Aula 8

Membrana celular e Transporte de íons

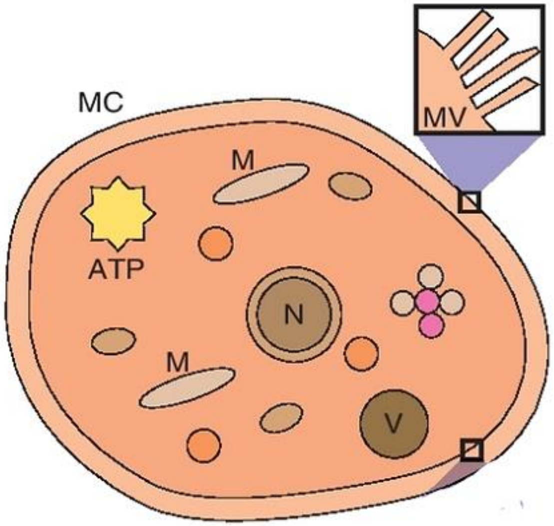
Física Aplicada à Farmácia

2º semestre 2019

Prof. Henrique A. M. Faria

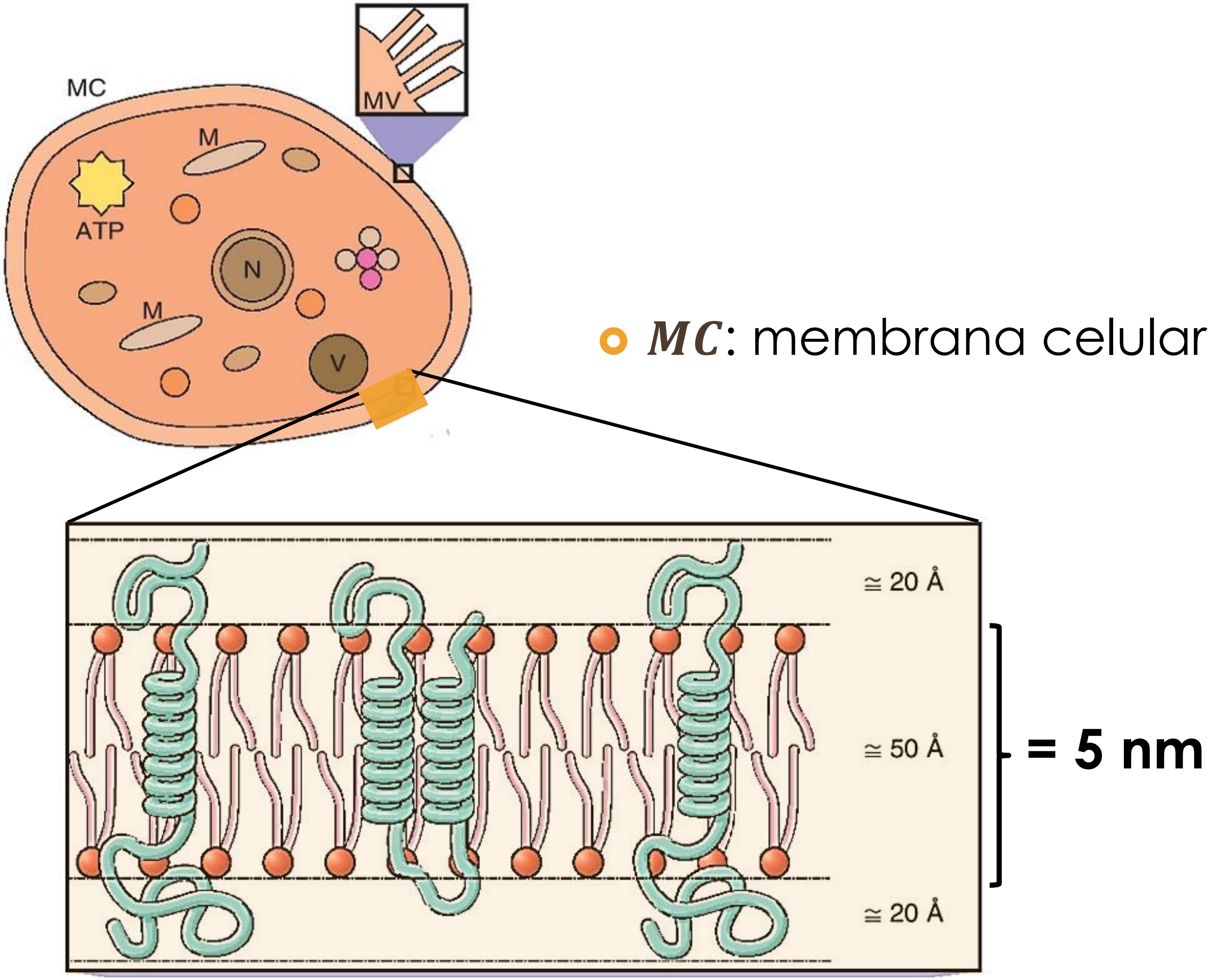
Membrana celular

- 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.



- $\boldsymbol{MV}$: micro vilosidade;
- $\boldsymbol{M}$: mitocôndria;
- $\boldsymbol{N}$: núcleo;
- $\boldsymbol{V}$: vacúolo;
- $\boldsymbol{MC}$: membrana celular

Fonte: Adaptado de Duran, 2011, p. 250.



- $\boldsymbol{MC}$: membrana celular

Fonte: Adaptado de Duran, 2011, p. 250.

