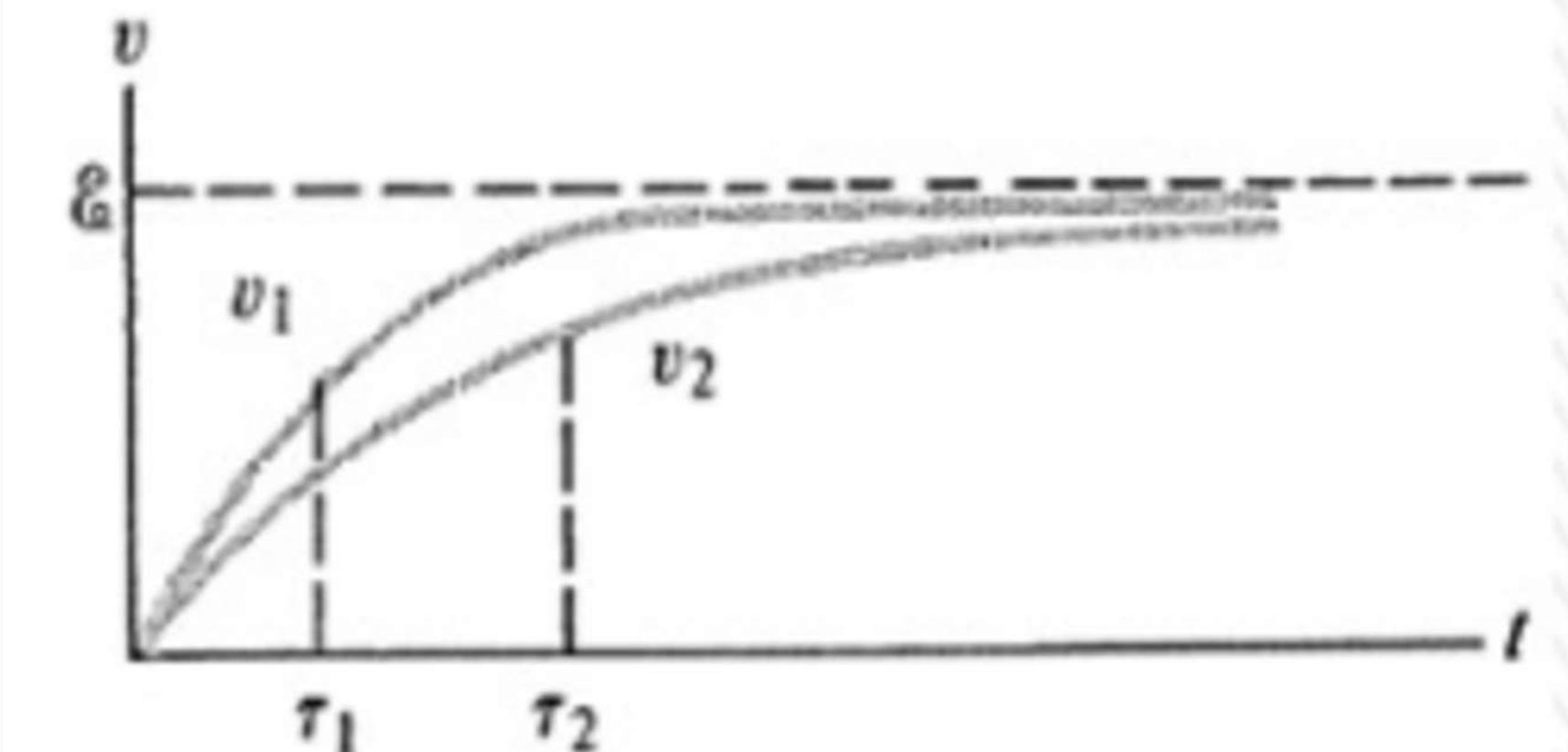
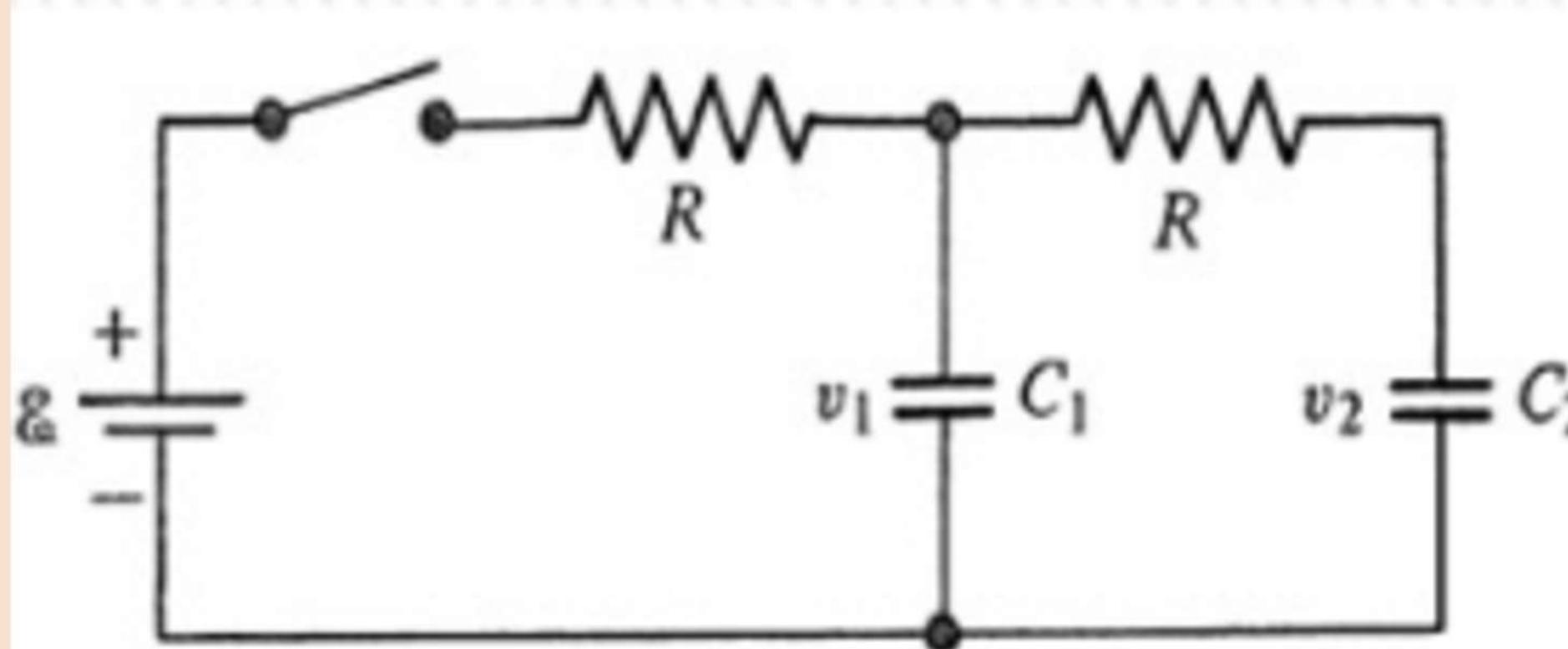
como era la diferencia de potencial de un circuito RC al cerrar el interruptor?

