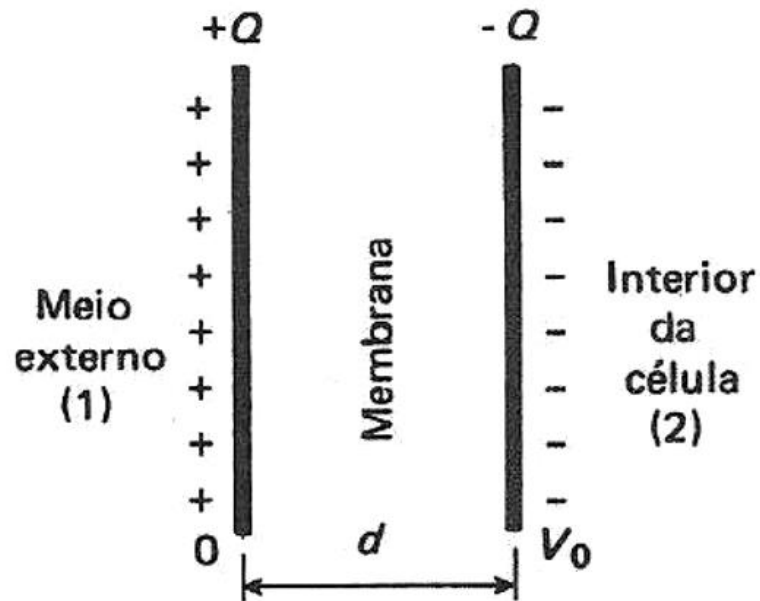
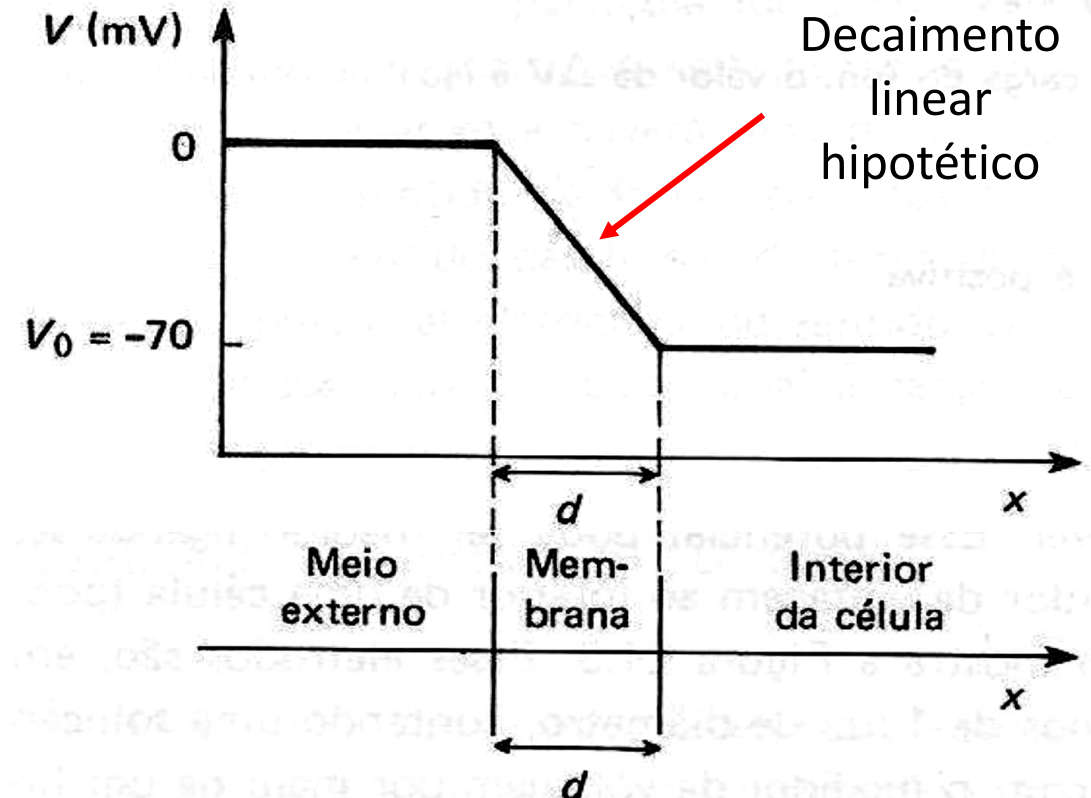


Potencial de Repouso

- Entre o líquido no interior de uma célula e o fluido extracelular existe uma diferença de potencial elétrico denominada **potencial de membrana**
- Na maioria das células, o potencial de membrana permanece inalterado quando não há influencia externa e neste caso, recebe o nome de **potencial de repouso (V_0)**



Face interna é negativa em relação à externa



Corrente elétrica

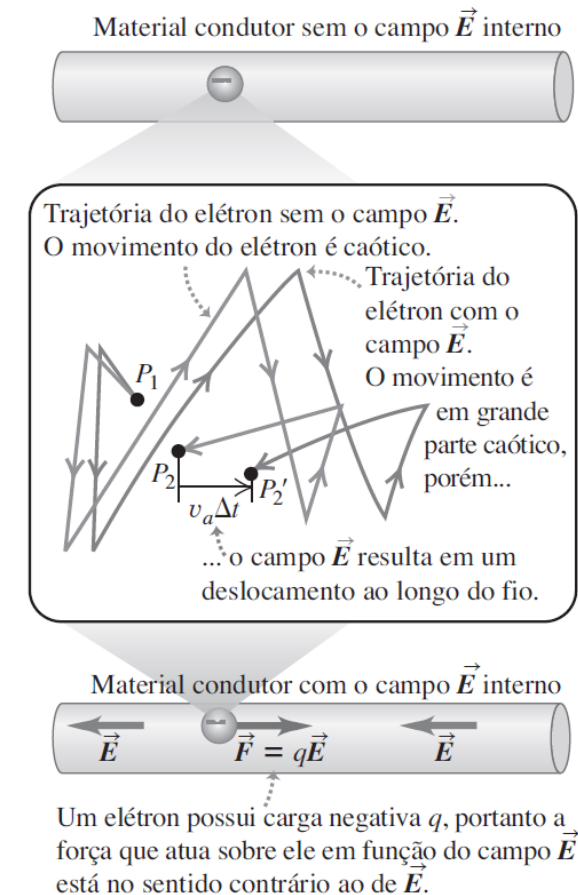
- A maioria dos fenômenos elétricos se relaciona à cargas em movimento
→ **Corrente elétrica** é o movimento de cargas elétricas de uma região a outra.

- Para que a corrente elétrica seja mantida, deve existir uma diferença de potencial, ou seja, um campo elétrico no meio.
- Em um condutor ou numa solução eletrolítica, define-se a intensidade média de corrente elétrica I , através de uma área A como:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

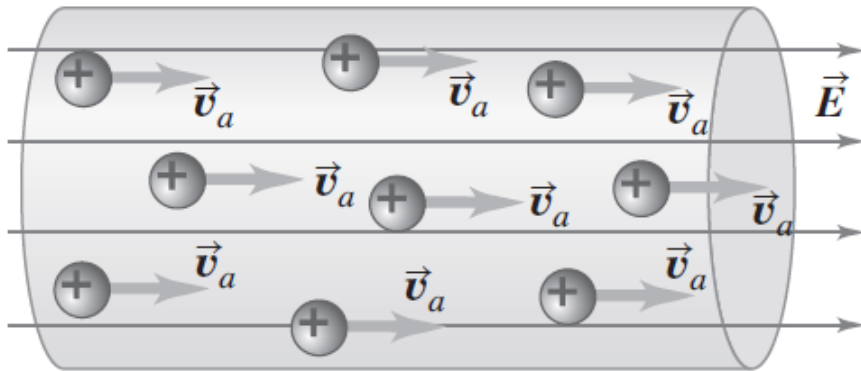
Com ΔQ sendo a carga total que atravessa a área A , durante o intervalo de tempo Δt

- Unidade: ampère (A), sendo $1A = 1C/1s$

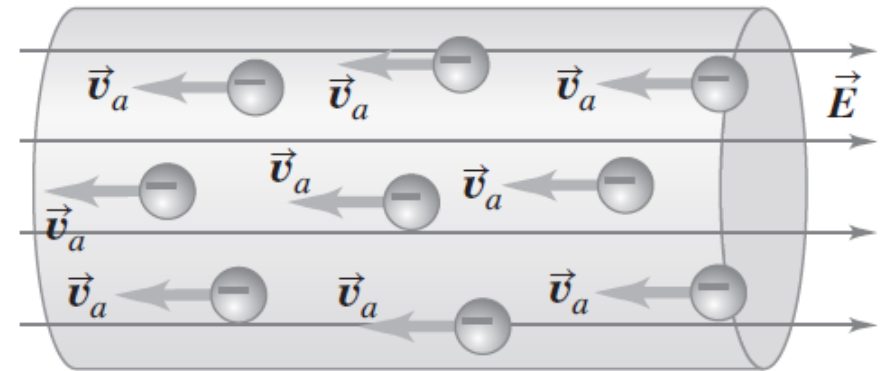


Corrente elétrica

- Convenciona-se descrever a corrente elétrica como o fluxo de cargas positivas, mesmo quando a corrente real é negativa ou possui cargas de ambos sinais



Uma **corrente convencional** é tratada como um fluxo de cargas positivas, não importando se as cargas livres no condutor são positivas, negativas ou ambas



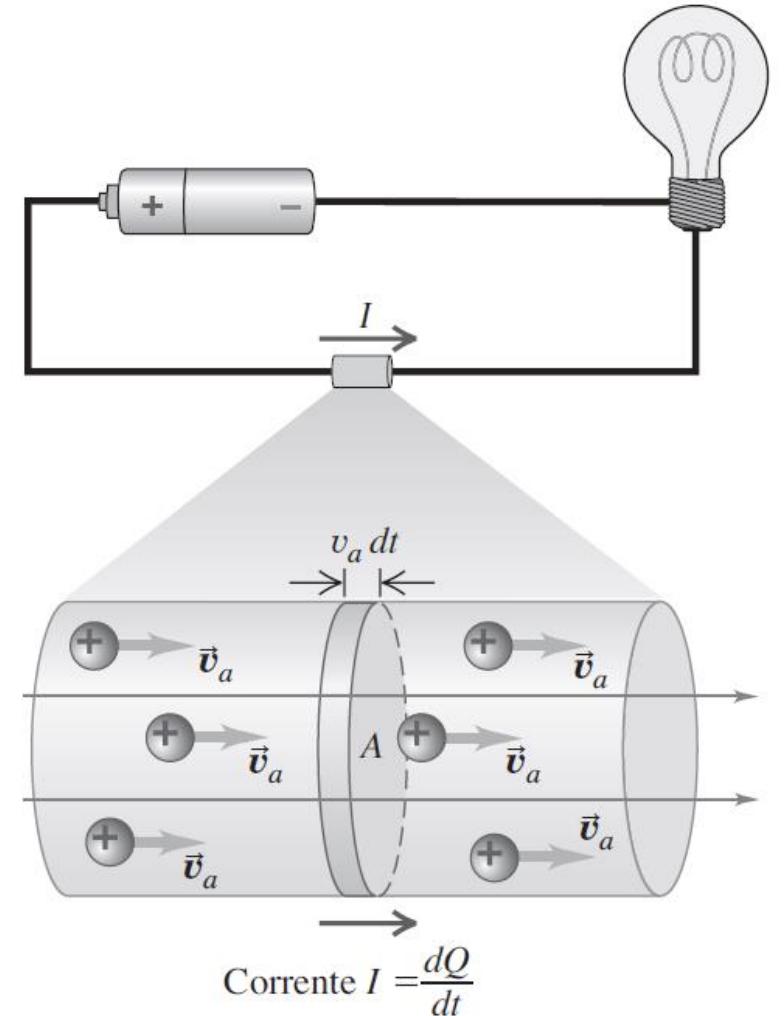
Em um condutor metálico, as cargas em movimento são elétrons — mas a *corrente* ainda aponta no sentido do movimento das cargas positivas

Resistência elétrica

- O fluxo das cargas elétricas num determinado material depende da sua resistividade (ρ):
 - Um bom condutor apresenta resistividade baixa
 - Um bom isolante apresenta resistividade alta
- Se a resistividade do material se mantém constante, independente do campo elétrico aplicado, tem-se uma proporcionalidade entre a diferença de potencial ΔV aplicada entre dois pontos de um condutor e a corrente resultante. A razão $\Delta V/I$ é a resistência do material:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta i}$$

Unidade: ohm (Ω), sendo $1\Omega=1V/1A$



Concentração iônica dentro e fora da célula

- As concentrações de íons no fluido intra e extra-celular são bem diferentes:
 - Meio intracelular: maior concentração de íons K^+
 - Meio extracelular: maior concentração de íons Cl^- e Na^+
- Devido à mobilidade dos íons o fluido deve ser neutro

Concentrações iônicas em uma célula muscular de rã

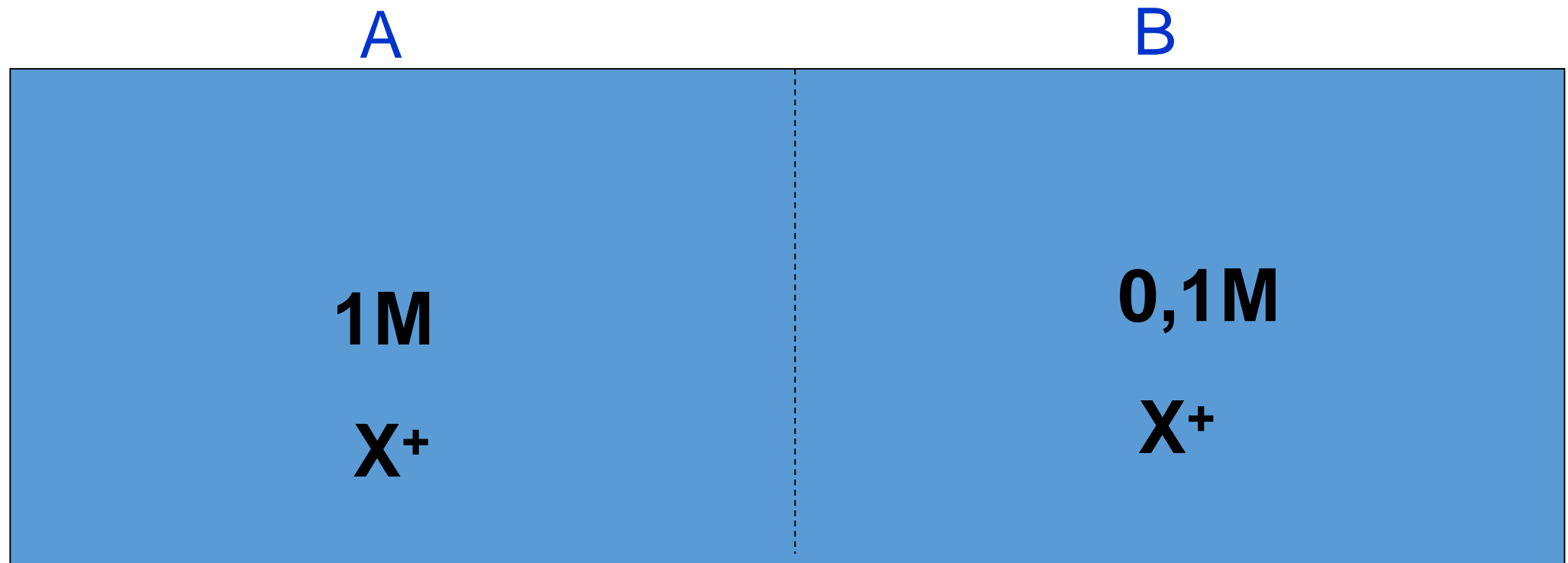
Íon	Concentração C(1) fora da célula (10^{-3} mol/l)	Concentração C(2) no interior da célula (10^{-3} mol/l)
K^+	2,25	124
Na^+	109	10,4
Ca^{++}	2,1	4,9
Mg^{++}	1,25	14,0
Cl^-	77,5	1,5
HCO_3	26,6	12,4
Íons orgânicos	13	74