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

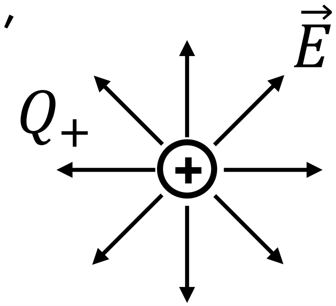
- O **meio líquido** é uma solução **salina de carga líquida neutra**, ou seja, mesma concentração de ânions (-) e cátions (+);
- O **transporte de íons** através da membrana ocorre devido a **quatro fatores**:
  - Diferença de pressão;
  - Difusão devido ao potencial químico;
  - **Migração por campo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

Aula de hoje

Revisão dos conceitos de eletricidade

Campo elétrico (E)

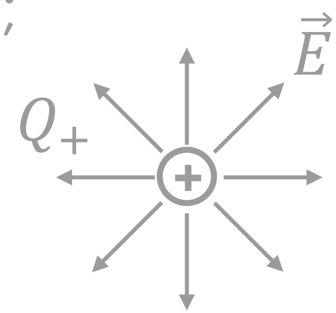
Capacidade de uma carga fonte (Q) influenciar eletricamente o espaço em seu entorno;



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

Campo elétrico (E)

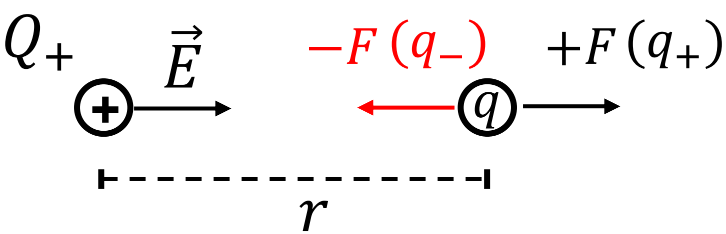
Capacidade de uma carga fonte (Q) influenciar eletricamente o espaço em seu entorno;



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

Força elétrica (F)

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



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

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)

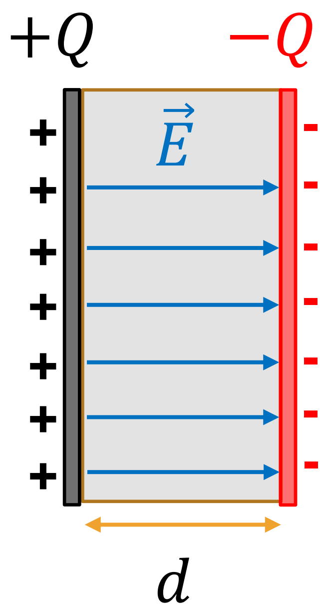
- Grandeza que permite a interação eletromagnética;
- Pode apresentar **valores positivos e negativos**;
- Em um **sistema macroscópico** (átomos ou moléculas) a carga elétrica é um múltiplo da **carga elétrica elementar** ($e = 1{,}602.10^{-19}C$)

Capacitores

- Dispositivos que **armazenam cargas elétricas**;

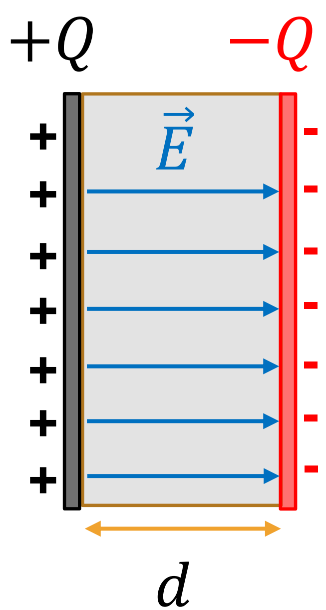
Capacitores

- 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 $-Q$)



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

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad [F] \ (farad)$$

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

$$V = Ed \quad [V]$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{Q}{A} \quad [\frac{V}{m}]$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

