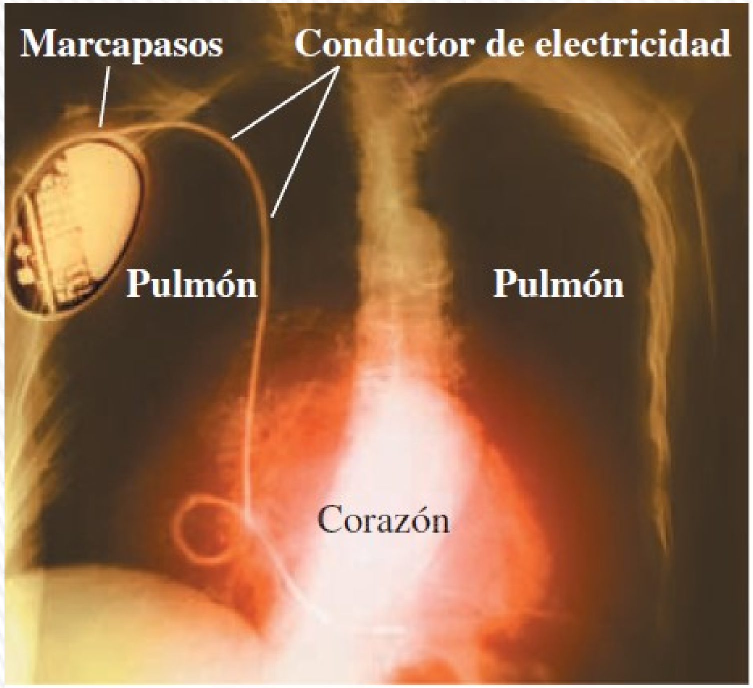
5- CIRCUITOS RC Y CONDUCCIÓN NERVIOSA



AVISOS

Primera evaluación corta resultados: 1,89/3,50 (54%)
Respondieron: 129/235 (55%)
Calificaciones: ver en pestaña "Evaluaciones" planilla de calificaciones

2da. evaluación corta: a partir de este jueves 21 y hasta el sábado 23/09 a la medianoche… temas de Unidad 2.

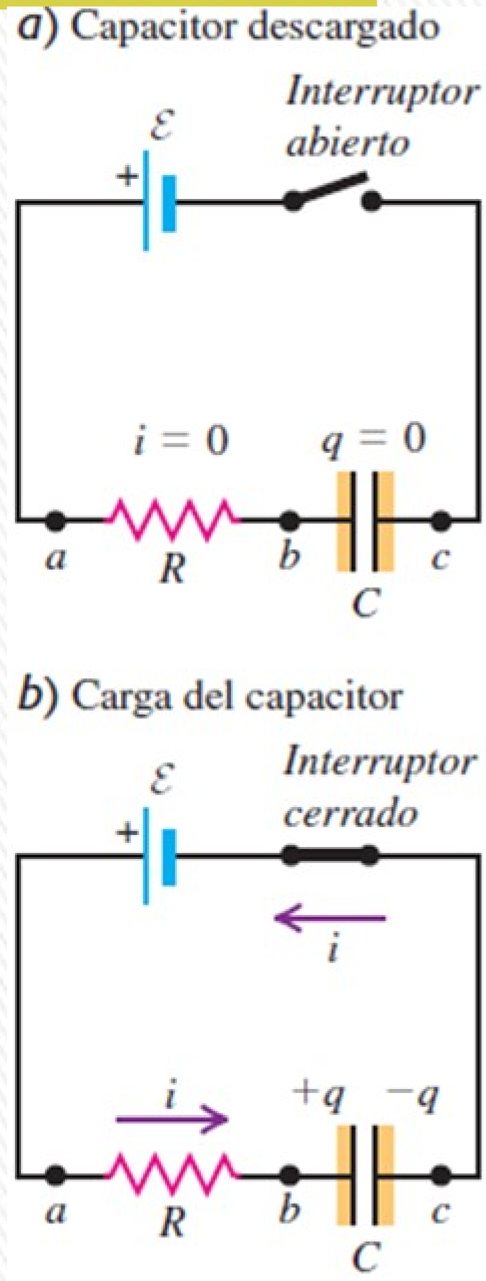
CIRCUITOS RC – Carga de un capacitor

Circuito con resistor y capacitor en serie: **circuito *RC***.
Batería ideal de fem Ɛ constante (r =0) y se desprecia la resistencia de todos los conductores de conexión, salvo el resistor *R*.
Inicialmente capacitor descargado, en $t = 0$, cierro el interruptor
Circula la corriente alrededor y comienza a cargar el capacitor.

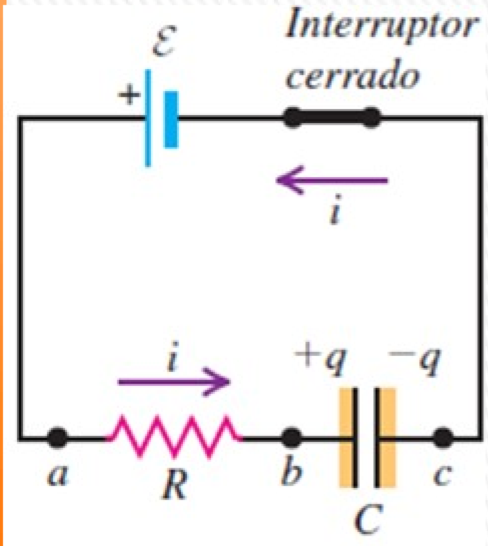
Como en $t = 0$ el capacitor está descargado $v_{bc}=0$, y el voltaje v_{ab} a través del resistor *R* es igual a la fem Ɛ; y la corriente inicial a través del resistor, $I_0 = v_{ab}/R = \mathcal{E}/R$.

Es decir que en t=0 el capacitor se comporta como un cable (conductor perfecto).

A medida que el capacitor se carga v_{bc} aumenta, mientras que v_{ab}, disminuye, cumpliéndose que: $\mathcal{E} = v_{ab} + v_{bc}$.
Sea *q* la carga del capacitor e *i* la corriente del circuito.
Luego de un cierto tiempo, el capacitor se termina de cargar, $i = 0$, por lo que $v_{ab} = i.R = 0$, y $v_{bc}= \mathcal{E}$.
Las diferencias de potencial instantáneas valen:
$v_{ab} = i.R$ y $v_{bc}= q/C$.



CIRCUITOS RC – Carga de un capacitor



Con la regla de Kirchhoff de las mallas, se obtiene

$$\mathcal{E} - i.R - \frac{q}{C} = 0 \qquad i = \frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC}$$

En t = 0 q = 0, por lo que la corriente *inicial* vale $I_0 = \mathcal{E}/R$.
A medida que q *aumenta*, *q/RC crece* y la carga del capacitor q tiende a su valor final (Q_f), la corriente i disminuye y finalmente se vuelve cero.
Cuando i = 0: $Q_f = \mathcal{E}.C$

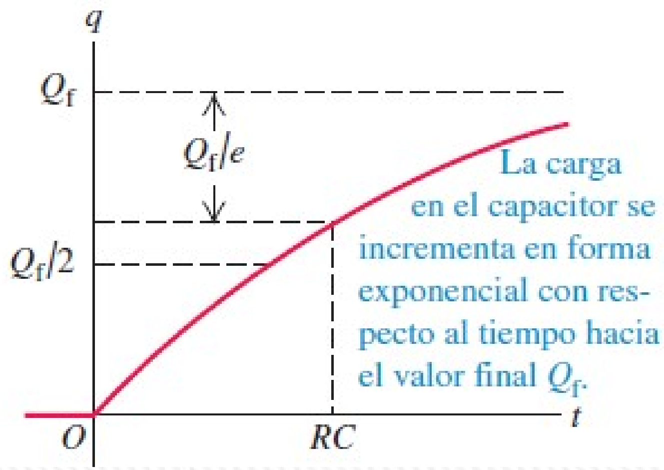
Vamos a resolver esta ecuación diferencial

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\mathcal{E}}{R} - \frac{q}{RC} = \frac{1}{RC}(\mathcal{E}C - q) \qquad \frac{dq}{(q - \mathcal{E}C)} = -\frac{dt}{RC}$$

$$q(t) = \mathcal{E}C\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = Q_f\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

La carga del capacitor comienza en cero y poco a poco se acerca al valor final $Q_f = C\mathcal{E}$.