$$C_K(2) \gg C_K(1)$$

$$C_{Na}(1) \gg C_{Na}(2)$$

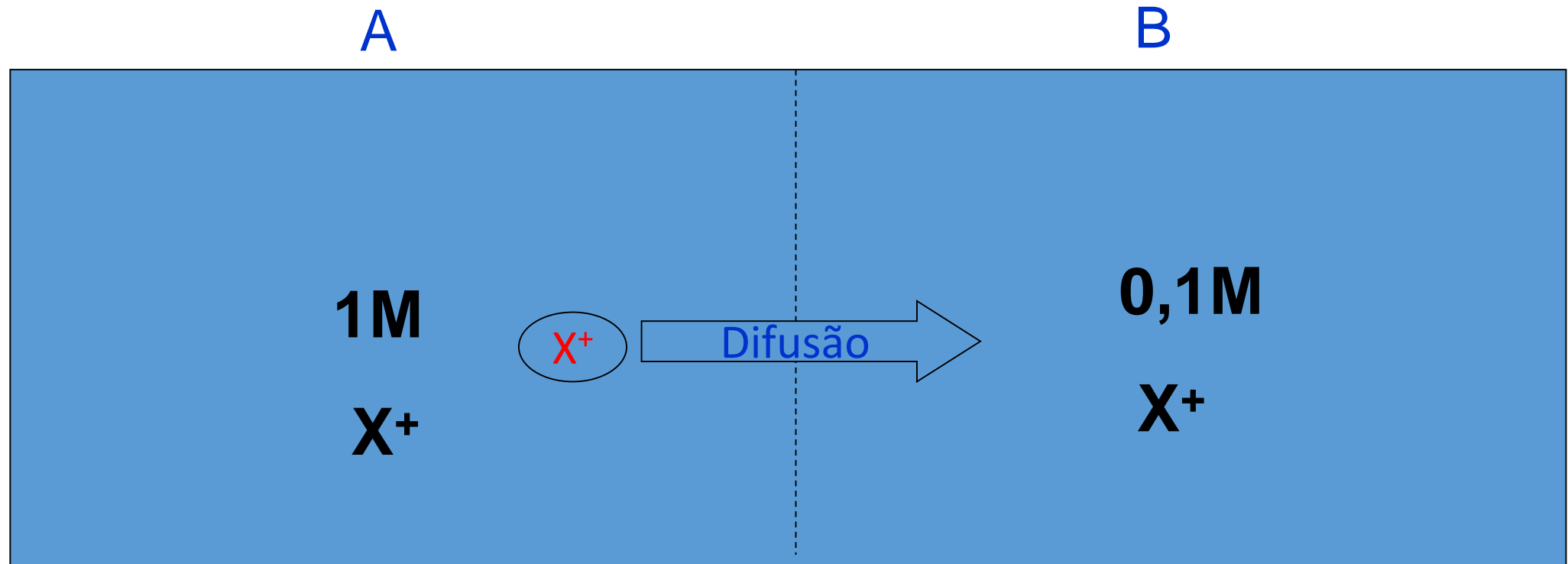
$$C_{Cl}(1) \gg C_{Cl}(2)$$

Equilíbrio Iônico



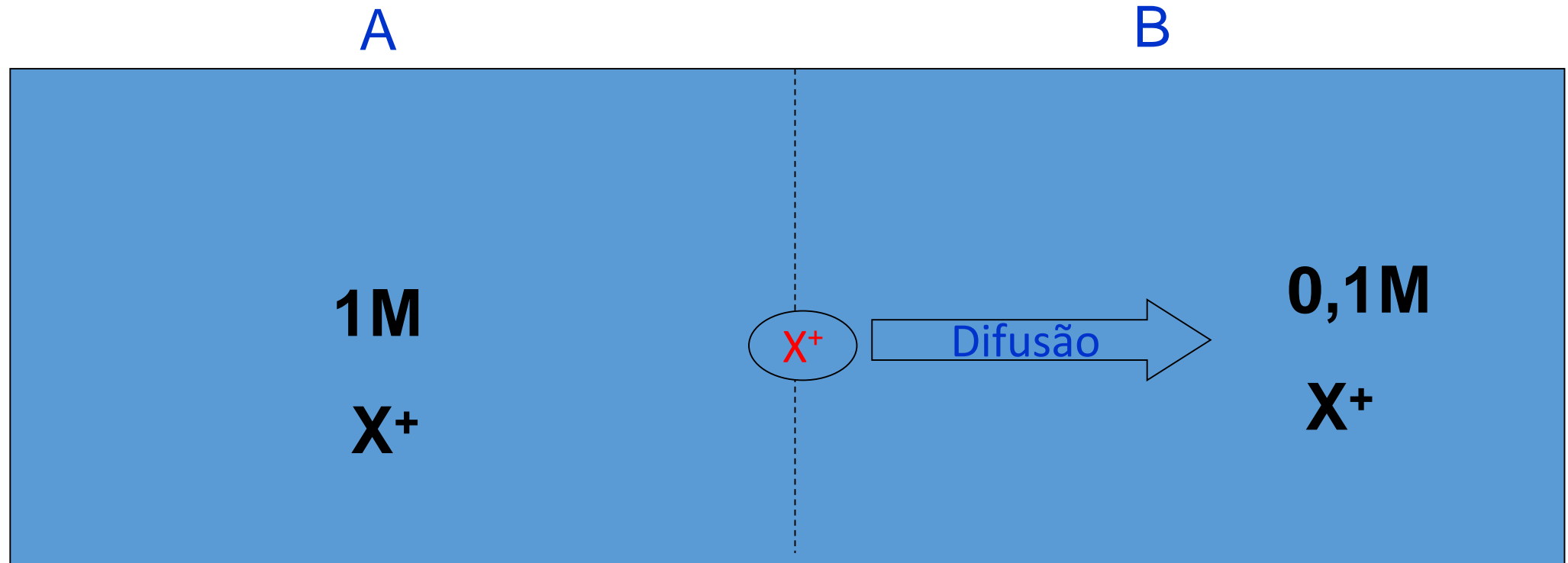
Membrana Permeável ao X^+

Equilíbrio Iônico



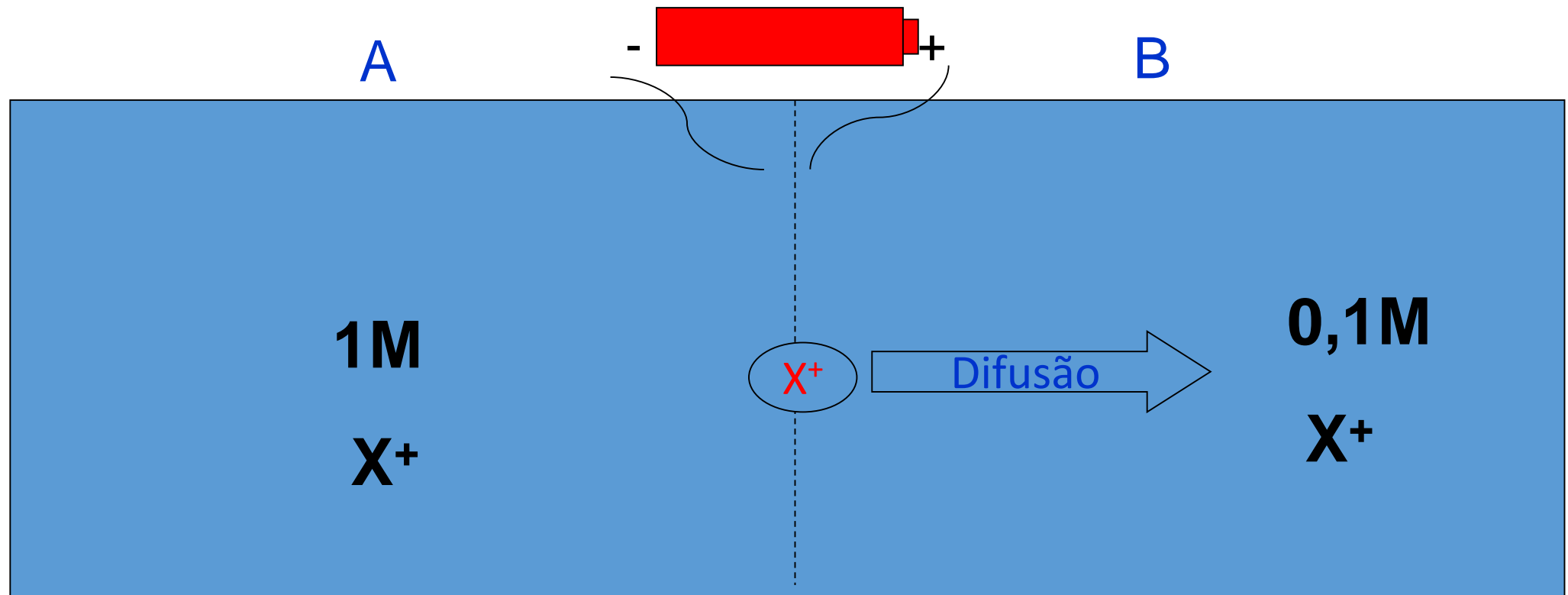
Membrana Permeável ao X^+

Equilíbrio Iônico



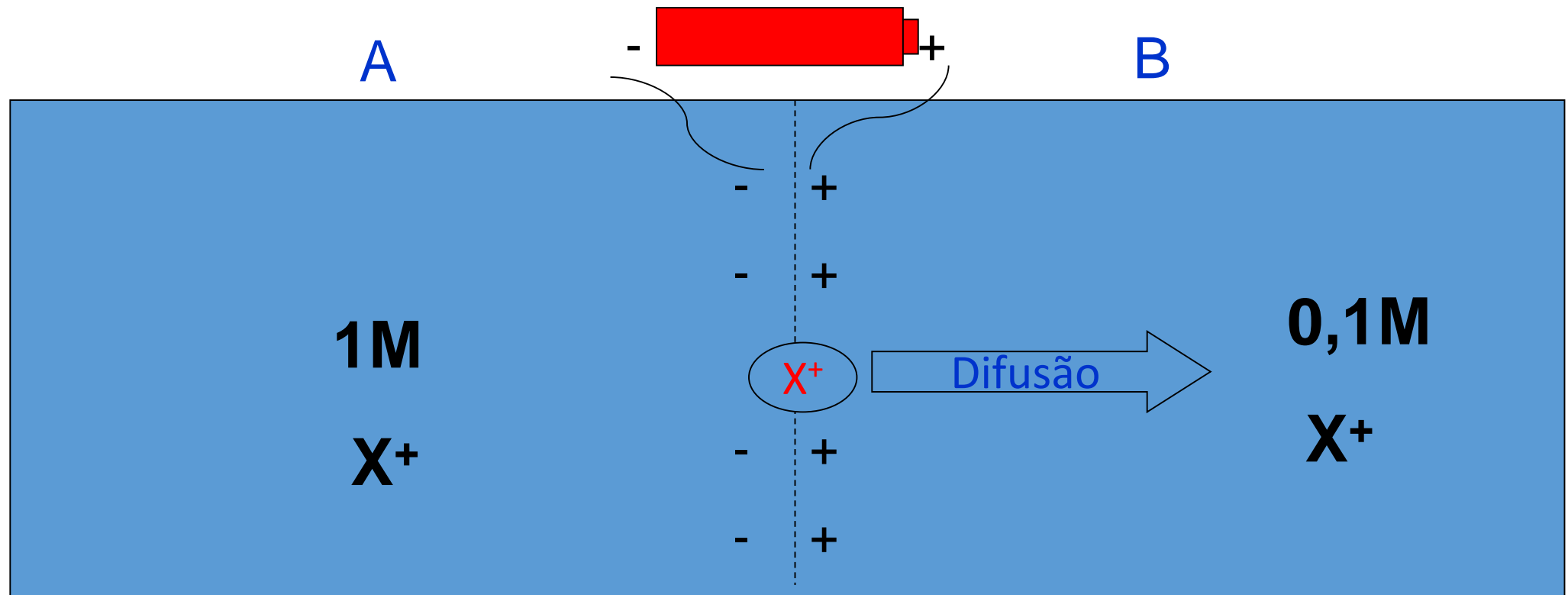
Membrana Permeável ao X^+

Equilíbrio Iônico



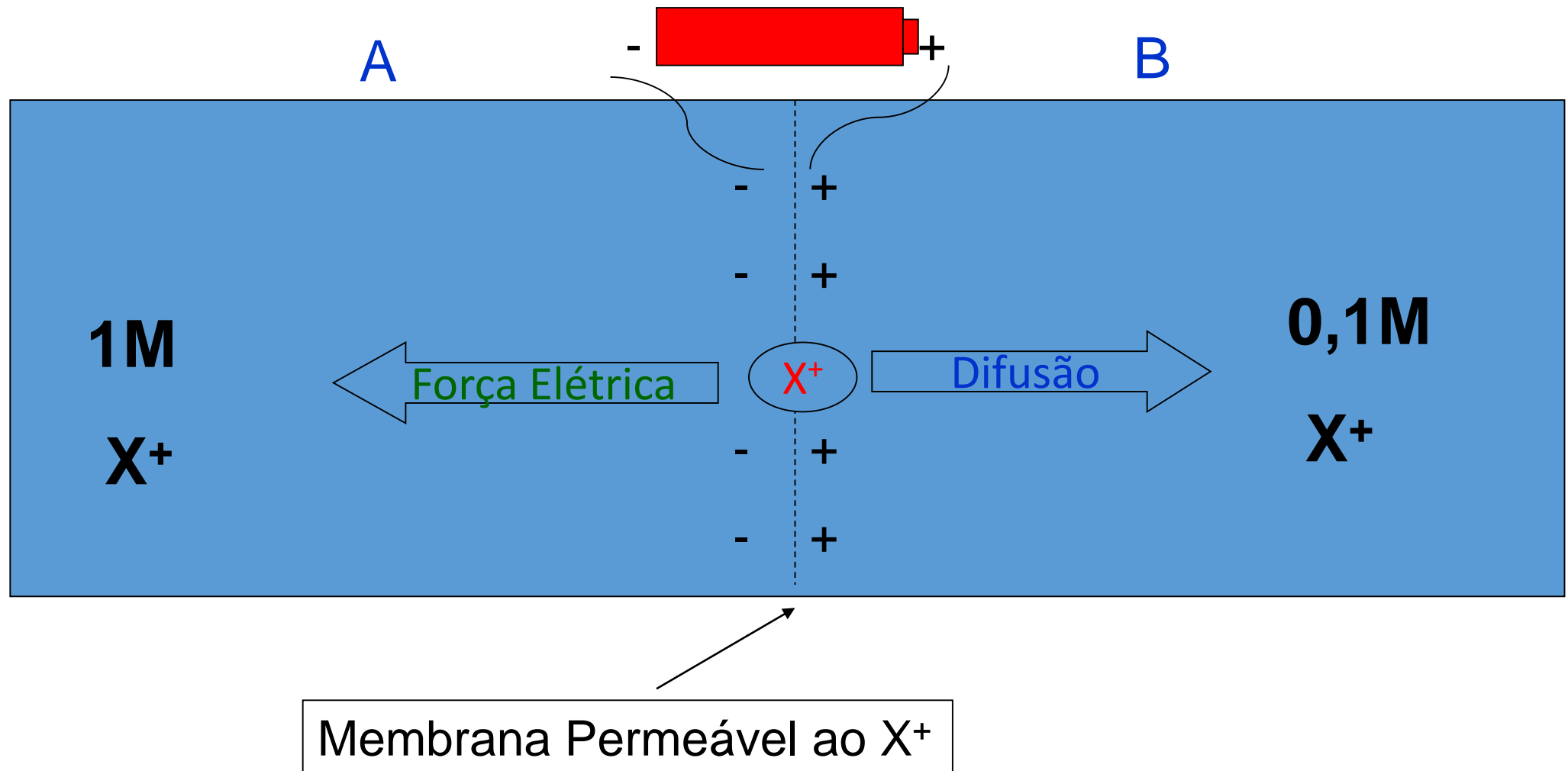
Membrana Permeável ao X^+

Equilíbrio Iônico

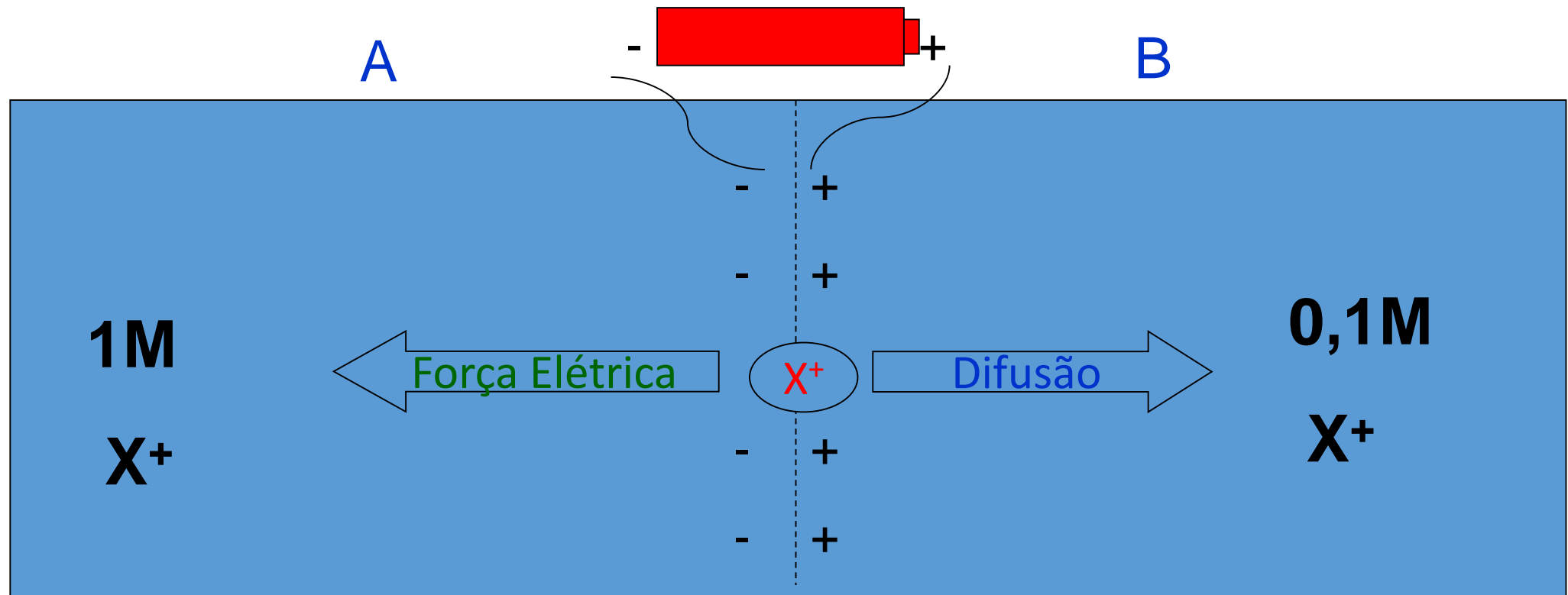


Membrana Permeável ao X^+

Equilíbrio Iônico



Equilíbrio Iônico



A direção do movimento efetivo do íon dependerá de qual efeito é maior

$$F_D > F_E \mapsto J_{AB}$$

$$F_E > F_D \mapsto J_{BA}$$

$$F_E = F_D \mapsto J = 0 \text{ EQUILÍBRIO IÔNICO}$$

Densidade de corrente na membrana

- Devido às diferentes concentrações de iônicas dos dois lados da membrana, o fluxo de íons pela membrana pode ser associado a uma corrente elétrica
- Em cada instante pode-se definir a densidade de corrente elétrica, como a corrente elétrica por unidade de área:

$$j = \frac{I}{A} \text{ (A/m}^2\text{)}$$

- Em uma solução com concentrações iônicas não uniformes e na presença de um campo elétrico \mathbf{E} , a densidade de corrente para cada tipo de íon é:

$$j_i = j_i^D + j_i^E$$

com j_i^D sendo a densidade de corrente devida à difusão iônica e j_i^E a densidade de corrente induzida pelo campo elétrico

Densidade de corrente por difusão

- O processo de difusão está relacionado ao movimento aleatório das moléculas, se a concentração de moléculas não for uniforme, a agitação térmica fará a solução se uniformizar.
- No caso de soluções iônicas com concentrações não uniformes, os íons se movimentarão, dando origem à correntes elétricas
 - Se para os íons i , o gradiente de concentração iônica $\Delta C_i/\Delta x$ for uniforme na direção x , haverá uma densidade de corrente elétrica j_i^D , devido à difusão, proporcional a este gradiente:

$$j_i^D = -q_i D_i \frac{\Delta C_i}{\Delta x}$$

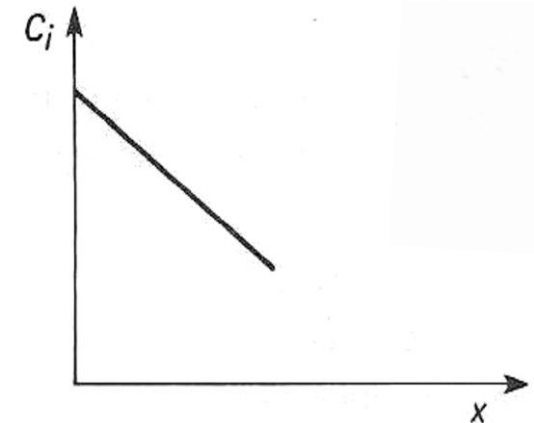
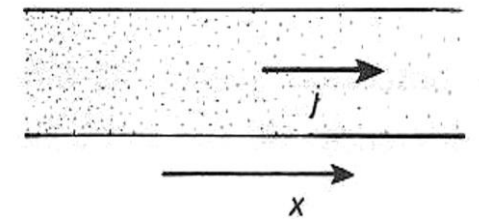
com D_i = a constante de difusão para os íons i e o sinal (-) indicando que a densidade de corrente elétrica tem o sentido da diminuição de C_i

- Se C_i varia uniformemente com x :

$$j_i^D = -q_i D_i \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta C_i}{\Delta x} = -q_i D_i \frac{dC_i}{dx}$$

- Como $D_i = \mu_i kT$, com $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$, temos:

$$j_i^D = -q_i \mu_i kT \frac{dC_i}{dx}$$



Densidade de corrente elétrica

- Como a corrente elétrica se origina pelo movimento das cargas devido ao campo elétrico aplicado, podemos relacionar a densidade de corrente elétrica ao campo elétrico E e a resistividade do meio (ρ):

$$j^E = \frac{1}{\rho} E$$

- Numa solução eletrolítica, a resistividade elétrica ρ_i ($\Omega.m$) é diferente para cada íon i e pode ser obtida por:

$$\frac{1}{\rho_i} = \mu_i q_i^2 C_i$$

com μ_i = constante de mobilidade ($\mu_i = \frac{D_i}{kT}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J/K$), q_i a carga elétrica e a concentração C_i em íons por volume

- Relacionando as duas equações anteriores, encontramos: $j_i^E = \mu_i q_i^2 C_i E$

Equação de Nernst-Planck

- Em uma solução com concentrações iônicas não uniformes e na presença de um campo elétrico E , a densidade de corrente para cada tipo de íon é:

$$j_i = j_i^D + j_i^E$$

com j_i^D sendo a densidade de corrente devida à difusão iônica e j_i^E a densidade de corrente induzida pelo campo elétrico

- Considerando apenas soluções com simetria plana, ou seja, na qual todas as grandezas (j , C , E ...) variam apenas em uma direção (ex: direção x – perpendicular aos planos de simetria), o campo elétrico pode ser escrito como:

$$E = -\frac{dV}{dx}$$

- E a densidade de corrente j_i , para íons de carga elétrica q_i , pode ser escrita como:

$$j_i = -q_i \mu_i \left(kT \frac{dC_i}{dx} + q_i C_i \frac{dV}{dx} \right)$$

Equação de
Nernst-Planck

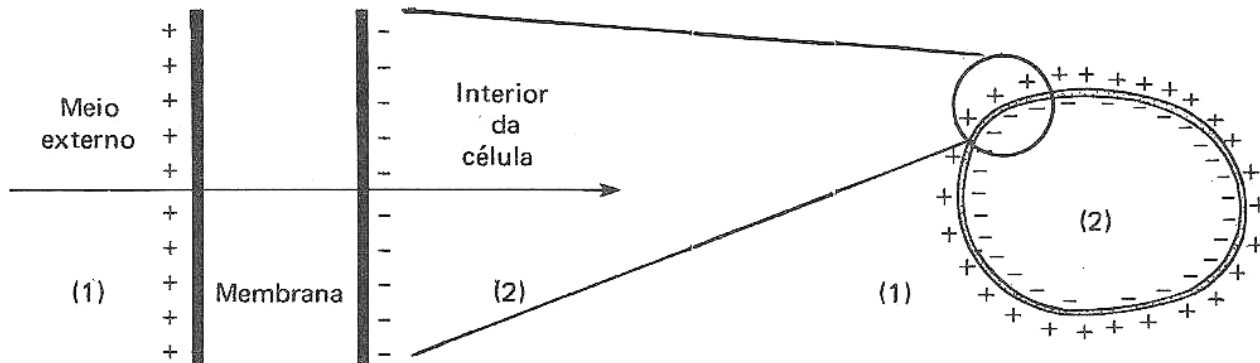
Condição especial: Eletrodifusão no equilíbrio

- Uma situação importante é aquela de equilíbrio, em que o fluxo de íons na membrana é zero ($j_i=0$)

$$j_i = -q_i \mu_i \left(kT \frac{dC_i}{dx} + q_i C_i \frac{dV}{dx} \right) = 0$$

$$kT \frac{dC_i}{dx} + q_i C_i \frac{dV}{dx} = 0$$

C_i e V variam no interior da membrana na direção x e são constantes no meio intra e extra celular, resolvendo esta equação encontramos:



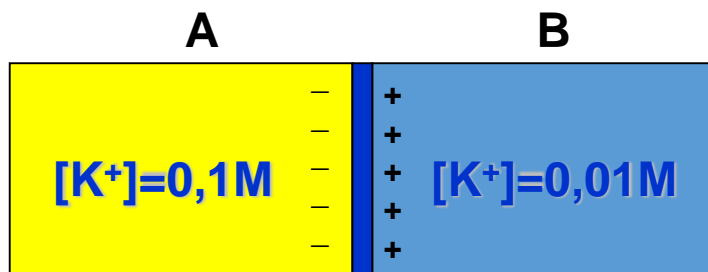
$$V(2) - V(1) = -\frac{kT}{q_i} \ln \frac{C_i(2)}{C_i(1)}$$

$\Delta V_{\text{membrana}} = \text{Potencial de Nernst}$

Equação de Nernst

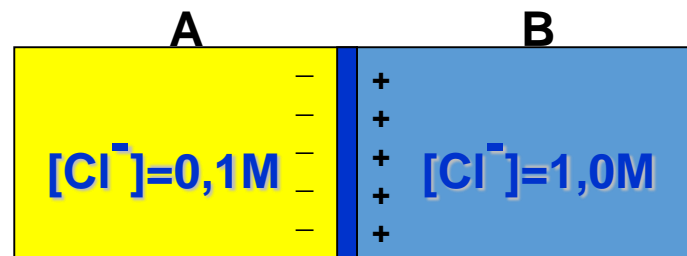
$$V_2 - V_1 = \frac{60mV}{z} \cdot \log \frac{C_2}{C_1}$$

Exemplos



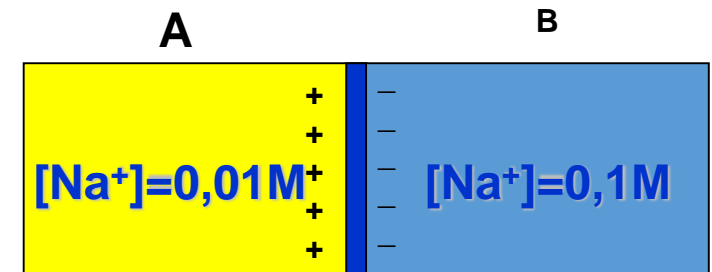
Membrana permeável ao K^+

$$V_A - V_B = -60mV$$



Membrana permeável ao Cl^-

$$V_A - V_B = -60mV$$



Membrana permeável ao Na^+

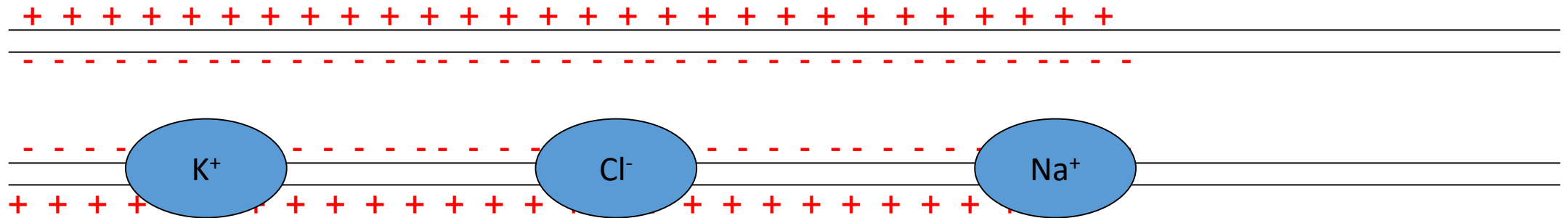
$$V_A - V_B = +60mV$$

Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Músculo de rã				
[Na ⁺]	120	9,2	+67	
[K ⁺]	2,5	140	-105	-90
[Cl ⁻]	120	4	-90	
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	

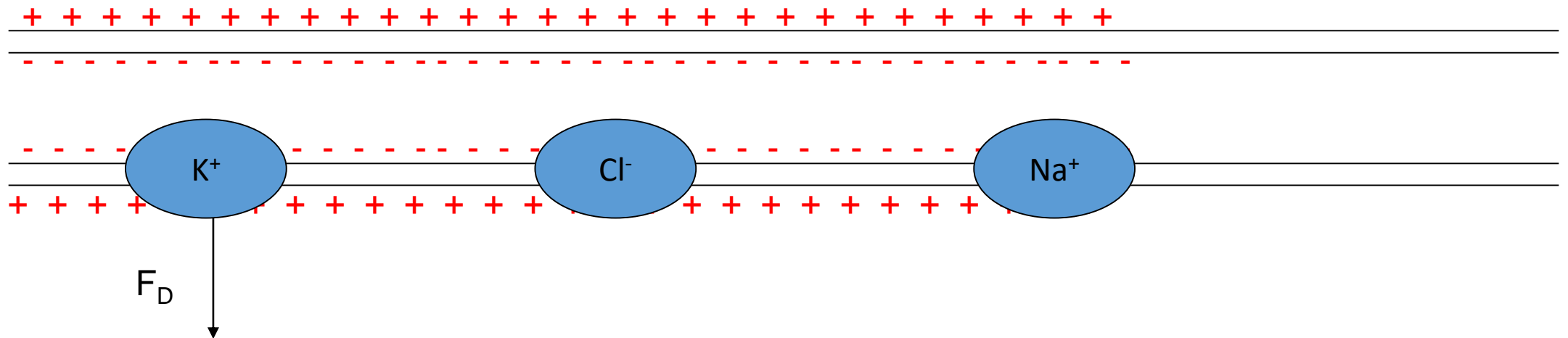
Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	



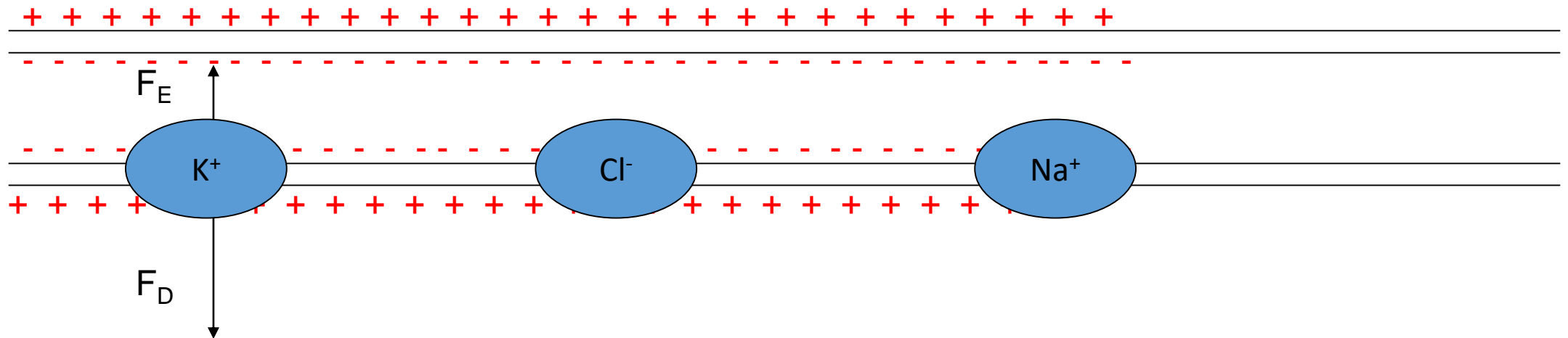
Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	



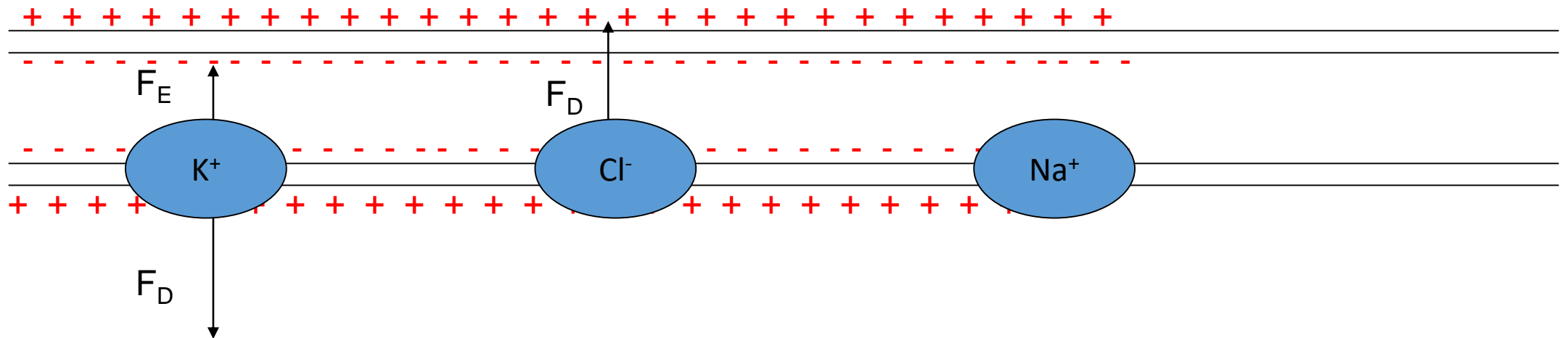
Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	



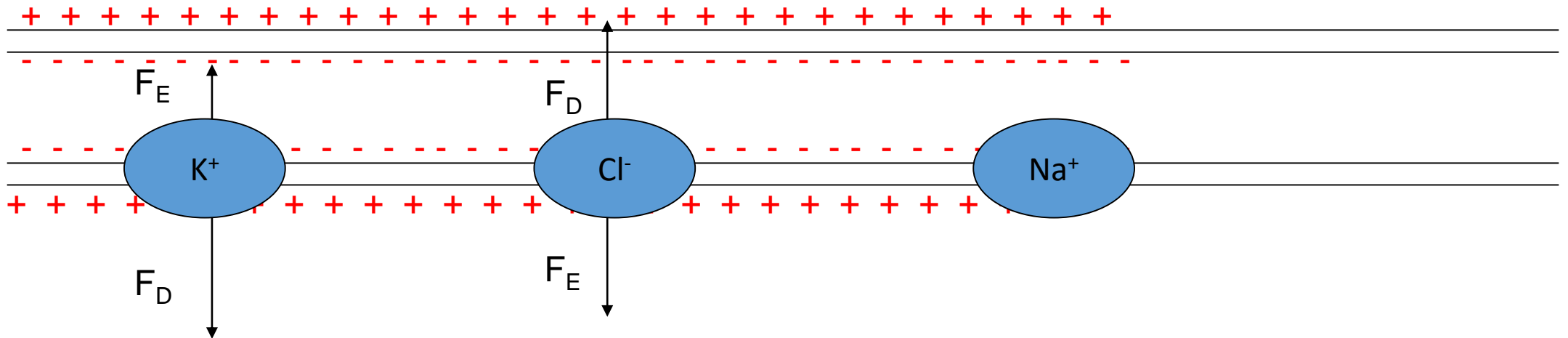
Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	



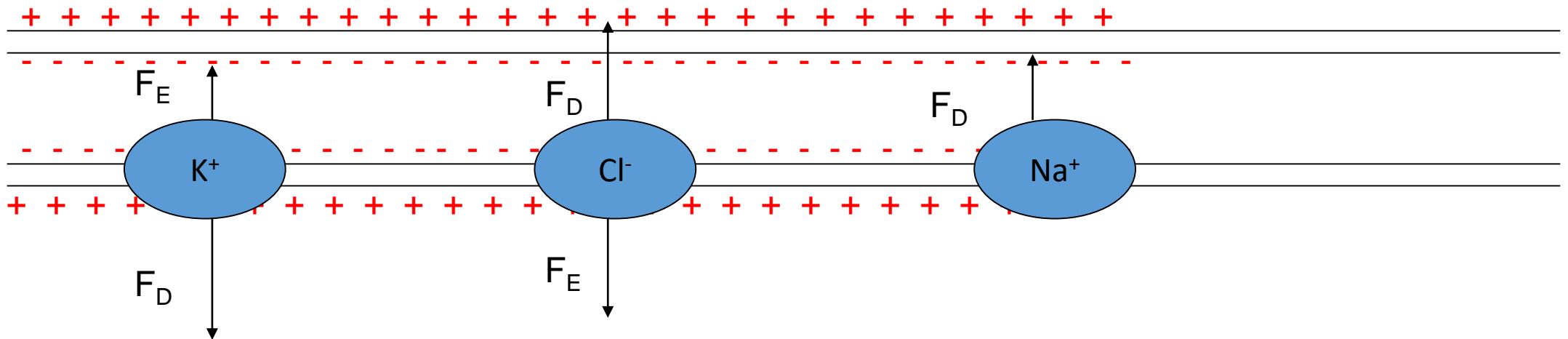
Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	



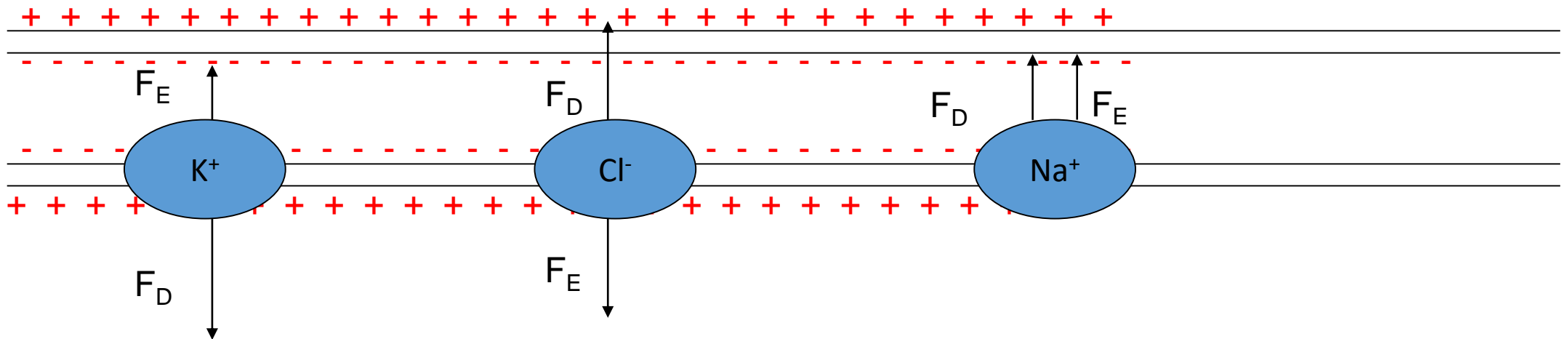
Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	