Potencial de repouso da membrana

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

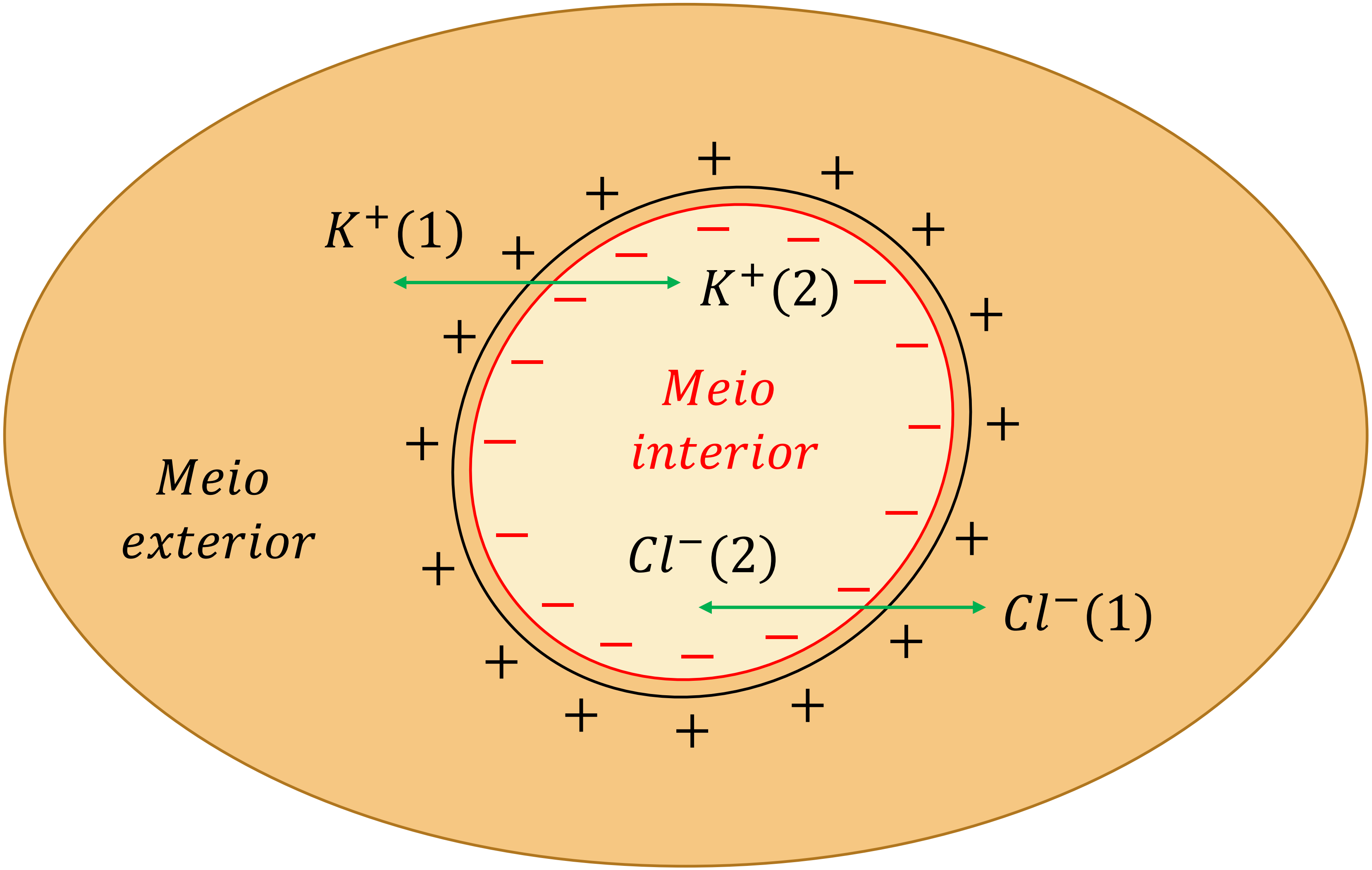
Potencial de repouso da membrana

- A maior parte das moléculas nas **soluções salinas do interior e exterior** da célula se decompões 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 decompões 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

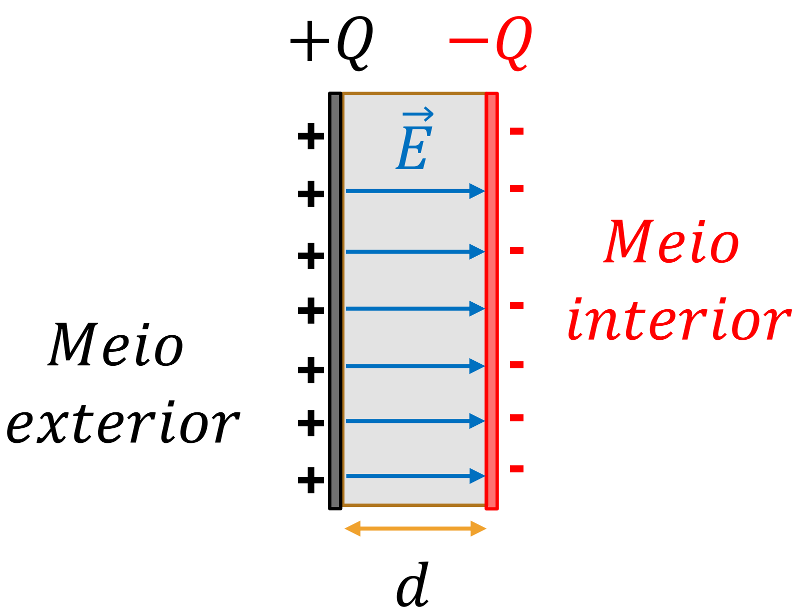
- **Quando não há interferência** externa sobre a célula o potencial de membrana é denominado **potencial de repouso ($\boldsymbol{V_0}$)**;
- Por convenção, o **potencial elétrico do fluido extracelular é considerado nulo** e $\boldsymbol{V}$ é o potencial **no interior da membrana**;
- Nas **fibras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

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**.

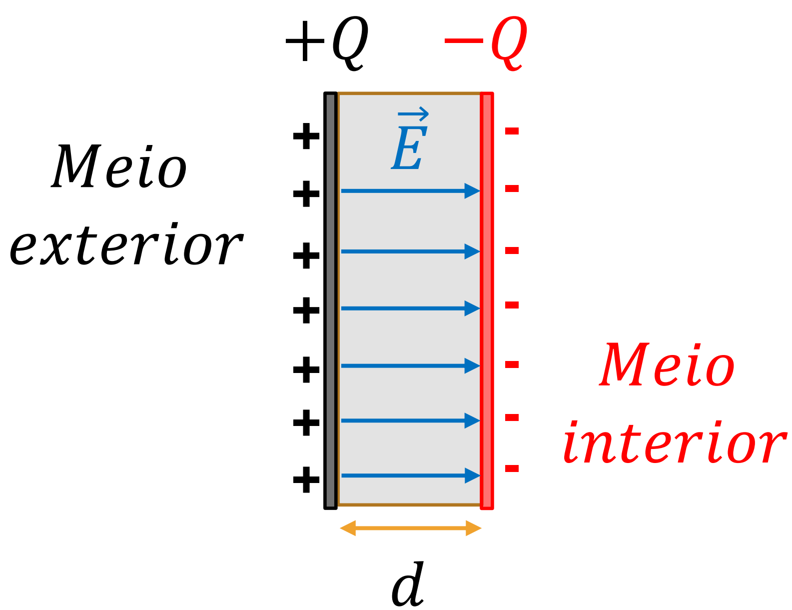
Modelo da membrana como capacitor

- 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**.