CIRCUITO RC



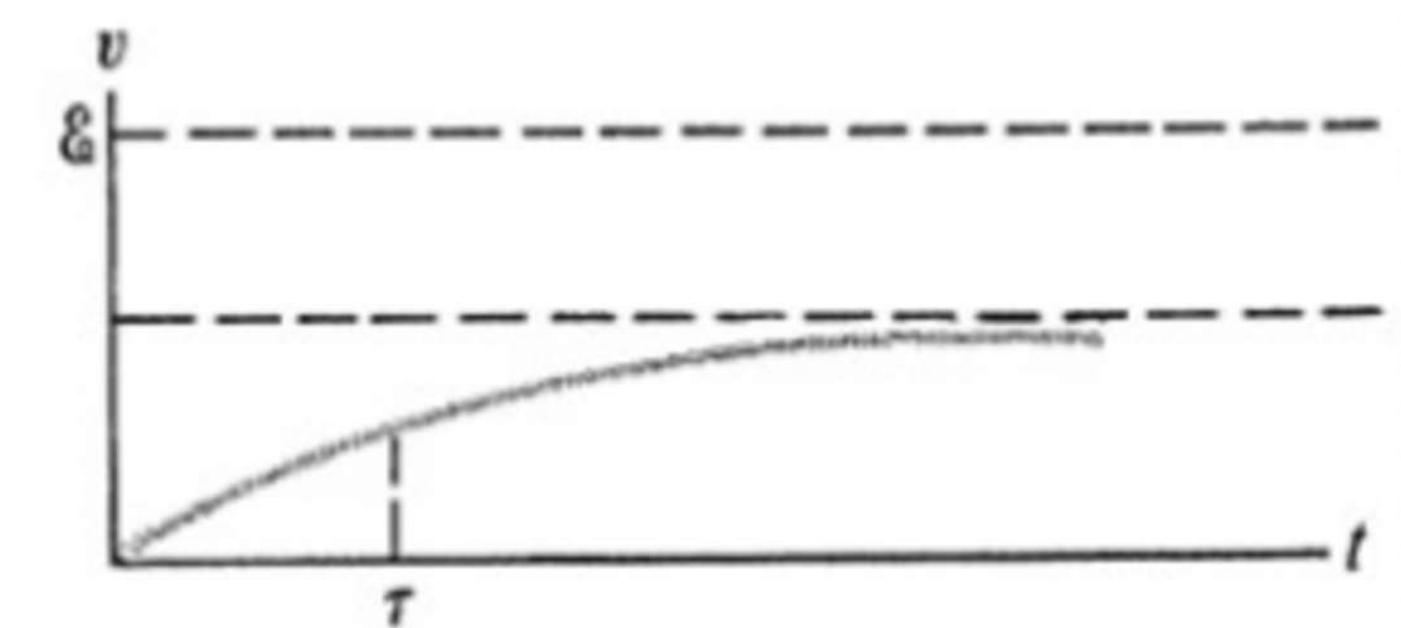
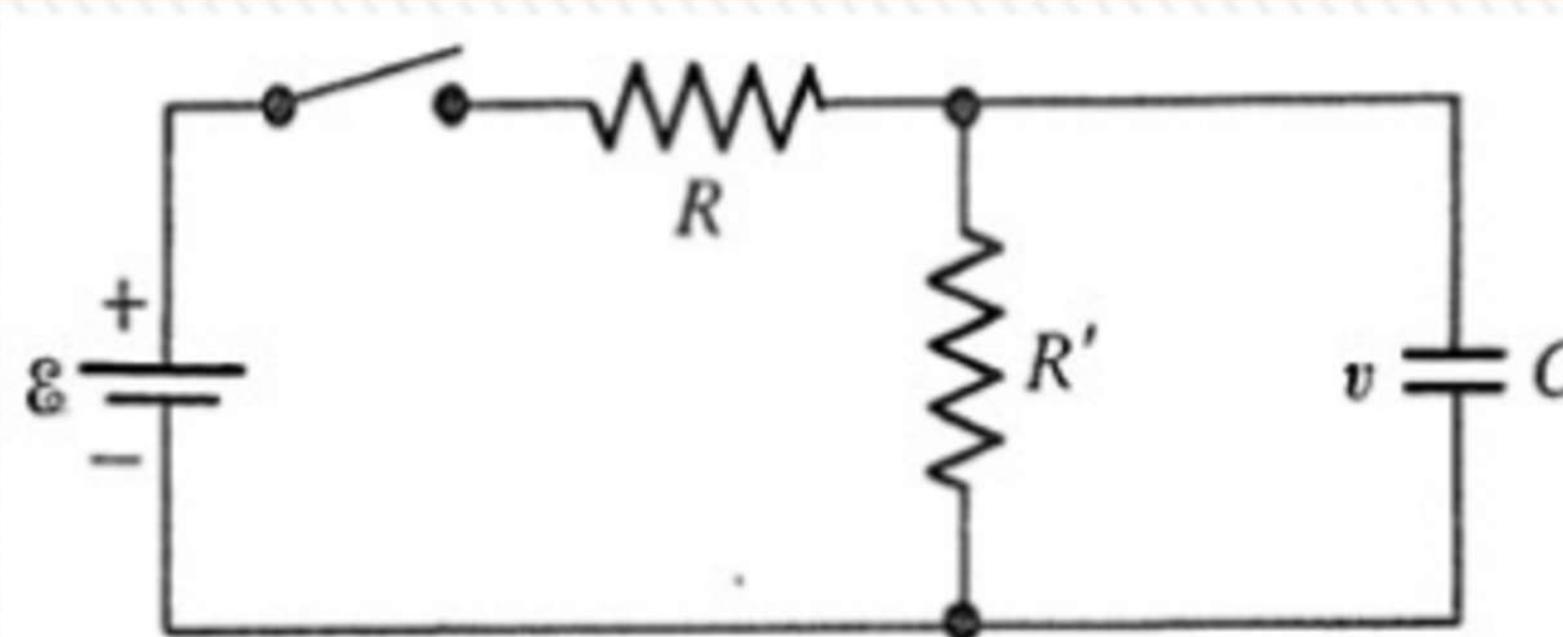
la diferencia de potencial aumenta gradualmente y tiene un tiempo de carga característico (tiempo necesario necesario para alcanzar un 63,2% de los valores finales de v)

