

Aula 8

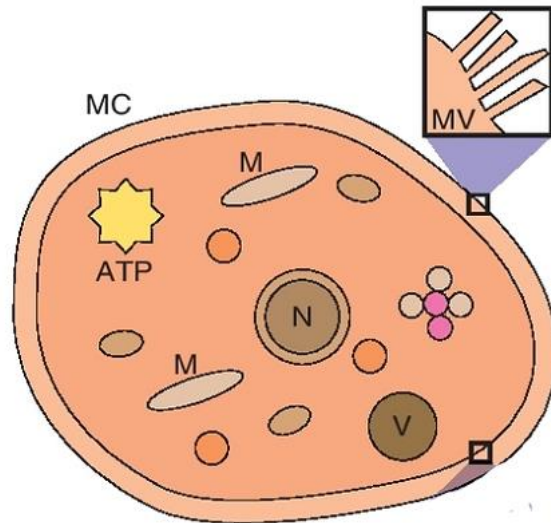
Membrana celular e Transporte de íons

Física Aplicada à Farmácia

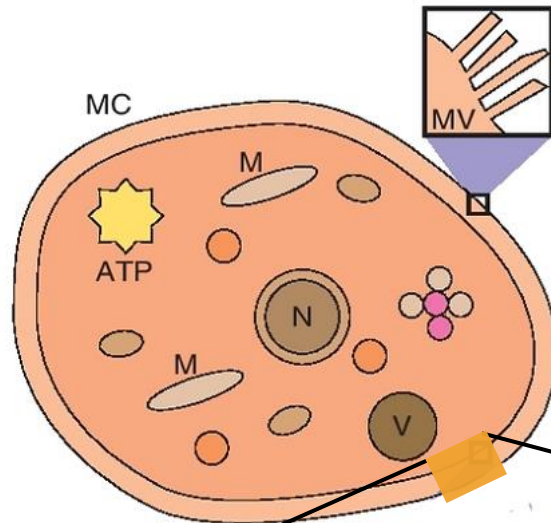
Prof. Henrique A. M. Faria

Membrana celular

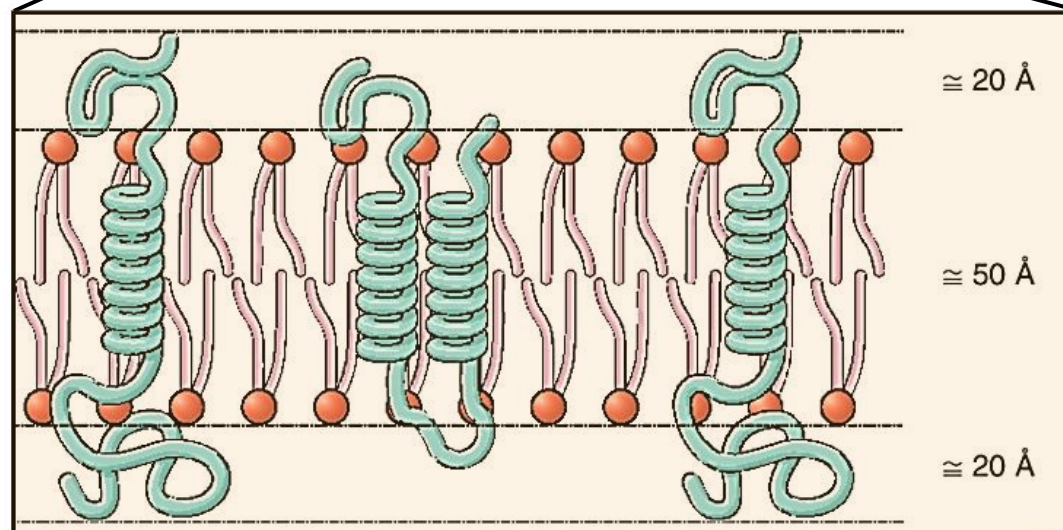
- A membrana celular é um **sistema aberto**;
- Permite o **trânsito** permanente de **moléculas complexas** e de espécies **iônicas**;
- O **fluxo** pode ocorrer **nos dois sentidos**: do meio intracelular para o exterior ou do meio extracelular para o meio interior.



- *MV*: micro vilosidade;
- *M*: mitocôndria;
- *N*: núcleo;
- *V*: vacúolo;
- *MC*: membrana celular



● *MC*: membrana celular



Membrana celular

- A membrana é composta de **bicamada lipídica e proteínas** que formam canais através da membrana;

Membrana celular

- A membrana é composta de **bicamada lipídica e proteínas** que formam canais através da membrana;
- A **permeabilidade celular** é resultado da atividade **fisiológica** e do **comportamento elétrico**;

Membrana celular

- A membrana é composta de **bicamada lipídica e proteínas** que formam canais através da membrana;
- A **permeabilidade celular** é resultado da atividade **fisiológica** e do **comportamento elétrico**;
- A membrana separa dois meios líquidos **ionizados** denominados intracelular e extracelular.

Membrana celular

- O meio líquido é uma solução **salina de carga líquida neutra**, ou seja, mesma concentração de ânions (-) e cátions (+);

Membrana celular

- O **meio líquido** é uma solução **salina de carga líquida neutra**, ou seja, mesma concentração de ânions (-) e cátions (+);
- O **transporte de íons** através da membrana ocorre devido a **quatro fatores**:
 - Diferença de pressão;
 - Difusão devido ao potencial químico;
 - Migração por campo elétrico;
 - Transporte ativo com gasto de energia.

Membrana celular

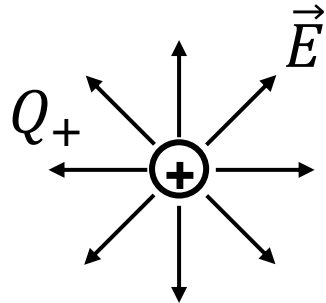
- O meio líquido é uma solução **salina de carga líquida neutra**, ou seja, mesma concentração de ânions (-) e cátions (+);
- O **transporte de íons** através da membrana ocorre devido a **quatro fatores**:
 - Diferença de pressão;
 - Difusão devido ao potencial químico;
 - **Migração por campo elétrico**;
 - **Transporte ativo com gasto de energia.**

Aula
de hoje

Revisão dos conceitos de eletricidade

Campo elétrico (E)

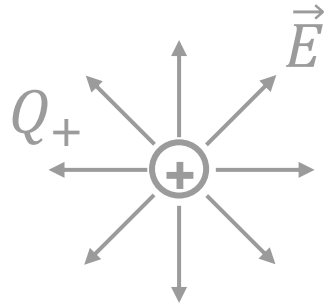
Capacidade de uma carga fonte (Q) influenciar eletricamente o espaço em seu entorno;



$$E = K \frac{Q}{r^2} \left[\frac{N}{C} \right]$$

Campo elétrico (E)

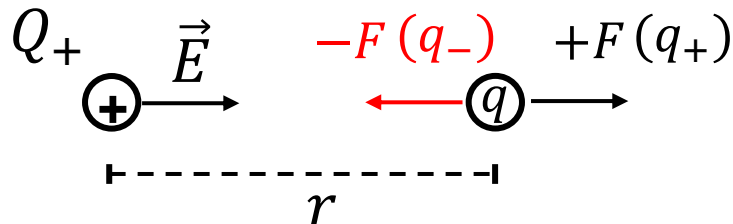
Capacidade de uma carga fonte (Q) influenciar eletricamente o espaço em seu entorno;



$$E = K \frac{Q}{r^2} \left[\frac{N}{C} \right]$$

Força elétrica (F)