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$



Cuando el interruptor se cierra (t = 0), la corriente pasa de cero a su valor inicial $I_0 = \mathcal{E}/R$; después de eso, tiende gradualmente a cero.

CIRCUITOS RC – Carga de un capacitor

Constante de tiempo - Después de un tiempo igual a *RC (t=RC):*

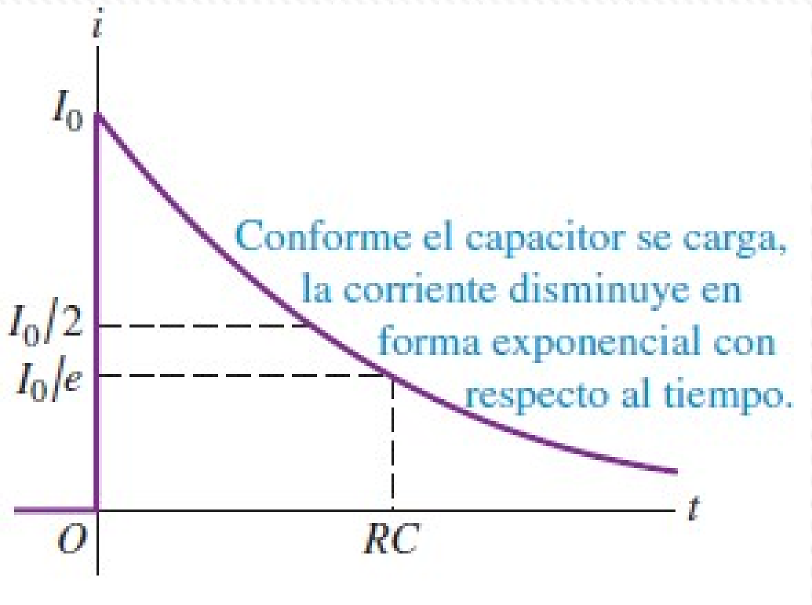
$$i(t=RC) = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{RC}{RC}} = I_0 e^{-1} = I_0 \frac{1}{e}$$

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

la corriente ha disminuido a 1/e (alrededor de 0,368) de su valor inicial, y la carga del capacitor ha alcanzado (1 – 1/*e*) = *0,632 de su valor final* $Q_f = C\mathcal{E}$.
El término *RC recibe el nombre* de **constante de tiempo, o tiempo de relajación,** del circuito, y se denota con **τ:**

$$\tau = RC$$

Cuando τ es pequeña, el capacitor se carga con rapidez; cuando es grande, el proceso de carga toma más tiempo.
Si *R está en ohms y C en farads, τ está en segundos.*



En un circuito cuando tengo un capacitor totalmente descargado el mismo se comporta como un cable, mientras que cuando estátotalmente cargado actúa como un interruptor abierto.

CIRCUITOS RC – Descarga de un capacitor

Tengo el capacitor con *una* carga Q_0*, y retiro la batería. Cuando cierro el interruptor, supongo que t = 0. q =* Q_0*. El capacitor se descarga a través del resistor y su carga disminuye finalmente a cero.*
La regla de Kirchhoff de las mallas da la ecuación anterior pero con $\mathcal{E} = 0$:

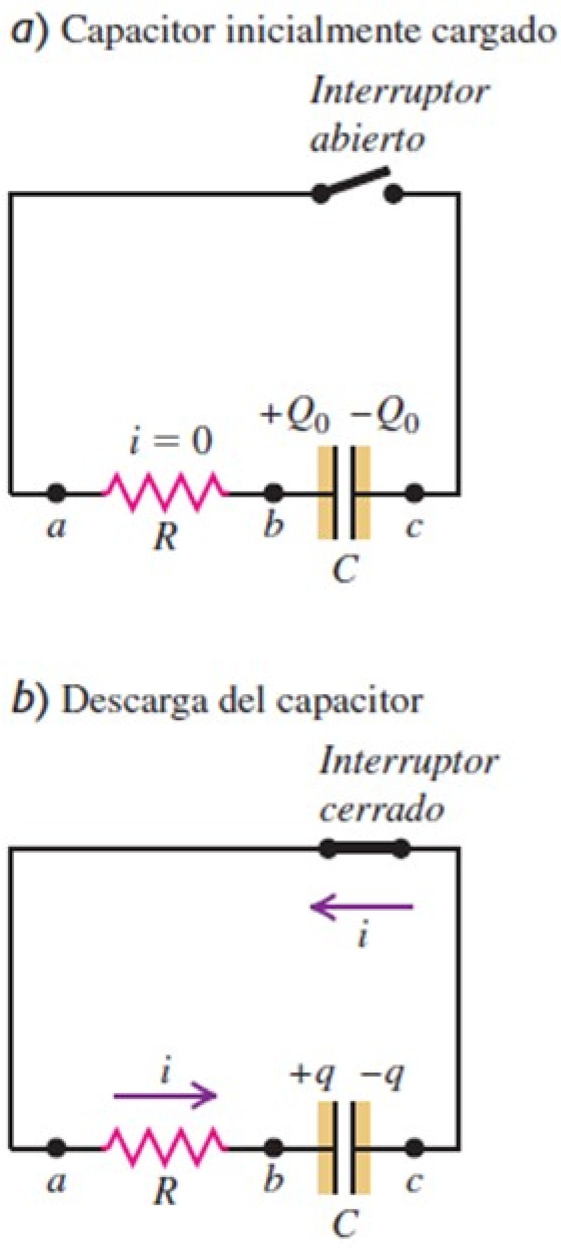
$$0 - iR - \frac{q}{C} = 0 \qquad i(t) = \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC}$$

La corriente *i ahora es negativa: la carga positiva q ahora sale* de la placa izquierda del capacitor*, por lo que la corriente va en* sentido opuesto al que se ilustra en la figura.
En *t = 0, q =*Q_0*,* corriente inicial es $I_0 = -Q_0/RC$.