CIRCUITO RC



- v_2 en C_2 crece más lentamente que v_1 a través de C_1
- el camino desde la batería hasta C_2 y regreso tiene una resistencia $2R$
- cuantos más pares RC se añaden, la diferencia de potencial a través de cada condensador que se añade aumenta más lentamente

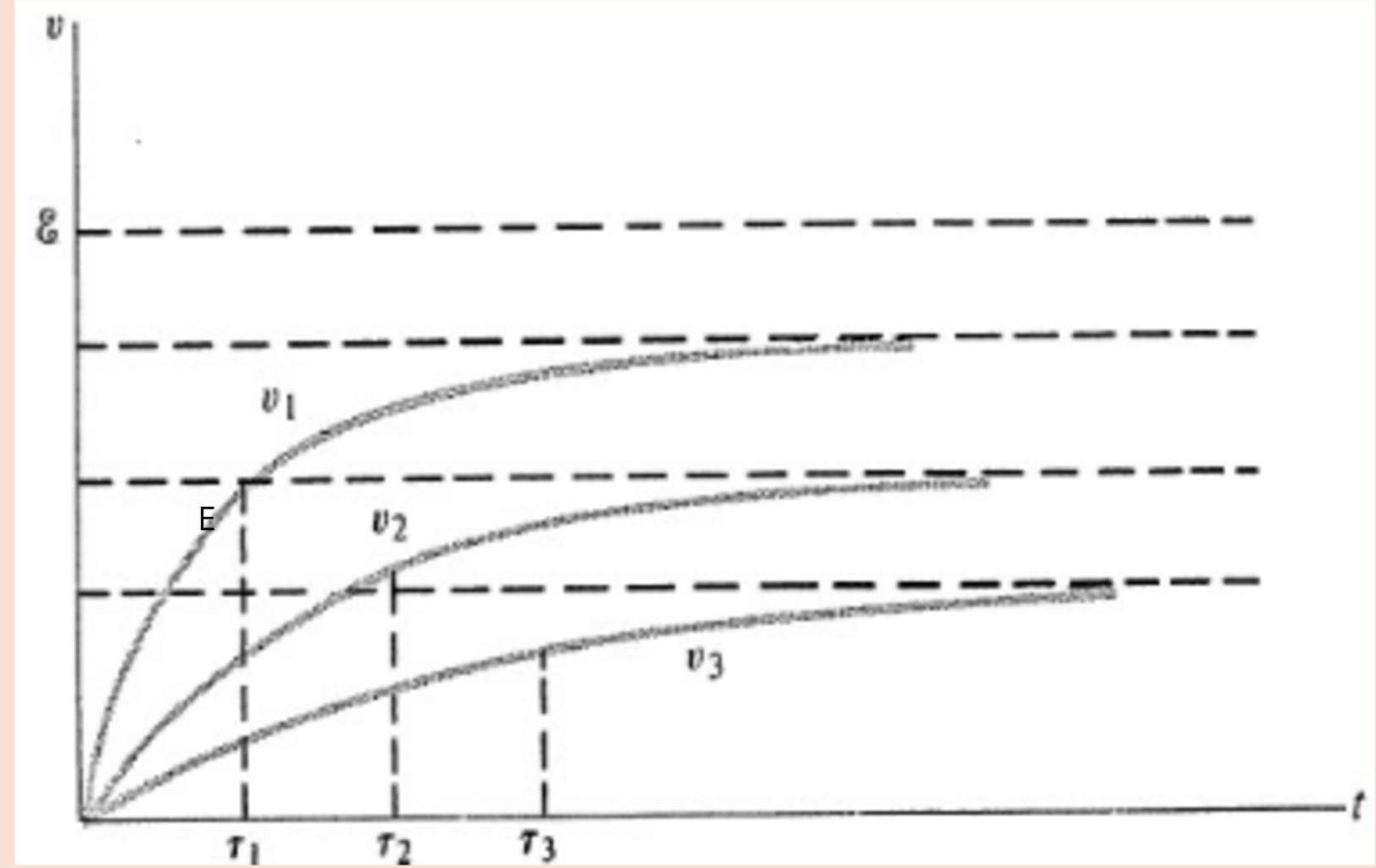
CIRCUITO RC



- v_2 en C_2 crece más lentamente que v_1 a través de C_1
- el camino desde la batería hasta C_2 y regreso tiene una resistencia $2R$
- cuantos más pares RC se añaden, la diferencia de potencial a través de cada condensador que se añade aumenta más lentamente

CIRCUITO RC

En el circuito análogo al axón, las diferencias de potencial finales van disminuyendo a medida que nos desplazamos hacia la derecha debido a la pérdida de corriente a través de las resistencias R' .



A medida que nos alejamos del estímulo, los cambios se producen más lentamente y sus valores finales disminuyen



**ejercicio de
practico**

EJERCICIO 2.2.6

2.2.6- Hasta ahora estudiamos estáticamente las propiedades resistivas y capacitivas de un axón. Veremos qué sucede cuando se lo somete a un estímulo débil. Entendemos como estímulo débil a aquel que no provoca un potencial de acción. Modelaremos el impulso como una fuente de corriente continua y al axón como una serie de resistores y capacitores, acorde a las propiedades que venimos estudiando hasta ahora. Supongamos que tenemos un axón con mielina de 2,5 cm de longitud, 5,0 μm de radio de axoplasma, resistencia por unidad de membrana de $R_m = 40 \Omega \cdot \text{m}^2$, 10 nm de espesor de membrana, y constante dieléctrica $\kappa = 7,0$

- Modelemos el axón como un circuito RC en serie, con R siendo la resistencia del axón a través del axoplasma y C la capacitancia de su membrana celular. Si cuando comienza el estímulo (se prende la batería) la carga del capacitor era nula, calcule cuánto tiempo le toma al capacitor en llegar a la mitad de su carga total, y cuánto le toma cargarse al 99%. ¿Estos resultados dependen de la intensidad del estímulo (representado por la batería)? ¿Es realista que así sea?
- En el modelo anterior ignoramos la resistencia de pérdida. Supongamos que, al irse el estímulo, la carga acumulada se pierde a través de la membrana celular. Modelamos entonces la descarga mediante un circuito RC en serie sin fuente, donde C es la capacidad de la membrana celular, y $R = R_o$ es la resistencia de pérdida del axón con mielina. ¿Cuánto demora, aproximadamente, en descargarse completamente el capacitor? ¿Qué tomó menos tiempo, la carga o la descarga?
- Esboce el gráfico de la carga como función del tiempo para este axón en el caso de que la carga inicial era nula, aparece el estímulo hasta que el capacitor se carga completamente, y luego se descarga a través de la resistencia de pérdida.