Uma carga (q) experimentará uma força elétrica ao ser colocada na região de (E);



$$F = qE = K \frac{Qq}{r^2} [N]$$

Potencial elétrico (V)

Trabalho da força elétrica para mover uma carga elétrica positiva de um ponto de potencial nulo a um ponto do campo elétrico;

$$V = Er = K \frac{Q}{r} [V]$$

Potencial elétrico (V)

Trabalho da força elétrica para mover uma carga elétrica positiva de um ponto de potencial nulo a um ponto do campo elétrico;

$$V = Er = K \frac{Q}{r} [V]$$

Carga elétrica (Q ou q)

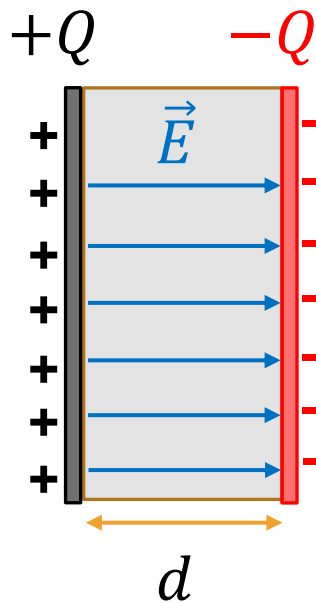
- Grandeza que permite a interação eletromagnética;
- Pode apresentar **valores positivos e negativos**;
- Em um **sistema macroscópico** (átomos ou moléculas) a carga elétrica é um múltiplo da **carga elétrica elementar** ($e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$)

Capacitores

- Dispositivos que **armazenam cargas elétricas;**

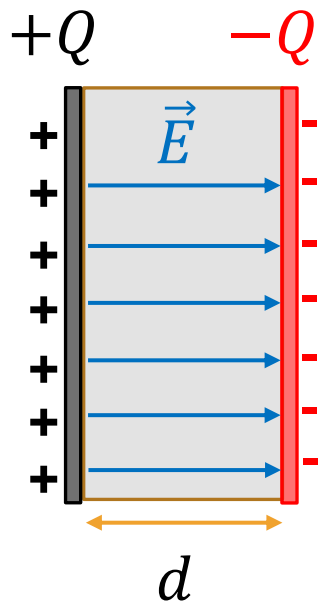
Capacitores

- Dispositivos que **armazenam cargas elétricas**;
- O tipo **mais simples** consiste de duas **placas paralelas** carregadas ($+Q$ e $-Q$)



Capacitores

- Dispositivos que **armazenam cargas elétricas**;
- O tipo **mais simples** consiste de duas **placas paralelas** carregadas ($+Q$ e $-Q$)



$$C = \frac{Q}{V}$$

$$C = \frac{\epsilon A}{d} [F] \text{ (farad)}$$

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{C}{A} V \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

$$V = Ed [V]$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{Q}{A} \left[\frac{V}{m} \right]$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Potencial de repouso da membrana

- A maior parte das moléculas nas **soluções salinas do interior e exterior** da célula se decompõem em **íons**;

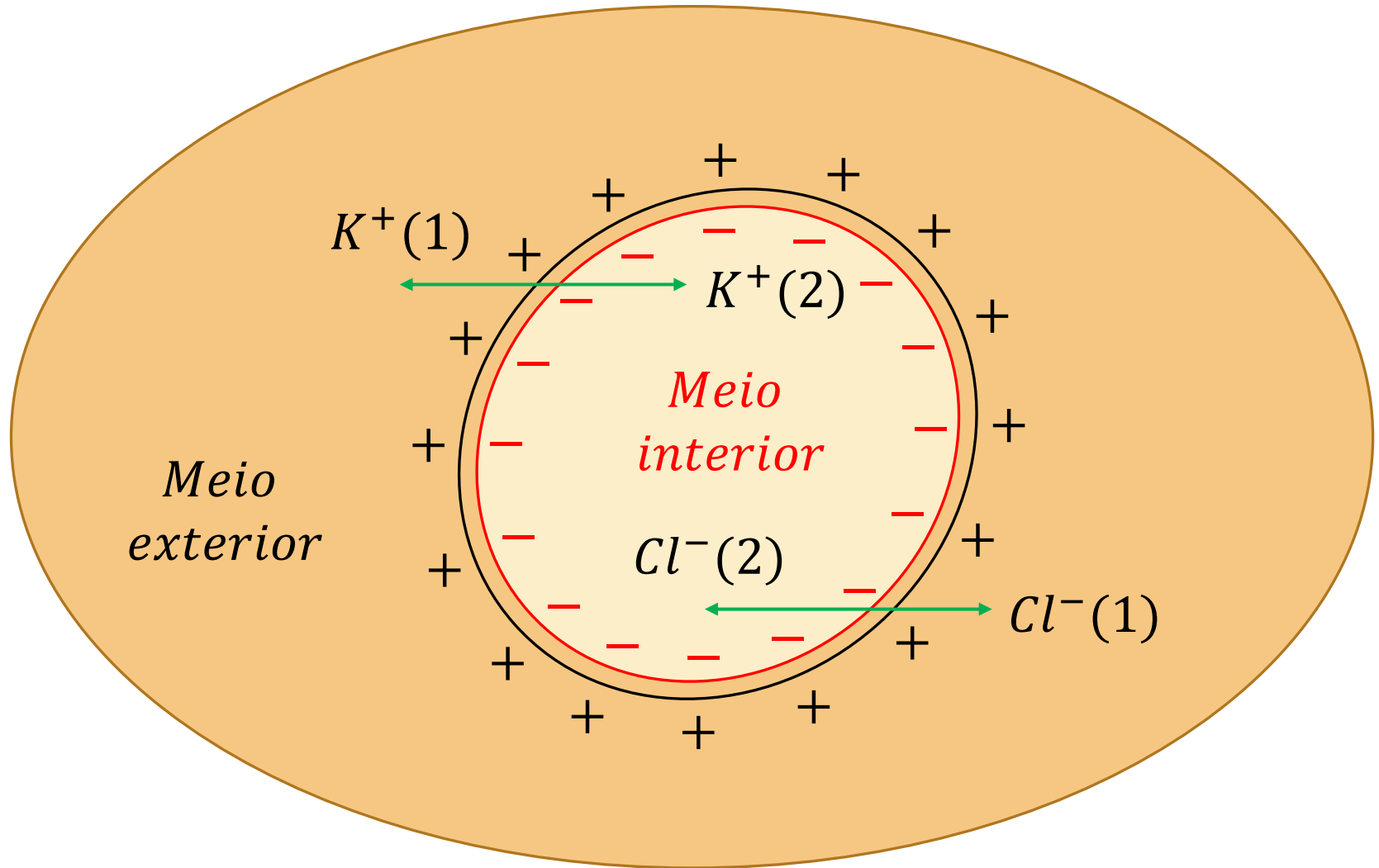
Potencial de repouso da membrana

- A maior parte das moléculas nas **soluções salinas do interior e exterior** da célula se decompõem em **íons**;
- A membrana é permeável a alguns tipos de **íons** o que resultará em **concentração de cargas na superfície** interna e externa da membrana;

Potencial de repouso da membrana

- A maior parte das moléculas nas **soluções salinas do interior e exterior** da célula se decompõem em **íons**;
- A membrana é permeável a alguns tipos de **íons** o que resultará em **concentração de cargas na superfície** interna e externa da membrana;
- A **ionização das superfícies** cria diferença de **potencial**.