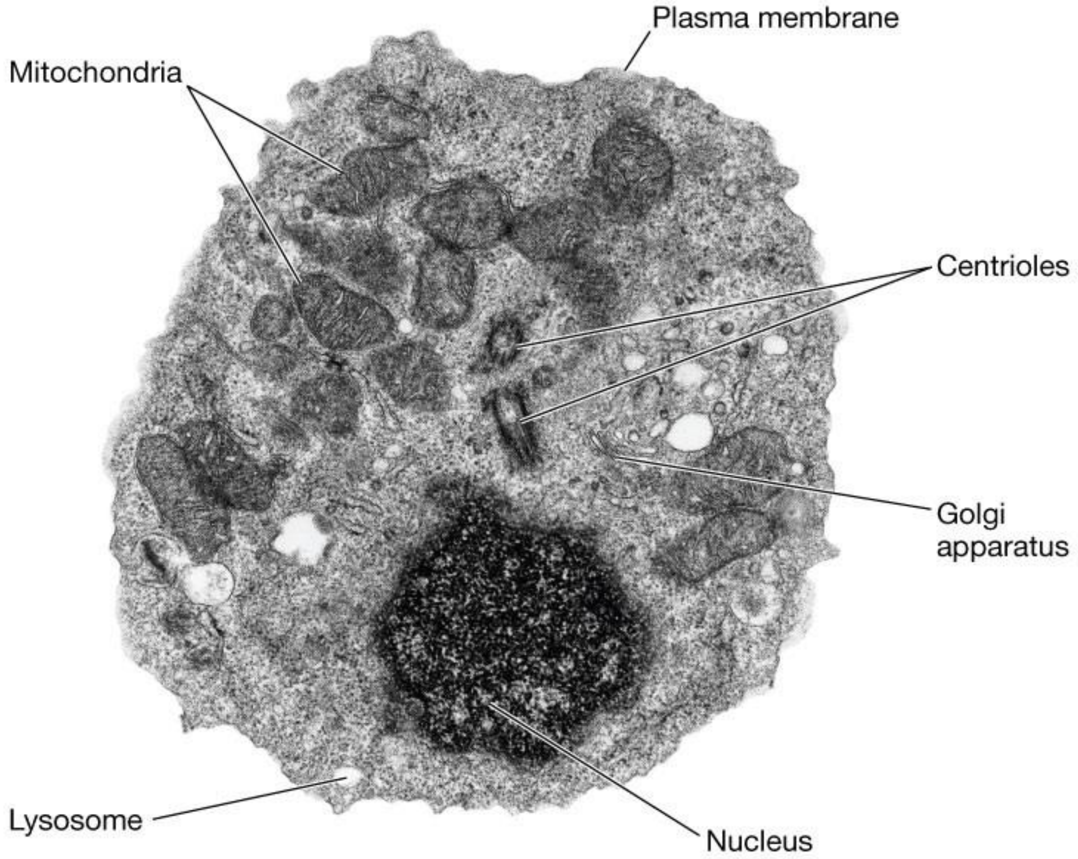


Modelo da membrana como capacitor

- 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**.

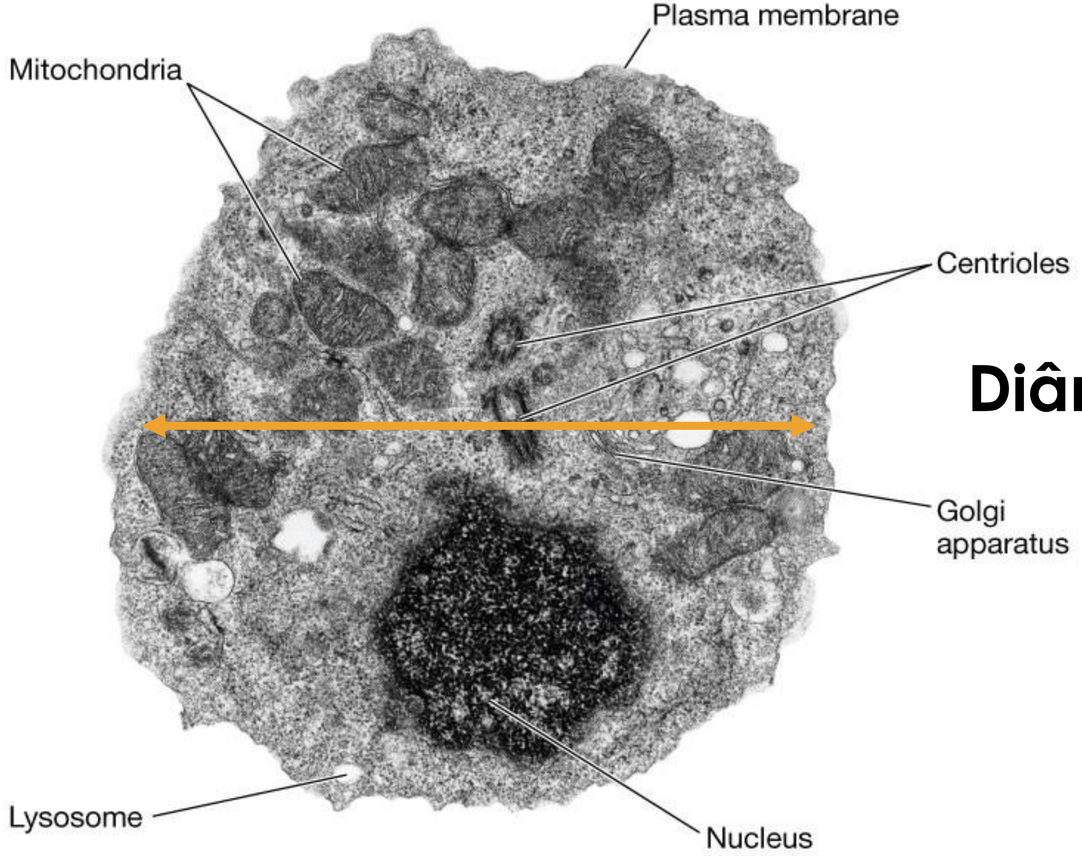


Esse modelo é uma boa aproximação?