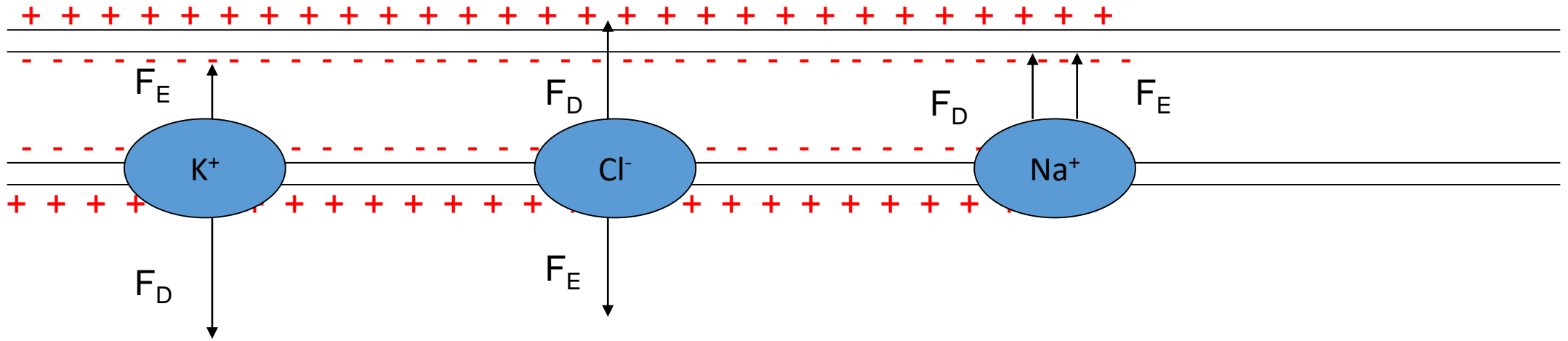


Equilíbrio Iônico no meio celular

	Líquido Extracelular (mM)	Citoplasma (mM)	Potencial Equilíbrio de Nernst (mV)	Potencial da Membrana (mV)
Axônio de Lula				
[Na ⁺]	460	50	+58	
[K ⁺]	10	400	-96	-70
[Cl ⁻]	540	40	-70	



Equilíbrio Iônico no meio celular



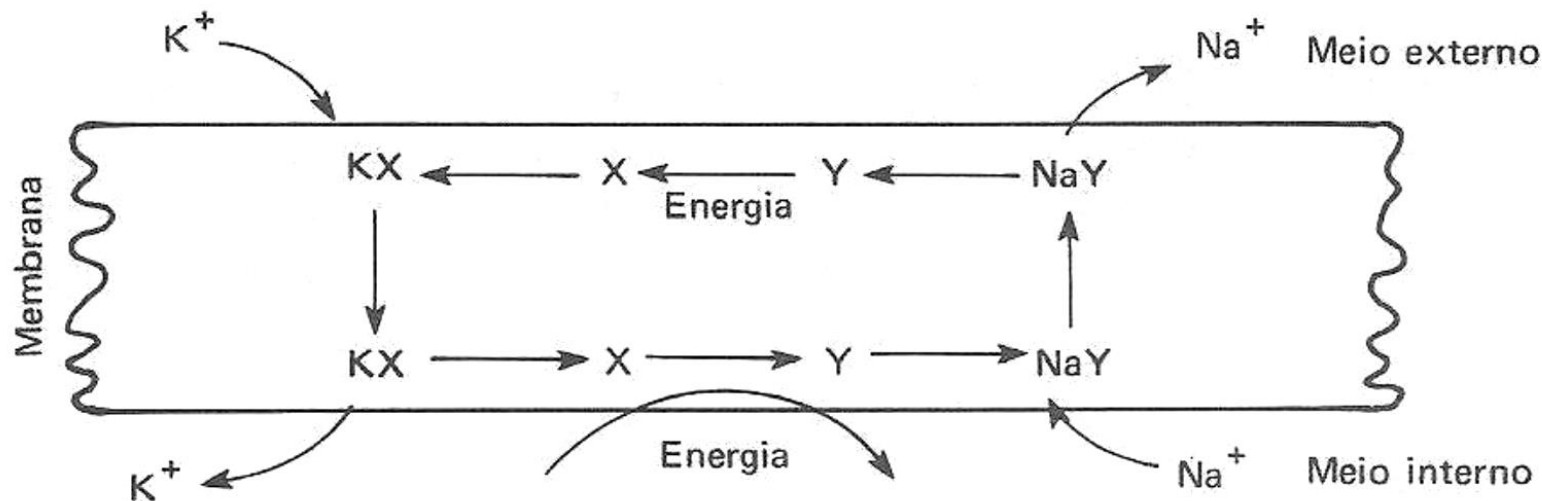
- K^+ : $F_E < F_D \mapsto$ tendência de sair
- Cl^- : $F_E = F_D \mapsto$ está em equilíbrio
- Na^+ : F_E e F_D na mesma direção \mapsto tendência a entrar

	Nernst (mV)	Potencial Repouso (mV)
[Na ⁺]	+58	
[K ⁺]	-96	-70
[Cl ⁻]	-70	

- Dessa forma, haveria uma $\downarrow [K^+]$ e um $\uparrow [Na^+]$ dentro da célula
 - \rightarrow Na prática as concentrações descritas se mantêm constantes ao longo do tempo
 - \rightarrow Deve haver outro mecanismo atuando no sistema além do transporte passivo descrito até agora

Transporte ativo de íons: A bomba de sódio

- É um tipo de transporte ativo através da membrana celular, presente em quase todas as células para manter as concentrações intracelulares baixas de Na^+ e altas de K^+
- É realizado pela proteína complexa existente na membrana celular denominada: *sódio-potássio-adenosina-trifosfatase*, ou simplesmente, *bomba de sódio*
 - Nos neurônios humanos, uma molécula de ATP é usada para retirar 3 íons de Na^+ da célula e levar 2 íons de K^+ para seu interior. Cada bomba de sódio transporta 200 Na^+ para fora e 130 K^+ para dentro da célula por segundo, de acordo com a necessidade celular
 - A razão de íons de Na^+ e K^+ varia de uma bomba para outra.

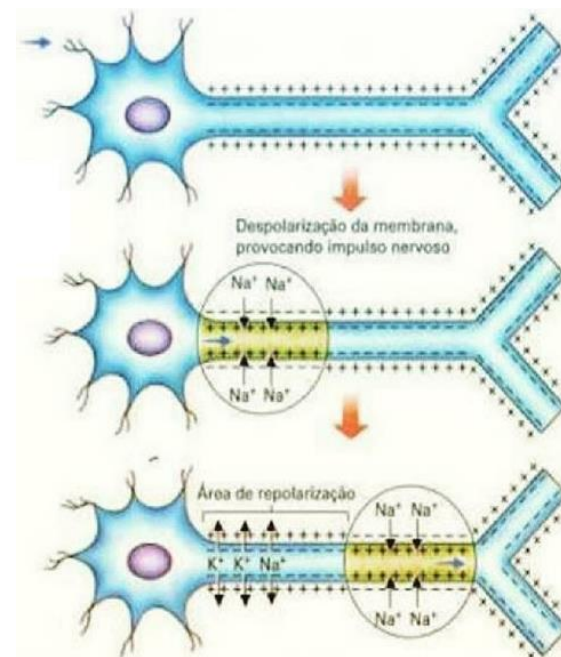
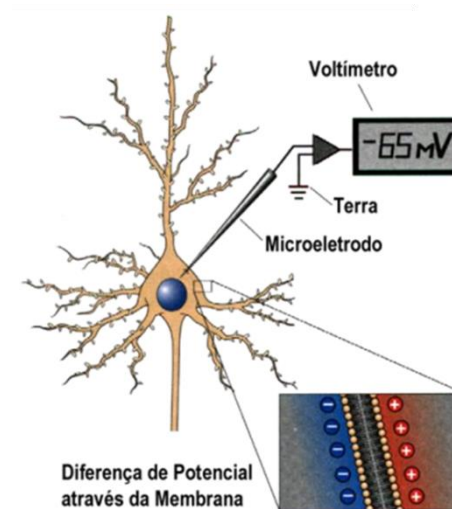


- As células gastam até 20% de sua energia metabólica para manter as bombas, se não fosse o acoplamento (NaY e KX) esse gasto seria ainda maior.

Bioeletrecidade – eletricidade nos neurônios

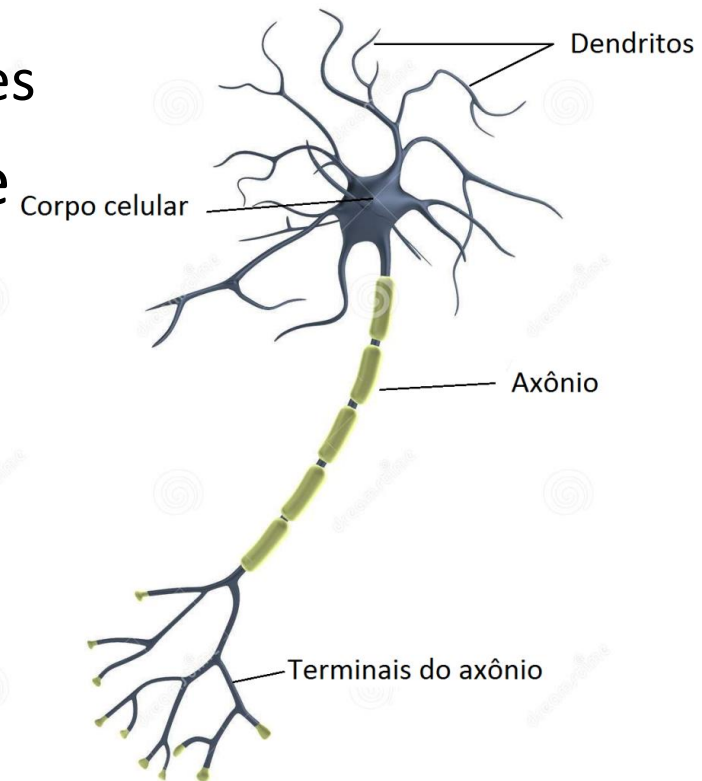
Introdução

- As biomembranas ao transportarem íons entre os meios intra e extracelulares ficam polarizadas, o que origina um *potencial elétrico na biomembrana*.
- Uma célula excitável, que recebe um estímulo externo, pode alterar o fluxo de íons através de sua membrana, modificando sua polarização.
- Ex: célula nervosa ou neurônio:
 - Recebe impulsos elétricos do próprio organismo ou do meio externo, integra essas informações e as retransmite para outros neurônios.
 - Possui um potencial de membrana entre seu interior e exterior.
 - Para desempenhar suas funções, deve possuir determinadas características quanto ao modo de gerar, conservar e transmitir impulsos elétricos → *potencial de ação*.



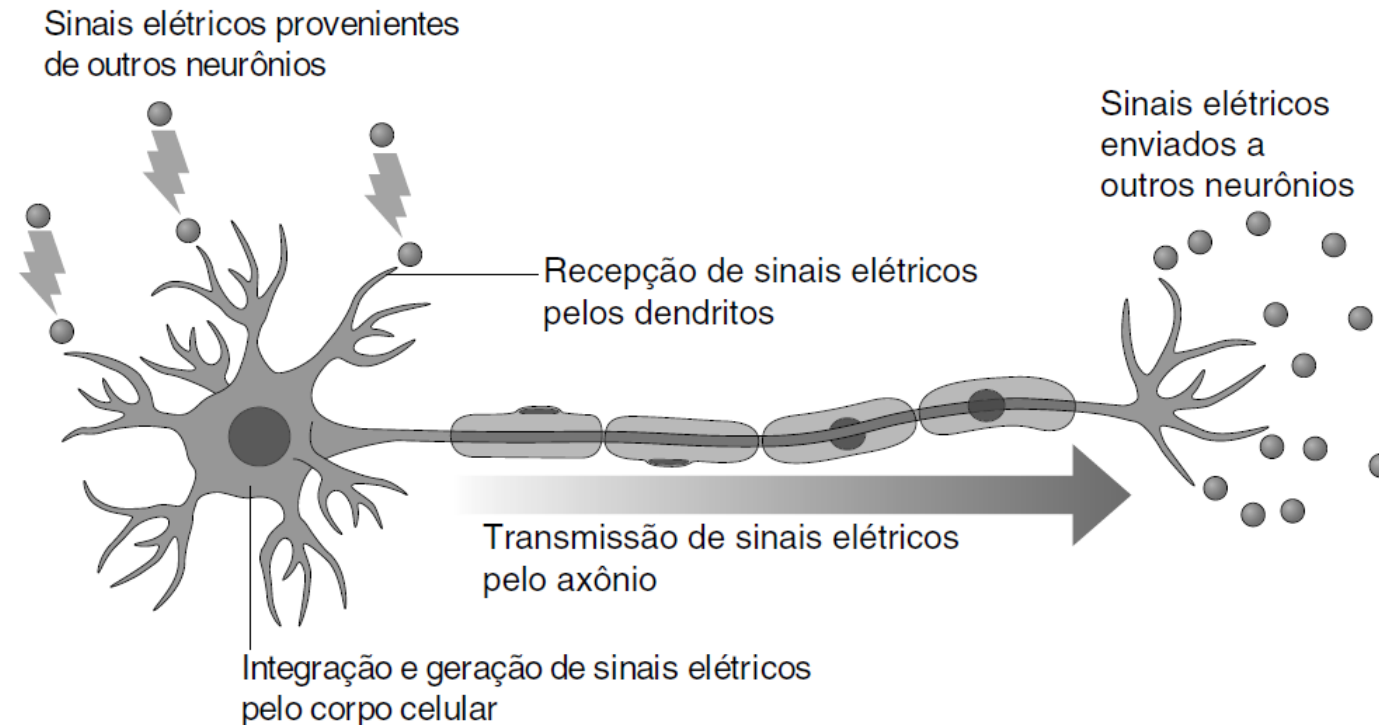
Neurônio

- Dendritos
 - Recebem impulsos nervosos de outros neurônios e os transmitem ao corpo celular
- Corpo celular = núcleo do neurônio
 - Gera novos impulsos que são transmitidos ao axônio
 - Compõem a substância cinzenta dos centros nervosos superiores
- Fibras nervosas ou axônios = prolongamento em forma de cabo elétrico de comprimento variado
 - Se agrupa em feixes característicos
 - Transmite o impulso elétrico aos terminais do axônio
 - Pode chegar a até 1m de comprimento com diâmetro da ordem de 0,1-20 μ m
 - Compõem a substância branca, feixes da medula espinhal e nervos



Funcionamento elétrico do neurônio

- O neurônio é especializado em receber informações, integrar essas informações e retransmiti-las a outros neurônios.
- *O axônio é a parte do neurônio encarregada da transmissão de informações, por causa da sua propriedade de ser excitável – que se manifesta como alteração da condutância elétrica quando sua membrana altera a polarização inicial em função do estímulo externo*

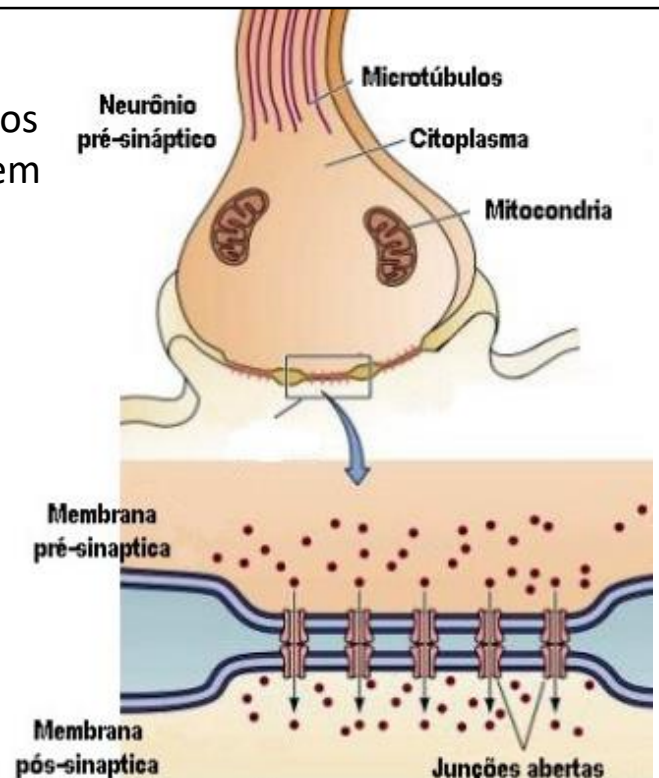


Sinapses

- Correspondem as unidades estruturas e funcionais da junção entre os dendritos de um neurônio com os terminais de outros axônios
- As sinapses funcionam como válvulas sendo capazes de controlar o fluxo de sinais entre os neurônios, essa regulação é denominada *eficiência sináptica*

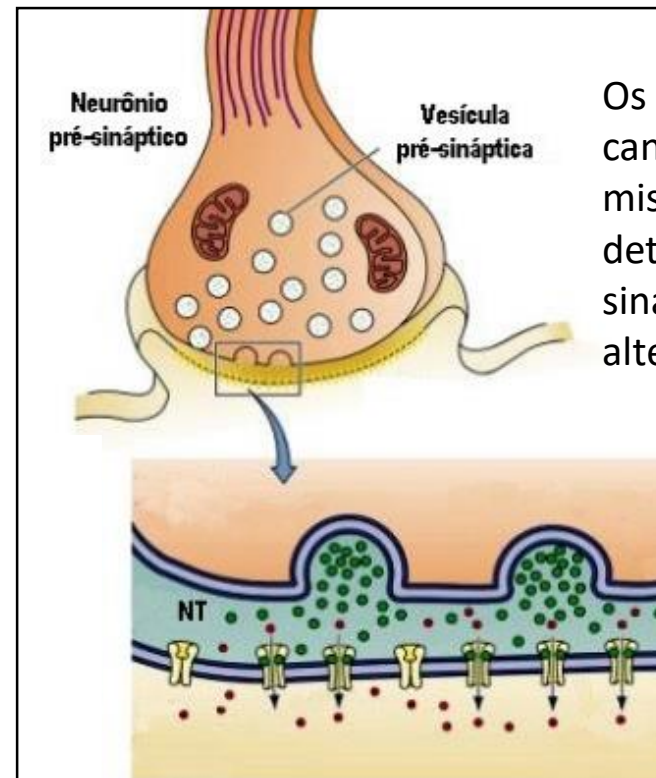
SINAPSE ELÉTRICA

Os dois neurônios estão ligados fisicamente pelo citoplasma em canais de pouca resistência

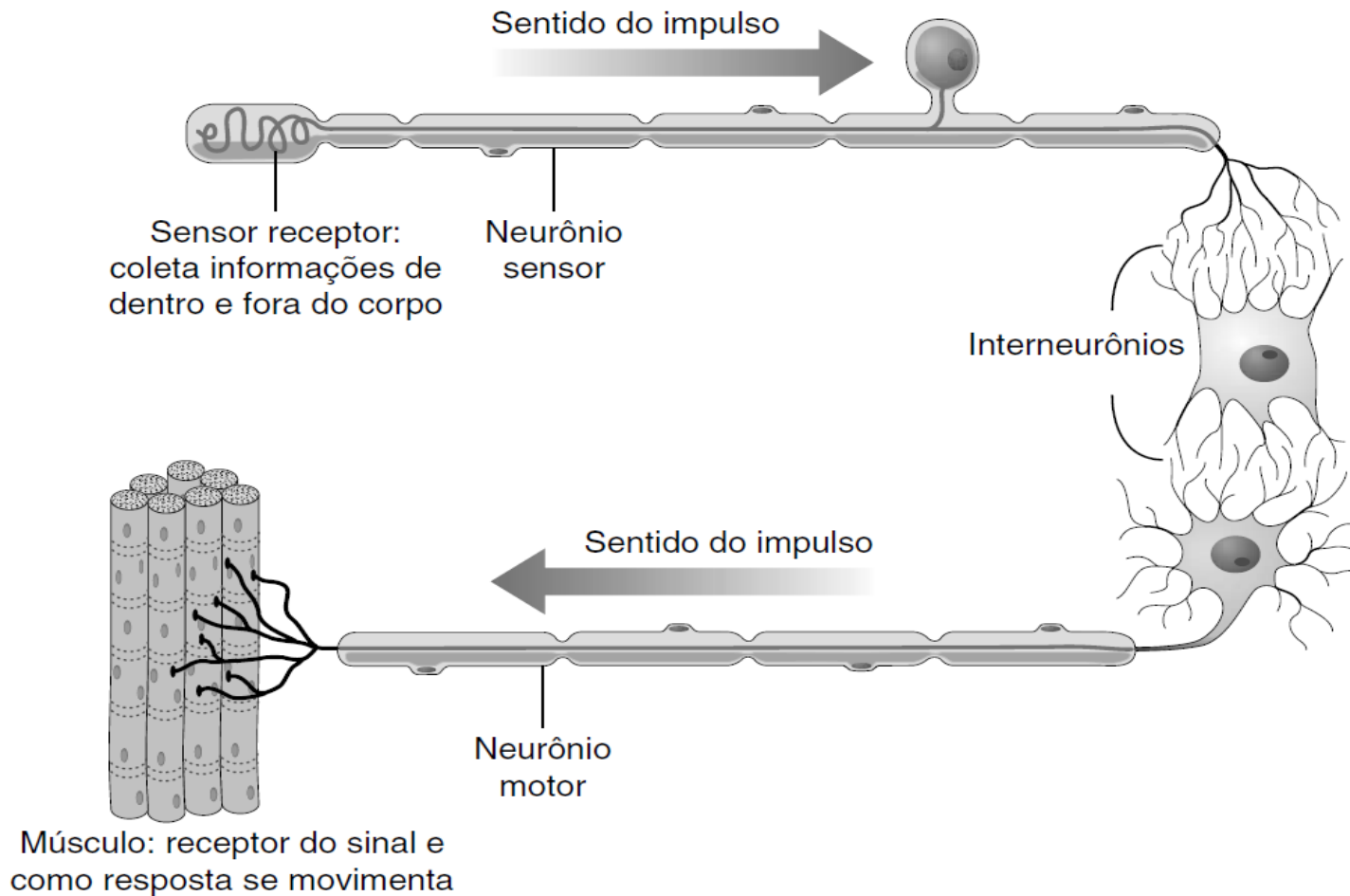


SINAPSE QUÍMICA

Os sinais no terminal do axônio abrem canais de cálcio e liberam neurotransmissores para a fenda sináptica que são detectados pelo neurônio pós-sináptico e induzem fluxos iônicos que alteram a polarização da membrana



Funcionamento do sistema nervoso central



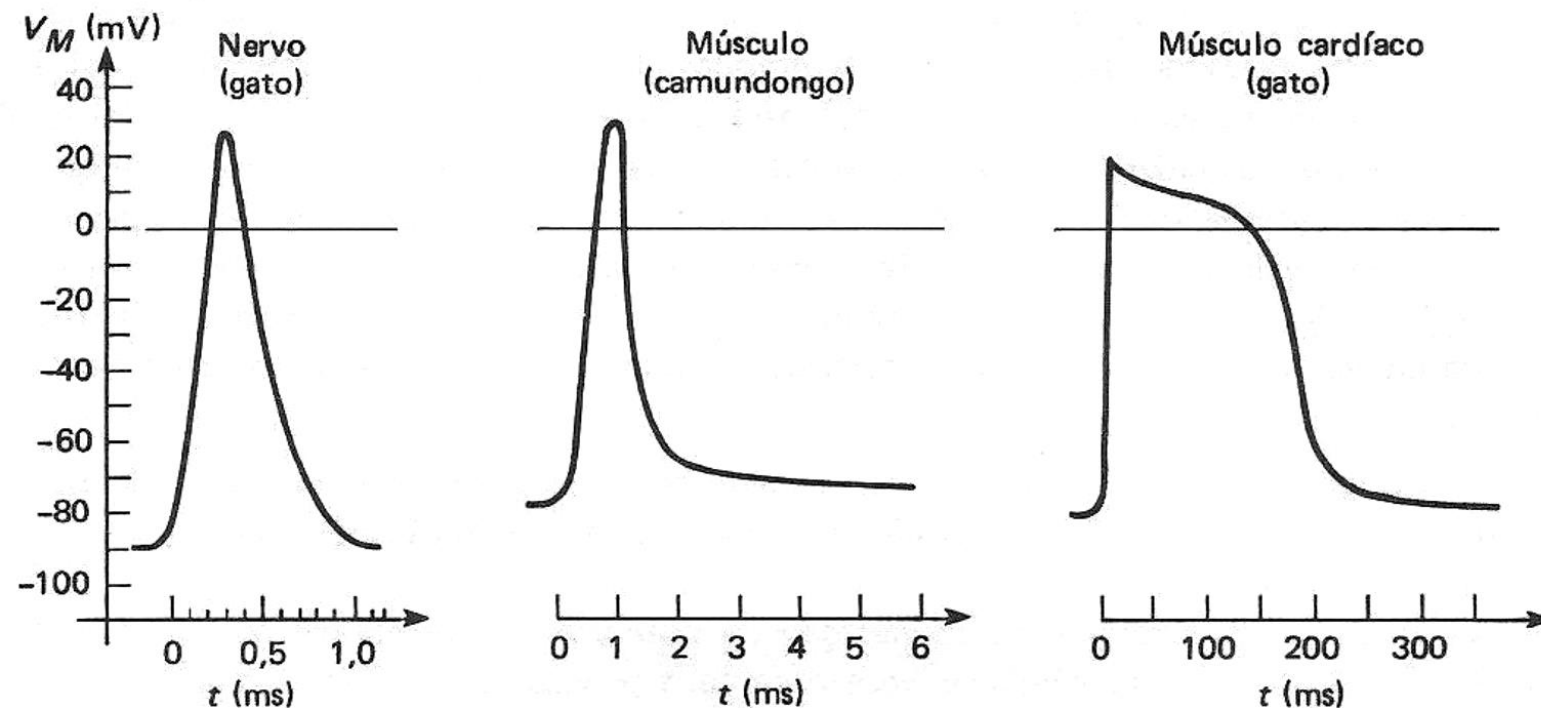
- Neurônio sensor: conduz impulsos nervosos ao SNC
- Neurônio motor: conduz impulsos nervosos do SNC para todo corpo

Potencial de ação

- Na ausência de perturbações externas, o potencial de membrana V_M da célula se mantém constante e é chamado de potencial de repouso V_0 . Com o estímulo externo, uma variação de potencial V ocorre na membrana da célula:

$$V_M = V_0 + V$$

- Essa variação rápida, que se propaga ao longo da célula é chamada **potencial de ação**