Potencial de repouso da membrana



Potencial de repouso da membrana

- Quando não há interferência externa sobre a célula o potencial de membrana é denominado **potencial de repouso (V_0)**;

Potencial de repouso da membrana

- Quando não há interferência externa sobre a célula o potencial de membrana é denominado **potencial de repouso (V_0)**;
- Por convenção, o **potencial elétrico do fluido extracelular é considerado nulo** e V é o potencial no interior da membrana;

Potencial de repouso da membrana

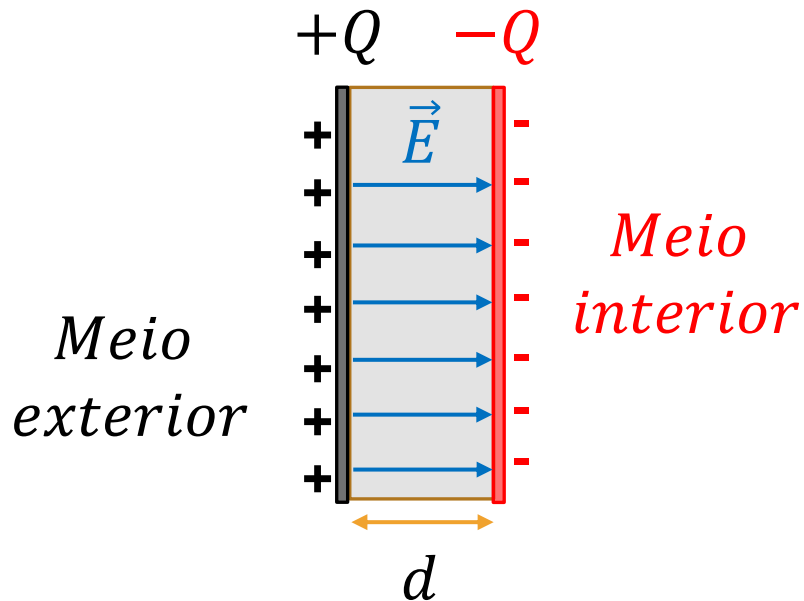
- **Quando não há interferência** externa sobre a célula o potencial de membrana é denominado **potencial de repouso (V_0)**;
- Por convenção, o **potencial elétrico do fluido extracelular é considerado nulo** e V é o potencial no interior da membrana;
- Nas **fibras nervosas e musculares dos animais** os potenciais de repouso são negativos e situam entre $-30 \text{ mV} < V_0 < -100 \text{ mV}$.

Modelo da membrana como capacitor

- Pode-se imaginar, **do ponto de vista elétrico**, a membrana celular como um capacitor;
- Nesse modelo **duas soluções condutoras estão separadas por uma camada isolante.**

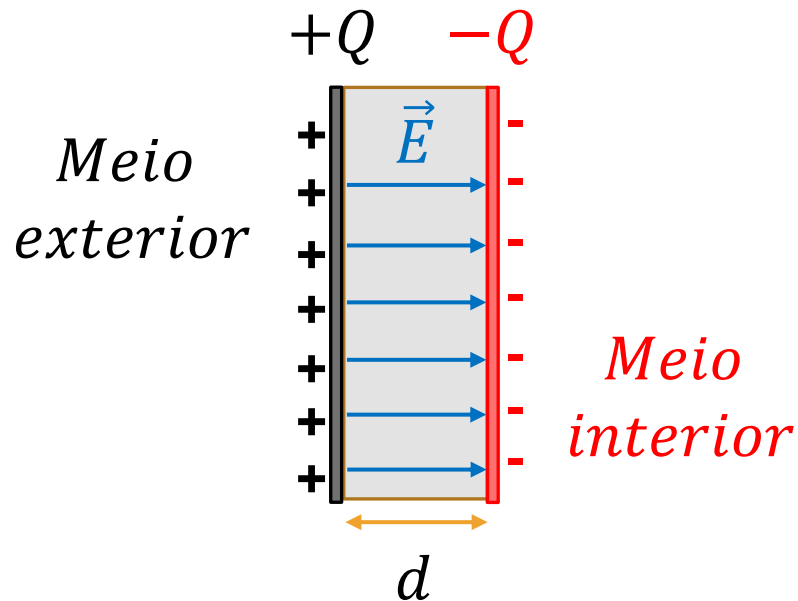
Modelo da membrana como capacitor

- Pode-se imaginar, **do ponto de vista elétrico**, a membrana celular como um capacitor;
- Nesse modelo **duas soluções condutoras estão separadas por uma camada isolante**.

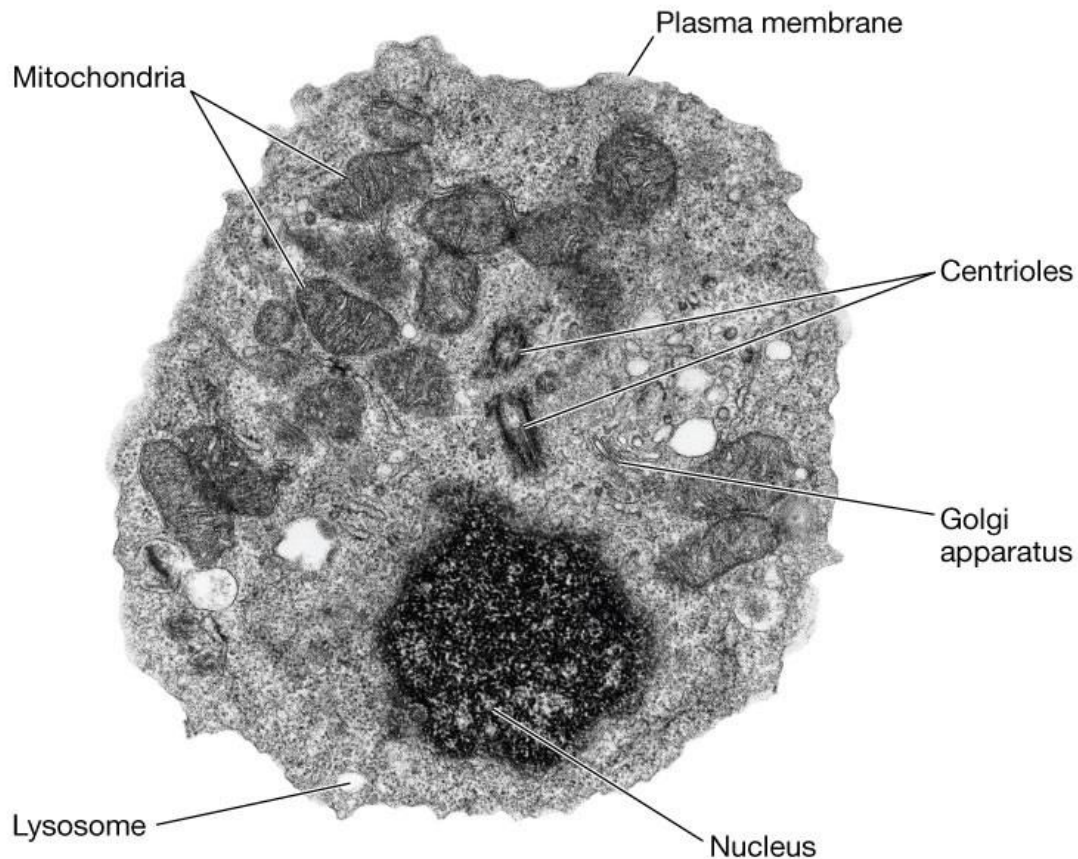


Modelo da membrana como capacitor

- A **superfície externa** é coberta por **cátions (+Q)** enquanto a **interna** por **ânions (- Q)**;
- A **concentração de cátions e ânions** dá origem ao **potencial de repouso da membrana**.