Fonte: Animal cell, Edexcel IAL Biology

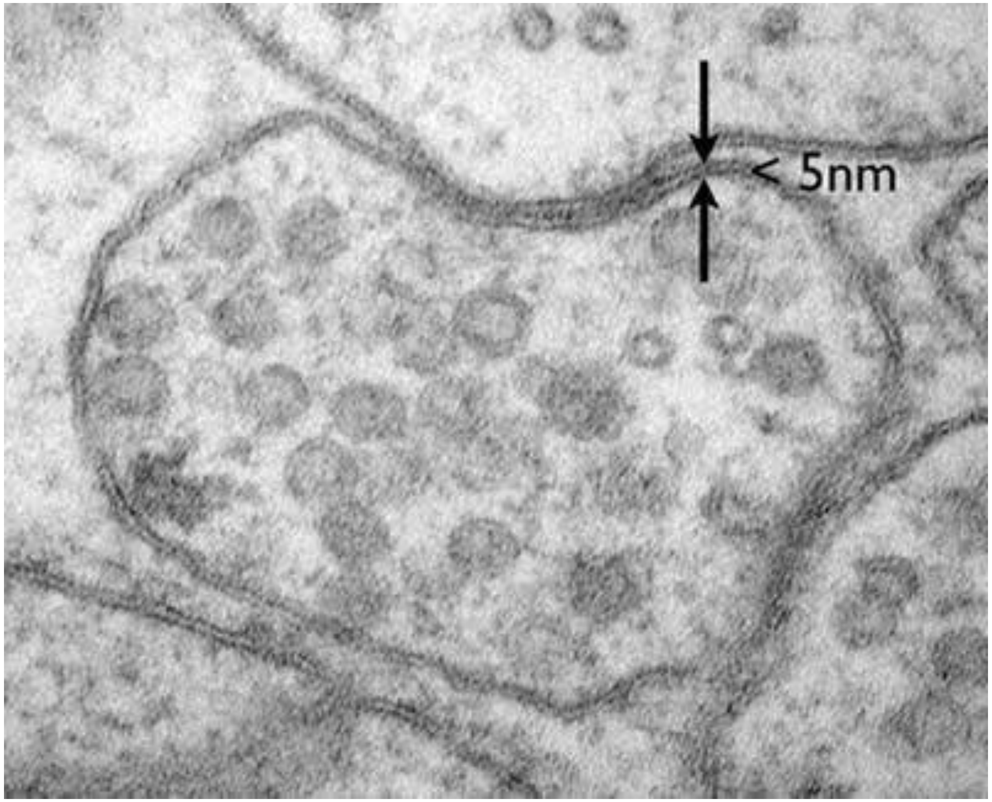
Esse modelo é uma boa aproximação?



Diâmetro médio 10 µm

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?

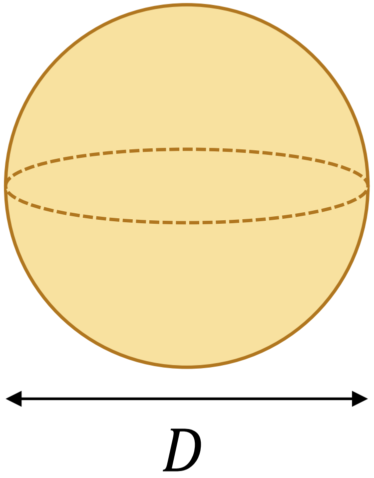
- Algumas células animais isoladas em meio líquido adquirem a forma esférica com diâmetros (D) entre *10* a *20* μm;
- Em uma célula com **diâmetro** $\boldsymbol{D = 10\ \mu m}$

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* μm;
- Em uma célula com **diâmetro** $\boldsymbol{D = 10\ \mu m}$

podemos calcular a circunferência e a área.

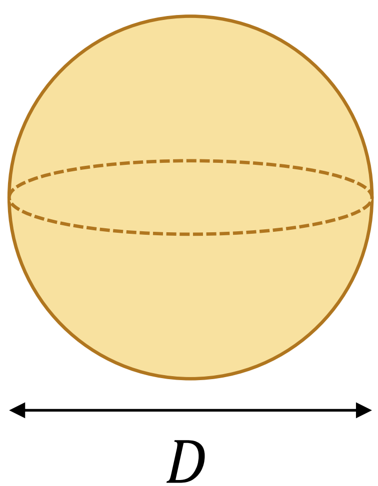


$$c = \pi D$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- Algumas células animais isoladas em meio líquido adquirem a forma esférica com diâmetros (D) entre *10 a 20 μm;*
- Em uma célula com **diâmetro $\boldsymbol{D = 10\ \mu m}$**

podemos calcular a circunferência e a área.



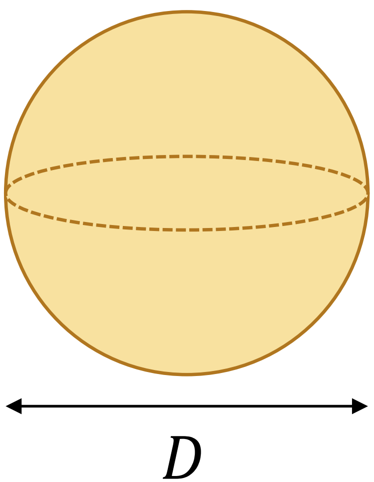
$$c = \pi\, D = 3{,}14\ x\ 10.10^{-6}$$

$$\boxed{c = 31.10^{-6} m}$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- Algumas células animais isoladas em meio líquido adquirem a forma esférica com diâmetros (D) entre *10 a 20* μm;
- Em uma célula com **diâmetro** $\boldsymbol{D = 10\ \mu m}$

podemos calcular a circunferência e a área.



$$c = \pi\, D = 3{,}14\ x\ 10.10^{-6}$$

$$\boxed{c = 31.10^{-6} m}$$

$$A = \pi\, D^2 = 3{,}14\ x\ (10.10^{-6})^2$$

$$\boxed{A = 3{,}1.10^{-10} m^2}$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- A **espessura ($\boldsymbol{d}$)** da membrana tem aproximadamente:

$$d = 5\,nm = 5.10^{-9}m = 5.10^{-3}\mu m$$

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

Esse modelo é uma boa aproximação?