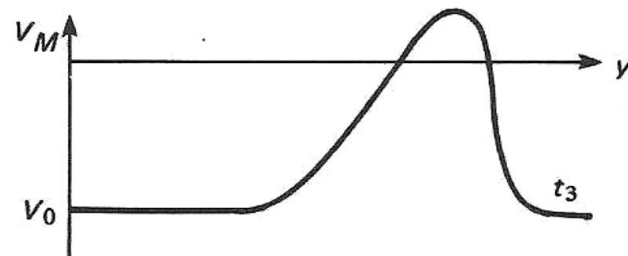
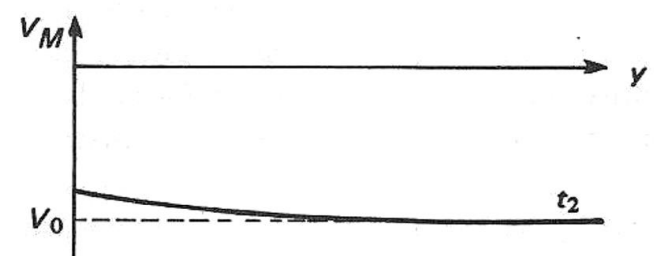
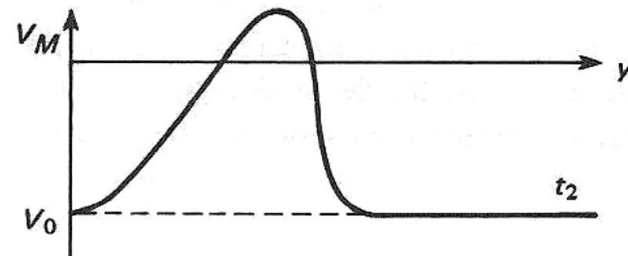
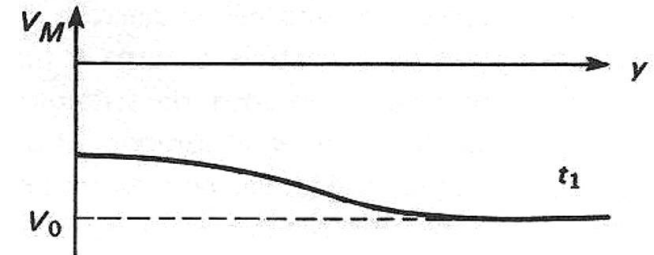
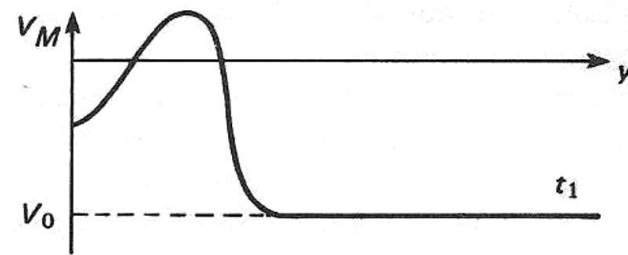
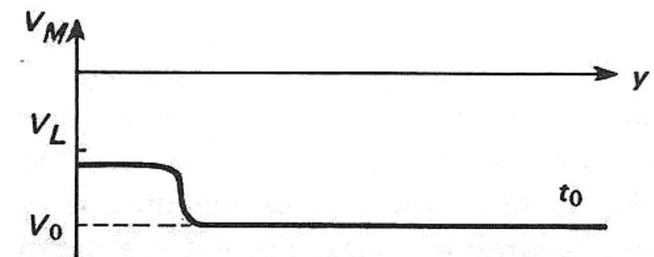
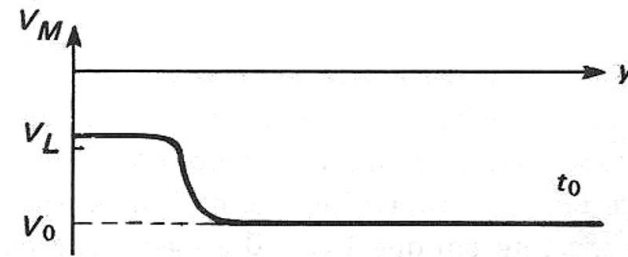


OBS:

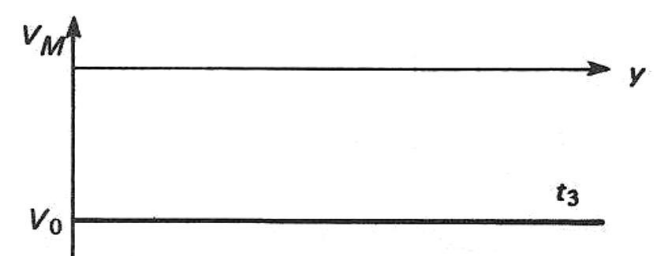
- V_M fica positivo rapidamente e retorna lentamente ao potencial de repouso
- Valor máximo de $V_M \cong +30mV$
- Duração do potencial de ação varia bastante (1-200ms)

O potencial limiar V_L

- Para que o potencial de ação aconteça, a despolarização da membrana deve ter um valor mínimo, característico de cada célula, chamado de potencial limiar (V_L)
- Potencial de ação é um evento “*tudo ou nada*”:
 - $V_M > V_L$ – potencial se propaga
 - $V_M < V_L$ – potencial não se propaga

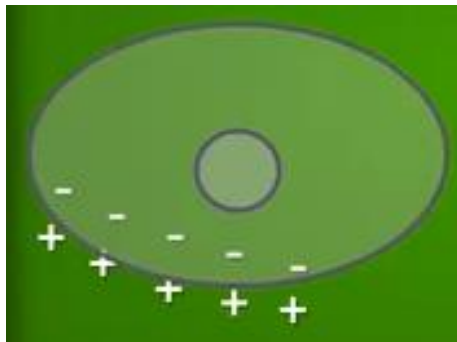


$$V_M > V_L$$

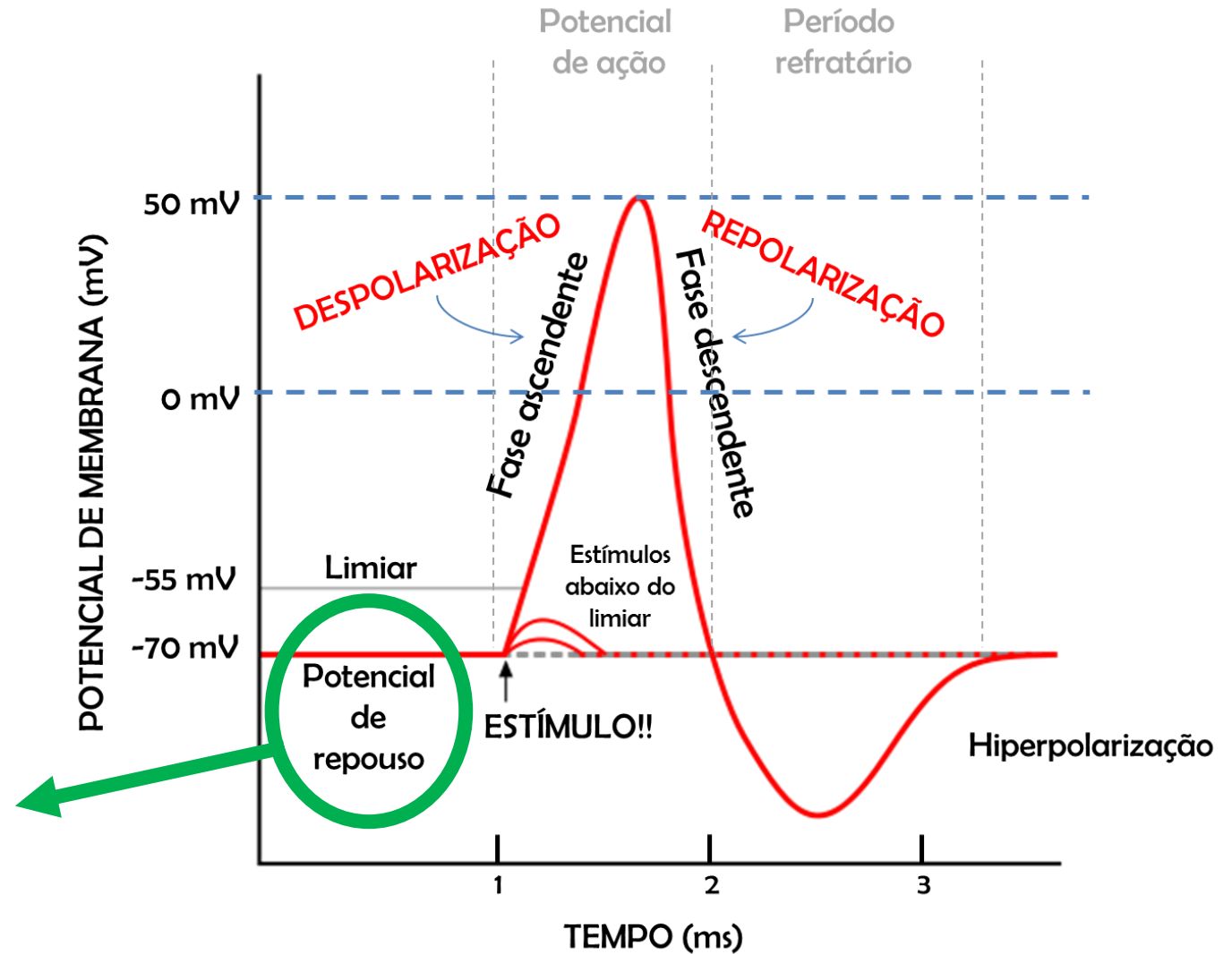


$$V_M < V_L$$

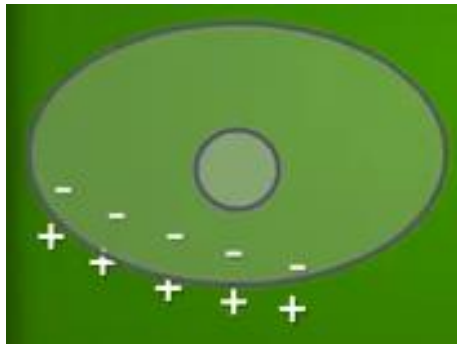
Forma típica do potencial de ação



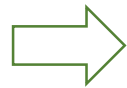
$$V_M = -70\text{mV}$$



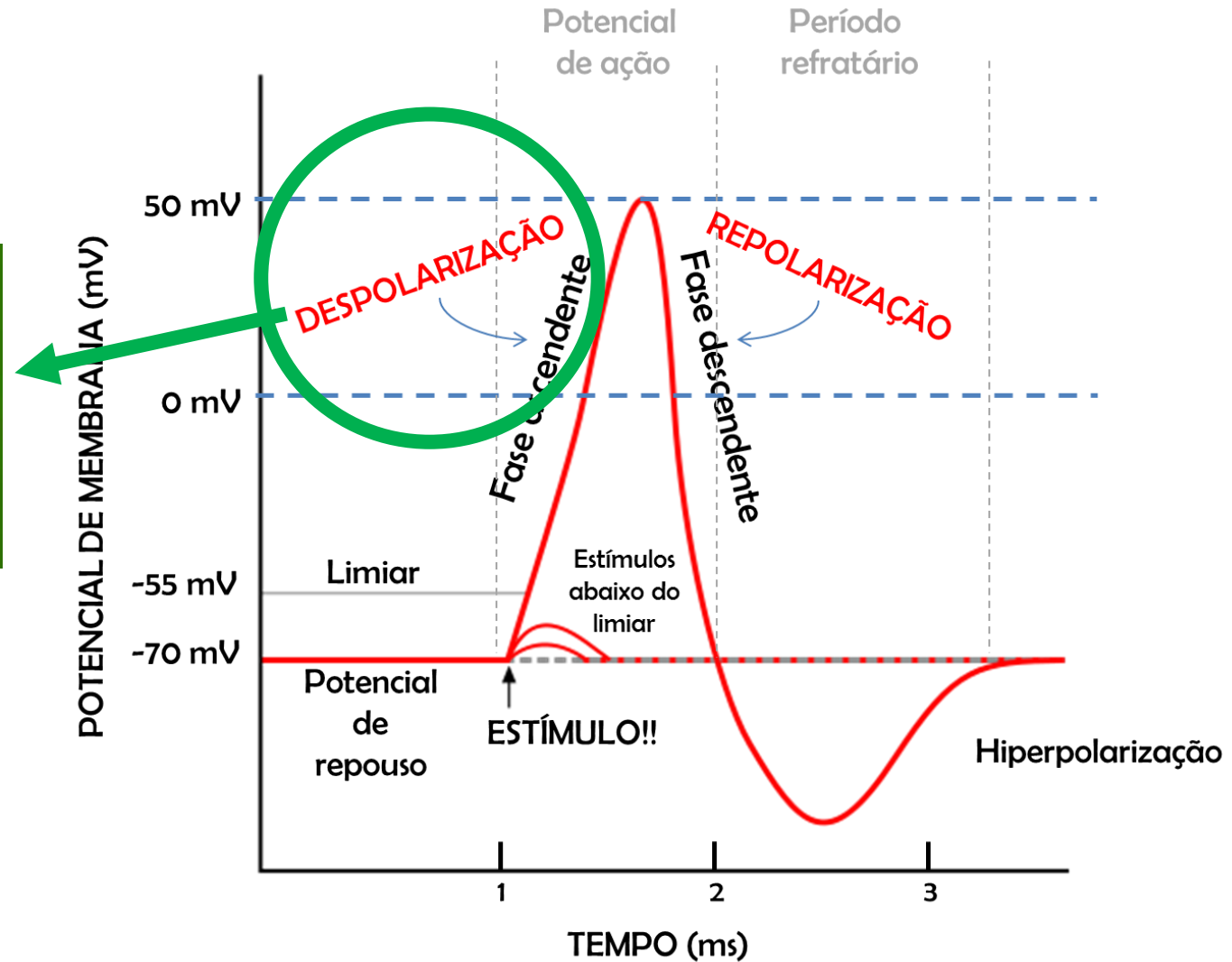
Forma típica do potencial de ação



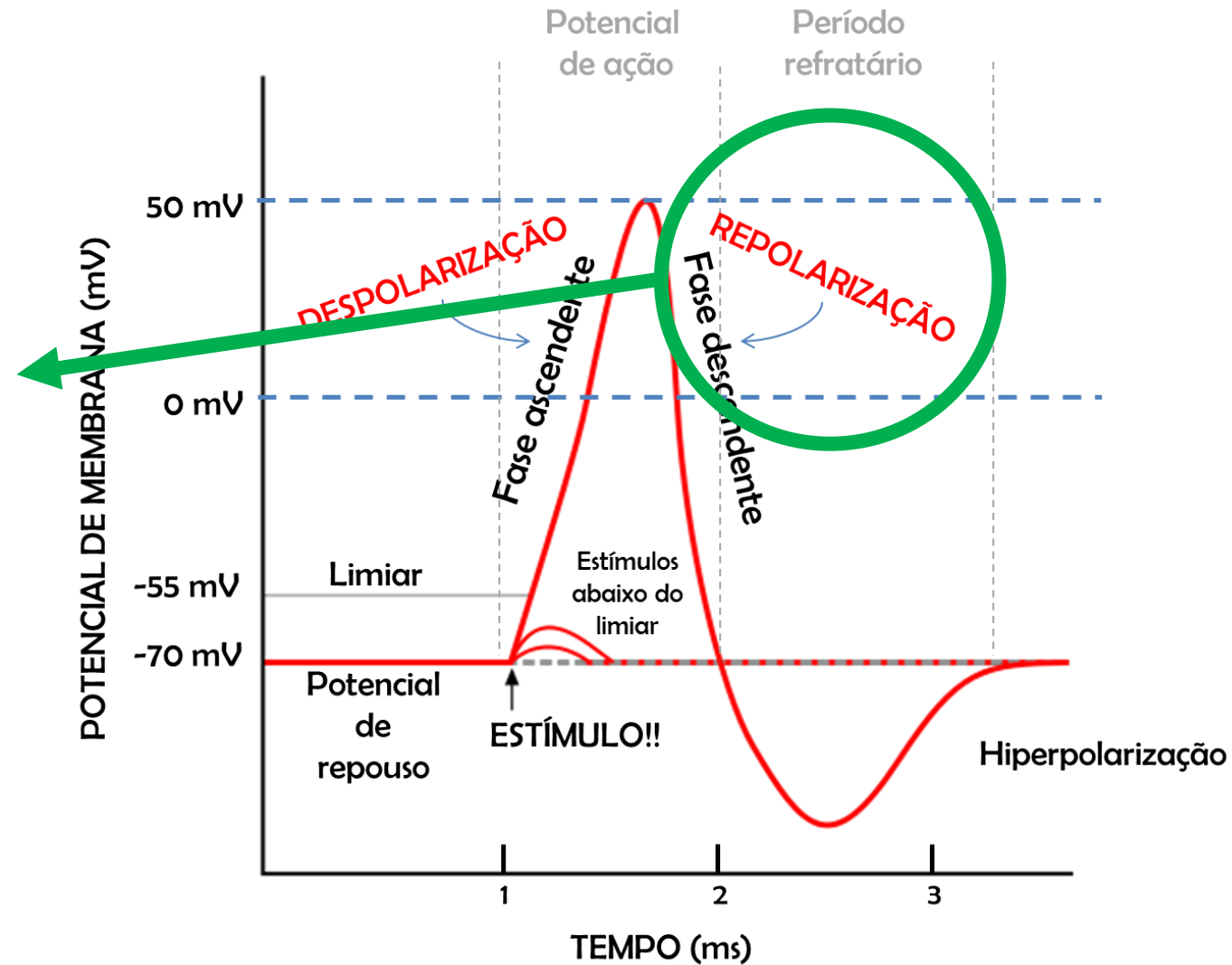
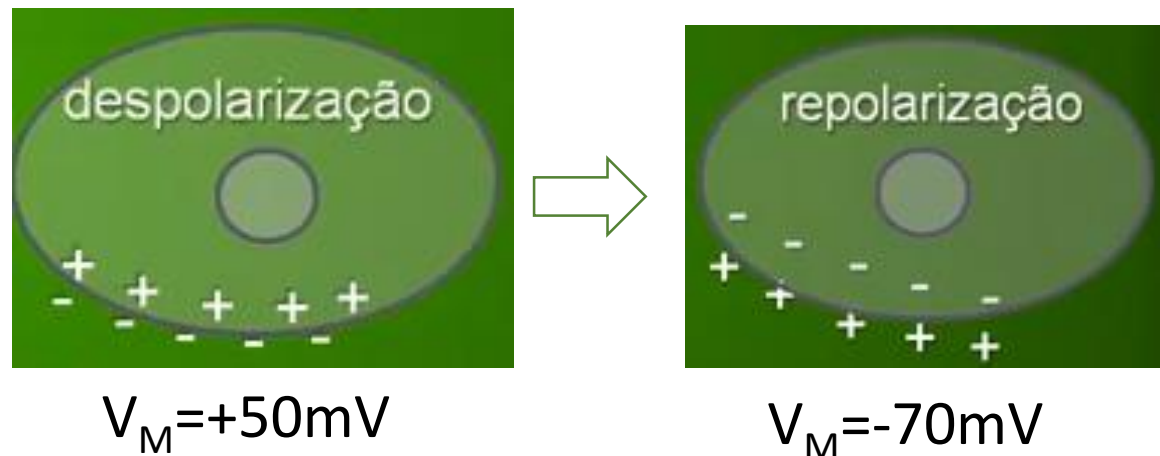
$$V_M = -70\text{mV}$$



$$V_M = +50\text{mV}$$



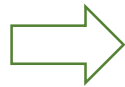
Forma típica do potencial de ação



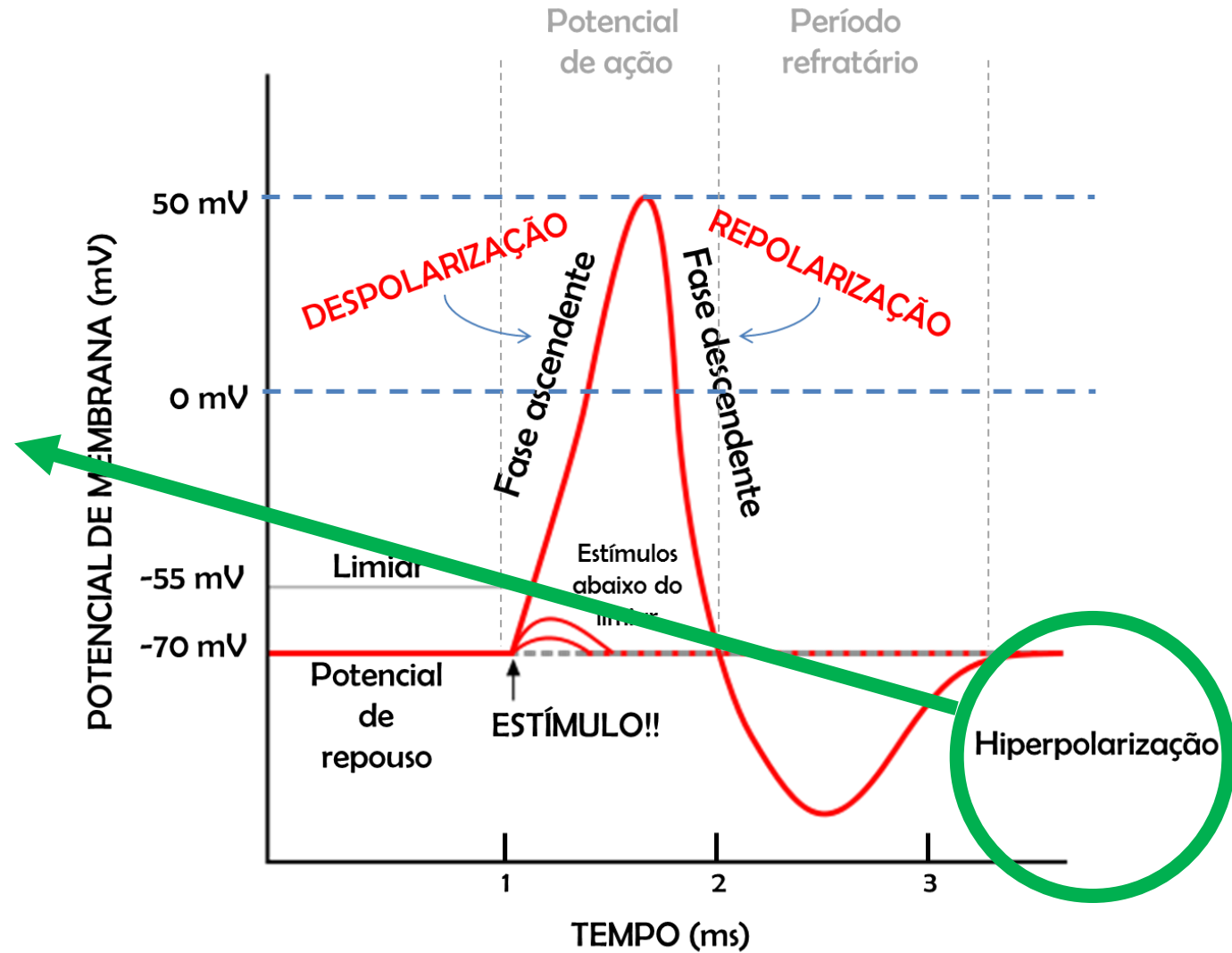
Forma típica do potencial de ação



$$V_M = -70\text{mV}$$



$$V_M < -70\text{mV}$$



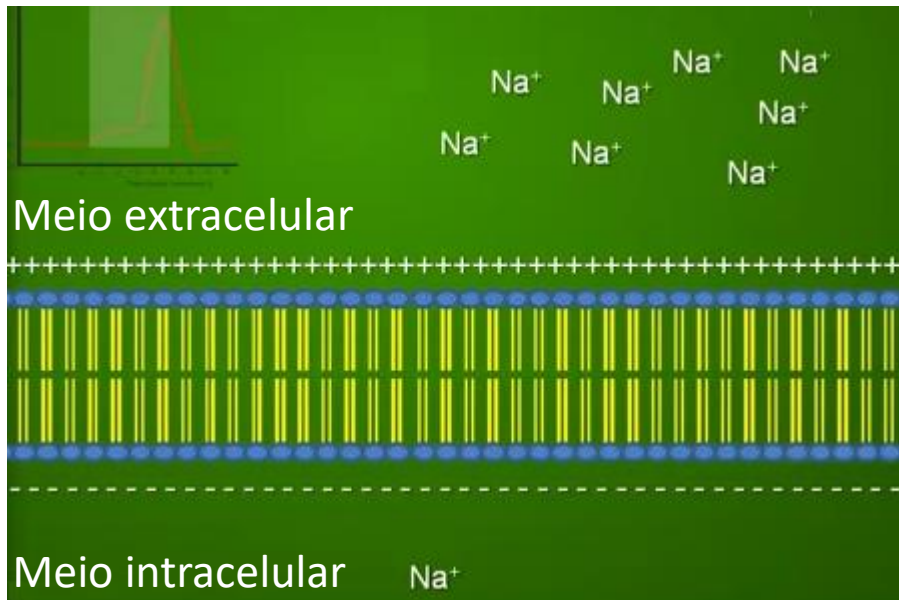
Como se altera o potencial da membrana?