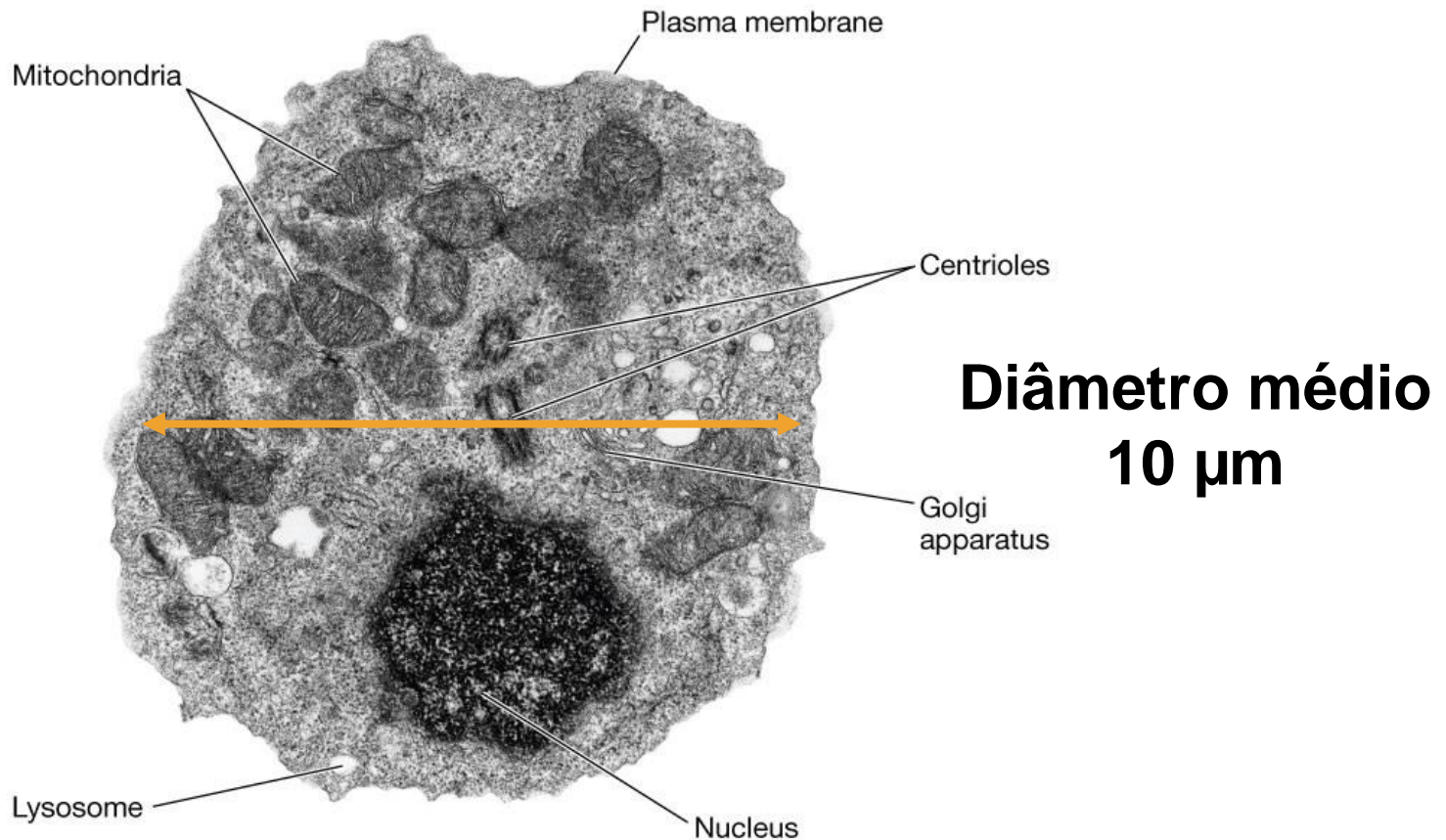


Esse modelo é uma boa aproximação?



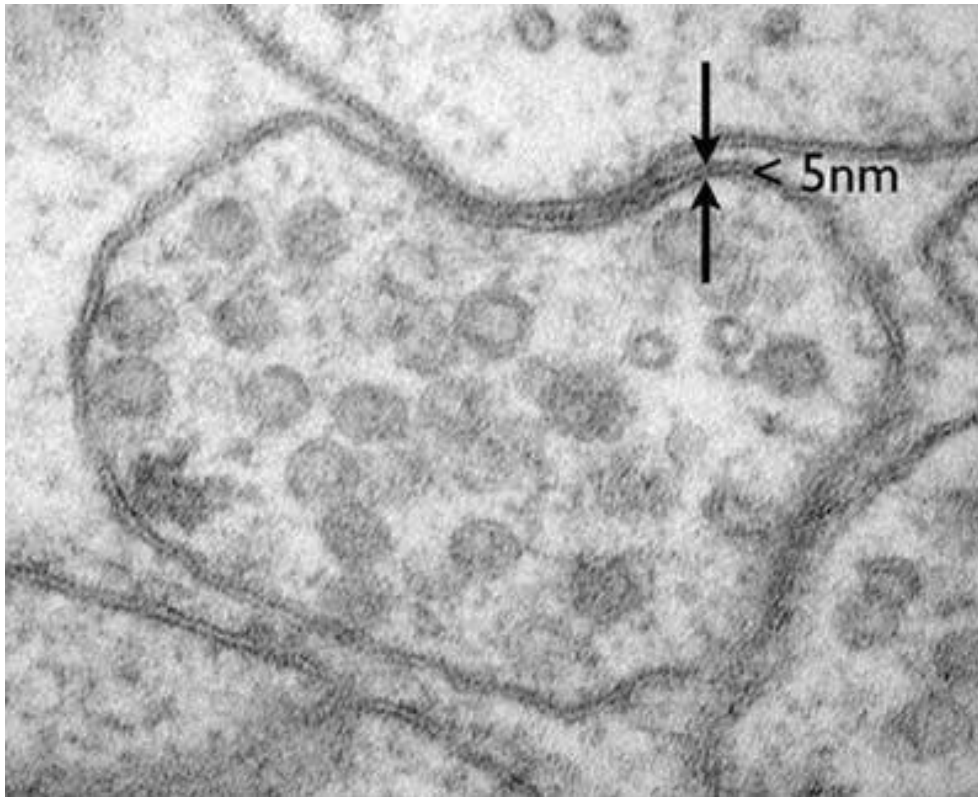
Fonte: Animal cell, Edexcel IAL Biology

Esse modelo é uma boa aproximação?