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC} \qquad q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

La corriente instantánea *i es la derivada de esta con respecto al tiempo:*

$$i(t) = -I_0 e^{-\frac{t}{RC}} = -\frac{Q_0}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}$$



CIRCUITO RC BALANCE ENERGÍA

Mientras el capacitor se carga, la tasa instantánea a la que la batería entrega energía al circuito (la potencia entregada) es $P = \mathcal{E}i$.
La tasa instantánea a la que la energía eléctrica se disipa en el resistor es i^2R, *y la tasa a la que la energía se almacena en el* capacitor es $iv_{bc} = iq/C$:

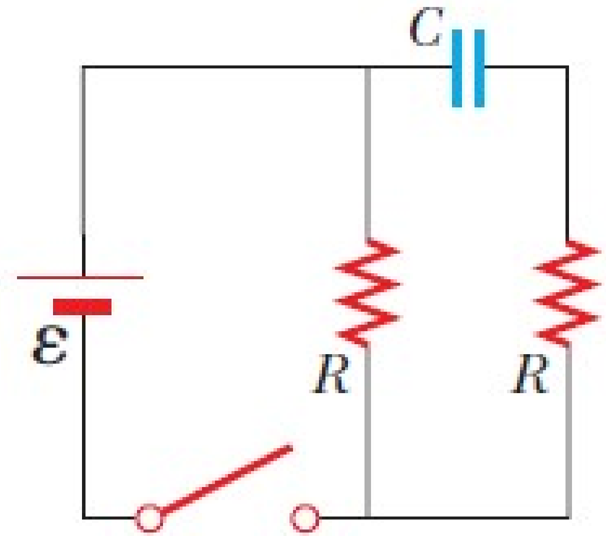
$$\mathcal{E}i = i^2R + \frac{iq}{C}$$

Esto significa que de la potencia *suministrada por la batería, una parte se disipa* en el resistor y otra parte *se almacena en el capacitor.*

Energía *total suministrada por la batería durante la carga del capacitor:* $\mathcal{E}.Q_f$
Energía total almacenada en el capacitor es $Q_f\,\mathcal{E}/2$.
La mitad de la energía suministrada por la batería se almacena en el capacitor, y la otra mitad se disipa en el resistor.
Esta división a la mitad de la energía no depende de *C, R o* $\mathcal{E}$.

PREGUNTA RÁPIDA (QUICK QUIZ)

Considere el circuito de la figura y suponga que la batería no tiene resistencia interna.



i) **Justo después de cerrar el interruptor, ¿cuál es la corriente** en la batería?

a) 0,

b) $\mathcal{E}/2R$,

c) *2Ɛ/ R,*

d) *Ɛ/R,*

e) *imposible de determinar.*

ii) Después de **un tiempo muy largo**, ¿cuál es la corriente en la batería? Elija entre las mismas opciones

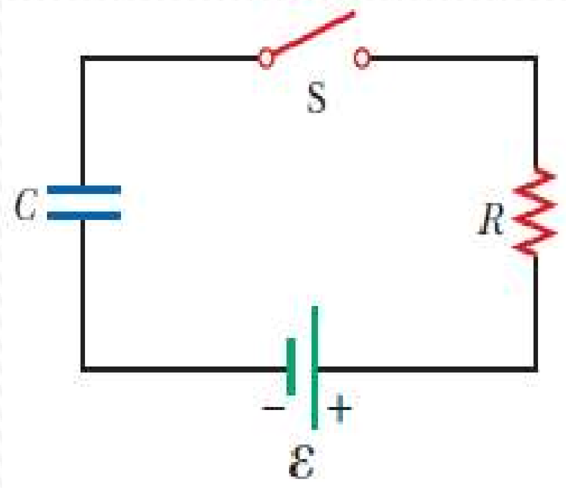
i) c) 2ε/R
Justo después de que se ha cerrado el interruptor, no existe carga en el capacitor. Mientras el capacitor comienza a cargarse, existe corriente en ambas ramas del circuito, por lo que la mitad derecha del circuito es equivalente a dos resistencias *R en paralelo, es decir, una resistencia equivalente de ½* R.

ii), d) ε/R . Después de mucho tiempo, el capacitor se carga por completo y la corriente en la rama derecha disminuye hasta cero. Ahora la corriente existe sólo en una resistencia *R a través* de la batería

EJEMPLO: ejercicio 2.1.14

Considere el circuito *RC* en serie de la figura en el cual R = 1,00 MΩ, C = 5,00 μF y ε= 30,0 V. Encuentre:

a) la constante de tiempo del circuito;
b) la máxima carga en el capacitor después de que se cierra el interruptor;
c) la carga en el capacitor y la corriente que circula 10,0 s después de cerrar el interruptor,
d) el tiempo que demora en alcanzar el capacitor el 75% de la carga máxima.



a) Constante de tiempo $\tau = RC$ =(1,00×10^6 Ω) (5,00×10^{-6} F) **= 5,00 s**

b) Carga máxima $Q = \varepsilon C$ = (30,0V) (5,00×10^{-6} F)= 150×10^{-6} C =150 μC

Q = 150 μC

c) Carga como función del tiempo:

$$q(t) = Q\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = (150\ \mu C)\left(1 - e^{-\frac{10,0}{5,00}}\right) = 129,70\ \mu C$$

$q(t$ =10,0 s) = 130 μC

Corriente como función del tiempo: $I(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{30,0}{1,00 \times 10^6} e^{-\frac{10,0}{5,00}} =$

$= (3,00 \times 10^{-5}) e^{-2} = 4,06\ \mu A$

***I* (*t* =10 s)= 15,0 μA**

EJEMPLO: ejercicio 2.1.14

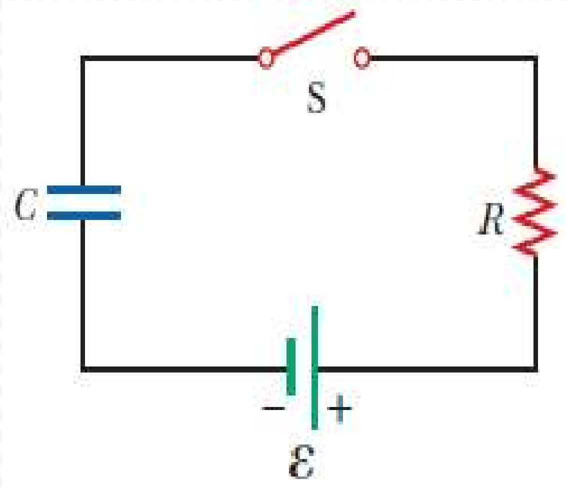
Considere el circuito *RC* en serie de la figura en el cual *R* = 1,00 MΩ, *C* = 5,00 μF y *ε*= 30,0 V. Encuentre:

a) la constante de tiempo del circuito;

b) la máxima carga en el capacitor después de que se cierra el interruptor;

c) la carga en el capacitor y la corriente que circula 10,0 s después de cerrar el interruptor,

d) el tiempo que demora en alcanzar el capacitor el 75% de la carga máxima.



d) Carga como función del tiempo: $q(t) = Q\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$

$$\frac{3}{4}Q_f = Q_f\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \qquad \frac{3}{4} = \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \qquad \frac{1}{4} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$\ln\left(\frac{1}{4}\right) = -\frac{t}{RC} \qquad -\ln\left(\frac{1}{4}\right) = \ln\left(\frac{1}{4}\right)^{-1} = \ln(4) \qquad \ln(4) = \frac{t}{RC}$$

$$t = -RC\ln\left(\frac{1}{4}\right) = RC\ln(4) = 5{,}00\ln(4) = 6{,}93\ s$$

***t* = 6,93 s**

9-CONDUCCIÓN NERVIOSA

Información se transmite mediante pulsos eléctricos en **fibras nerviosas** denominadas **axones**.