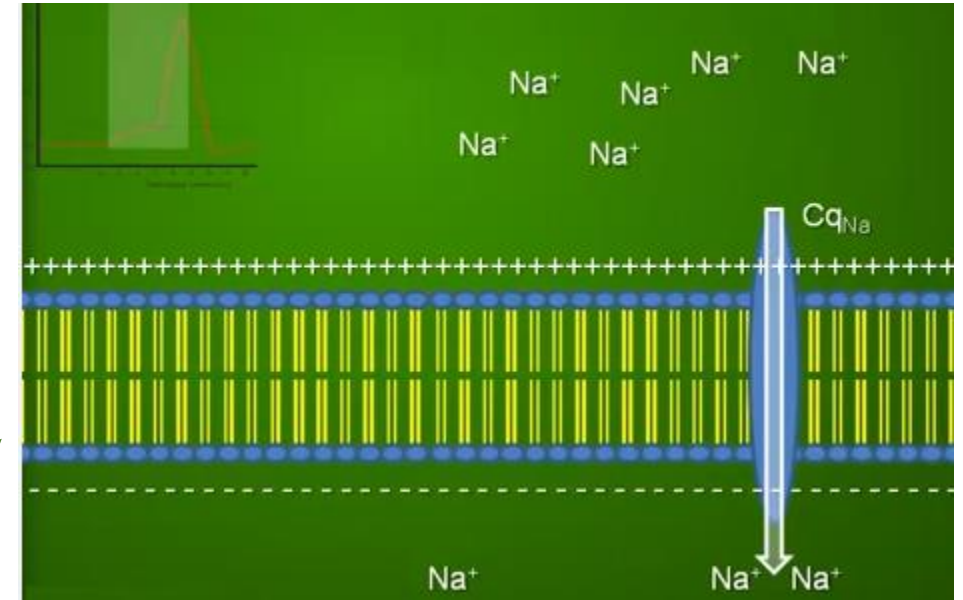
- Pela entrada ou saída de íons da célula
- Principais íons envolvidos são:
 - sódio (Na^+)
 - potássio (K^+)
 - cloreto (Cl^-)

Despolarização

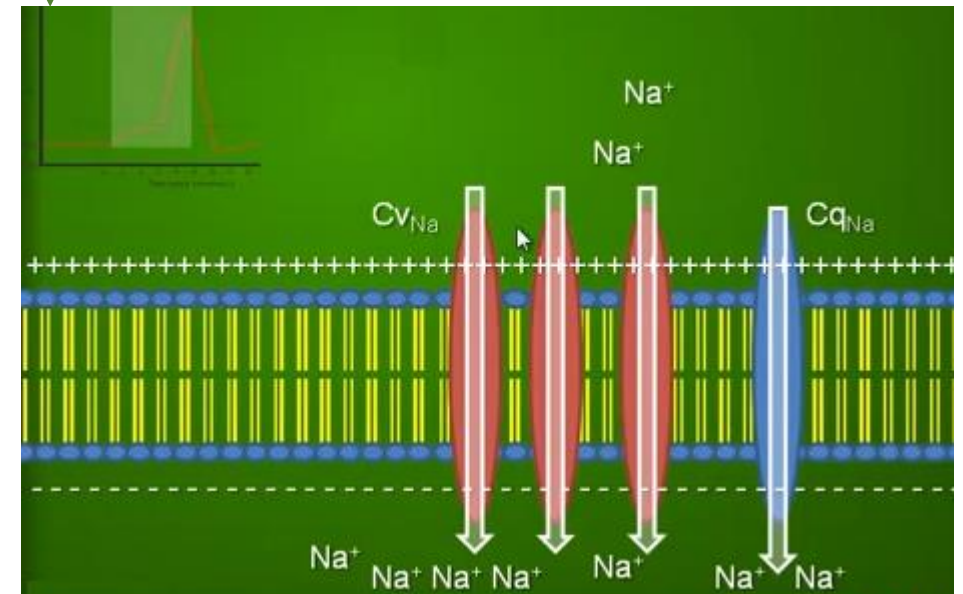
- Processo no qual a célula inverte momentaneamente a polaridade da membrana plasmática (interior fica positivo e exterior negativo)
- Ocorre entrada do sódio para promover a despolarização



1- Sódio entra na célula

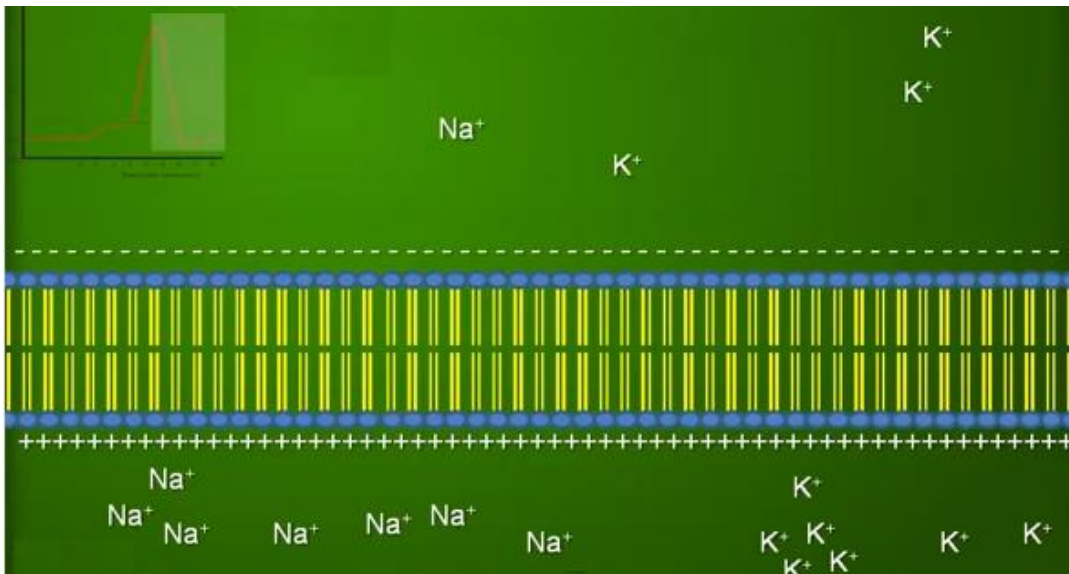


2- Ao atingir o potencial limiar, muito mais sódio entra na célula - despolarização

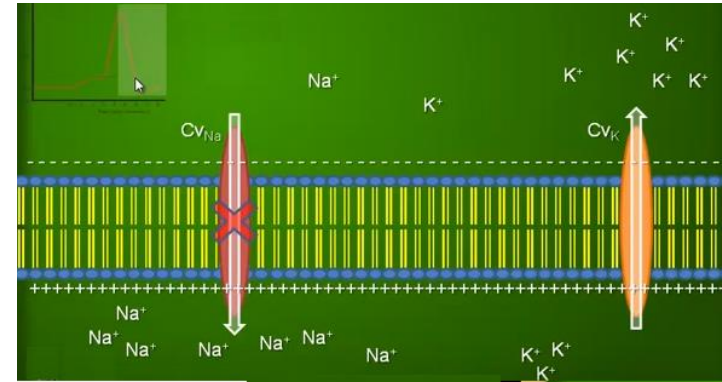


Repolarização

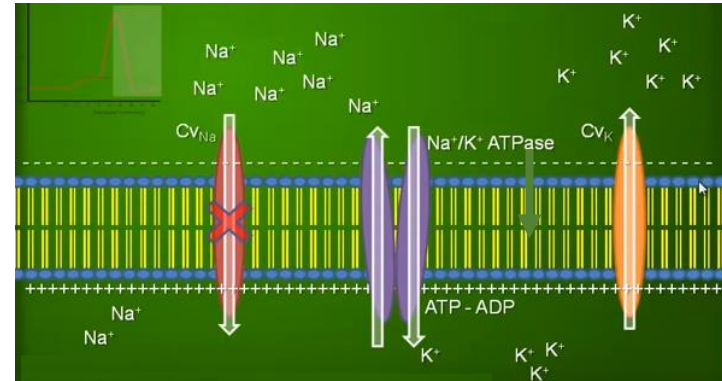
- Célula não pode ficar despolarizada, porque ela não conseguiria gerar outro potencial de ação --> célula retorna ao seu potencial de repouso após ocorrer a despolarização
- Na repolarização ocorre a saída de íons de sódio e potássio com reequilíbrio de ambos pela bomba sódio potássio



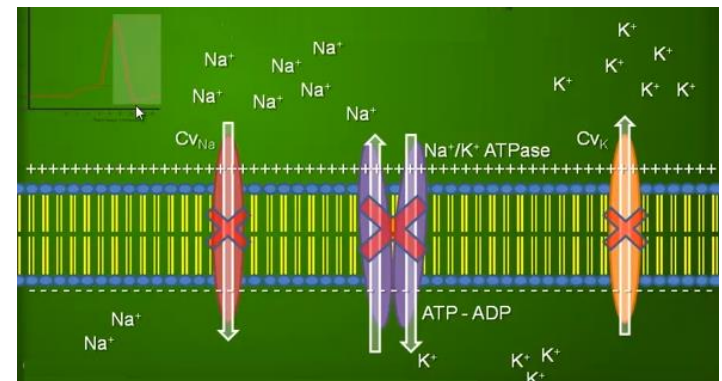
1- Canais de Na^+ deixam de atuar e canais de K^+ se abrem



2- Bomba de Na^+ e K^+ também ajuda na repolarização

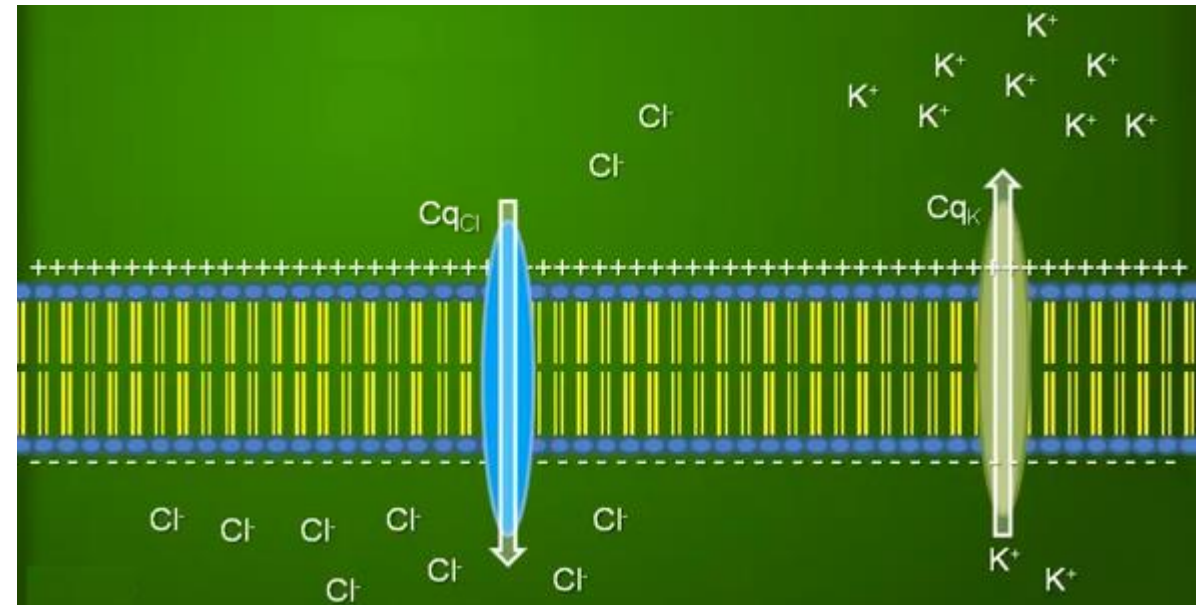
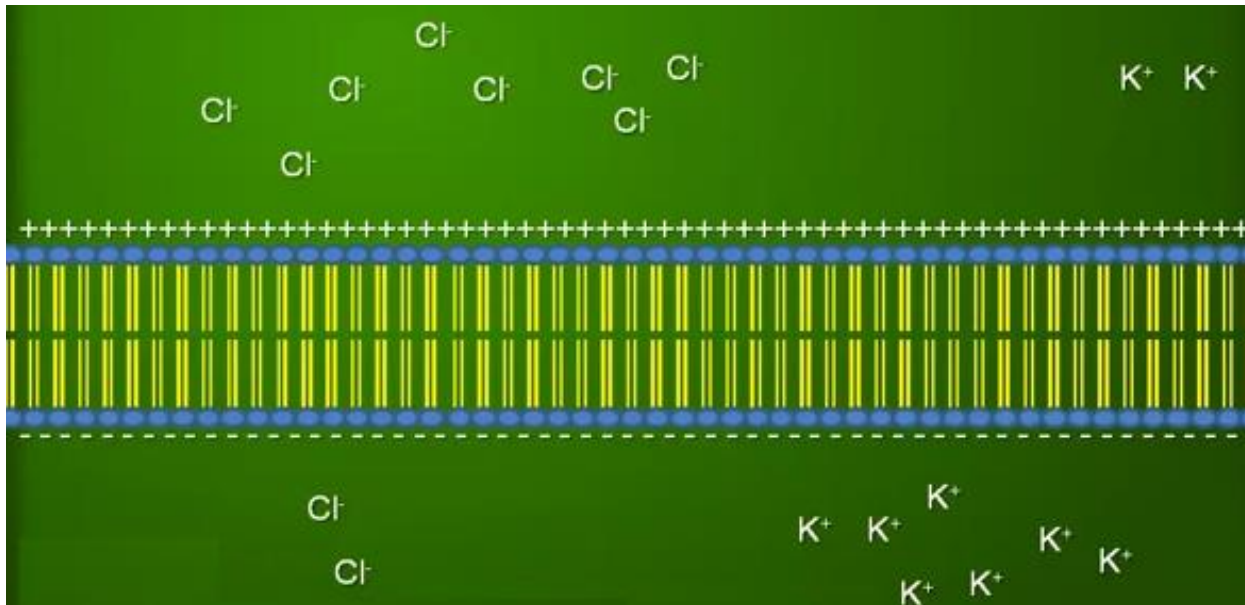


3- Quando o potencial volta a ficar negativo, a bomba de Na^+ e K^+ é inibida e os canais de K^+ se fecham tardiamente



Hiperpolarização

- É o processo no qual a célula polariza ainda mais seu interior a partir do seu potencial de repouso
 - Os canais de potássio se fecham tardiamente
 - Íons cloreto também podem entrar na célula



Forma típica do potencial de ação

1- Despolarização ($V_M > V_0$)

- Canais de sódio se abrem na membrana, gerando fluxo de Na^+ para dentro da célula

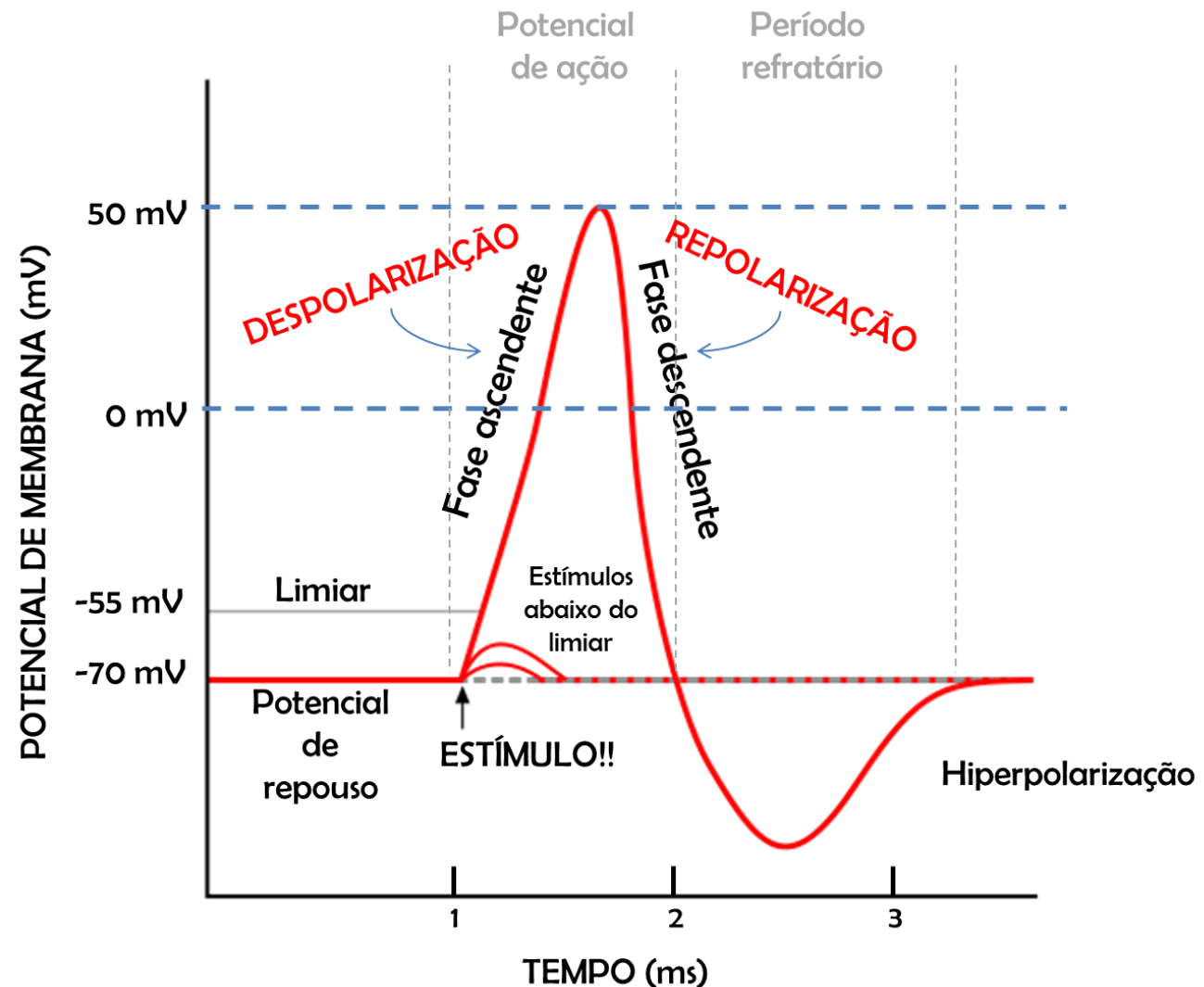
2- Repolarização

- Canais de entrada de sódio se fecham, canais para saída de potássio se abrem e bomba sódio potássio passa a atuar

3- Hiperpolarização

- Canais de saída de potássio se fecham tardiamente

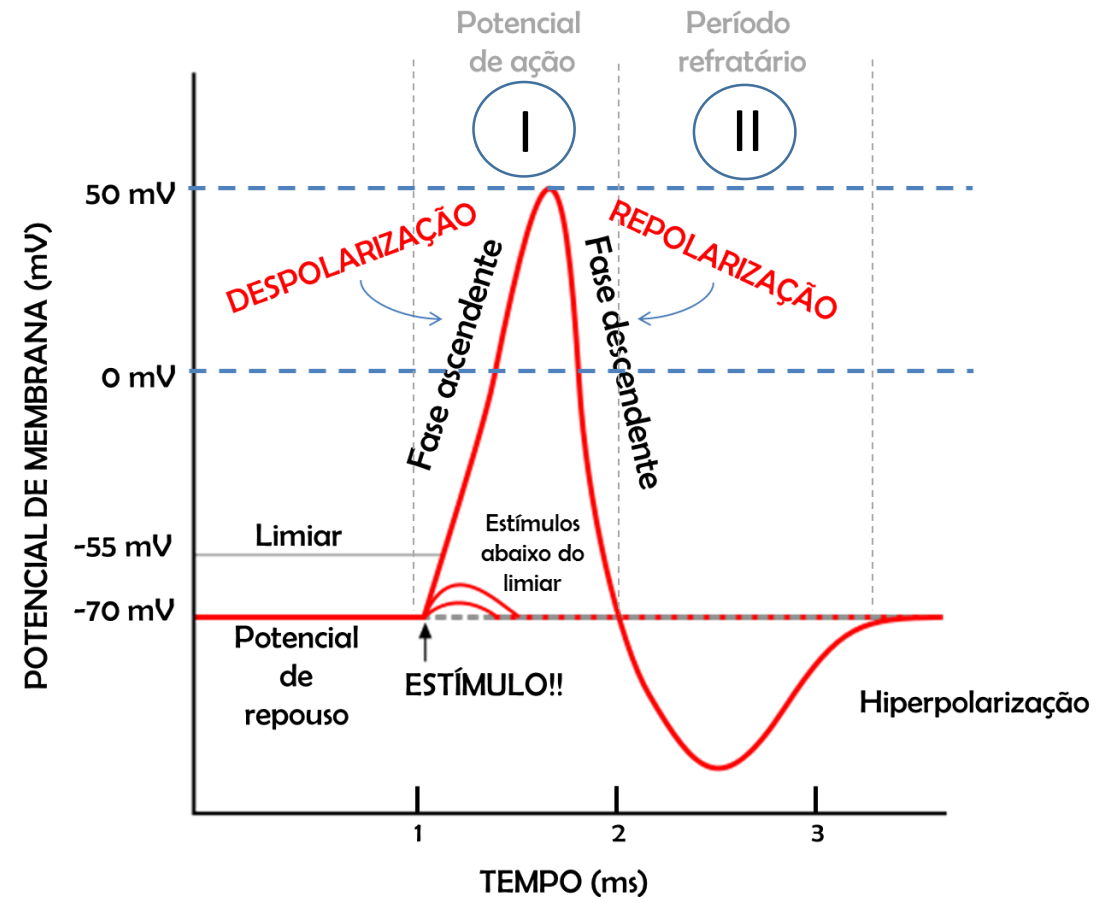
- O funcionamento destes canais explica a necessidade de um período refratário na membrana, durante o qual não é possível a formação de outro potencial



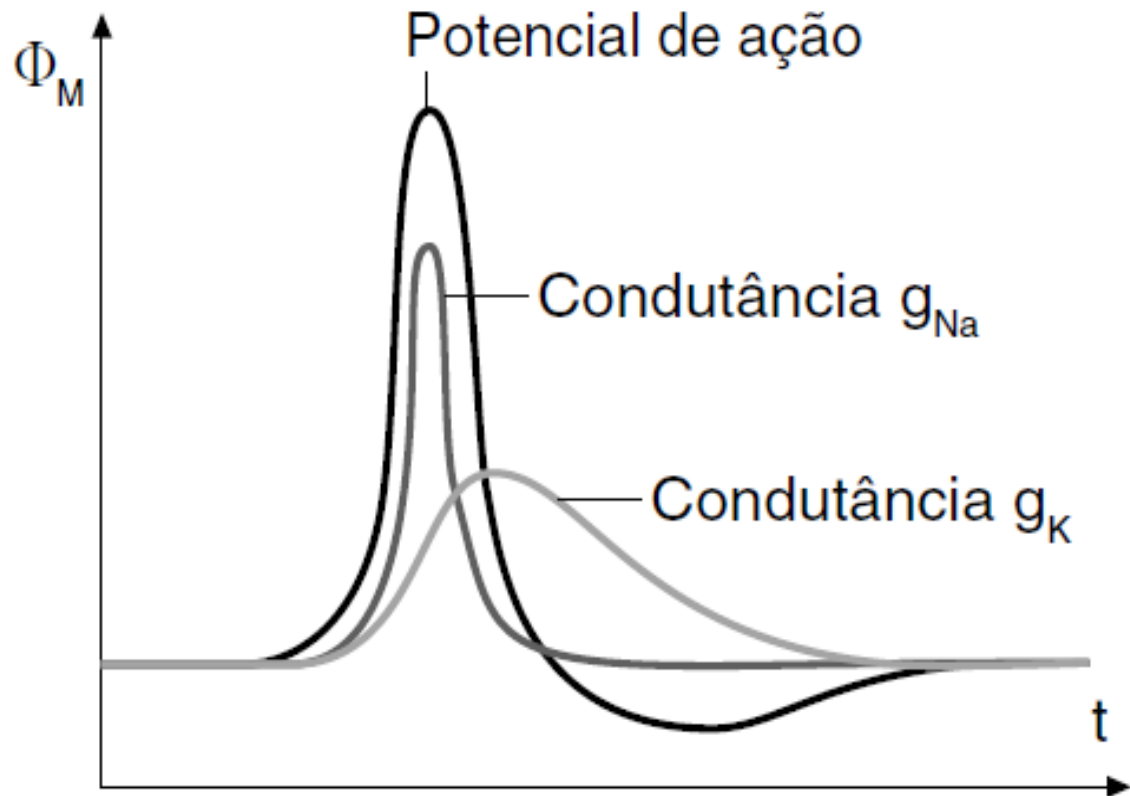
Período refratário

- I. **Período refratário absoluto:** Por um breve período (alguns milissegundos) após a geração de um potencial de ação não é possível gerar outro potencial de ação, independentemente do valor da corrente injetada

- II. **Período refratário relativo:** Por um período um pouco mais longo (algumas dezenas de milissegundos) já é possível gerar potenciais de ação, mas as correntes injetadas precisam ser maiores que a inicial para que isso ocorra



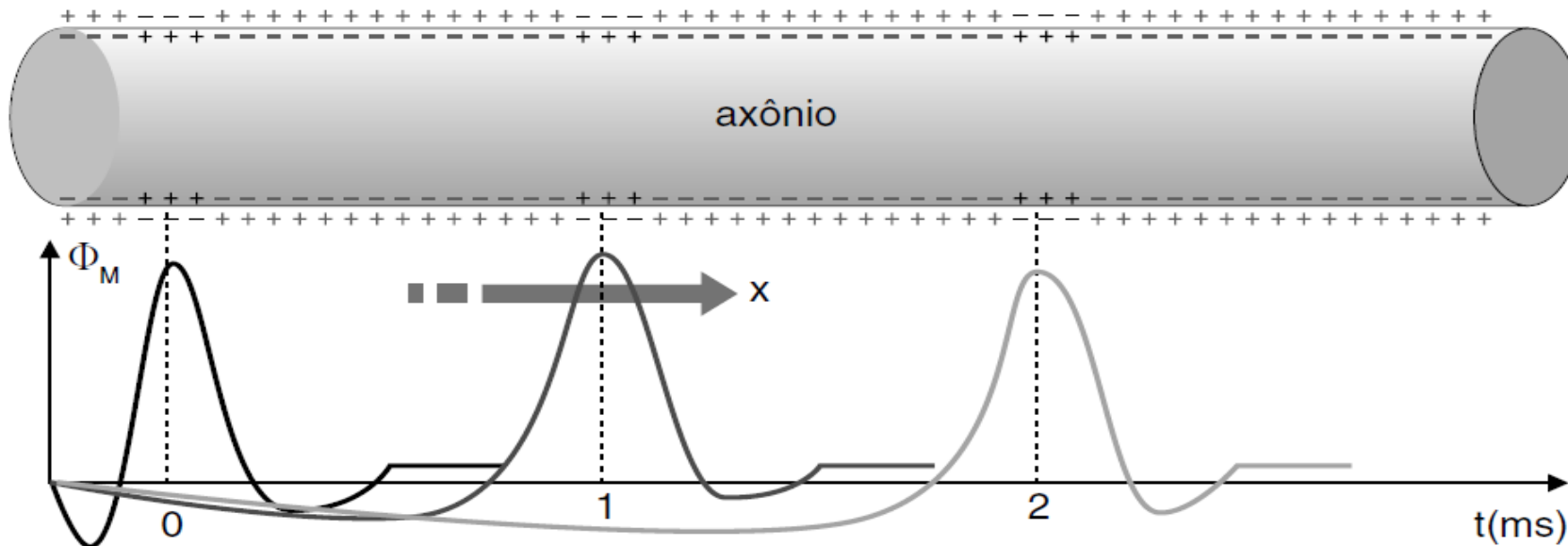
Condutância de uma biomembrana durante o potencial de ação



- A abertura e fechamento dos canais iônicos na membrana alteram drasticamente os valores de condutância iônica enquanto o potencial de ação age
- A condutância do sódio aumenta e diminui muito rapidamente, enquanto a do potássio é mais lenta

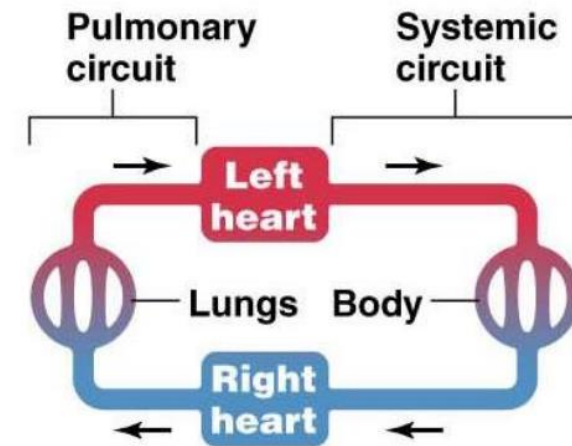
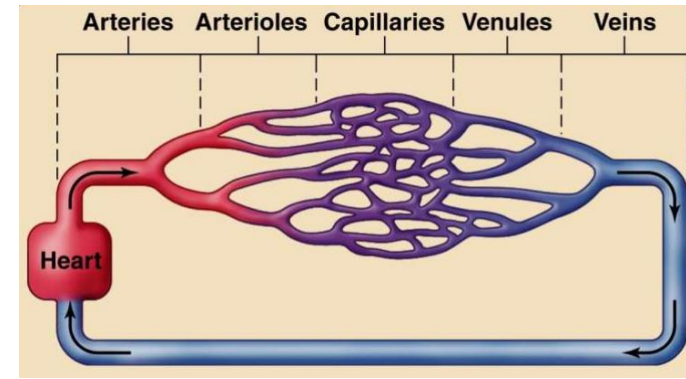
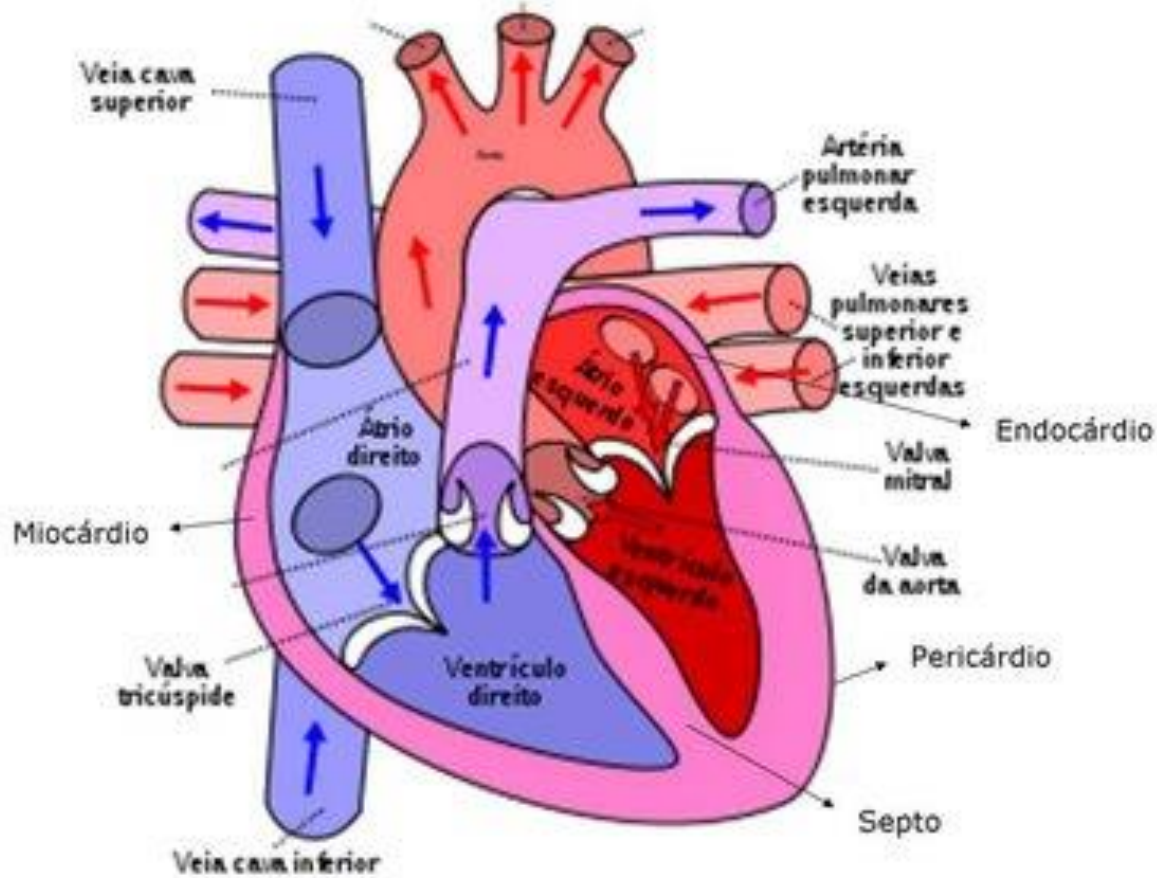
Algumas considerações....