potencial de acción

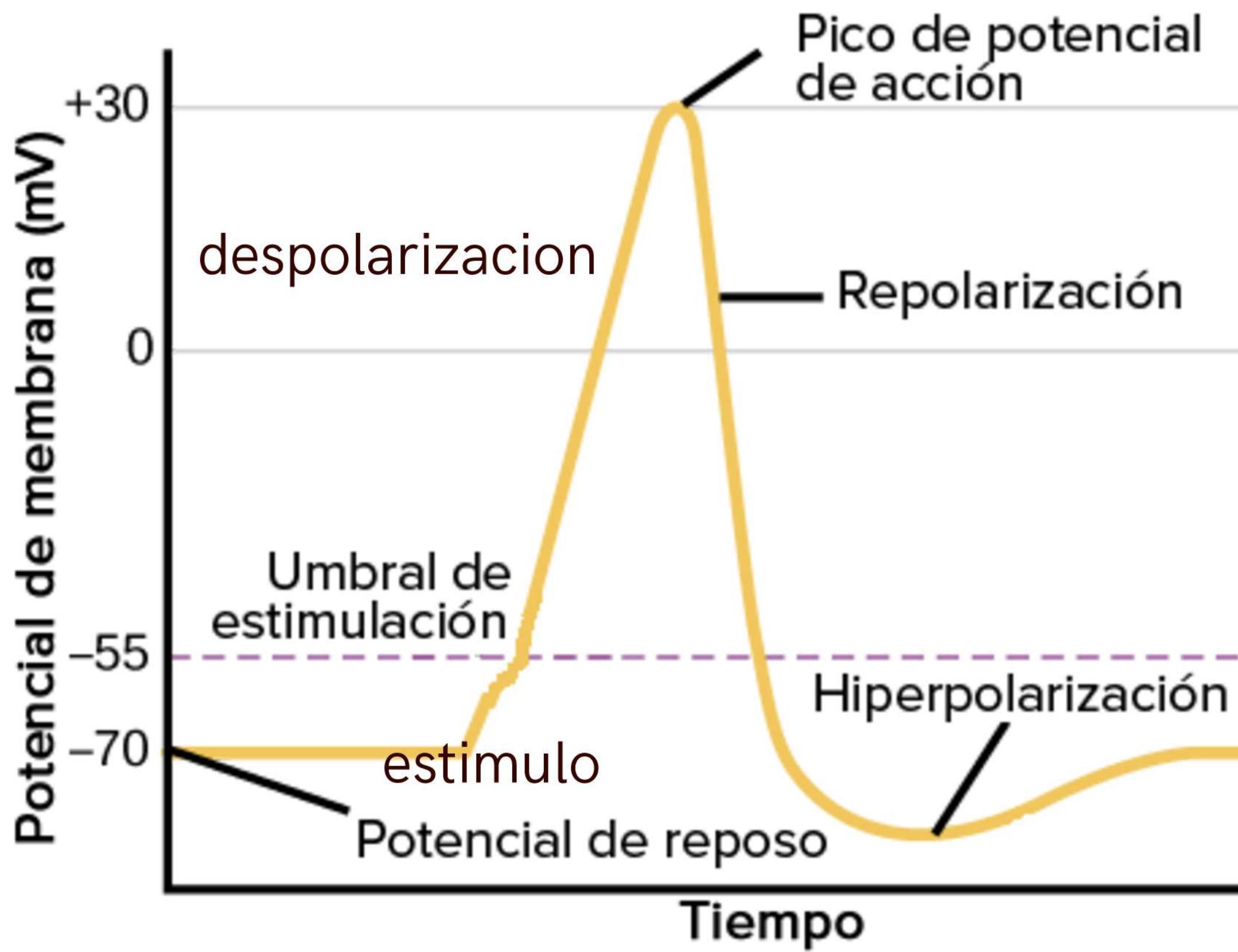
- Es un cambio muy rápido en la polaridad de la membrana de negativo a positivo y vuelta a negativo, donde ocurre la activacion y desactivacion de canales ionicos dependientes del voltaje.
- Ocurre cuando la célula recibe un estímulo suficientemente fuerte y supera un umbral de activación.
- El interior de la célula, que normalmente es más negativo que el exterior (≈ -70 mV en una neurona en reposo), se despolariza rápidamente, llegando a valores positivos ($\approx +30$ mV).
- Luego, la membrana se repolariza y hasta puede producirse una hiperpolarización antes de volver al estado de reposo.

potencial de acción

- El potencial de acción no se mantiene en un punto de la membrana, sino que viaja a lo largo de la misma, lo que da lugar al impulso nervioso.
- Se debe superar un potencial umbral (alrededor de -55 mV) para el desarrollo del potencial de acción.

FASES:

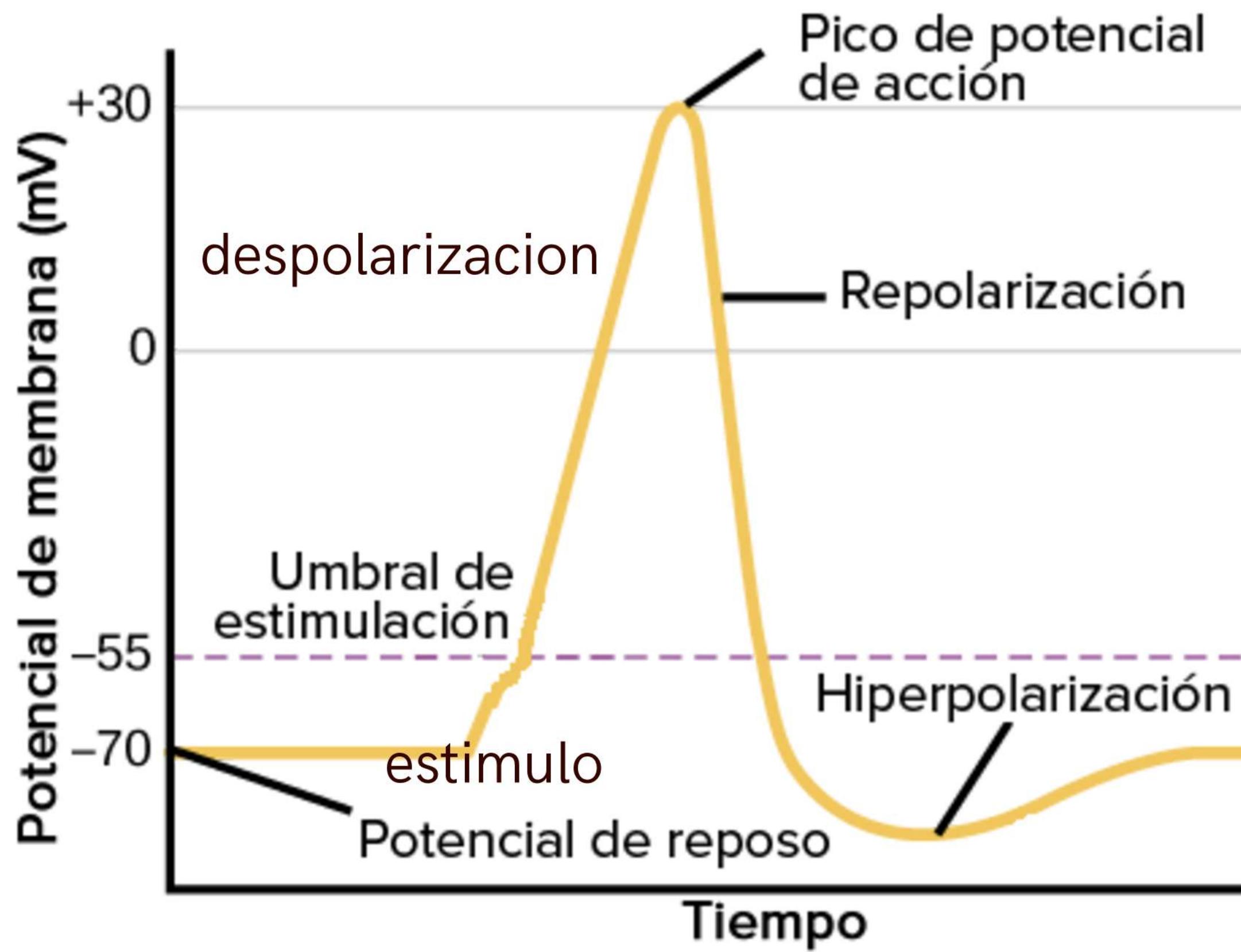
1. Reposo: membrana en ≈ -70 mV, controlada por la bomba Na^+/K^+ y permeabilidad al K^+ .
2. Despolarización: se abren canales de sodio (Na^+), entra $\text{Na}^+ \rightarrow$ interior más positivo.
3. Repolarización: se cierran canales de Na^+ y se abren canales de potasio (K^+), sale K^+ . Vuelve al potencial en reposo, interior vuelve a ser negativo.
4. Hiperpolarización: salida excesiva de K^+ hace que el interior quede más negativo que en reposo.
5. Recuperación: la bomba Na^+/K^+ restablece las condiciones iniciales.



FASES:

al alcanzar el pico se inactivan los canales de sodio

que pasa si no se alcanza el potencial umbral?

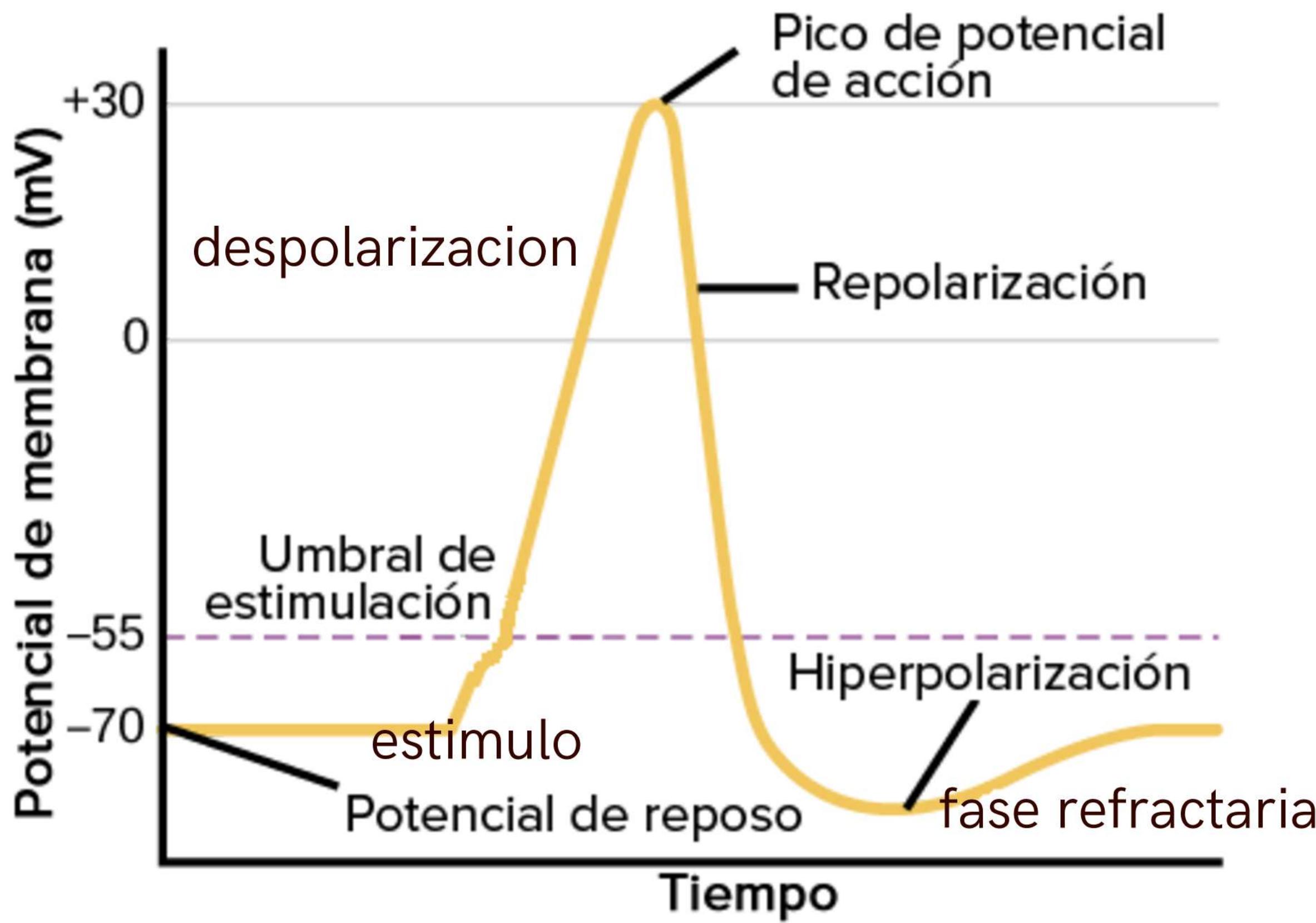


FASES:

Serán intentos fallidos!