Axón tiene una resistencia alta y está poco aislado de sus alrededores, por lo cual tras una corta distancia los pulsos nerviosos de debilitan mucho.

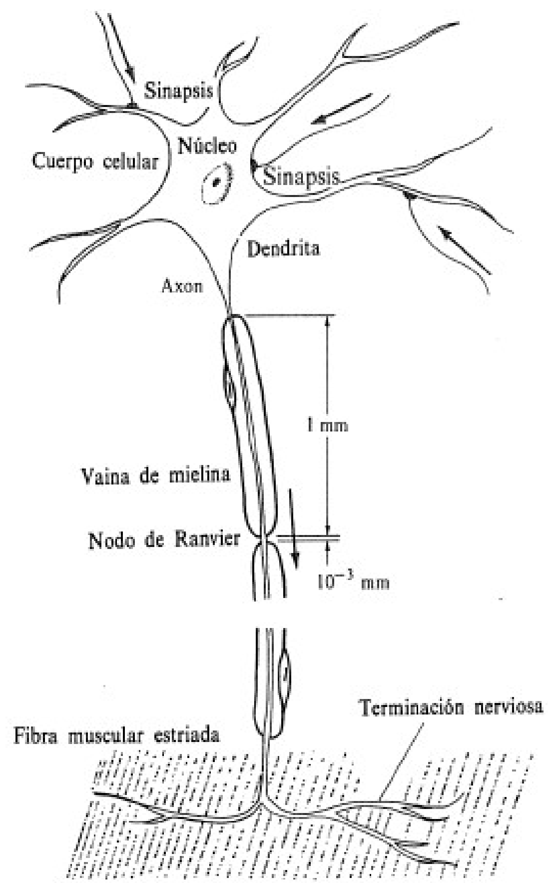
Velocidad del pulso nervioso: 10^{-6} velocidad de pulso eléctricos en un cable.

En **estado de reposo**, el interior del axón está a un potencial menor que el del líquido intersticial circundante **(potencial de reposo)**.

Cuando un nervio se estimula convenientemente, un pulso de corriente se transmite a lo largo del axón.

El cambio de potencial transitorio asociado se denomina **potencial de acción**.

Una neurona se conecta con otra en puntos denominados sinapsis.



Diámetro axones: de 1 a 20 μm y pueden medir hasta más de 1 m de largo.

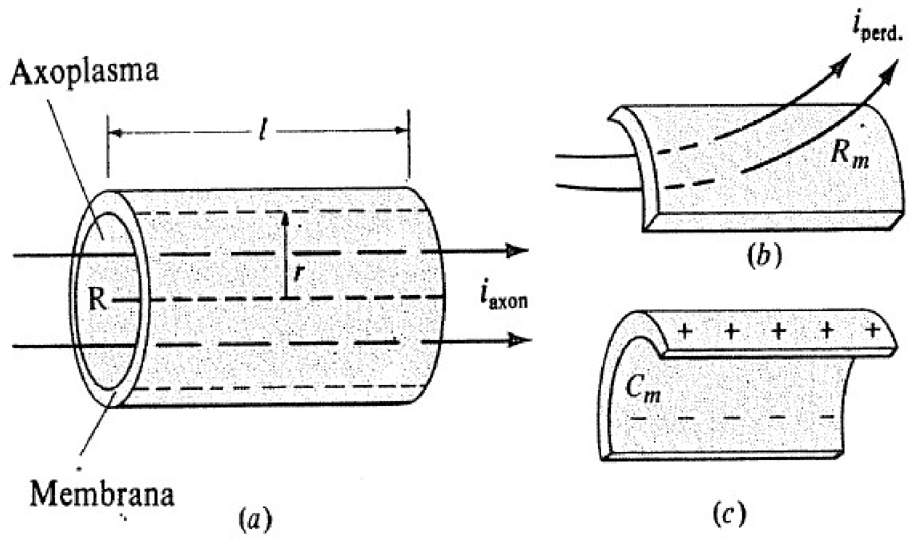
Enrolladas alrededor de algunos axones de animales superiores, hay **células de Schwann**, que forman una **vaina de mielina:** reducen capacidad eléctrica de la membrana y aumentan resistencia eléctrica.

Célula de Schwann: 1 mm de longitud, con distancia entre las mismas de 1 μm (**nodos de Ranvier**),

RESISTENCIA Y CAPACIDAD ELÉCTRICA DEL AXÓN

Modelo axón: membrana cilíndrica contiene un líquido conductor: el **axoplasma**.
La corriente viaja a lo largo del axón por este fluido y también escapa a través de la membrana.

La **resistencia R de un trozo de axón** al paso de **corriente del axón i_{axon}** es proporcional a la **resistividad del axoplasma ρ_a**.
Resistencia de una unidad de área de membrana (R_m) a la **corriente de pérdida i_{perd}**.
La membrana también tiene capacidad eléctrica, ya que a ambos lados se acumulan cargas eléctricas de signo opuesto.



La carga por unidad de superficie dividida por la diferencia de potencial resultante es la **capacidad por unidad de área de la membrana C_m**.
La resistencia de un alambre de longitud *l*, área de la sección transversal $A=\pi r^2$ y resistividad ρ_a es: $R=\rho_a.l/A$.

RESISTENCIA Y CAPACIDAD ELÉCTRICA DEL AXÓN

Valores de los parámetros del axón utilizados en los ejemplos. Los valores medidos varían algo con el tipo de axón. (La resistividad del fluido intersticial es pequeña y puede no ser tenida en cuenta.)

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

Resistencia *R* de trozo de axón longitud l = *1,0 cm*, área de la sección transversal $A=\pi r^2$ y resistividad ρ_a usando los valores típicos de la tabla:

$$R = \frac{\rho_a l}{\pi r^2} = \frac{(2{,}0\ \Omega.m)(0{,}010\ m)}{\pi(5{,}0 \times 10^{-6})^2} = 2{,}5 \times 10^8\ \Omega$$

Modelamos la membrana como un capacitor plano.

Longitud l de membrana tiene un área superficial $A=2\pi rl$.
C_m es la capacidad por unidad de área, la capacidad de un trozo de axón de longitud l es

$$C = C_m(2\pi r l)$$

Para un axón sin mielina de 1 cm de largo y radio 5 μm, con $C_m=1\text{x}10^{-2}$ F/m^2 resulta: $C=(1\text{x}10^{-2})\,(2\pi)\,(5\text{x}10^{-6})\,(1\text{x}10^{-2}) = 3\text{x}10^{-9}$ F

Un axón con mielina tiene un C_m 200 veces menor que uno sin mielina

RESISTENCIA Y CAPACIDAD ELÉCTRICA DEL AXÓN

La membrana no es un aislante perfecto y parte de la carga escapa del axoplasma al líquido intersticial.
La resistencia por unidad de área membrana es R_m (R_m= 0,20 $\Omega.m^2$ en axones sin mielina y R_m= 40 $\Omega.m^2$ en axones con mielina).
Resistencia de pérdida por la membrana:

$$R' = \frac{R_m}{2\pi r l} = \frac{0{,}2\ \Omega.m^2}{2\pi(5\times10^{-5}m)(0{,}01m)} = 6{,}4\times10^5\Omega$$

Si λ es la longitud de axón a partir de la cual la resistencia de pérdida es mayor a la del axón, igualando *R* y *R'*:

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

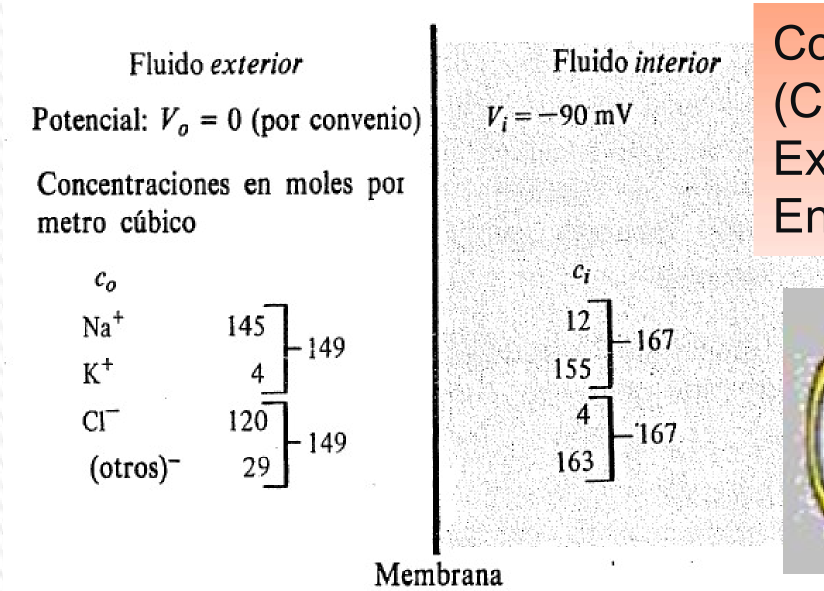
$$\lambda = \sqrt{\frac{rR_m}{2\rho_a}}$$

λ= 0,5 mm para un axón sin mielina
λ= 7 mm para un axón con mielina

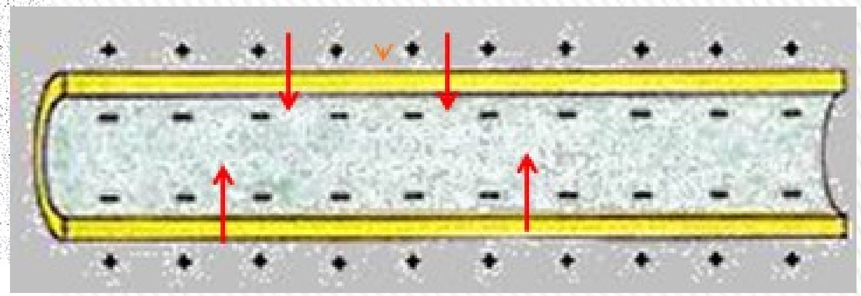
λ es el parámetro espacial, indica qué distancia recorre la corriente antes de que la mayor parte se pierda en la membrana.

CONCENTRACIONES IÓNICAS Y POTENCIAL DE REPOSO

Líquido externo al axón similar al agua de mar: solutos iónicos mayorítarios: Na^+ y Cl^-.
Dentro del axón: mayoritariamente K^+ y grandes iones negativos orgánicos.
Normalmente, las concentraciones de iones de sodio y de potasio dentro y fuera del axón se igualan por **difusión.**
Como el axón, es una célula viva con un suministro de energía y puede cambiar la permeabilidad de sus membranas en una escala de tiempo de milisegundos.

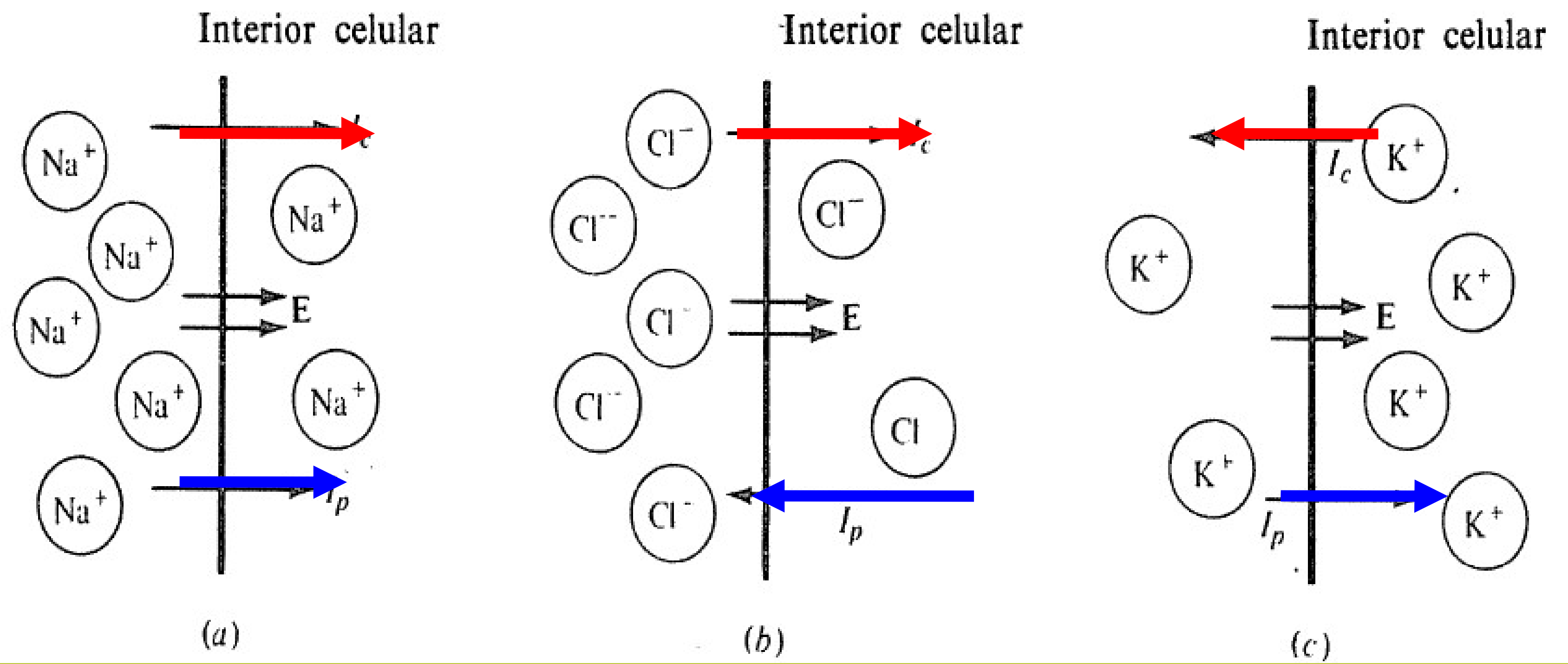


Concentraciones de varios iones en el interior (C_i) y en el exterior (C_o) de un axón en reposo.
Exterior hay mayor concentración de Na^+ y Cl^-
En el interior hay mayor concentración K^+.



Se toma el potencial del fluido exterior de la célula como 0: Vo = 0.
Potencial en interior del axón: **Vi = -90 mV** (**potencial de membrana**).
Como hay un ΔV hay acumulación de cargas a ambos lados de la membrana: **positivas en el exterior y negativas en el interior**, el campo eléctrico es entrante hacia el interior del axón.

CONCENTRACIONES IÓNICAS Y POTENCIAL DE REPOSO



Corrientes iónicas:

I_C debidas a las **diferencias de concentración**, e

I_P debida a la **diferencia de potencial**.