- A indução de um *potencial de ação* no corpo celular de um neurônio equivale a disparar um transiente que se propagará com muita rapidez, como um pulso que não altera sua forma ao longo da fibra nervosa, até chegar ao terminal do axônio.
- Os neurônios, quando excitados, *transmitem potenciais de ação em um só sentido* devido à inativação dos canais de sódio
 - Célula não consegue despolarizar sem a participação dos canais de sódio



Aplicações

Revisão - Sistema cardiovascular



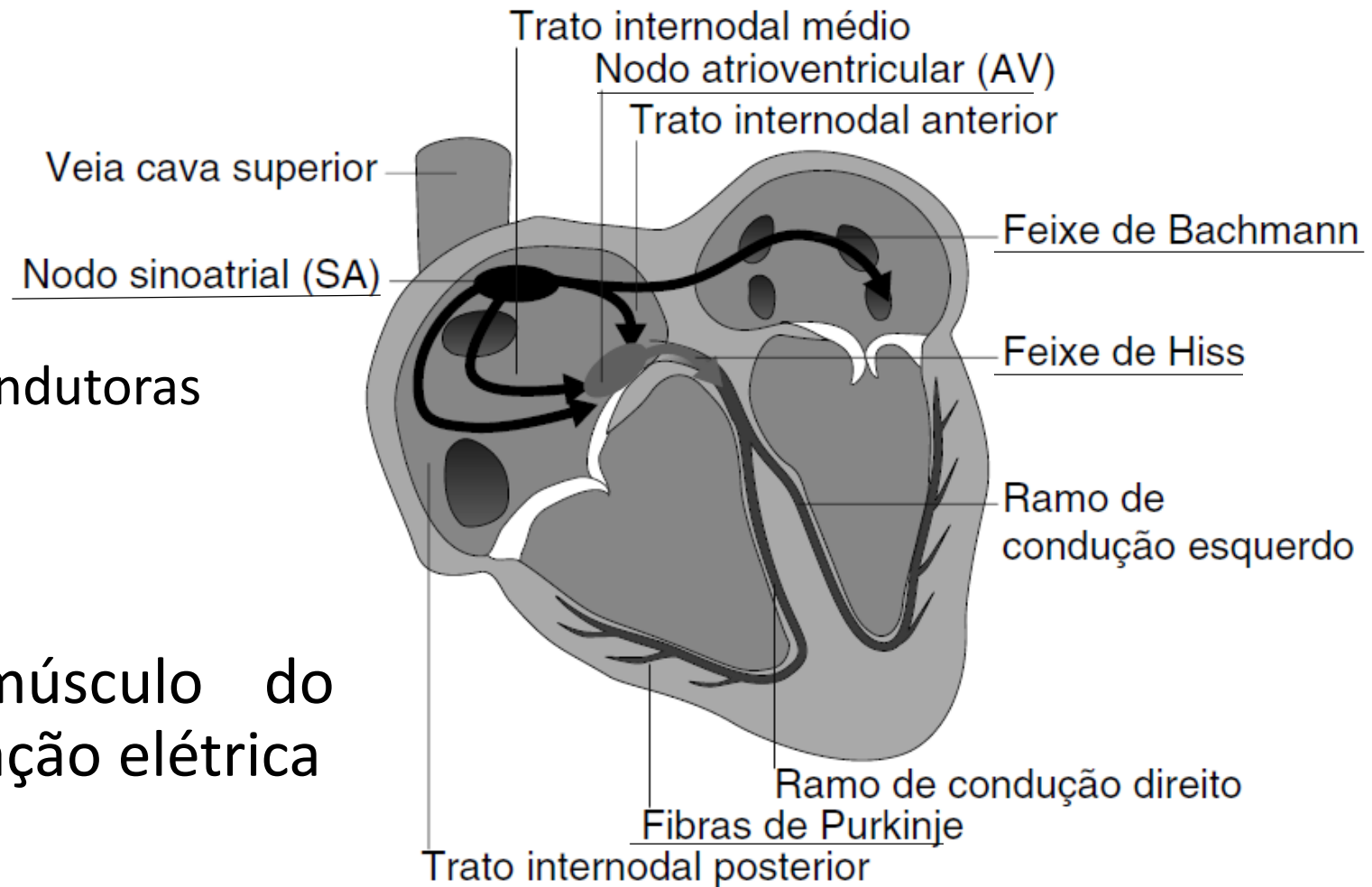
- Coração é composto basicamente por 2 bombas que fazem circular o sangue por dois sistemas circulatório: pulmonar e sistêmico

Transportes elétricos no coração

- Coração: 3 tipos de músculos:

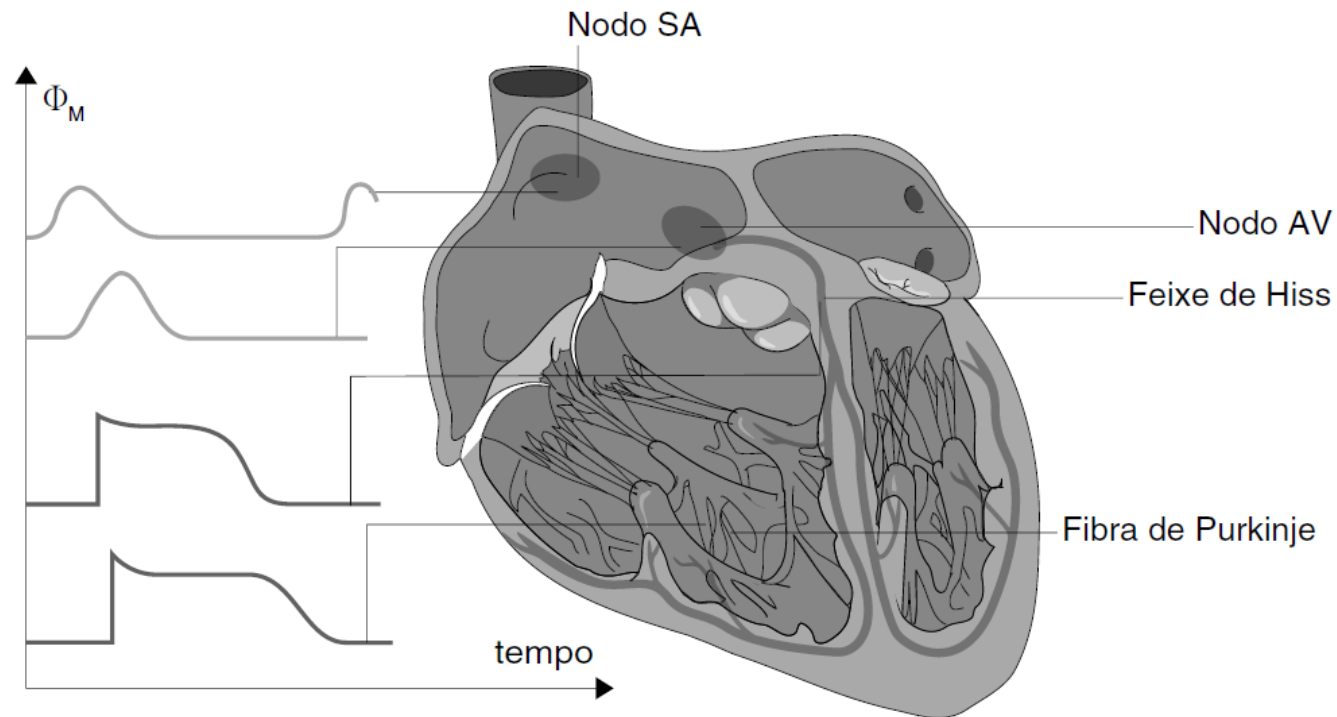
- atrial
- ventricular
- fibras musculares excitatórias e condutoras

- Contração do miocárdio (músculo do coração) = pulso de despolarização elétrica



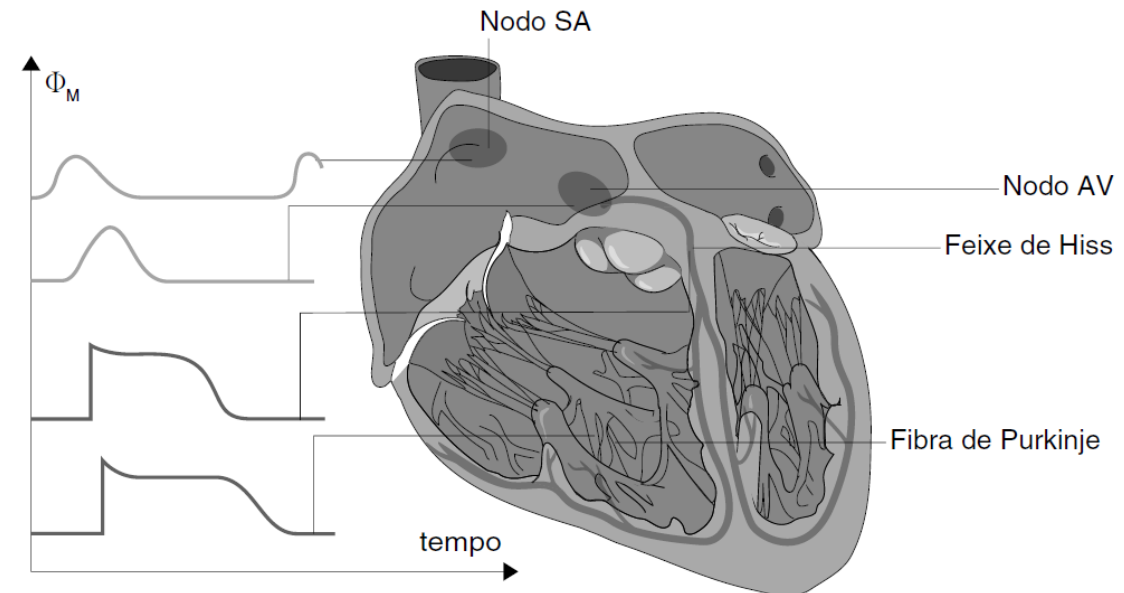
Potencial de ação no coração

- O músculo cardíaco não é estimulado diretamente pelo sistema nervoso central, ele possui um pequeno número de células capaz de gerar seu próprio potencial de ação (Nodos SA e AV)
 - Essas células são auto rítmicas e localizam-se em pontos bem definidos do coração
 - O potencial de ação é transmitido em cadeia por todo coração – provocando a contração muscular
 - Em cada uma dessas zonas a frequência com que se gera o potencial de ação é diferente



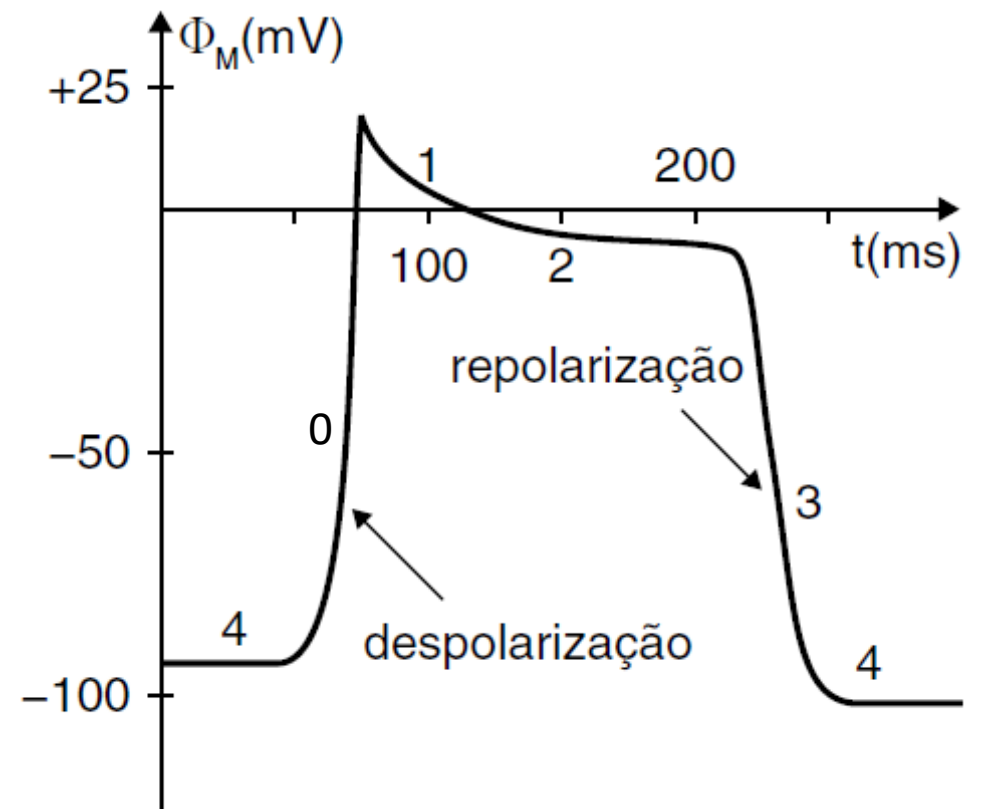
Origem do batimento cardíaco

- Ao originar um batimento cardíaco, a excitação é iniciada no nodo SA localizado na aurícula direita.
 - Frequência de 1,17 a 1,33Hz
 - Velocidade de propagação de 0,2 a 1m/s
 - Em aproximadamente 80 a 100 ms, a excitação atrial é completada.
- Os músculos da aurícula estão separados do ventrículo por fibras de tecidos conectivos que não transmitem o impulso. A única conexão entre a aurícula e o ventrículo é o tecido nervoso denominado *nodo AV*.
 - Velocidade de condução baixa: 0,05m/s → excitação dura aprox. 40ms
 - Nestes 40ms a excitação se propaga rapidamente pelo feixe de Hiss e pelas fibras de Purkinje



Potencial de ação célula não autoexcitáveis

- Apresenta duas diferenças importantes com relação ao potencial de ação nas células neuronais:
 - *o tempo de duração* do potencial de ação;
 - os canais participantes na *despolarização e repolarização* da membrana cardíaca são canais de Na, K e Ca.



Potencial de ação célula não autoexcitáveis

- Fases do potencial de ação:

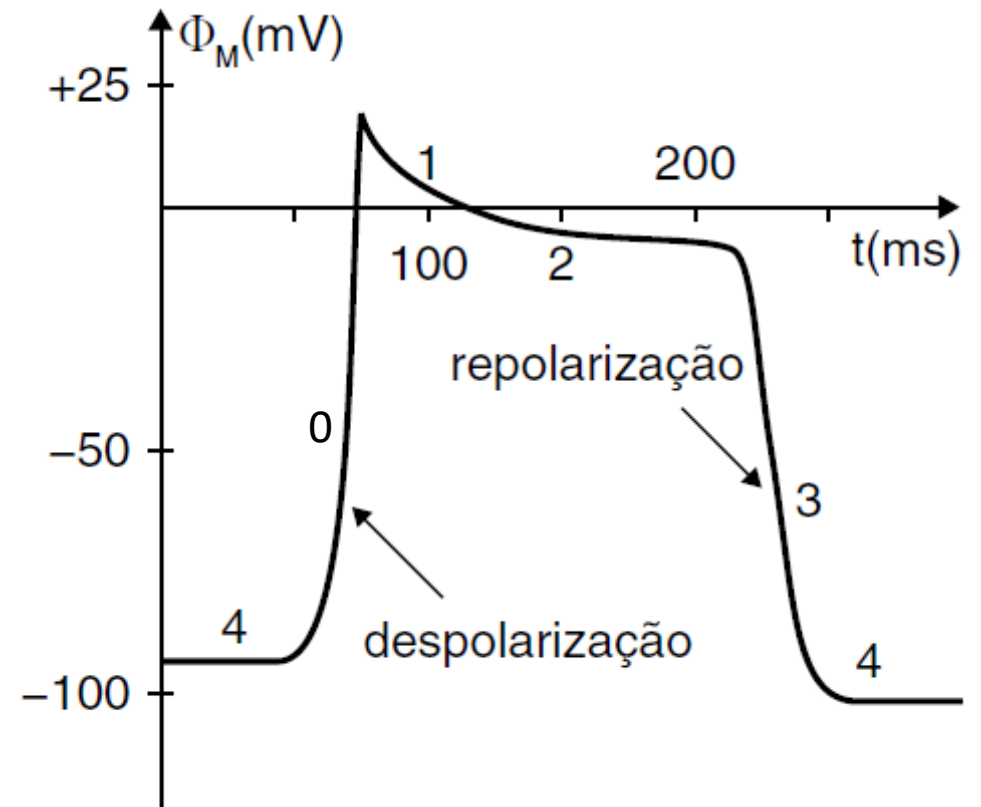
Fase 0 - Despolarização extremamente rápida

Fase 1 - Repolarização precoce

Fase 2 - Platô que sustenta a despolarização

Fase 3 - Repolarização

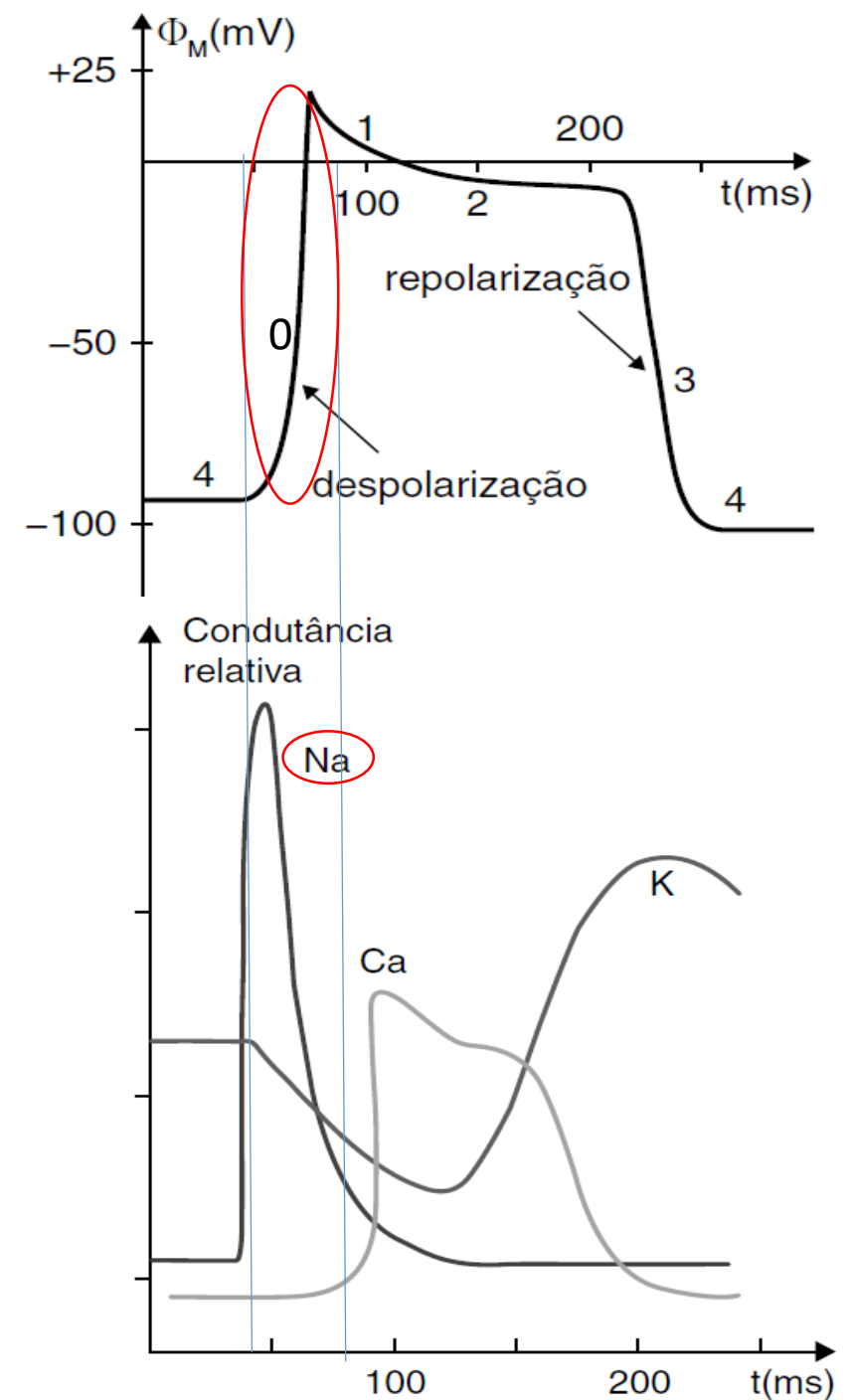
Fase 4 – Repouso (-90 a -60mV)



Potencial de ação célula não autoexcitáveis

Fase 0 - Despolarização extremamente rápida

- Ocorre pela abertura de canais de sódio que permitem sua entrada na célula



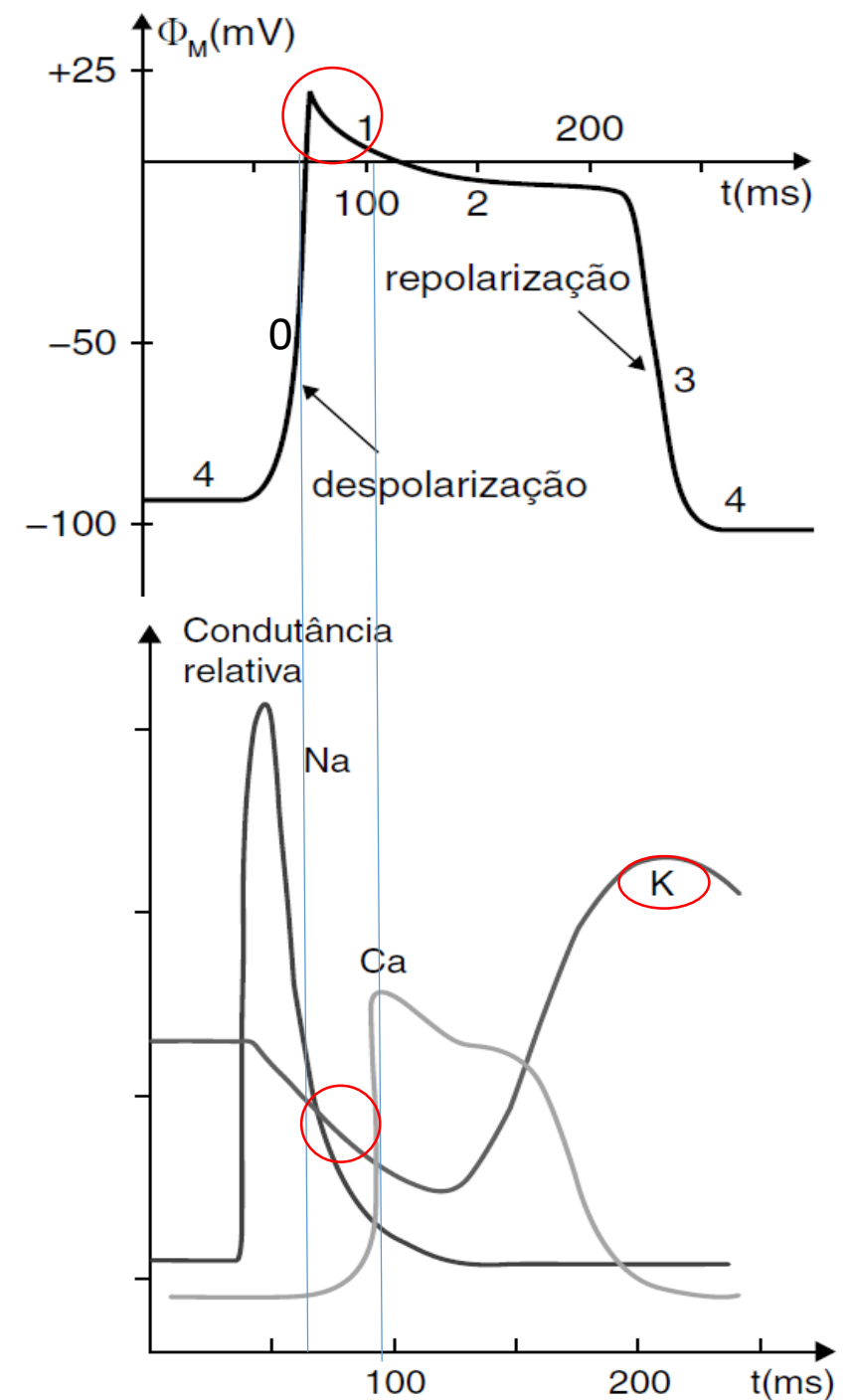
Potencial de ação célula não autoexcitáveis

Fase 0 - Despolarização extremamente rápida

- Ocorre pela abertura de canais de sódio que permitem sua entrada na célula

Fase 1 - Repolarização precoce

- Ocorre abertura de canais de potássio que permitem sua saída da célula (dura um tempo muito curto)



Potencial de ação célula não autoexcitáveis

Fase 0 - Despolarização extremamente rápida

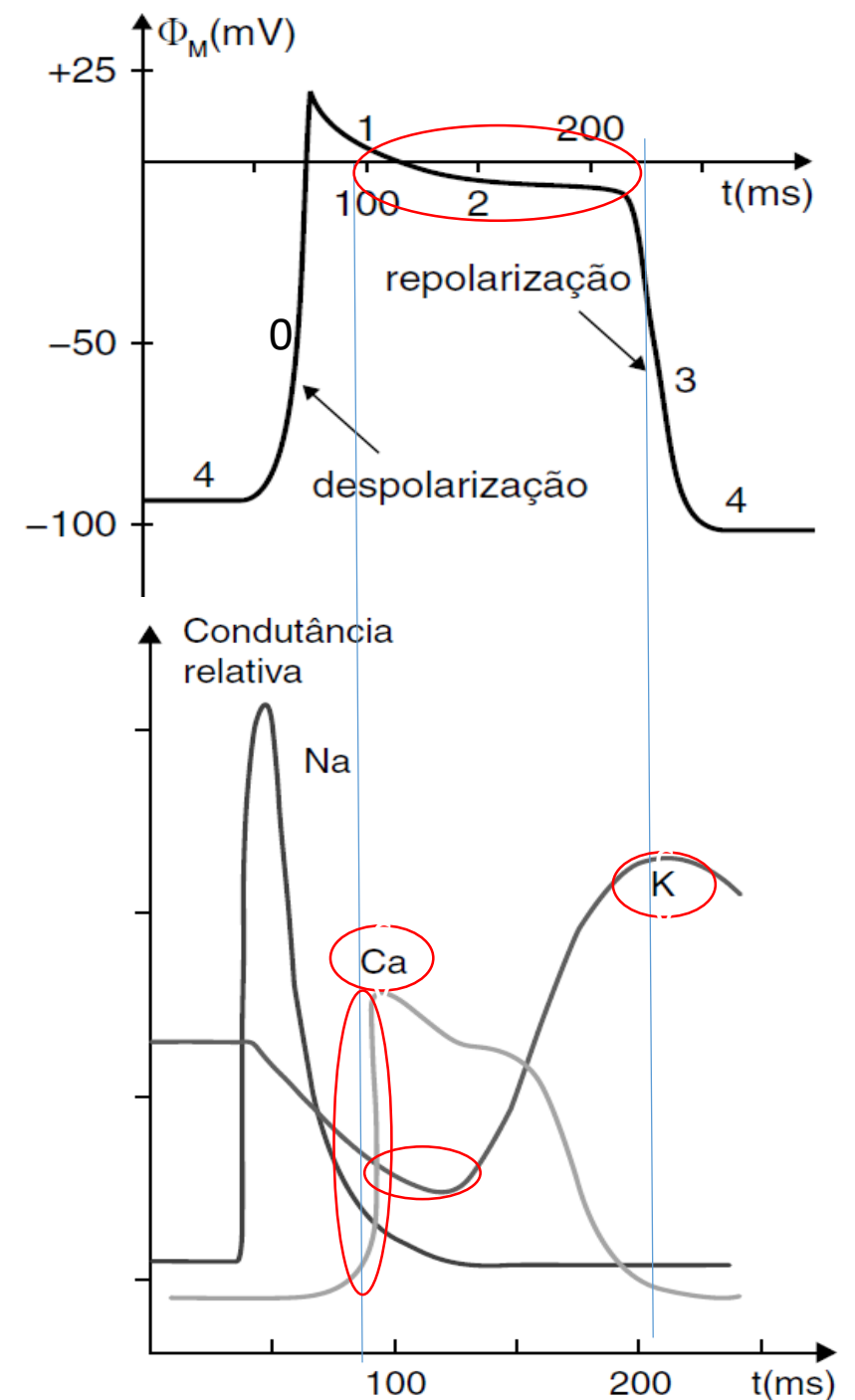
- Ocorre pela abertura de canais de sódio que permitem sua entrada na célula