Si el estímulo sí supera el umbral, se abre una cascada de canales de Na^+ dependientes de voltaje

comienza el potencial de acción



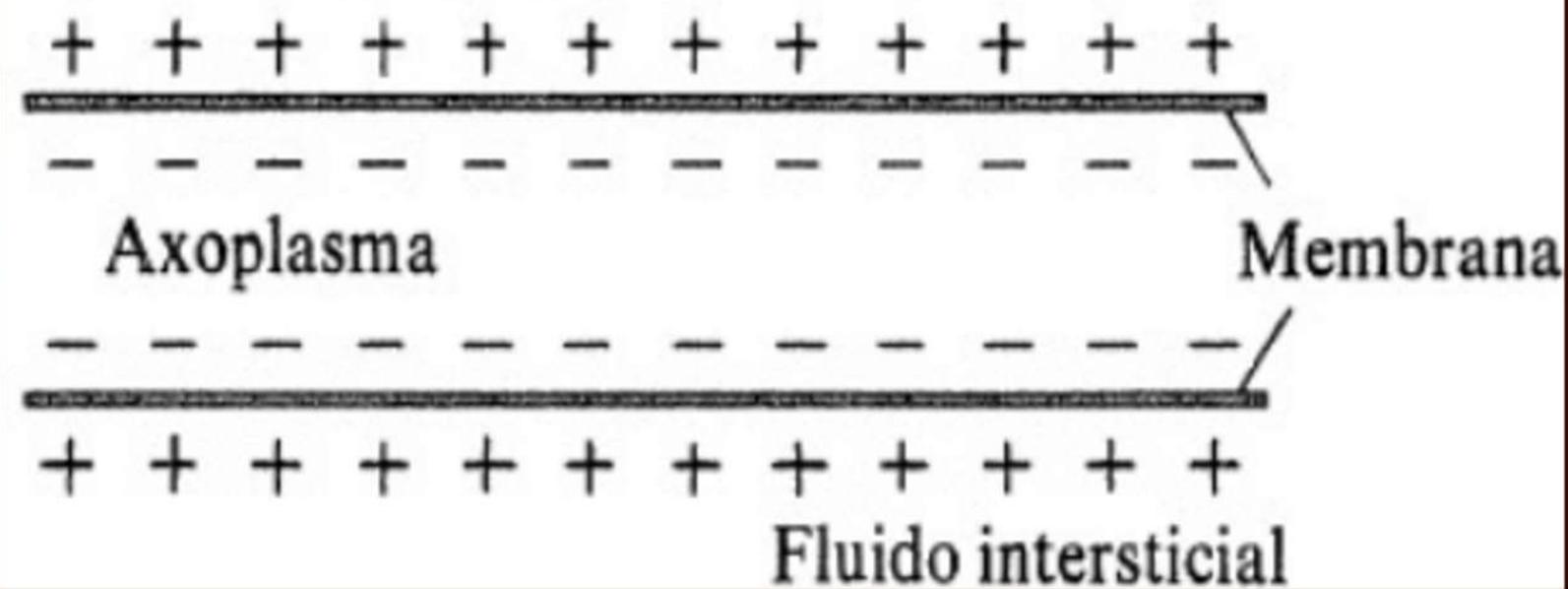
FASES:

Durante la fase refractaria la celula no puede iniciar otro potencial de acción

Esto asegura que el impulso eléctrico se propague en una sola dirección

FASES:

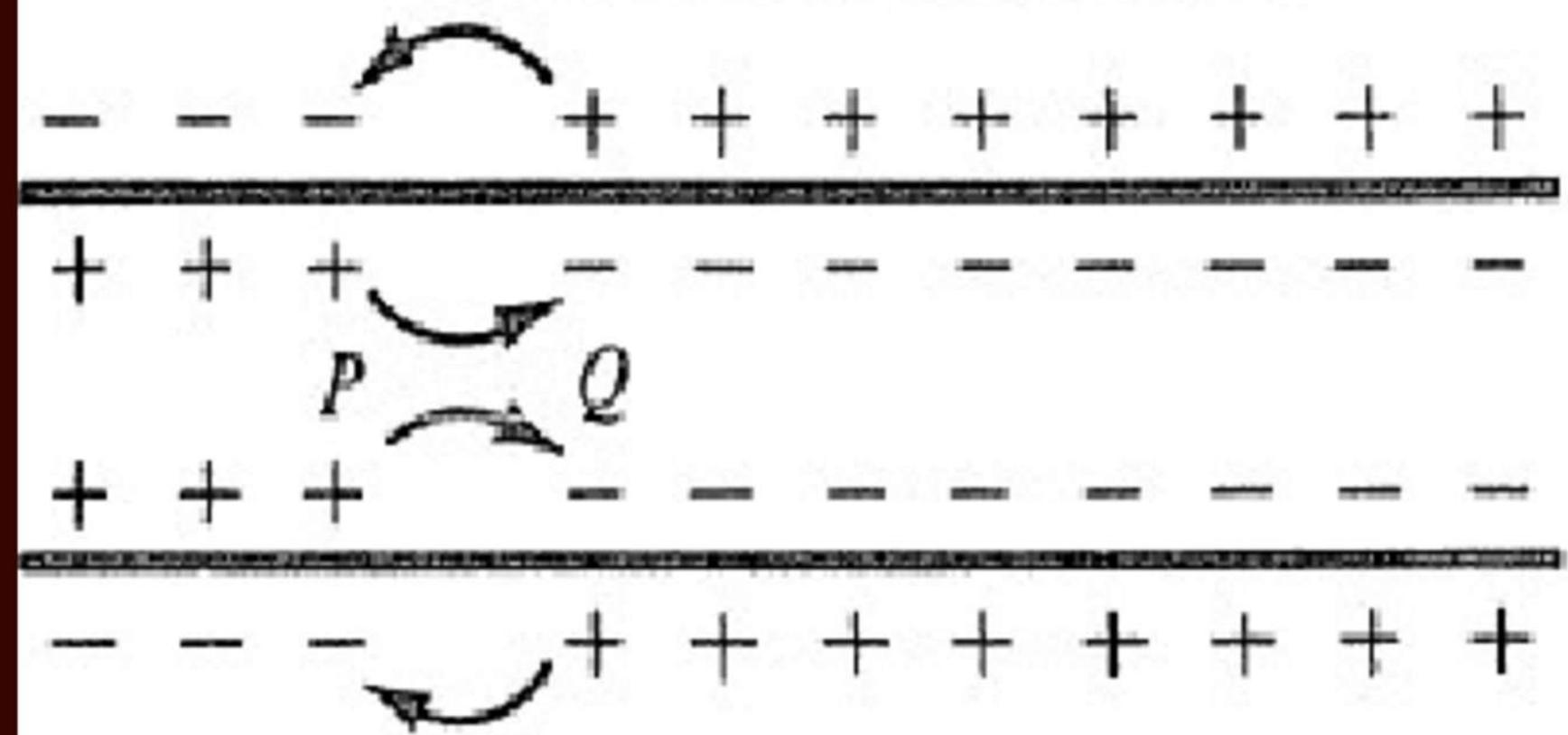
Fluido intersticial



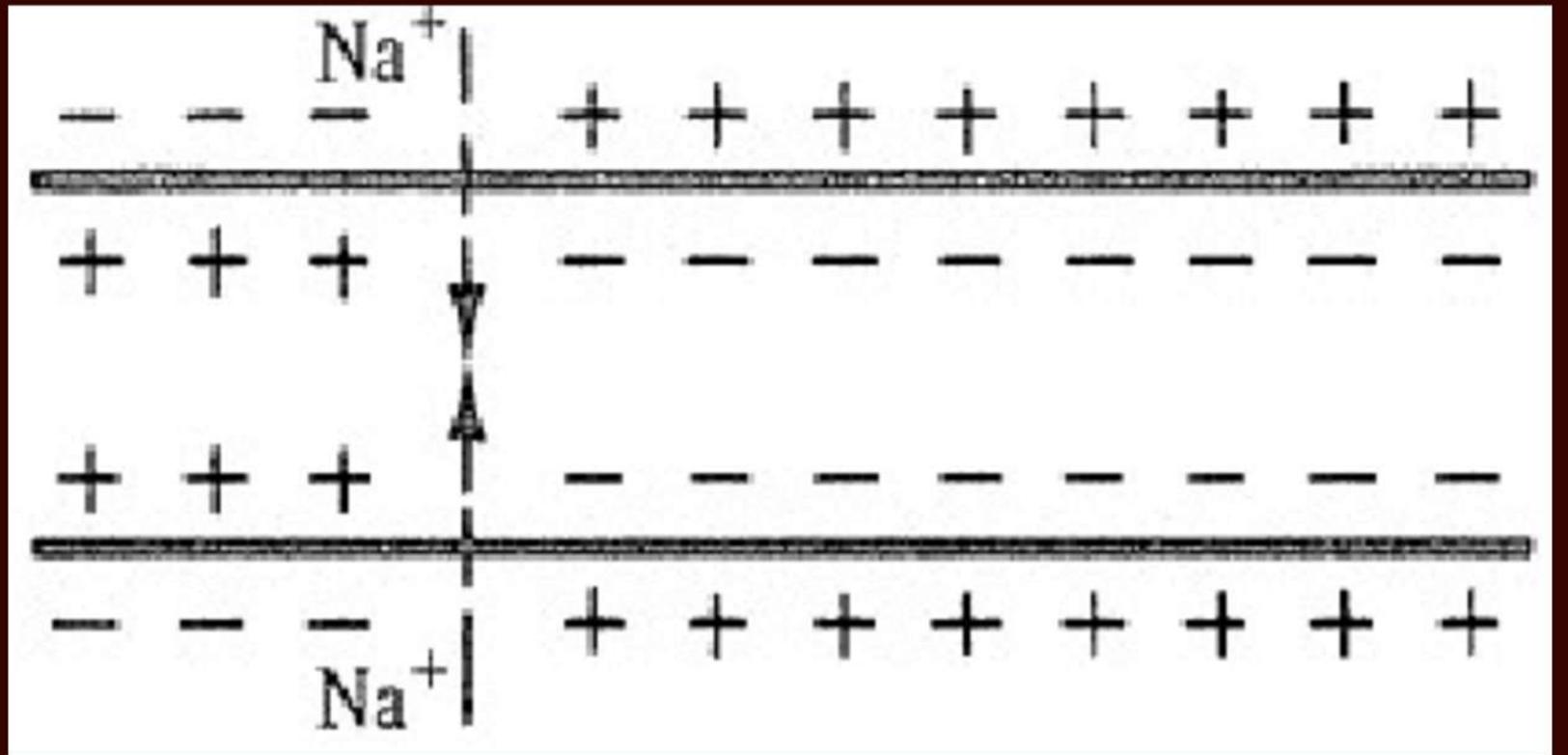
Estado en reposo

Un pulso del potencial de acción ha viajado por el segmento del axón hasta el punto P. Las cargas en ambos lados de la porción adyacente de la membrana en Q disminuyen gradualmente en valor y el potencial aumenta ahí hacia el umbral del potencial de acción.

Flujo de iones positivos



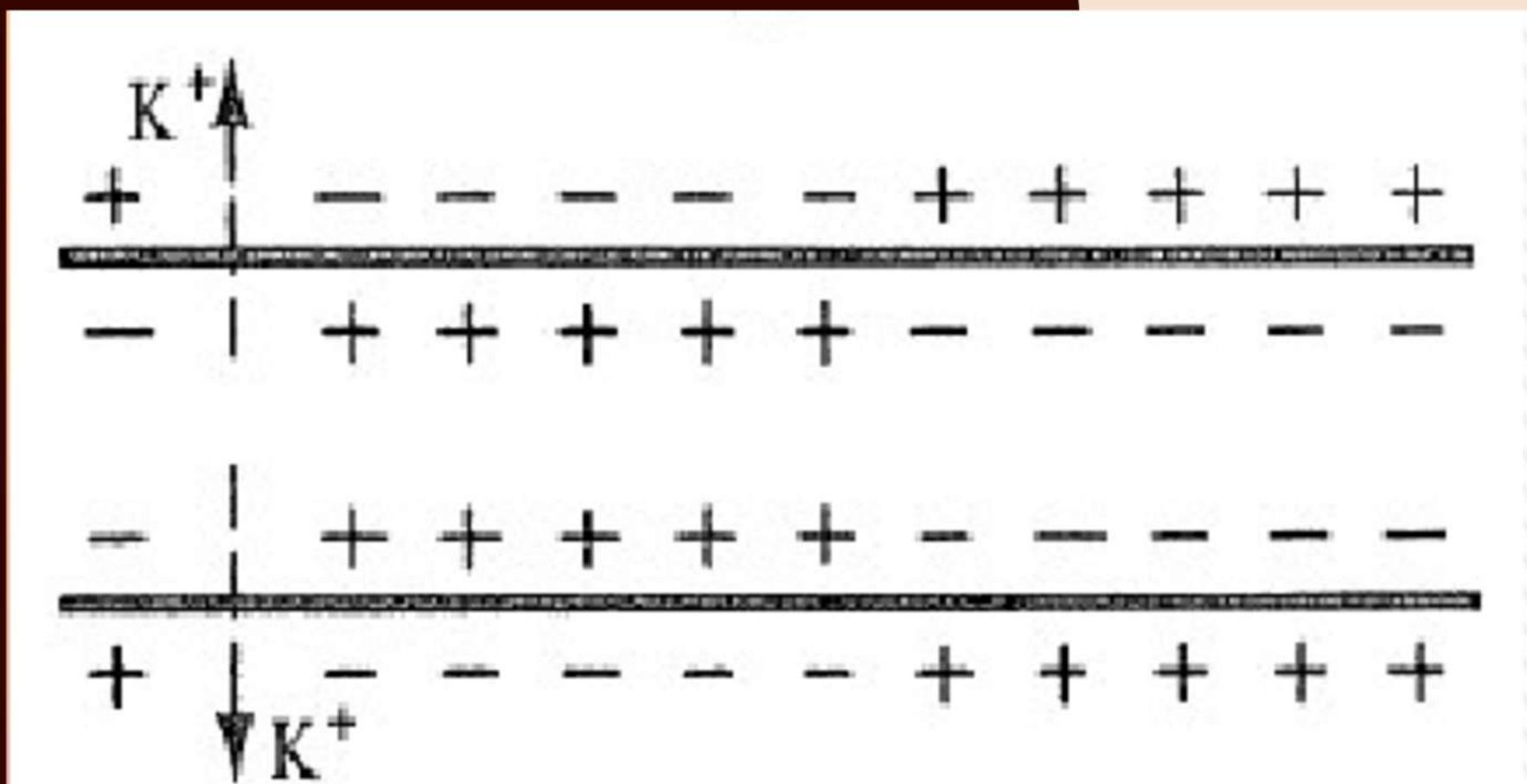
FASES:



se alcanza el umbral,
la membrana permite un flujo hacia
adentro de iones de sodio

El pulso del potencial de acción ha
continuado su recorrido a lo largo del
axón

Comienza a volver al potencial negativo
Flujo hacia afuera de los iones de
potasio



FASES:

El proceso de recuperación dura aproximadamente unos 50 ms. Durante este periodo no se puede generar en esta zona un nuevo potencial de acción

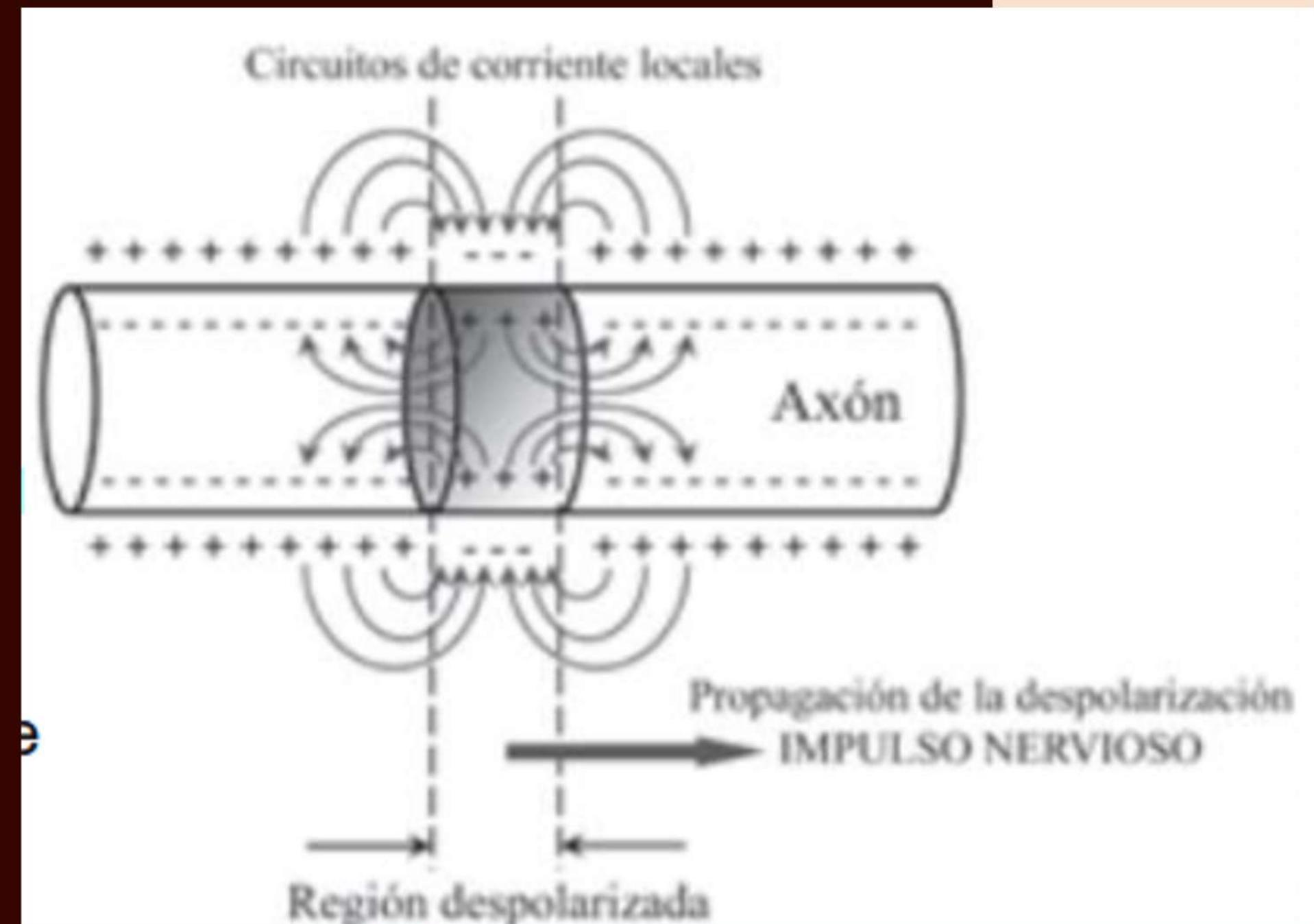
El potencial de acción no es proporcional al estímulo, sino que es una respuesta transitoria del tipo todo o nada.

El flujo local de iones Na^+ al interior del axón durante el desarrollo del potencial de acción provoca una despolarización parcial de la membrana, y genera un flujo de carga en el exterior del axón, dando lugar a circuitos locales de carga

El flujo local de iones Na^+ al interior del axón durante el desarrollo del potencial de acción provoca una despolarización parcial de la membrana, y genera un flujo de carga en el exterior del axón, dando lugar a circuitos locales de carga

Estos flujos van modificando el potencial de membrana del axón, siendo este cambio el que constituye el impulso nervioso

FASES:



¡MUCHAS GRACIAS!