(a) Ambos flujos **Na^+** van dirigidos hacia el interior de la célula. Por tanto **se debe bombear hacia el exterior iones Na^+**

(b) Para el **Cl^-** los flujos se contrarrestan exactamente. Efecto de diferencia de concentraciones es similar al del potencial. Surge un **equilibrio de iones Cl^-.**

(c) Para el **K^+** , **I_C** es ligeramente mayor que **I_P** y existe un pequeño flujo hacia afuera. Efecto de diferencia de concentraciones es mayor al del potencial. Por tanto se debe **bombear hacia el interior iones K^+**

Ecuación de Nerst 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: ***diferencia de potencial de equilibrio a través de la membrana celular***, los flujos debidos a las diferencias de concentración y de potencial se contrarrestan exactamente. Esto se determina con la ***ecuación de Nernst***.

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

Para K^+ : -98 mV; para Na^+: +66 mV y para el Cl^-: -90 mv $k_B = 1{,}38\times10^{-23}$ J/K

Los flujos netos de Na^+ hacia el interior de la célula y de K^+ hacia el exterior de la misma debidos a la difusión y a la fuerza eléctrica, se denominan ***flujos pasivos***, *porque no se necesita* suministrar energía para que se produzcan.

Hay un proceso que devuelve el Na^+ y el K^+ a través de la membrana y mantienen sus concentraciones iónicas de no equilibrio, consume energía y se denomina ***transporte activo de Na-K*** o ***bomba Na-K***.

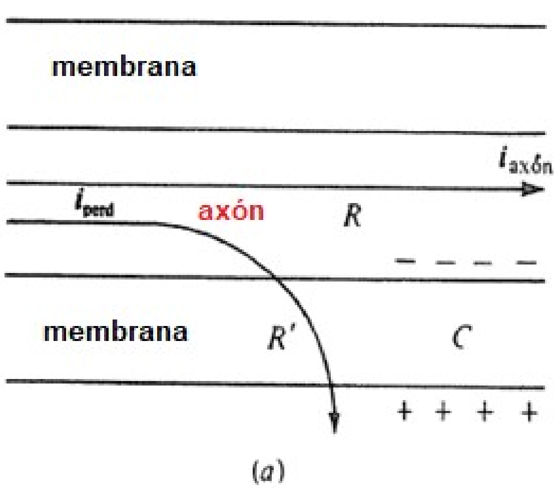
La bomba transporta 2 K^+ al interior de la célula por cada 3 Na^+ que saca de la misma.

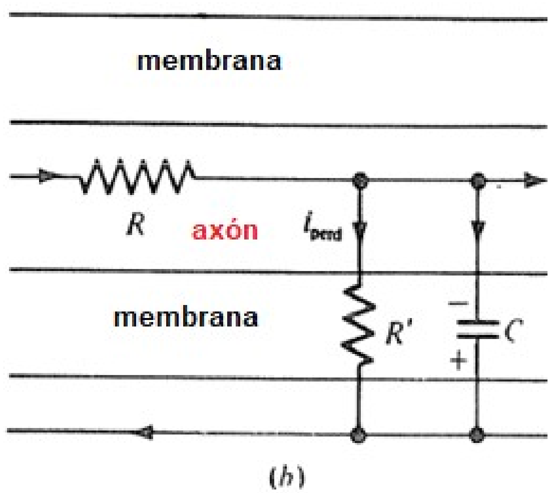
Se alcanza un equilibrio dinámico en el que las concentraciones dejan de variar cuando los flujos pasivos de Na+ y K+ por la difusión y potencial eléctrico se ven contrarrestado exactamente por el transporte activo debido a la bomba.

RESPUESTA A ESTÍMULOS DÉBILES

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.
Si se aplica un estímulo débil en algún punto del axón, no se presentan cambios más allá de unos pocos milímetros a partir de ese punto.
Un estímulo superior al umbral, produce un pulso de corriente que recorre la longitud del axón sin atenuación (potencial de acción).
Para desarrollar el circuito equivalente del axón lo suponemos divididos en muchos segmentos cortos.
El fluido intersticial que rodea el axón tiene muy poca resistencia y puede representarse por lo tanto como un conductor perfecto.

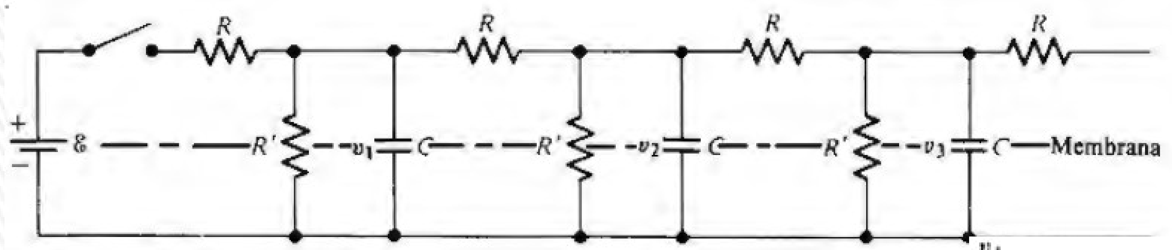
Cada segmento de axón se presenta una resistencia R al paso de la corriente i_{axon} a lo largo de su longitud, y a la membrana se la modela con una resistencia R' a la corriente de pérdida i_{perd} más un capacitor





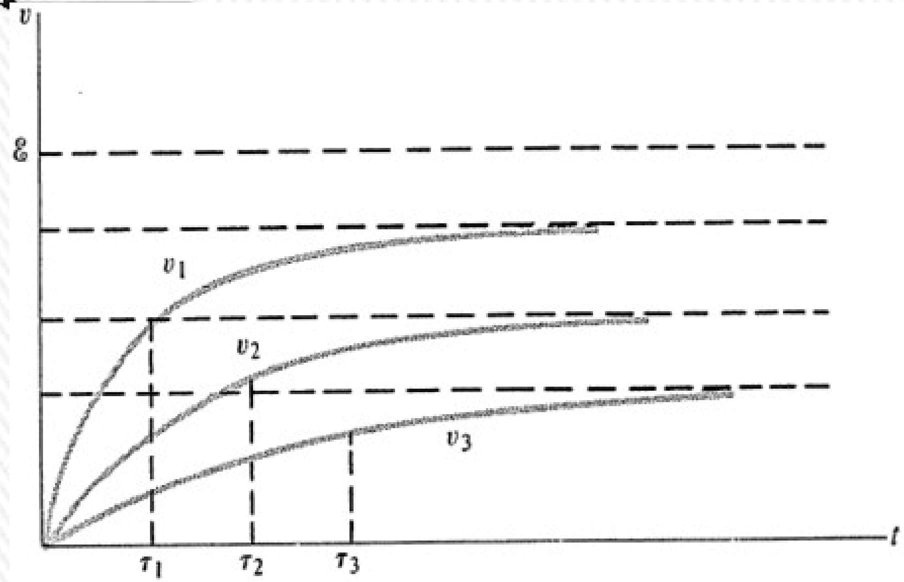
RESPUESTA A ESTÍMULOS DÉBILES

El comportamiento se modela mediante una compleja red de resistencias y de condensadores como se muestra en la figura.