Fase 1 - Repolarização precoce

- Ocorre abertura de canais de potássio que permitem sua saída da célula (dura um tempo muito curto)

Fase 2 - Platô que sustenta a despolarização

- Canais de potássio de entrada e saída da célula se equilibram e abrem-se canais de cálcio pra sua entrada na célula, que mantém o potencial despolarizado (Ca^{++} é importante para contração muscular)



Potencial de ação célula não autoexcitáveis

Fase 0 - Despolarização extremamente rápida

- Ocorre pela abertura de canais de sódio que permitem sua entrada na célula

Fase 1 - Repolarização precoce

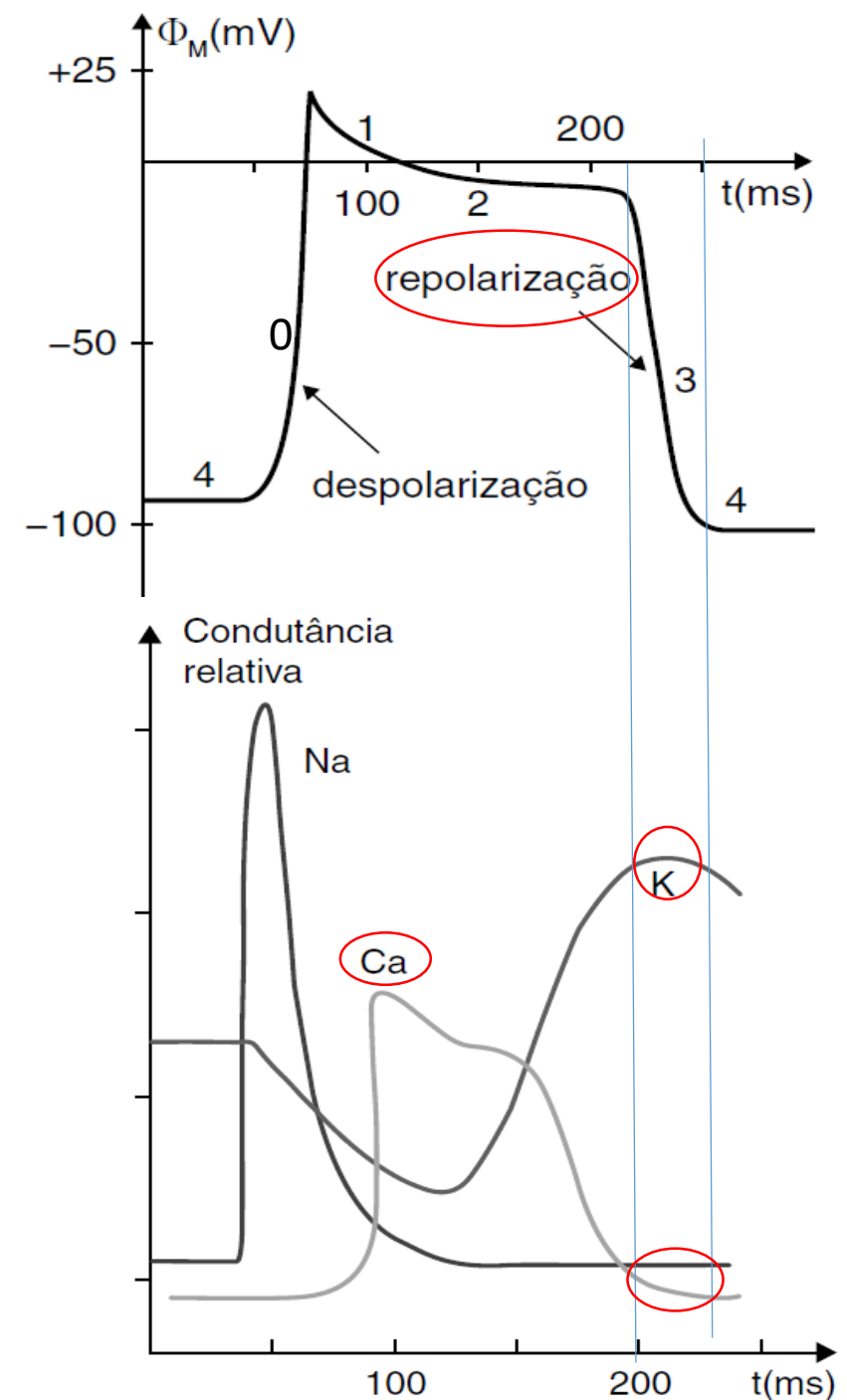
- Ocorre abertura de canais de potássio que permitem sua saída da célula (dura um tempo muito curto)

Fase 2 - Platô que sustenta a despolarização

- Canais de potássio de entrada e saída da célula se equilibram e abrem-se canais de cálcio pra sua entrada na célula, que mantém o potencial despolarizado (Ca^{++} é importante para contração muscular)

Fase 3 – Repolarização

- Canais de cálcio se fecham e canais de potássio que permitem a entrada de potássio na célula se abrem. Simultaneamente canais de sódio e cálcio atuam para repolarização



Potencial de ação célula não autoexcitáveis

Fase 0 - Despolarização extremamente rápida

- Ocorre pela abertura de canais de sódio que permitem sua entrada na célula

Fase 1 - Repolarização precoce

- Ocorre abertura de canais de potássio que permitem sua saída da célula (dura um tempo muito curto)

Fase 2 - Platô que sustenta a despolarização

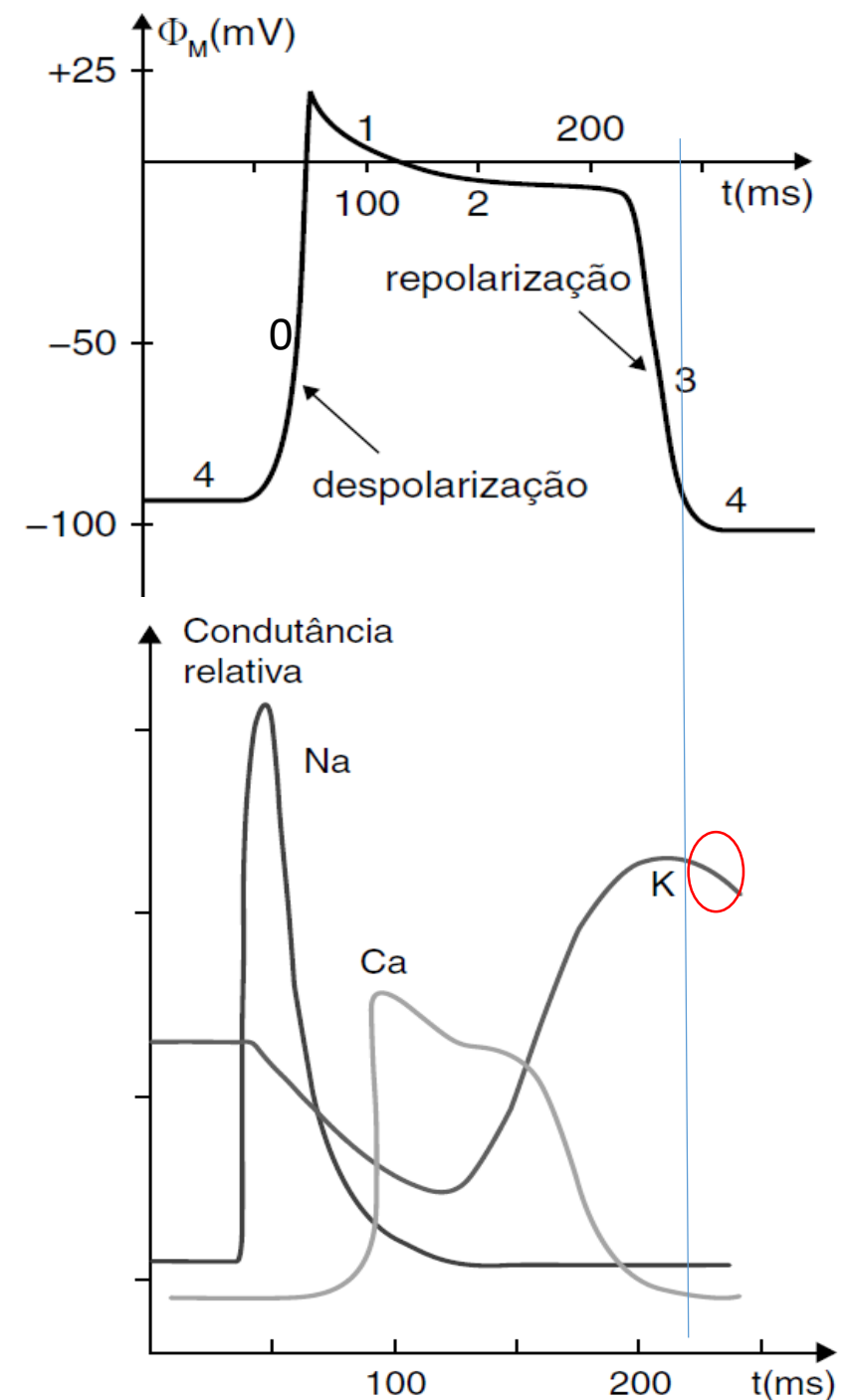
- Canais de potássio de entrada e saída da célula se equilibram e abrem-se canais de cálcio pra sua entrada na célula, que mantém o potencial despolarizado (Ca^{++} é importante para contração muscular)

Fase 3 – Repolarização

- Canais de cálcio se fecham e canais de potássio que permitem a entrada de potássio na célula se abrem. Simultaneamente canais de sódio e cálcio atuam para repolarização

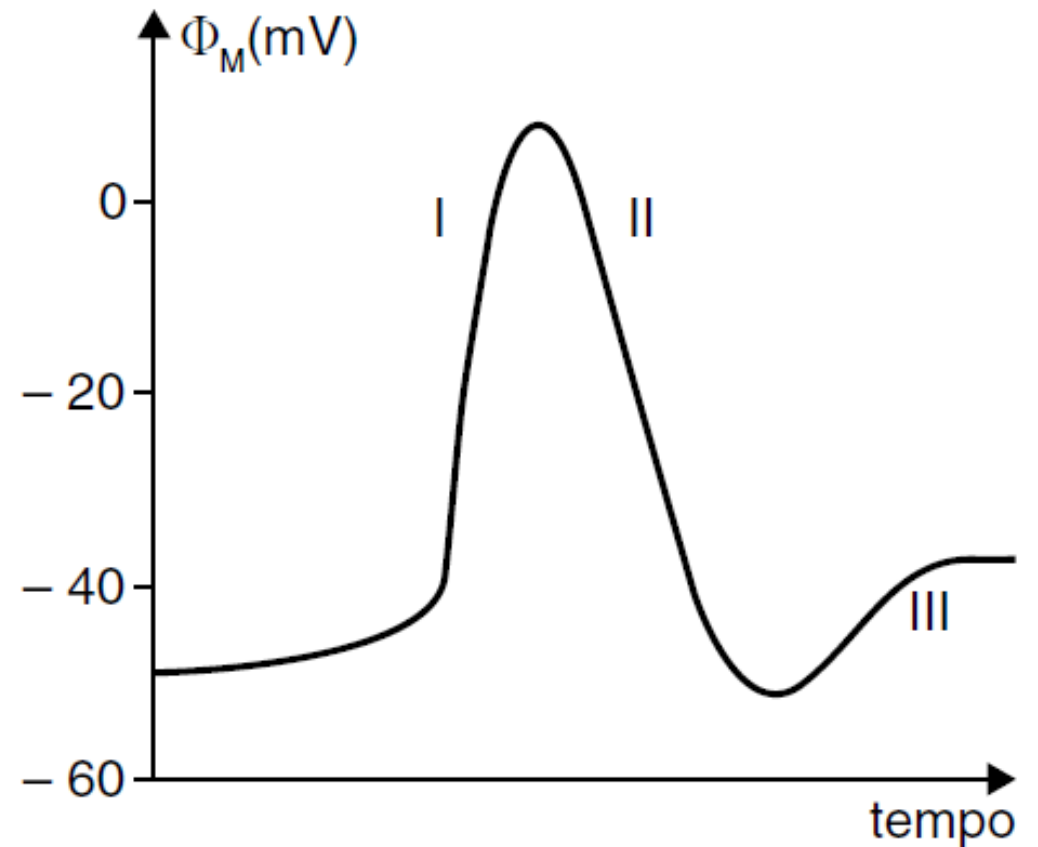
Fase 4 - Repouso

- Equilíbrio eletroquímico ocorre e é determinado predominantemente pelo potencial de repouso do potássio



Potencial de ação célula autoexcitáveis

- Fases do potencial de ação:
Fase I - Despolarização rápida
Fase II - Repolarização
Fase III – Período de repouso



Potencial de ação célula autoexcitáveis

Para atingir o potencial limiar (ex:-40mV), canais de curta duração para entrada de cálcio se abrem, deixando o potencial da célula menos negativo

Fase I - Despolarização rápida

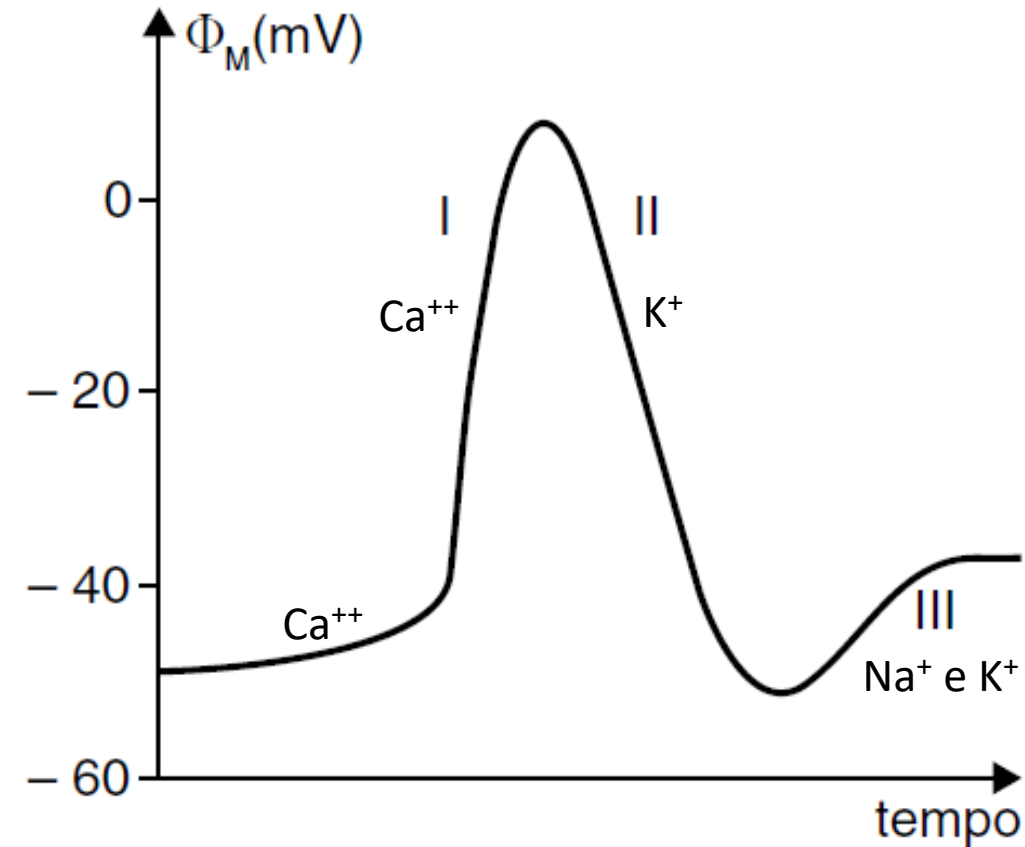
- Canais de longa duração para entrada de cálcio se abrem e despolarizam completamente a membrana

Fase II - Repolarização

- Canais para saída de potássio

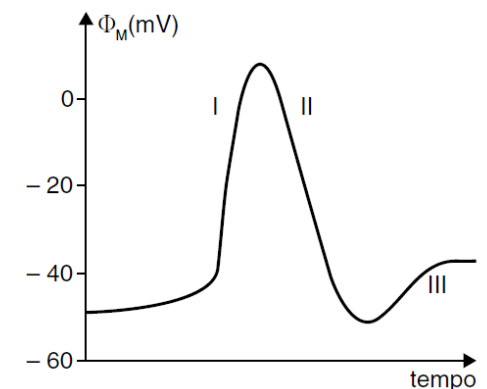
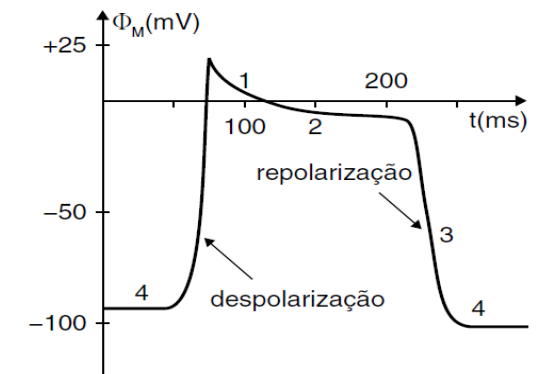
Fase III – Período de repouso

- Ocorre um despolarização lenta (entrada permanente de sódio e redução de permeabilidade ao potássio)

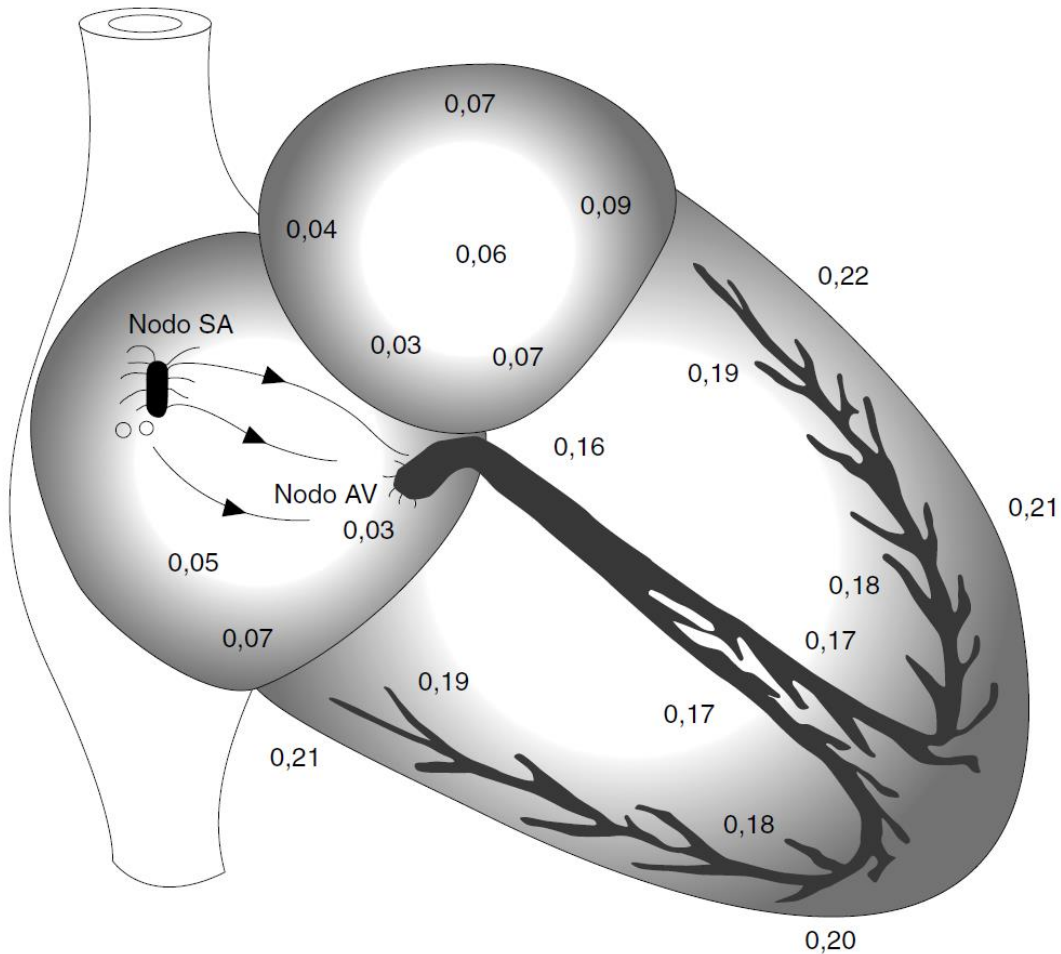


Transmissão do impulso cardíaco no coração

- A contração rítmica dos músculos das paredes do coração deve-se à *propagação de potenciais de ação através das fibras cardíacas*. O potencial de ação que se propaga no coração pode ser de ação rápida ou lenta:
- **Potencial de ação rápida (células não autoexcitáveis):**
 - velocidade de ascensão (150 mV/s) a partir do potencial de repouso da célula (entre -80 e -90 mV)
 - apresenta-se nas células musculares atriais e ventriculares normais e nas fibras de Purkinje.
- **Potencial de ação lenta (células autoexcitáveis):**
 - velocidade de ascensão de no máximo 10 mV/s, a partir do potencial de repouso da célula (entre -40 e -70 mV)
 - apresenta-se nas células dos nodos sinoatrial (SA) e atrioventricular (AV) normais.
 - Por demorar um pouco mais para ocorrer, permite a contração inicial dos átrios e depois dos ventrículos, ou seja, controla o ritmo cardíaco global (marca-passo cardíaco)

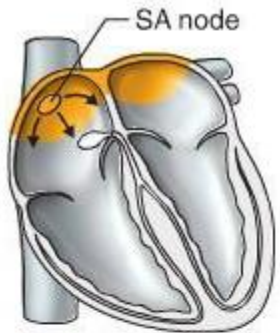


Transmissão do impulso cardíaco através do coração

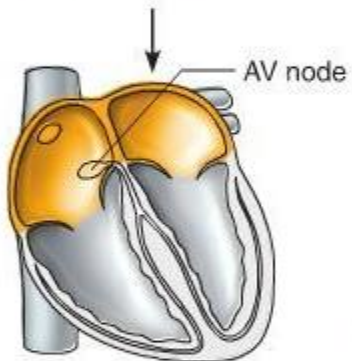


- Qualitativamente, o impulso cardíaco pode ser considerado uma *excitação* que se origina no nodo SA, e tal excitação pode ser representada como uma **frente de onda** que inicia sua propagação pela região auricular do coração com velocidade variando entre 0,2 a 1 m/s. Em aproximadamente 0,08 a 0,1s, a excitação das aurículas é completada.
- Estas frentes de onda entram no nodo AV e se propagam com 0,05m/s e requerem 0,04s para completar a excitação do nodo e se propagar pela região ventricular

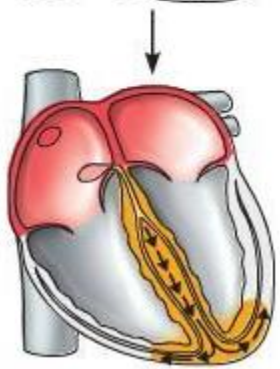
Propagação do sinal elétrico



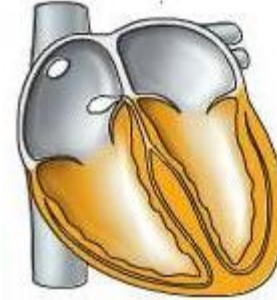
Despolarização atrial



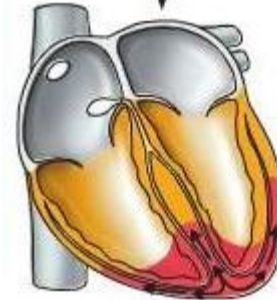
Repolarização atrial
e despolarização
ventricular