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

$$d = 5\,nm = 5.10^{-9}m = 5.10^{-3}\mu m$$

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

$$\frac{d}{c} = \frac{5.10^{-3}\mu}{31\,\mu} = 1{,}6.10^{-4}$$

Esse modelo é uma boa aproximação?

- A **espessura ($\boldsymbol{d}$)** da membrana tem aproximadamente:

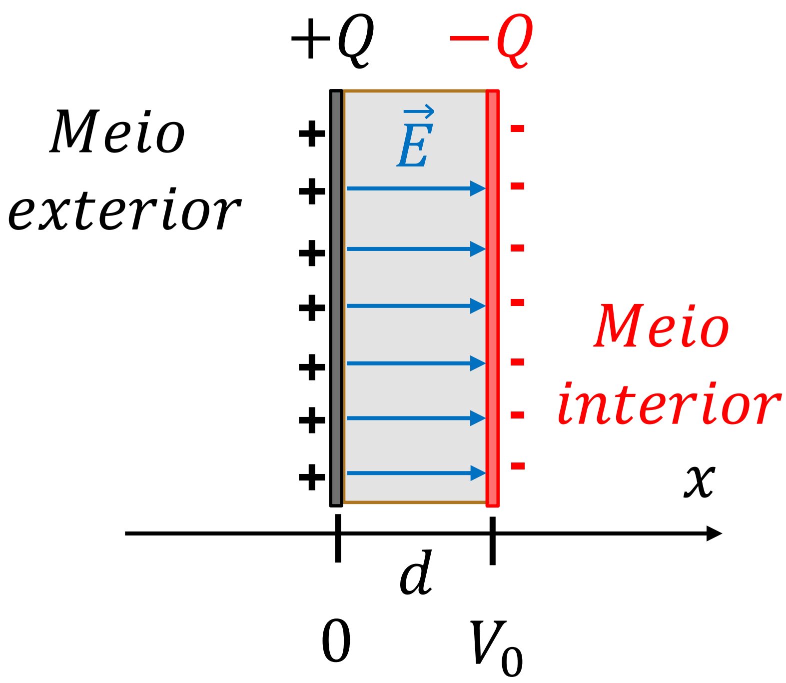
$$d = 5\,nm = 5.10^{-9}m = 5.10^{-3}\mu m$$

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

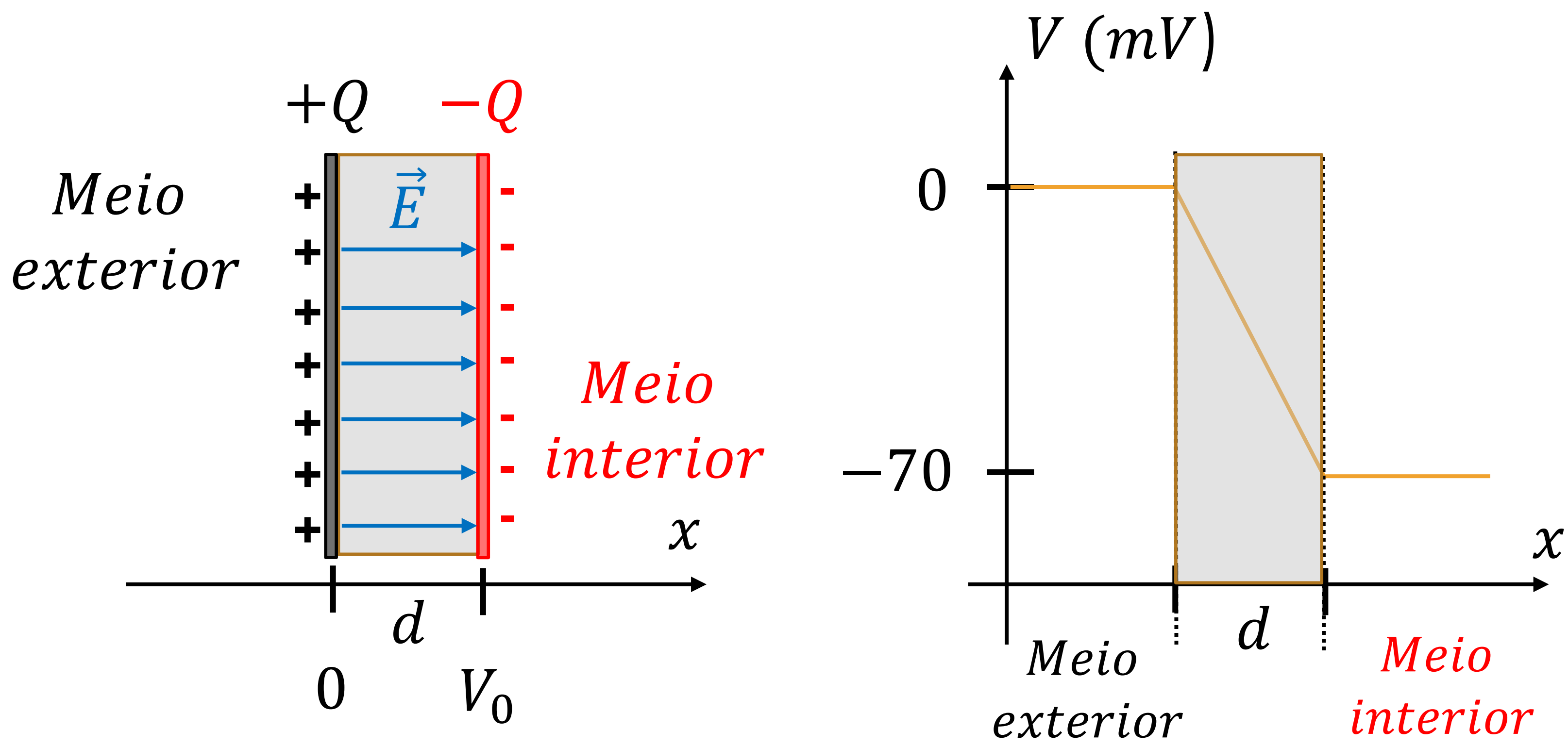
$$\frac{d}{c} = \frac{5.10^{-3}\mu}{31\ \mu} = 1{,}6.10^{-4} \quad \rightarrow \quad c \cong 10^4 d \quad \rightarrow \quad \boxed{\boldsymbol{c \gg d}}$$