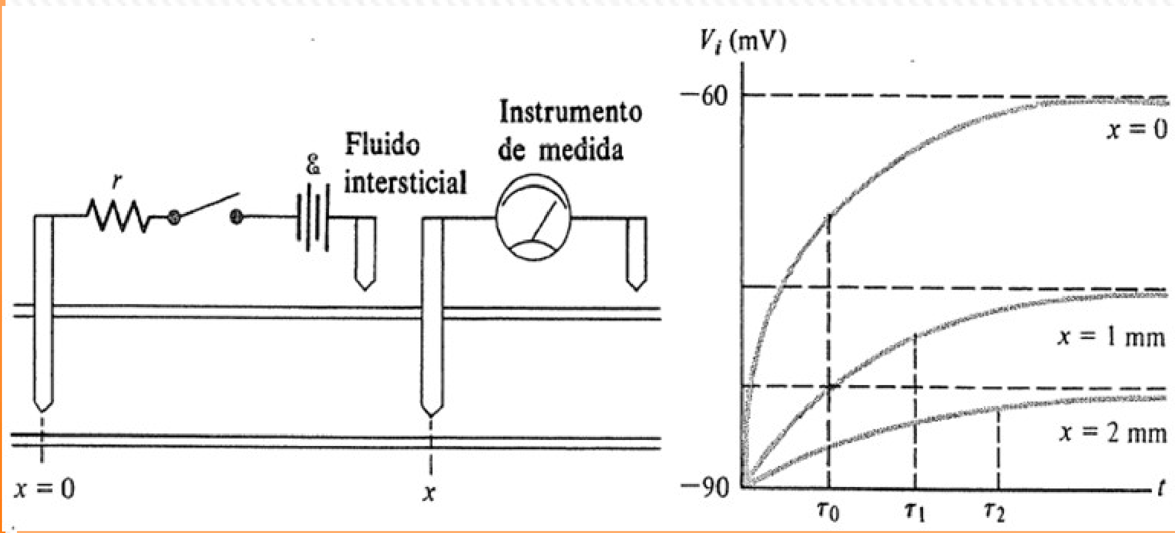
El axón completo se representa con varios segmentos en serie y la fem representa el estímulo aplicado.

Hay una cierta corriente en el camino que conduce a través de *R y R‘, por lo que hay* una caída de potencial correspondiente a través de *R,* y la diferencia de potencial final en el condensador es. menor que la fem. En el circuito análogo al axón, las ΔV finales van disminuyendo a medida que nos desplazamos hacía la derecha debido a la pérdida de corriente a través de las *R′.*



Cuando se cierra el interruptor(se aplica un «estímulo») las diferencias de potencial a través de los condensadores cambian gradualmente.
A medida que nos alejamos del estímulo, los cambios se producen más lentamente y sus valores finales disminuyen.

RESPUESTA A ESTÍMULOS DÉBILES



Se ve un comportamiento muy parecido cuando un axón sin mielina se estimula débilmente como se muestra en la figura.

Una sonda conectada a una batería se inserta en *x = 0, y poco a poco el potencial del* axón *V; en aquel punto cambia de -90 mV a -60 mV.* El tiempo necesario para que se produzca este cambio viene determinado por la capacidad de la membrana y la resistencia externa *r.*
A otros valores de x, los potenciales cambian más lentamente, alcanzando un potencial final entre -90 mV y -60 mV.

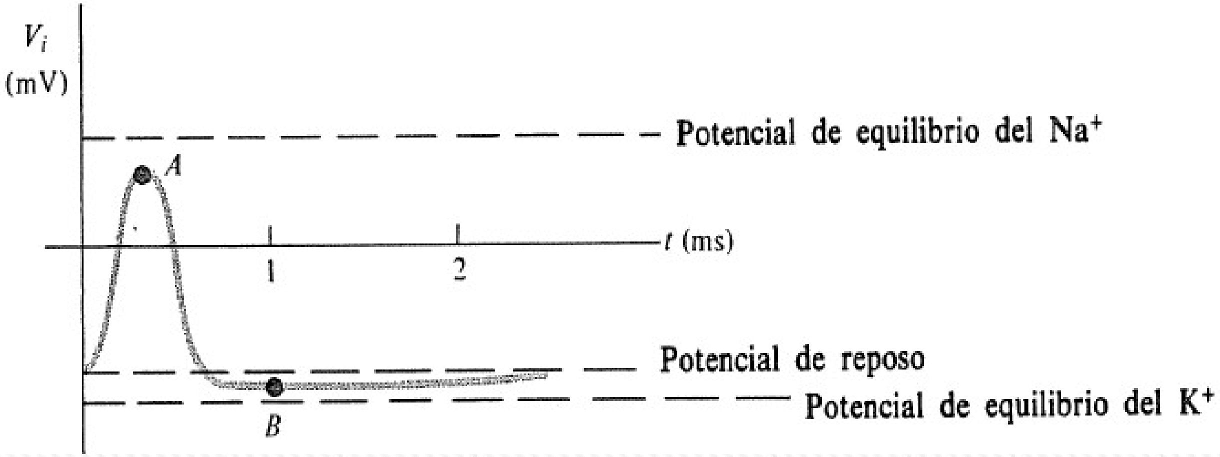
El circuito análogo también proporciona predicciones cuantitativas que relacionan el potencial final del axón a una distancia *x del estímulo con el parámetro espacial* λ
Si la diferencia entre el potencial de reposo y el potencial final en *x=0*
es V_d*, entonces la diferencia en x* resulta ser

$$V(x) = V_d e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

Si λ=0,5 mm: para x= λ V(λ)= 0,37V_d;
V(2λ)= 0,135V_d ; V(5 λ)= 0,007 V_d
Estos valores coinciden con los resultados experimentales.

POTENCIAL DE ACCIÓN

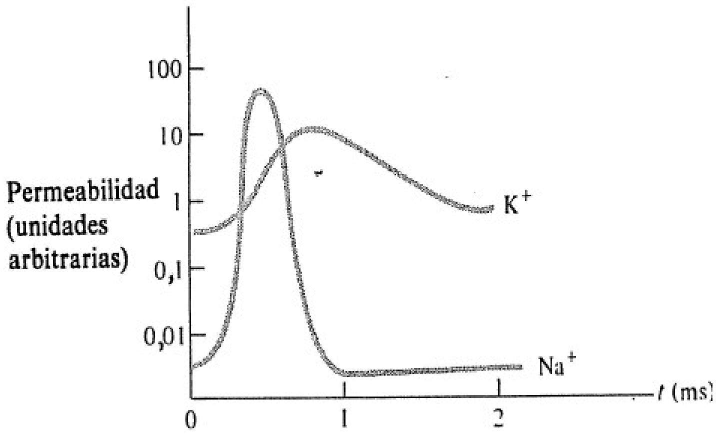
Cuando un estímulo eléctrico débil se aplica a un axón, los cambios de potencial son proporcionales al estímulo.
La situación es muy diferente si aumenta el potencial en $x = 0$ *hasta un valor* por encima del **umbral del potencial de acción**, cuyo **valor típico es de -50 mV**.
Poco después de la aplicación de este estímulo, el potencial de acción en *x aumenta* súbitamente y se hace positivo, llegando a valores tan altos como +50 mV en algunos axones, como se muestra.