Fonte: Animal cell, Edexcel IAL Biology

Esse modelo é uma boa aproximação?



**Membrana
celular
5 nm**

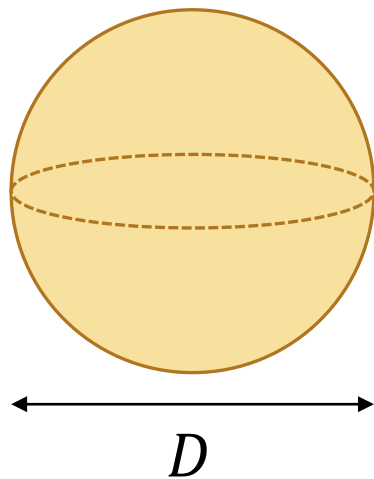
Fonte: Shigeki Watanabe and Erik Jorgensen, UTAh University

Esse modelo é uma boa aproximação?

- Algumas células animais isoladas em meio líquido adquirem a forma esférica com diâmetros (D) entre 10 a $20 \mu m$;
- Em uma célula com **diâmetro $D = 10 \mu m$** podemos calcular a circunferência e a área.

Esse modelo é uma boa aproximação?

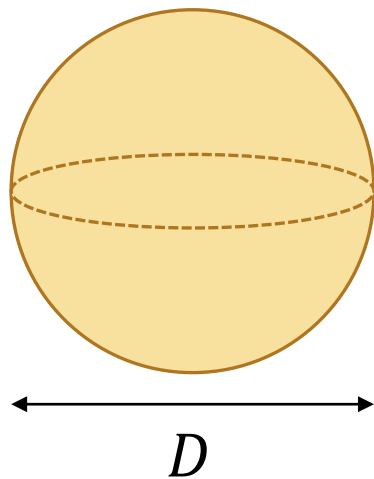
- Algumas células animais isoladas em meio líquido adquirem a forma esférica com diâmetros (D) entre 10 a $20 \mu m$;
- Em uma célula com **diâmetro $D = 10 \mu m$** podemos calcular a circunferência e a área.



$$c = \pi D$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- Algumas células animais isoladas em meio líquido adquirem a forma esférica com diâmetros (D) entre 10 a $20 \mu m$;
- Em uma célula com **diâmetro $D = 10 \mu m$** podemos calcular a circunferência e a área.

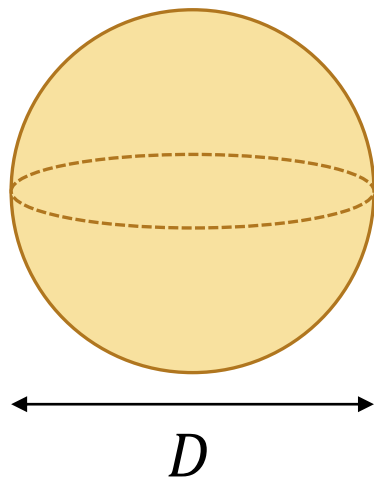


$$c = \pi D = 3,14 \times 10 \cdot 10^{-6}$$

$$c = 31 \cdot 10^{-6} m$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- Algumas células animais isoladas em meio líquido adquirem a forma esférica com diâmetros (D) entre 10 a $20 \mu\text{m}$;
- Em uma célula com **diâmetro** $D = 10 \mu\text{m}$ podemos calcular a circunferência e a área.



$$c = \pi D = 3,14 \times 10 \cdot 10^{-6}$$

$$c = 31 \cdot 10^{-6} \text{m}$$

$$A = \pi D^2 = 3,14 \times (10 \cdot 10^{-6})^2$$

$$A = 3,1 \cdot 10^{-10} \text{m}^2$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- A **espessura** (d) da membrana tem aproximadamente:

$$d = 5 \text{ nm} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$$

- Comparando com a **circunferência** $c = 31 \mu\text{m}$, temos:

Esse modelo é uma boa aproximação?

- A **espessura** (d) da membrana tem aproximadamente:

$$d = 5 \text{ nm} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$$

- Comparando com a **circunferência** $c = 31 \mu\text{m}$, temos:

$$\frac{d}{c} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \mu}{31 \mu} = 1,6 \cdot 10^{-4}$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- A **espessura** (d) da membrana tem aproximadamente:

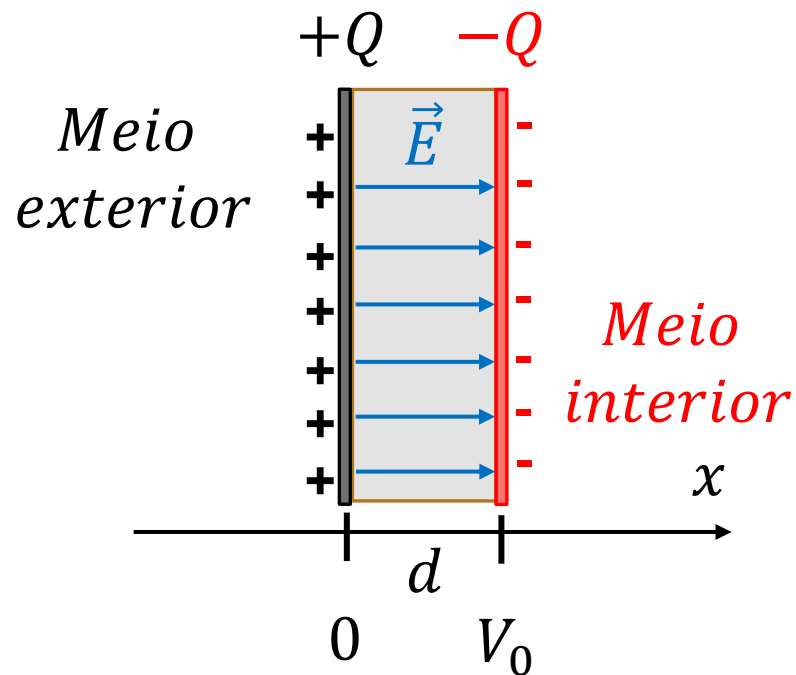
$$d = 5 \text{ nm} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$$

- Comparando com a **circunferência** $c = 31 \mu\text{m}$, temos:

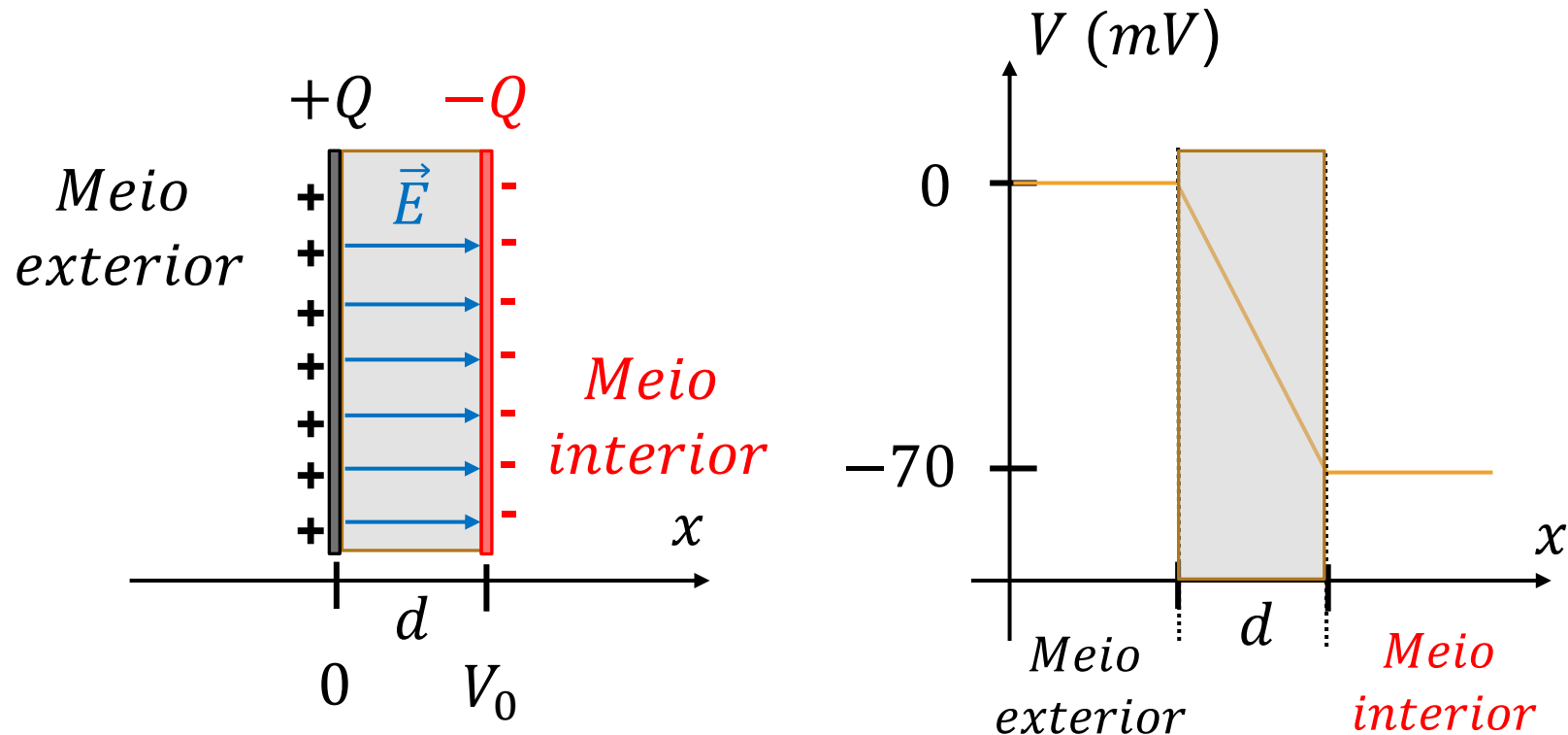
$$\frac{d}{c} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \mu}{31 \mu} = 1,6 \cdot 10^{-4} \rightarrow c \cong 10^4 d \rightarrow \boxed{c \gg d}$$

- O que mostra que o modelo da membrana como capacitor de placas paralelas é uma boa aproximação.

Potencial de repouso em função de uma distância x ao longo da membrana.



Potencial de repouso em função de uma distância x ao longo da membrana.



Potencial de repouso em função de uma distância x ao longo da membrana.

- Então, podemos considerar as cargas $(+Q)$ e $(-Q)$ localizadas em duas placas paralelas infinitas (**superfície da membrana**);

Potencial de repouso em função de uma distância x ao longo da membrana.

- Então, podemos considerar as cargas(+Q) e (-Q) localizadas em duas placas paralelas infinitas (**superfície da membrana**);
- Como o valor característico para a **permissividade elétrica na membrana é $\varepsilon = 10\varepsilon_0$** pode-se estimar a capacitância por unidade de área, a densidade superficial de cargas e outros parâmetros.

Exemplo

Uma membrana celular tem permissividade elétrica $\varepsilon = 10\varepsilon_0$ e espessura $d = 8,0 \text{ nm}$. A distribuição de cargas superficiais (σ) é de $8,0 \cdot 10^{-4} \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2} \right]$. Utilize o modelo de membrana como um capacitor de placas paralelas e calcule:

- A diferença de potencial entre as superfícies da membrana;
- O campo elétrico na face interior;
- A força elétrica que experimentará um íon de Ca^{++} que está no interior da membrana.

Dados: $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{N}}{\text{C}} \right]$

Exemplo - solução

Dados: $\varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10 \times 8,85 \cdot 10^{-12} = 8,85 \cdot 10^{-11} \left[\frac{N}{C} \right]$

$$d = 8,0 \text{ nm} = 8,0 \cdot 10^{-9} [m] \quad \sigma = \frac{Q}{A} = 8,0 \cdot 10^{-4} \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

Exemplo - solução

$$\text{Dados: } \varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10 \times 8,85 \cdot 10^{-12} = 8,85 \cdot 10^{-11} \left[\frac{N}{C} \right]$$

$$d = 8,0 \text{ nm} = 8,0 \cdot 10^{-9} [m] \quad \sigma = \frac{Q}{A} = 8,0 \cdot 10^{-4} \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

$$\text{a) } \sigma = \frac{C}{A} V \quad e \quad C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad \rightarrow \quad V = \frac{\sigma d}{\varepsilon}$$

$$V = \frac{8,0 \cdot 10^{-4} \times 8,0 \cdot 10^{-9}}{8,85 \cdot 10^{-11}} = 72 \cdot 10^{-3} = \mathbf{72 [mV]}$$

Exemplo - solução

$$\text{Dados: } \varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10 \times 8,85 \cdot 10^{-12} = 8,85 \cdot 10^{-11} \left[\frac{N}{C} \right]$$

$$d = 8,0 \text{ nm} = 8,0 \cdot 10^{-9} [m] \quad \sigma = \frac{Q}{A} = 8,0 \cdot 10^{-4} \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

$$\text{a) } \sigma = \frac{C}{A} V \quad e \quad C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad \rightarrow \quad V = \frac{\sigma d}{\varepsilon}$$

$$V = \frac{8,0 \cdot 10^{-4} \times 8,0 \cdot 10^{-9}}{8,85 \cdot 10^{-11}} = 72 \cdot 10^{-3} = \mathbf{72 [mV]}$$

$$\text{b) } V = Ed \quad \rightarrow \quad E = \frac{V}{d} = \frac{-72 \cdot 10^{-3}}{8,0 \cdot 10^{-9}} = \mathbf{9,0 \cdot 10^6 \left[\frac{V}{m} \right]}$$

Exemplo - solução

Dados: $\varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10 \times 8,85 \cdot 10^{-12} = 8,85 \cdot 10^{-11} \left[\frac{N}{C} \right]$

$$d = 8,0 \text{ nm} = 8,0 \cdot 10^{-9} [m] \quad \sigma = \frac{Q}{A} = 8,0 \cdot 10^{-4} \left[\frac{C}{m^2} \right]$$

a) $\sigma = \frac{C}{A} V$ e $C = \frac{\varepsilon A}{d} \rightarrow V = \frac{\sigma d}{\varepsilon}$

$$V = \frac{8,0 \cdot 10^{-4} \times 8,0 \cdot 10^{-9}}{8,85 \cdot 10^{-11}} = 72 \cdot 10^{-3} = \mathbf{72 [mV]}$$

b) $V = Ed \rightarrow E = \frac{V}{d} = \frac{-72 \cdot 10^{-3}}{8,0 \cdot 10^{-9}} = \mathbf{9,0 \cdot 10^6 \left[\frac{V}{m} \right]}$

c) $F = qE = q^{++} E = 2 \times 1,60 \cdot 10^{-19} \times 9,0 \cdot 10^6$

$$F = \mathbf{2,9 \cdot 10^{-12} [N]}$$

Movimento de íons

- Quando o meio condutor para corrente elétrica é uma solução eletrolítica a corrente é originada pelo deslocamento dos íons presentes na solução;