- 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** $\boldsymbol{\varepsilon = 10\varepsilon_0}$ pode-se estimar a capacitância por unidade de área, a densidade superficial de cargas e outros parâmetros.

Exemplo

Uma membrana celular tem permissividade elétrica $\boldsymbol{\varepsilon = 10\varepsilon_0}$ e espessura $\boldsymbol{d = 8,0\ nm}$. A distribuição de cargas superficiais ($\boldsymbol{\sigma}$) é de $\boldsymbol{8,0.10^{-4}}\ \left[\frac{C}{m^2}\right]$. Utilize o modelo de membrana como um capacitor de placas paralelas e calcule:

a) A diferença de potencial entre as superfícies da membrana;

b) O campo elétrico na face interior;

c) A força elétrica que experimentará um íon de Ca^{++} que está no interior da membrana.

Dados: $\varepsilon_0 = 8{,}85.10^{-12}\ \left[\frac{N}{C}\right]$

Exemplo - solução

Dados: $\varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10\ x\ 8{,}85.10^{-12} = 8{,}85.10^{-11}\ [\frac{N}{C}]$

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

Exemplo - solução

Dados: $\varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10\ x\ 8{,}85.10^{-12} = 8{,}85.10^{-11}\ [\frac{N}{C}]$

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

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

$$\boldsymbol{V} = \frac{8{,}0.\,10^{-4}x\ 8{,}0.\,10^{-9}}{8{,}85.10^{-11}} = 72.\,10^{-3} = \mathbf{72}\ [\boldsymbol{mV}]$$

Exemplo - solução

Dados: $\varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10\,x\,8{,}85.10^{-12} = 8{,}85.10^{-11}\ [\frac{N}{C}]$

$d = 8{,}0\,nm = 8{,}0.10^{-9}[m] \qquad \sigma = \frac{Q}{A} = 8{,}0.10^{-4}\ \left[\frac{C}{m^2}\right]$

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

$$\boldsymbol{V} = \frac{8{,}0.10^{-4}x\,8{,}0.10^{-9}}{8{,}85.10^{-11}} = 72.10^{-3} = \mathbf{72}\ [\boldsymbol{mV}]$$

b) $$V = Ed \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{E} = \frac{V}{d} = \frac{-72.10^{-3}}{8{,}0.10^{-9}} = \mathbf{9{,}0.10^{6}}\ [\frac{\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{m}}]$$

Exemplo - solução

Dados: $\varepsilon = 10\varepsilon_0 = 10\,x\,8{,}85.10^{-12} = 8{,}85.10^{-11}\,[\frac{N}{C}]$

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

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

$$\boldsymbol{V} = \frac{8{,}0.\,10^{-4} x\, 8{,}0.\,10^{-9}}{8{,}85.10^{-11}} = 72.\,10^{-3} = \boldsymbol{72\,[mV]}$$

b) $V = Ed \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{E} = \dfrac{V}{d} = \dfrac{-72.\,10^{-3}}{8{,}0.\,10^{-9}} = \boldsymbol{9{,}0.\,10^{6}\,[\frac{V}{m}]}$

c) $\boldsymbol{F} = qE = q^{++}E = 2\,x\,1{,}60.\,10^{-19} x\,9{,}0.10^{6}$

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

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** ($\boldsymbol{\sigma_i}$) da solução eletrolítica com esta espécie iônica será:

$$\boxed{\sigma_i = \mu_i\, qi^2\, C_i} \quad [\Omega . m]^{-1}$$

$\boldsymbol{q_i}$: carga elétrica da espécie iônica;

$\boldsymbol{C_i}$: concentração da espécie iônica da solução;

$\boldsymbol{\mu_i}$: 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

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

$\boldsymbol{\mu_i}$: constante de mobilidade

$\boldsymbol{D_i}$: coeficiente de difusão da espécie iônica;

$\boldsymbol{T}$: temperatura da solução;

$\boldsymbol{k}$: constante de Boltzmann.

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

$$J = \sigma E = \sum_i (\mu_i \, q i^2 \, C_i) \, E \qquad como: \; J = I/A$$

$$\boxed{I = \sigma E A = \sum_i (\mu_i \, q i^2 \, C_i) \, E A} \qquad (corrente\ iônica)$$

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 :

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

$\boldsymbol{C_{(x)}}$: concentração do soluto; $\boldsymbol{V_{(x)}}$: Potencial elétrico;
$\boldsymbol{k} = 1{,}38.10^{-23}\ [\frac{J}{C}]$: constante de Boltzmann;
$\boldsymbol{ze}$: grau de ionização do soluto, sendo $e = 1{,}60.10^{-19}[C]$

Equilíbrio de Donnan

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

Equilíbrio de Donnan

- Um potencial de repouso (V_0) é sempre observado quando há diferentes concentrações iônicas dentre 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

Fonte: Adaptado de Duran, 2011, p. 253.