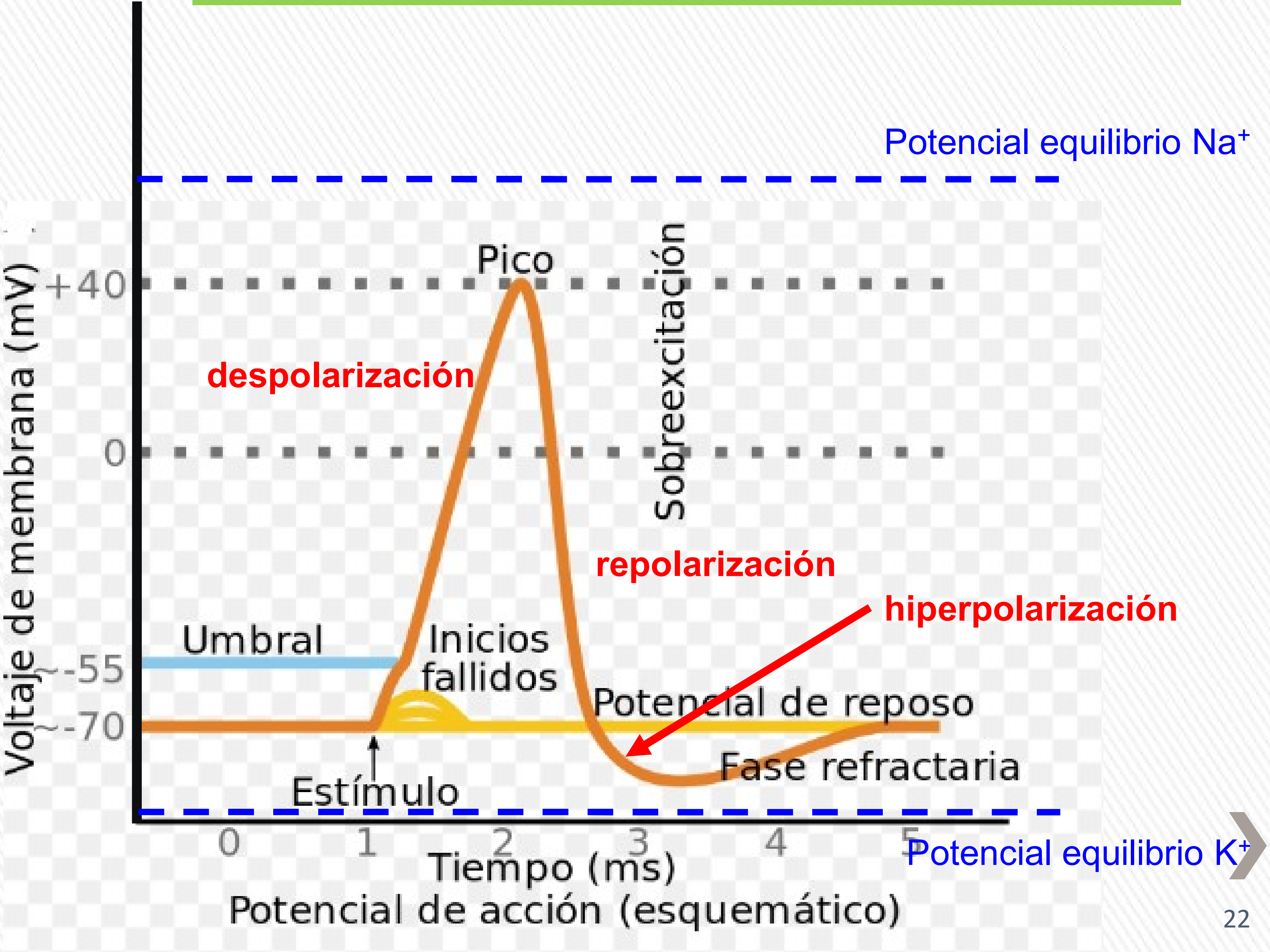
El potencial vuelve luego gradualmente a su valor de reposo.
El potencial de acción no es proporcional al estímulo, sino que es una respuesta transitoria del tipo ***todo o nada***.

En un axón sin mielina, el potencial de acción va acompañado de cambios espectaculares de la permeabilidad de la membrana al Na^+ y al K^+:

Este mecanismo amplifica el pulso y permite que un potencial de acción recorra la longitud de un axón **sin atenuación**.

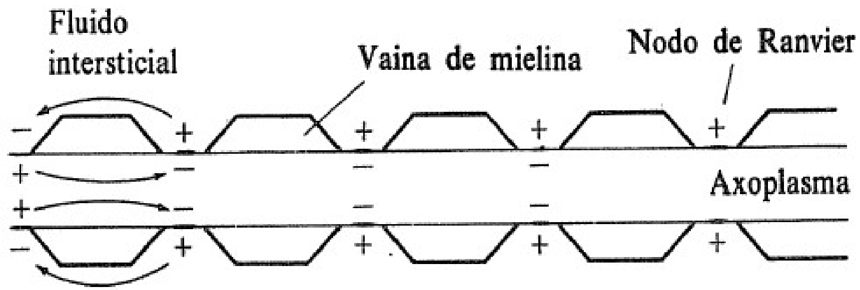


POTENCIAL DE ACCIÓN



AXONES CON MIELINA

En un axón revestido de mielina, relativamente pocos iones pasan a través de la vaina de mielina excepto en los nodos de Ranvier, los cuales se hallan separados aproximadamente 1 mm.



En los nodos, la membrana responde a un estímulo por encima del umbral tal como en un axón sin mielina.

Parte de la corriente del axón con mielina se pierde a través de la membrana, pero en su mayor parte llega al siguiente nodo ya que la distancia internodal de 1 mm es pequeña comparada con el parámetro espacial λ*, el cual es igual a varios milímetros* en un axón con mielina típico.

El potencial de acción viaja a lo largo del axón.

Como la amplificación y los transportes iónicos asociados ocurren únicamente en los nodos de Ranvier, se necesita menos energía metabólica para restablecer un axón con mielina en su estado de reposo después de un pulso de potencial que para un axón sin mielina y la propagación del potencial de acción también es más rápida en un axón con mielina.

Los axones con mielina están mejor dotados para propagar rápidamente las grandes cantidades de información requeridas por los animales superiores y representan una etapa importante en la evolución.

AXONES CON MIELINA

Velocidad de propagación de un potencial de acción- entre dos nodos de un axón con mielina se usa un modelo simple de axón, ya que la amplificación sólo se produce en los nodos. La velocidad *v del potencial de acción es la distancia X entre dos nodos dividida por el tiempo T necesario* para reducir la carga de la membrana y aumentar por encima del umbral el potencial en el segundo nodo. Este tiempo es del orden a la constante de tiempo *RC del circuito en serie que contiene la resistencia R del axoplasma y la capacidad de la membrana* C. *R es la resistencia desde el primer nodo hasta X/2, o punto medio del condensador» que se ha de* cargar.

El tiempo T es del orden de la constante de tiempo RC del circuito, donde R es la resistencia del axoplasma desde el primer nodo hasta X/2 (punto medio) y C la capacidad de la membrana.

Usando los valores típicos: ρ_a = 2 Ω.m C_m= 5 ×10^{-5} F/m^2 X= 1 mm
Y teniendo en cuenta que el radio r del axón se exprese en micras (μm)

$$v = \frac{r}{\rho_a C_m X} = 10\, r\left(\frac{m}{s}\right).\left(\frac{1}{\mu m}\right)$$

Para un axón de r = 5,0 μm, se tiene que v =50 m/s

Ver ejemplos resueltos en presentación en EVA:
02.5 Conducción nerviosa (ejemplos resueltos)Archivo