Movimento de íons

- Quando o meio condutor para corrente elétrica é uma solução eletrolítica a corrente é originada pelo deslocamento dos íons presentes na solução;
- A **condutividade elétrica** (σ_i) da solução eletrolítica com esta espécie iônica será:

Movimento de íons

- Quando o meio condutor para corrente elétrica é uma solução eletrolítica a corrente é originada pelo deslocamento dos íons presentes na solução;
- A **condutividade elétrica** (σ_i) da solução eletrolítica com esta espécie iônica será:

$$\sigma_i = \mu_i q_i^2 C_i \quad [\Omega \cdot m]^{-1}$$

q_i : carga elétrica da espécie iônica;

C_i : concentração da espécie iônica da solução;

μ_i : constante de mobilidade.

Movimento de íons

$$\mu_i = \frac{D_i}{kT}$$

μ_i : constante de mobilidade

D_i : coeficiente de difusão da espécie iônica;

T : temperatura da solução;

k : constante de Boltzmann.

Movimento de íons

$$\mu_i = \frac{D_i}{kT}$$

μ_i : constante de mobilidade

D_i : coeficiente de difusão da espécie iônica;

T : temperatura da solução;

k : constante de Boltzmann.

- Se a solução está sujeita a um campo elétrico (E) a **densidade de corrente (J)** na solução será:

Movimento de íons

$$\mu_i = \frac{D_i}{kT}$$

μ_i : constante de mobilidade

D_i : coeficiente de difusão da espécie iônica;

T : temperatura da solução;

k : constante de Boltzmann.

- Se a solução está sujeita a um campo elétrico (E) a **densidade de corrente (J)** na solução será:

$$J = \sigma E = \sum_i (\mu_i q_i^2 C_i) E \quad \text{como: } J = I/A$$

$$I = \sigma EA = \sum_i (\mu_i q_i^2 C_i) EA \quad (\text{corrente iônica})$$

Potencial de Nernst e Equilíbrio de Donnan

Potencial de Nernst

- É uma **condição de equilíbrio** no transporte de um determinado espécime iônico através da membrana;
- O potencial de Nernst é atingido quando as **forças química e elétrica** sobre a espécime **se equilibram**, ou seja, não há fluxo líquido.
- Representa a diferença entre os potenciais da superfície interna e externa.

Equação de Nernst

- Relaciona a **concentração de espécimes** iônicos em ambos os lados de uma membrana com o potencial;

Equação de Nernst

- Relaciona a **concentração de espécimes** iônicos em ambos os lados de uma membrana com o potencial;
- Em uma solução à **temperatura T**, com solutos iônicos deslocando-se na **direção x**, a equação tem a forma:

Equação de Nernst

- Relaciona a **concentração de espécimes** iônicos em ambos os lados de uma membrana com o potencial;
- Em uma solução à **temperatura T**, com solutos iônicos deslocando-se na **direção x**, a equação tem a forma :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = - \frac{kT}{ze} \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial x}$$

$C_{(x)}$: concentração do soluto; $V_{(x)}$: Potencial elétrico;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{C} \right]$: constante de Boltzmann;

ze : grau de ionização do soluto, sendo $e = 1,60 \cdot 10^{-19} [C]$

Equilíbrio de Donnan

- Um potencial de repouso (V_0) é sempre observado quando há diferentes concentrações iônicas dentro e fora da célula;

Equilíbrio de Donnan

- Um potencial de repouso (V_0) é sempre observado quando há diferentes concentrações iônicas dentro e fora da célula;
- A membrana é mais permeável para íons monovalentes inorgânicos (K^+ , Cl^- e Na^+);
- Os íons K^+ são necessários para manter a neutralidade no interior da célula uma vez que há a presença de grandes moléculas de albumina (ânions);

Equilíbrio de Donnan

- Um potencial de repouso (V_0) impede que íons K^+ , em maior concentração, saiam para o meio externo;
- Raciocínio análogo pode ser observado para outros íons;

Equilíbrio de Donnan

- Um potencial de repouso (V_0) impede que íons K^+ , em maior concentração, saiam para o meio externo;
- Raciocínio análogo pode ser observado para outros íons;
- A concentração intracelular de Cl^- ocorre em consequência da distribuição de íons K^+ , regulado pelo potencial da membrana.

As concentrações de íons presentes no fluido **intracelular** (C_2) e **extracelular** (C_1) na célula muscular de uma rã a 310 K são mostradas na tabela.

Íons	Concentração intracelular (C_2) mmol/L	Concentração extracelular (C_1) mmol/L	Potencial de Nernst (mV)
K^+	124,0	2,25	-107,1
Na^+	10,4	109,0	62,8
Ca^+	4,9	2,1	-11,3
Mg^{++}	14,0	1,2	-32,3
Cl^-	1,5	77,5	-105,4

Equilíbrio de Donnan

- A solução da equação diferencial de Nernst para o caso de equilíbrio iônico é:

$$V_{ion}^N = \frac{kT}{ze} \ln\left[\frac{C_1}{C_2}\right]$$

C_2 : concentração iônica no meio interno;

C_1 : concentração iônica no meio externo;

V_{ion}^N : Potencial de Nernst;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{C}\right]$: constante de Boltzmann;

ze : grau de ionização do soluto, sendo $e = 1,602 \cdot 10^{-19} [C]$.

Equilíbrio de Donnan

- No modelo de Donnan a diferença de potencial é a mesma para qualquer íon e denominado potencial de Donnan (V_D):

$$V_D = V_{(2)} - V_{(1)}$$

(Potencial de Donnan)

Equilíbrio de Donnan

- No modelo de Donnan a diferença de potencial é a mesma para qualquer íon e denominado potencial de Donnan (V_D):

$$V_D = V_{(2)} - V_{(1)} \quad (\text{Potencial de Donnan})$$

- Se o modelo de Donnan for satisfeito o potencial de Nernst e o potencial de Donnan deverão ser iguais

$$V_{íon}^N = V_D$$

V_D : Potencial de Donnan;

$V_{íon}^N$: Potencial de Nernst do íon;

$V_{(2)}$: Potencial na superfície interna;

$V_{(1)}$: Potencial na superfície externa.

Exemplo (p. 253 Duran)

Duas soluções iônicas separadas por uma membrana de uma célula muscular de rã a temperatura de 37°C , contêm íons K^{+} , Na^{+} e Cl^{-} nas concentrações relacionada na tabela anterior. Sendo o potencial de repouso desta membrana $V_0 = -98 [mV]$, determine o potencial de Nernst para cada tipo de íon e compare com V_0 .