Equilíbrio de Donnan

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

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

$\boldsymbol{C_2}$: concentração iônica no meio interno;

$\boldsymbol{C_1}$: concentração iônica no meio externo;

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

$\boldsymbol{k} = 1{,}38.10^{-23}\ [\frac{J}{C}]$: constante de Boltzmann;

$\boldsymbol{ze}$: grau de ionização do soluto, sendo $e = 1{,}602.10^{-19}[C]$.

Equilíbrio de Donnan

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

$$\boxed{V_D = V_{(2)} - V_{(1)}} \qquad (Potencial\ de\ Donnan)$$

Equilíbrio de Donnan

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

$$\boxed{V_D = V_{(2)} - V_{(1)}} \qquad (Potencial\ de\ Donnan)$$

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

$$\boxed{V_{íon}{}^{N} = V_D}$$

$\boldsymbol{V_D}$: Potencial de Donnan;

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

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

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

Exemplo (p. 253 Duran)

Duas soluções iônicas separadas por uma membrana de uma célula muscular de rã a temperatura de $37℃$, 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: $k = 1{,}38.10^{-23}\ \left[\frac{J}{K}\right]$

Exemplo - solução

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

Exemplo - solução

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

$$\frac{kT}{e} = \frac{1{,}38.10^{-23} x\ (37+273)}{1{,}60.10^{-19}} = 26{,}7\ [mV]$$

Exemplo - solução

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

$$\frac{kT}{e} = \frac{1{,}38.10^{-23}x\,(37+273)}{1{,}60.10^{-19}} = 26{,}7\ [mV]$$

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

Exemplo - solução

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

$$\frac{kT}{e} = \frac{1{,}38.10^{-23}x\ (37+273)}{1{,}60.10^{-19}} = 26{,}7\ [mV]$$

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

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

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

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

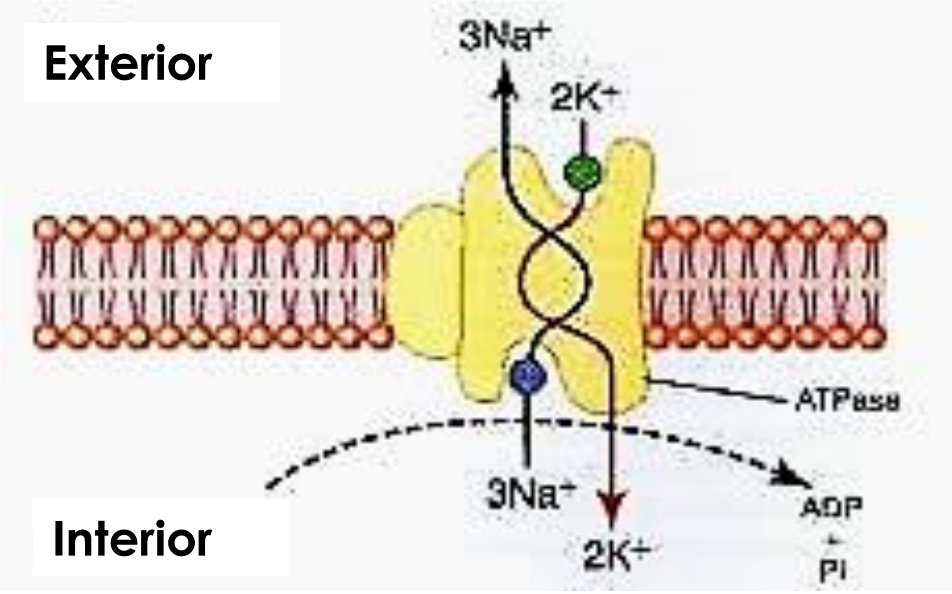
- O transporte devido a difusão e campo elétrico através do canal proteico da membrana são mecanismos passivos;
- Segundo o modelo de Donnan haverá um fluxo de Na^+ para o interior da célula e um fluxo K^+ para o exterior;
- Esse comportamento se deve ao potencial de repouso, principalmente do Na^+,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

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^{+}.



Fonte: Adaptado de Guyton, 1992, p. 42.

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: $ATP \quad \rightarrow \quad ADP + P + energia.$

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

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

$$I = N\frac{\Delta q}{\Delta t} = 10^6 x \ \frac{70 \ x \ 1{,}60.10^{-19}}{1}$$

$$I = 1{,}1.10^{-11} \ [A]$$

Para depois desta aula

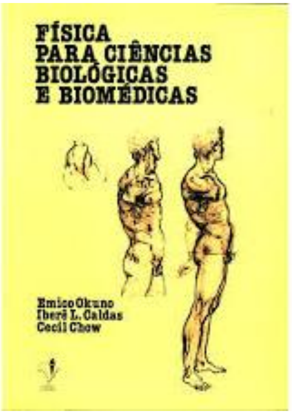
- Completar estudo com a leitura do capítulo 21 do livro texto (Okuno);
- Acessar Lista 07 no site:

profhenriquefaria.com

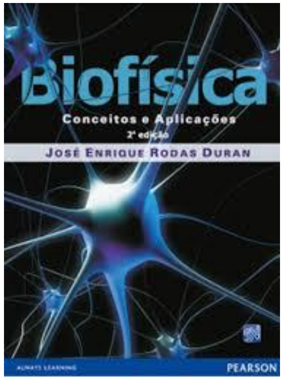
Obrigado pela atenção!

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)