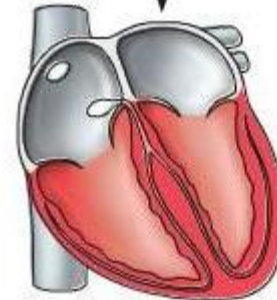
Despolarização = sístole



Despolarização
ventricular



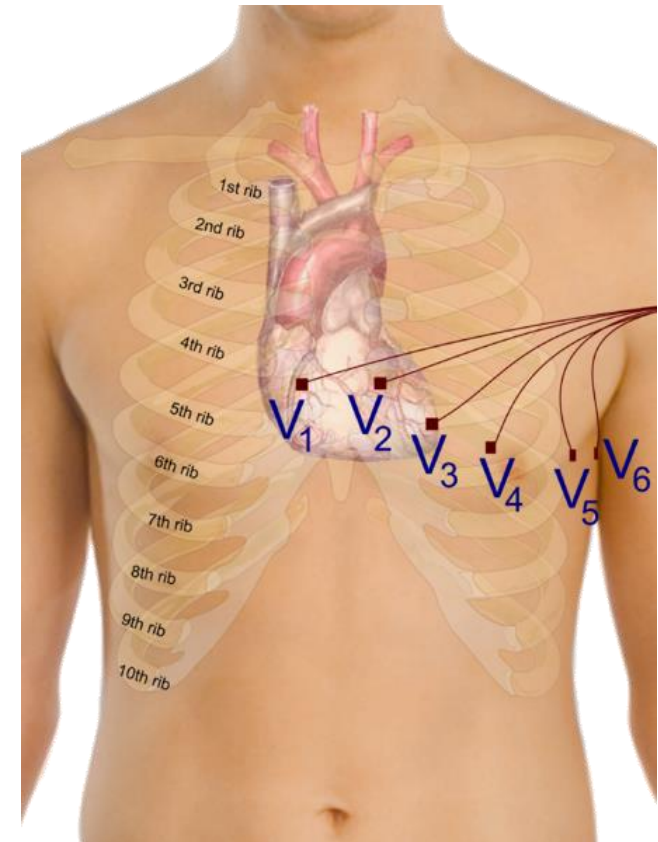
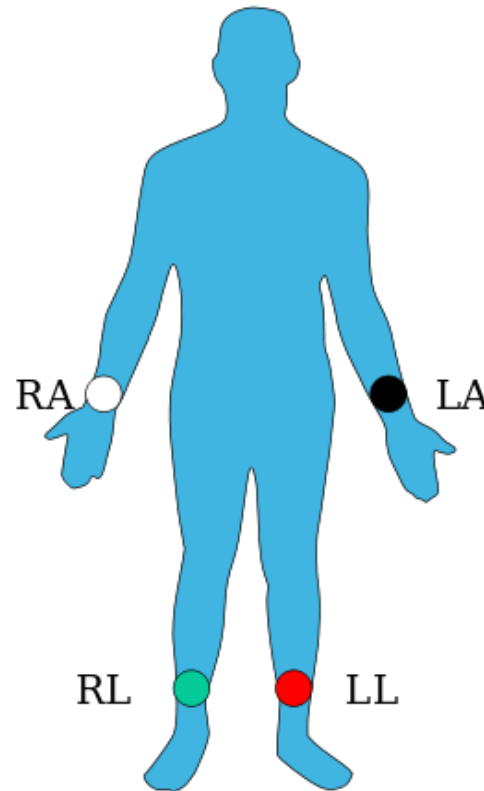
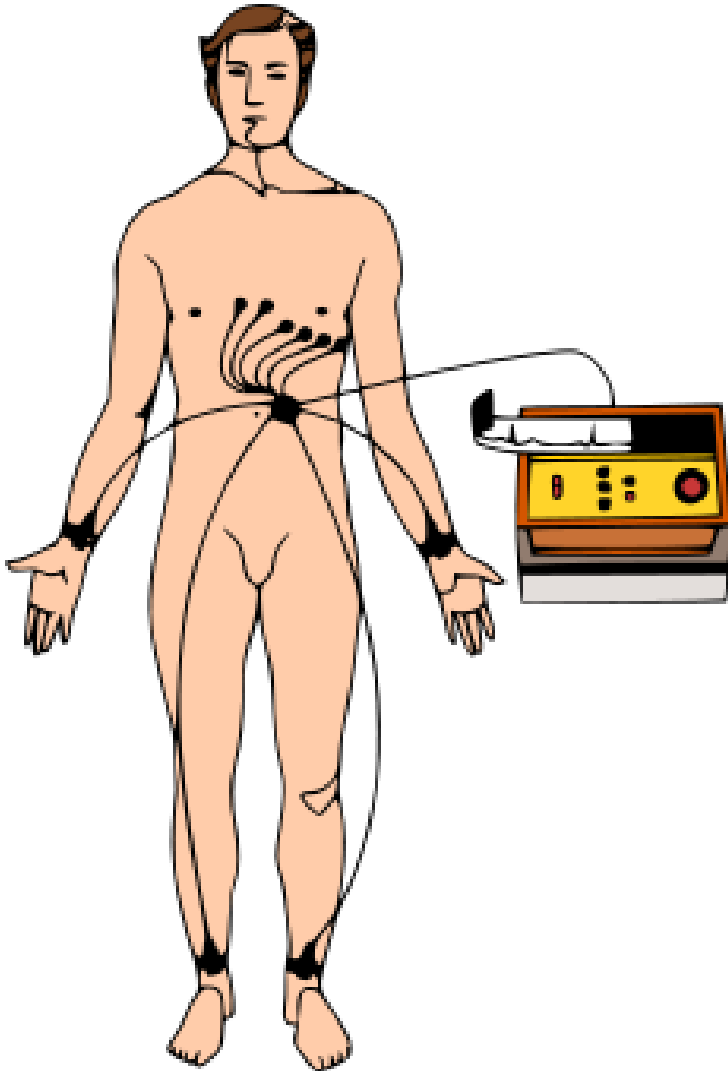
Repolarização
ventricular



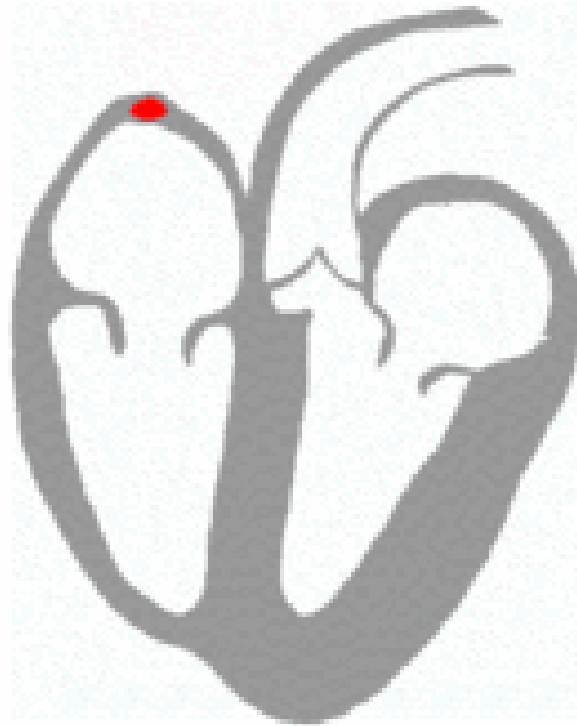
Repolarização = diástole

Medida da diferença de potencial na superfície do corpo

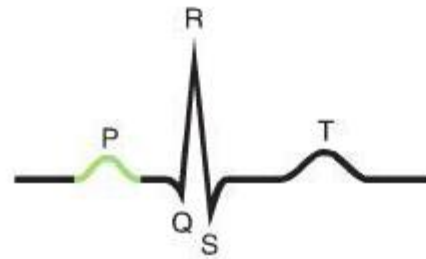
- É feita pela colocação de eletrodos em locais adequados no corpo.



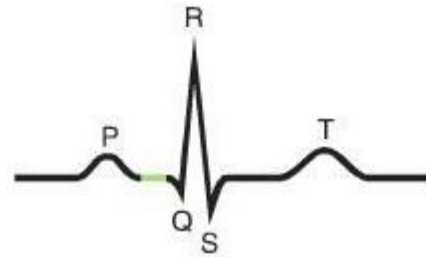
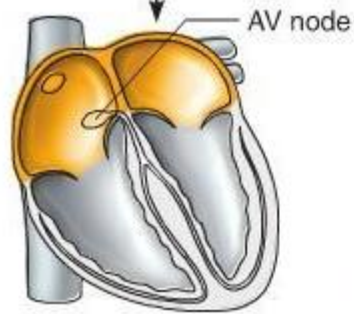
Formato do potencial elétrico do coração



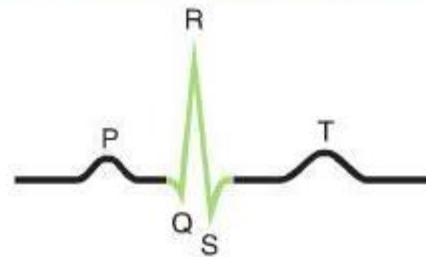
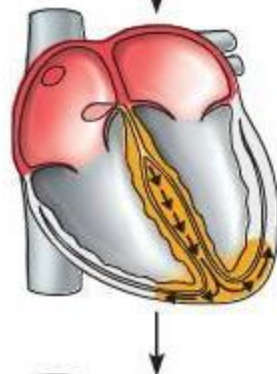
Resultado típico do eletrocardiograma



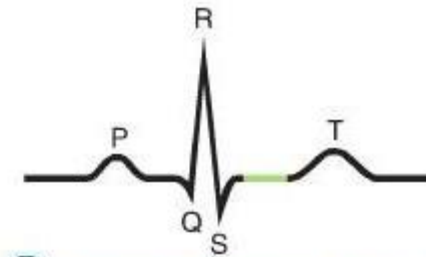
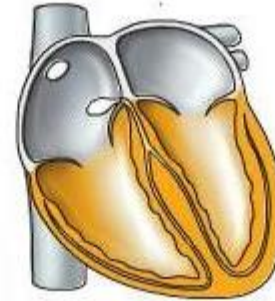
① Atrial depolarization, initiated by the SA node, causes the P wave.



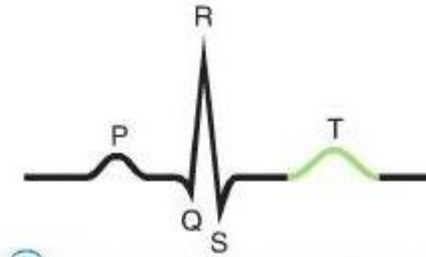
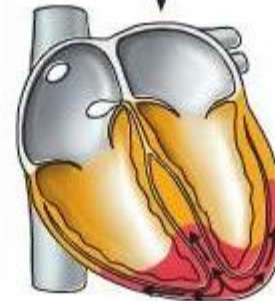
② With atrial depolarization complete, the impulse is delayed at the AV node.



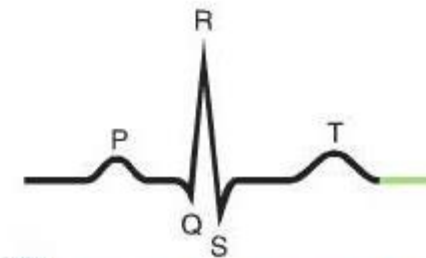
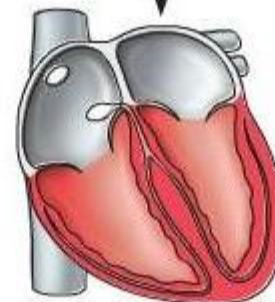
③ Ventricular depolarization begins at apex, causing the QRS complex. Atrial repolarization occurs.



④ Ventricular depolarization is complete.



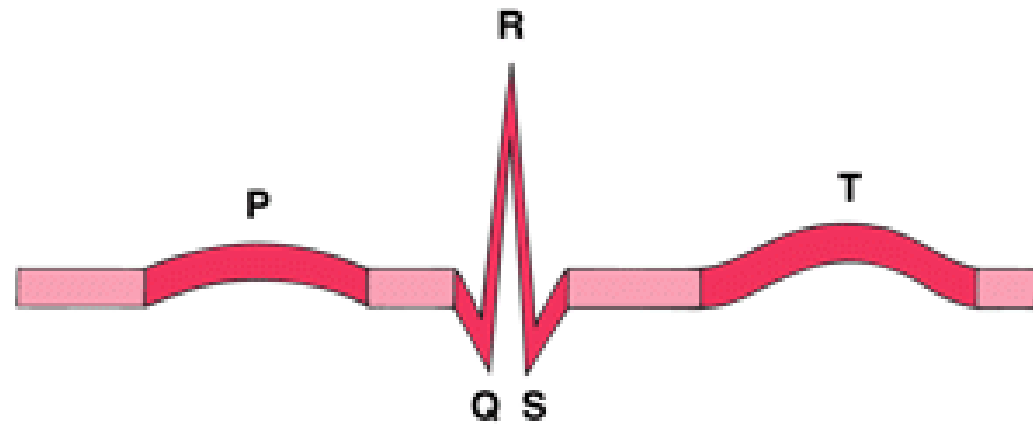
⑤ Ventricular repolarization begins at apex, causing the T wave.



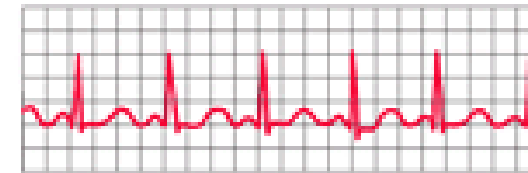
⑥ Ventricular repolarization is complete.

Yellow square: Depolarization
Red square: Repolarization

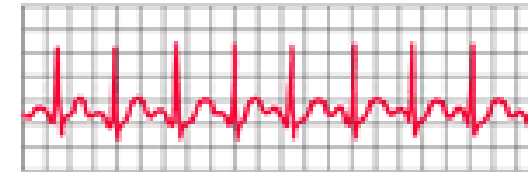
Avaliação de alguma anormalidades



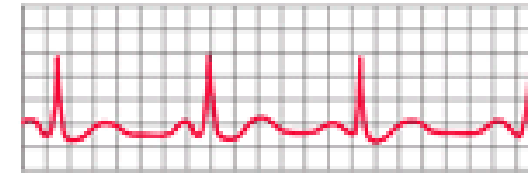
Normal Heartbeat



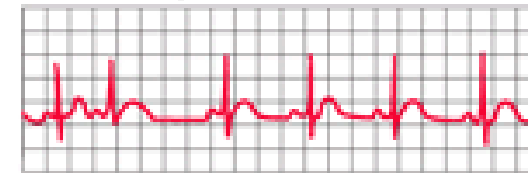
Fast Heartbeat



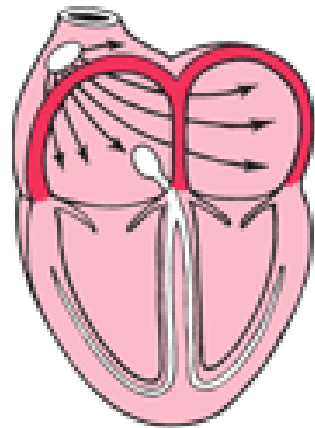
Slow Heartbeat



Irregular Heartbeat

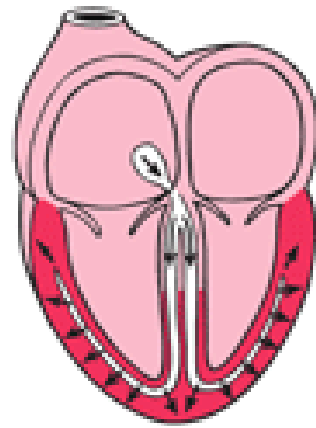


P Wave



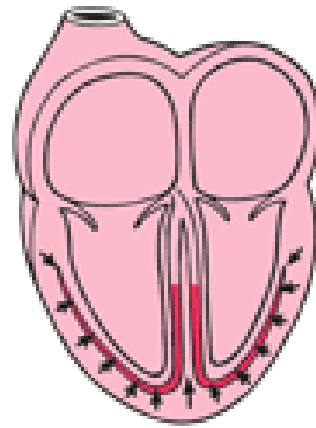
Activation of the atria

QRS Complex



Activation of the ventricles

T Wave



Recovery wave

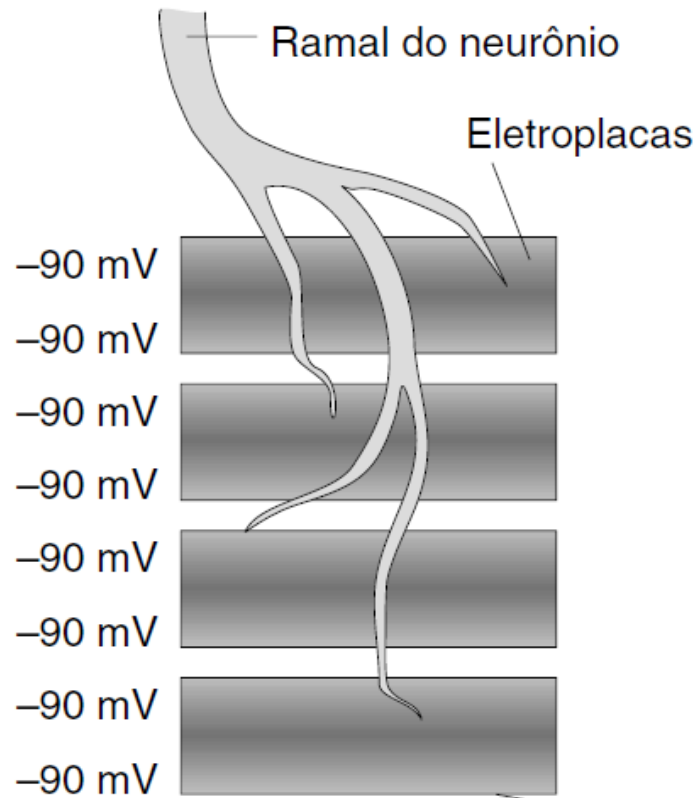
Bioeletricidade animal: Peixes elétricos

- Nos peixes-elétricos, os *órgãos elétricos* são derivados de tecidos musculares especializados em produzir *descargas elétricas* de diversas maneiras.
 - Peixes com grande eletricidade usam essas descargas para deter predadores e paralisar presas
- Correntes elétricas são geradas por órgãos que têm estrutura similar aos tecidos muscular ou nervoso, sendo os mais comuns derivados de tecido muscular:
 - Células que produzem o potencial de ação são *células musculares* multinucleares que carecem de elemento contrátil, são placas curtas e lisas denominadas *eletroplacas*.
 - Essas placas são numerosas (centenas ou milhares) e estão arranjadas de maneira compacta em colunas.

Células eletroplacas em repouso e excitadas

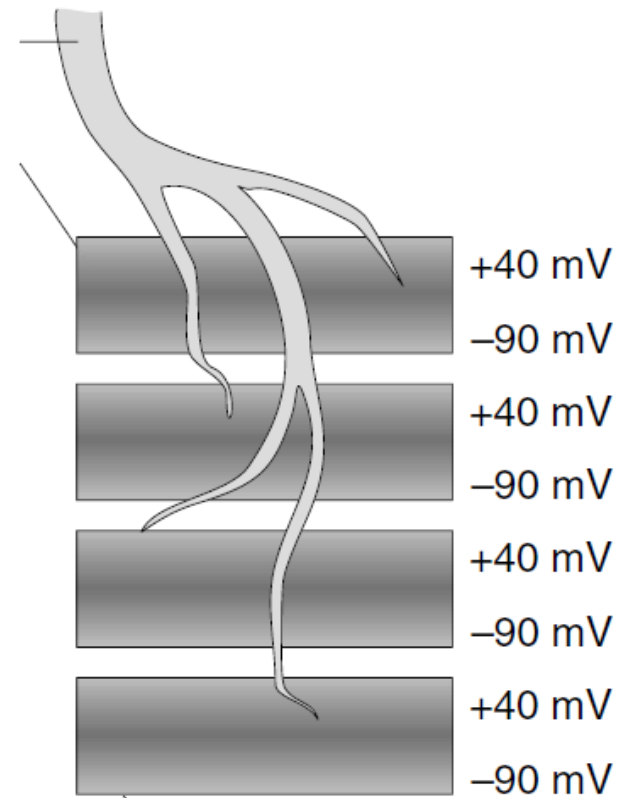
Estado de repouso

$\Phi_M = 0 \text{ mV/célula}$



Estado excitado

$\Phi_M = 130 \text{ mV/célula}$



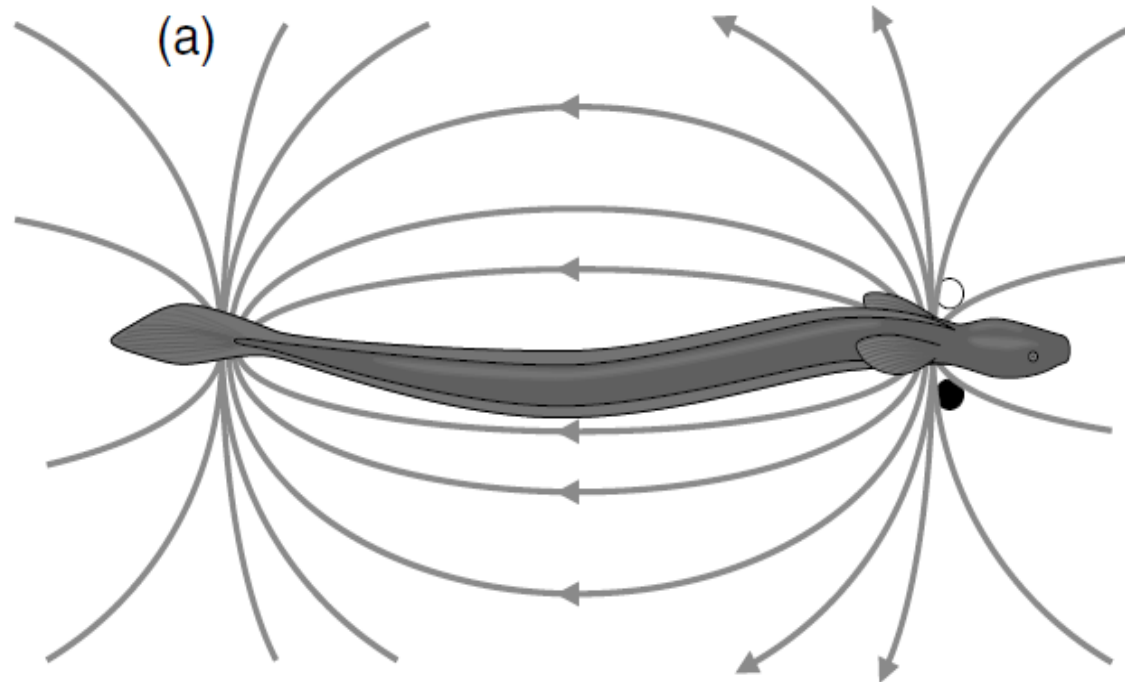
Lado interior
das eletroplacas

Peixes elétricos

- Dois grupos de espécies de peixes têm desenvolvido sistema de comunicação usando sinais elétricos: os peixes *gymnotid* da América do Sul e os *mormyriiform* da África.
- Outros peixes, como a arraia (*torpedinidae*), o peixe-gato (*malaptururidae*) etc., também podem utilizar estímulos elétricos para comunicação.
- A enguia elétrica possui dois órgãos fortes e um fraco; esses peixes produzem potenciais instantâneos da ordem de 300 volts.

Linhas de campo elétrico dos peixes elétricos

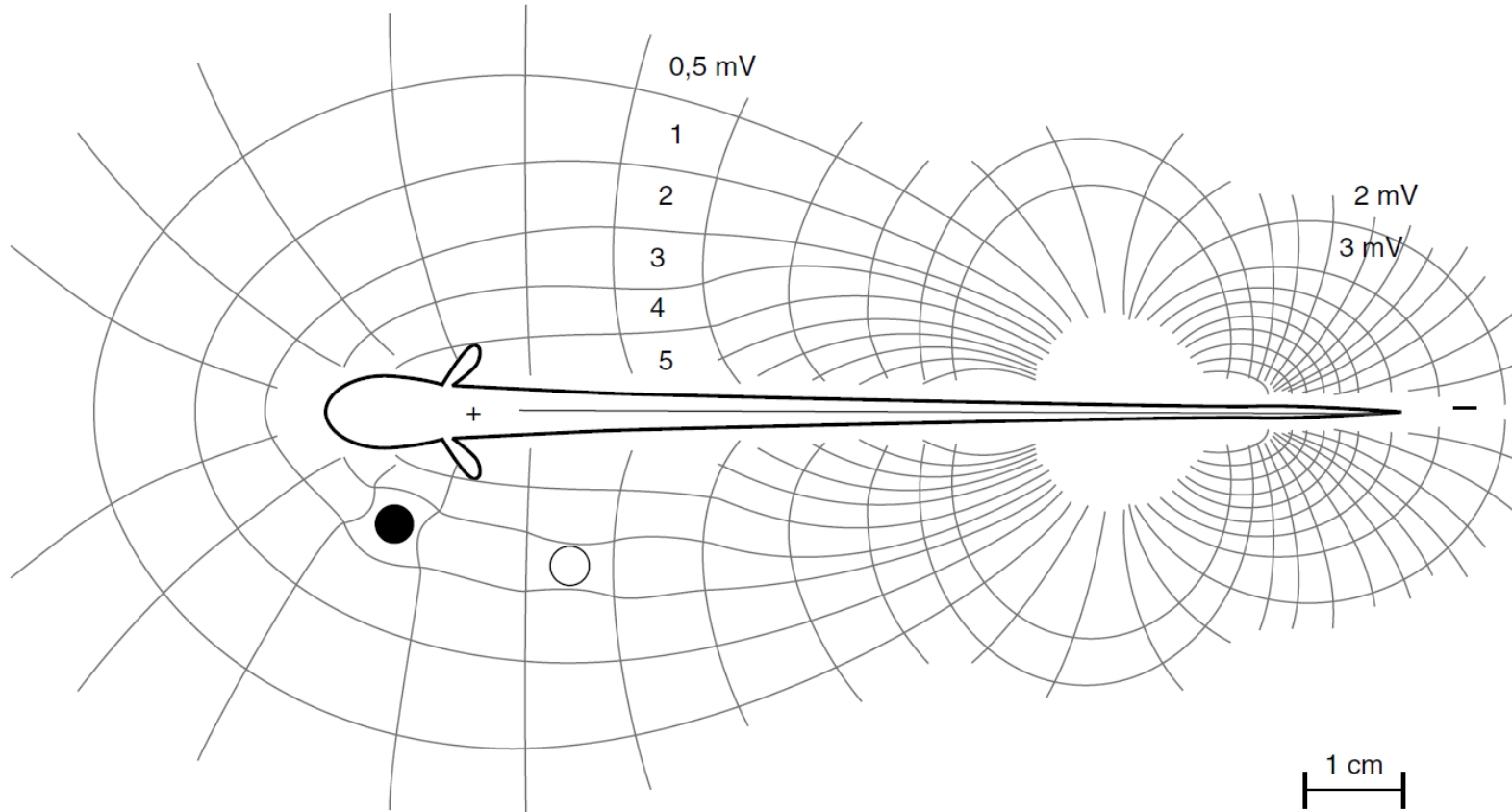
- Muitos peixes podem produzir potenciais elétricos fracos (da ordem de mV) pela diferença de potencial entre sua cabeça e rabo ser muito pequena. Esses potenciais são produzidos em pulsos



a) Forma aproximada das linhas de campo elétrico de um peixe-elétrico (espécie *gymnarchus*).

Linhas equipotenciais

- As linhas equipotenciais em decorrência do campo elétrico gerado pelo peixe *eigenmannia viresceus*



Peixes elétricos e seus potenciais

a) Electrophorus



b) Malapterurus



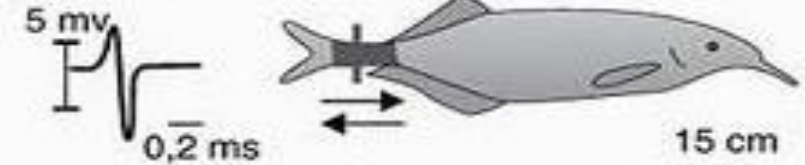
c) Torpedo



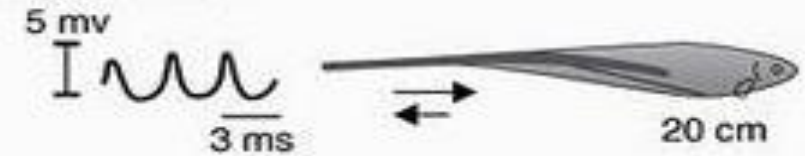
d) Astroscopus



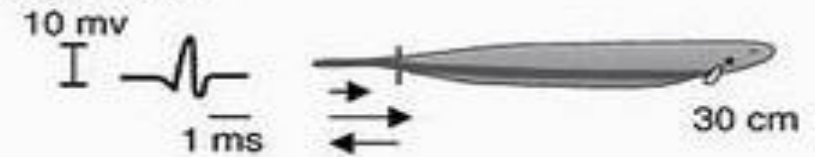
e) Gnathonemus



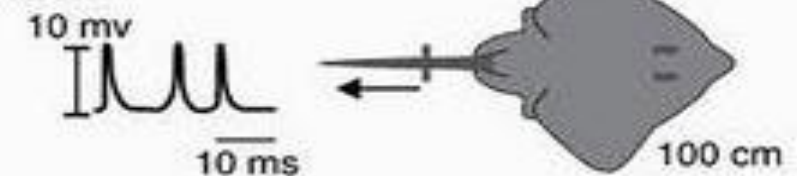
f) Eigenmannia



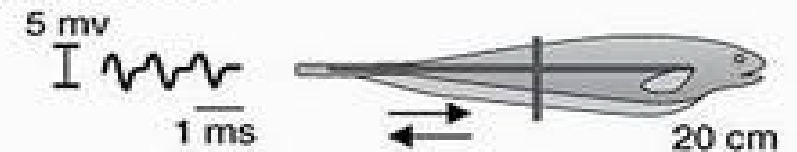
g) Gymnotus



h) Raia



i) Aptereronotus



Referências bibliográficas

- Site com animações sinapse e potencial de membrana
<http://brainu.org/movies>
- Ilustrações retiradas de vários sítios da internet
- Duran, J.H.R. Biofísica: conceitos e aplicações (2011). Capítulos 9 e 10.
- Okuno, E. et al. Física para ciências biológicas e biomédicas (1982).
Capítulo 22.