Dados: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]$

Exemplo - solução

$$V_{ion}^N = \frac{kT}{ze} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right] = \frac{kT}{e} \frac{1}{z} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right]$$

Exemplo - solução

$$V_{ion}^N = \frac{kT}{ze} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right] = \frac{kT}{e} \frac{1}{z} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right]$$

$$\frac{kT}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \times (37+273)}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 26,7 [mV]$$

Exemplo - solução

$$V_{ion}^N = \frac{kT}{ze} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right] = \frac{kT}{e} \frac{1}{z} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right]$$

$$\frac{kT}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \times (37+273)}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 26,7 \text{ [mV]}$$

$$V_{K^+}^N = \frac{26,7}{z} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right] \text{ [mV]} = \frac{26,7}{+1} \ln \left[\frac{2,25}{124} \right] = -107 \text{ [mV]}$$

Exemplo - solução

$$V_{ion}^N = \frac{kT}{ze} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right] = \frac{kT}{e} \frac{1}{z} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right]$$

$$\frac{kT}{e} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \times (37+273)}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 26,7 \text{ [mV]}$$

$$V_{K^+}^N = \frac{26,7}{z} \ln \left[\frac{C_1}{C_2} \right] \text{ [mV]} = \frac{26,7}{+1} \ln \left[\frac{2,25}{124} \right] = -107 \text{ [mV]}$$

$$V_{Na^+}^N = \frac{26,7}{+1} \ln \left[\frac{109}{10,4} \right] = +62,7 \text{ [mV]}$$

$$V_{Cl^-}^N = \frac{26,7}{-1} \ln \left[\frac{77,5}{1,5} \right] = -105,3 \text{ [mV]}$$

Exemplo (p. 253 Duran)

Os potenciais de Nernst para o K^+ e Cl^- estão próximos do valor do potencial de repouso (V_0) o que poderia indicar que a membrana seria permeável somente a esses dois íons.

No entanto, ela é permeável também aos íons Na^+ , o que indica que existe um outro mecanismo de entrada desses íons Na^+ na célula. Transporte esse não regido pelo equilíbrio de Donnan.

Bomba de sódio-potássio

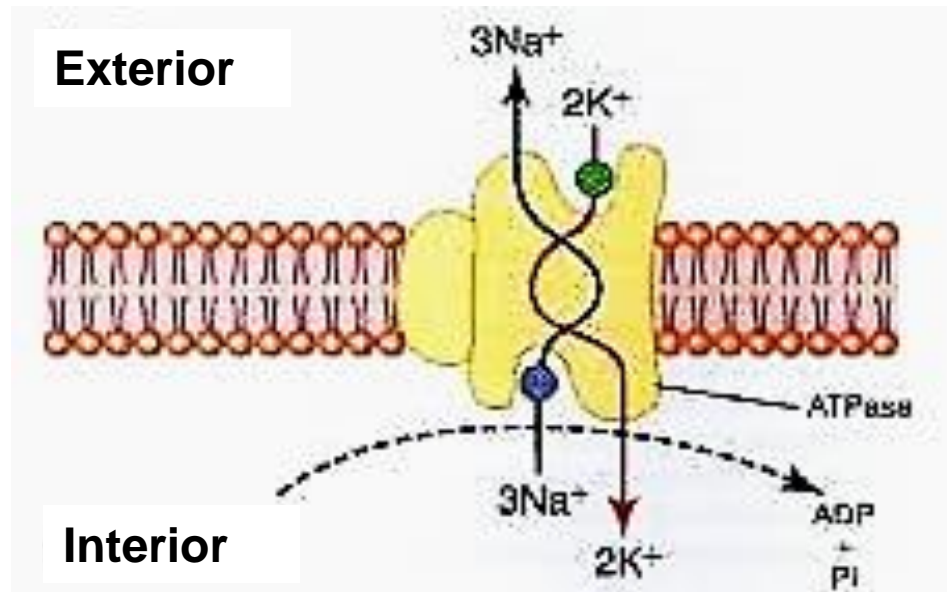
- O transporte devido a difusão e campo elétrico através do canal proteico da membrana são mecanismos passivos;
- Segundo o modelo de Donnan haverá um fluxo de Na^+ para o interior da célula e um fluxo K^+ para o exterior;
- Esse comportamento se deve ao potencial de repouso, principalmente do Na^+ , diferir do potencial de Nernst V_{Na}^N ;

Bomba de sódio-potássio

- Como as concentrações de K^+ e Na^+ são constantes deve haver outro tipo de **transporte, denominado ativo, no sentido contrário ao determinado pela força elétrica ou difusão;**
- O **transporte ativo** ocorrerá com **dispêndio de energia;**
- Sem o transporte ativo as concentrações iônicas dos meios interno e externo se igualariam, deixando de existir o potencial de repouso;

Bomba de sódio-potássio

- A bomba de sódio-potássio é um mecanismo ativo de transporte de íons;
- A figura representa os componentes básicos da bomba $Na^+ - K^+$.



Bomba de sódio-potássio

- Íons K^+ são transportados para dentro da célula e ao mesmo tempo íons Na^+ são transportados para o meio extracelular;
- A proteína carreadora apresenta três sítios para fixação de Na^+ e dois sítios para fixação de K^+ ;
- A face interna dessa proteína tem atividade ATPase (enzima catalizadora da quebra de ATP);
- Após a fixação dos íons a função ATPase é ativada, clivando uma molécula de ATP resultando em ADP mais P com a liberação de energia;

Bomba de sódio-potássio

- A energia liberada provoca alteração conformacional da proteína carreadora o que leva o Na^+ para o exterior e traz o K^+ para o interior;
- As células gastam 20% de sua energia metabólica para manter o funcionamento das bombas de sódio-potássio. O transporte acoplado de $Na^+ - K^+$ permite economizar energia, cujo gasto seria muito maior.

Exemplo (21.8 Okuno)

Nos neurônios do cérebro humano, a energia armazenada em um molécula de ATP é liberada pela reação: $ATP \rightarrow ADP + P + energia$.

Essa energia é utilizada para retirar três íons Na^+ da célula e levar dois íons K^+ para o seu interior. Cada bomba de sódio desses neurônios pode transportar, por segundo, até 200 Na^+ para fora e 130 K^+ para dentro.

Um neurônio possui cerca de 10^6 bombas de sódio que podem transportar 200 milhões de Na^+ por segundo.

Estime a corrente elétrica devida às bombas de sódio-potássio na membrana do neurônio.

Exemplo - solução

Dados: $N = 10^6$ [bombas]

$$\Delta q = qNa^+ - qK^+ = 200e - 130e = 70e$$

$$I = N \frac{\Delta q}{\Delta t} = 10^6 \times \frac{70 \times 1,60 \cdot 10^{-19}}{1}$$

$$I = 1,1 \cdot 10^{-11} \text{ [A]}$$

Para depois desta aula

- Completar estudo com a leitura do capítulo 21 do livro texto (Okuno);
- Acessar Lista 07 no site:

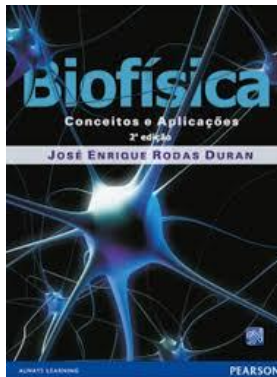
profhenriquefaria.com

Obrigado pela atenção!
E bons estudos.

Referências



Okuno, E. Caldas, I. L. Chow, C. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas.** São Paulo: Harbra, 1986. (Capítulo 21)



DURAN, J.E.R. **Biofísica. Fundamentos e Aplicações, 2ª Ed.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. (Capítulo 8)