

Tema#6: Electricidade

Bartolomeu Joaquim Ubisse

Instituto Superior de Ciências de Saúde (ISCISA)

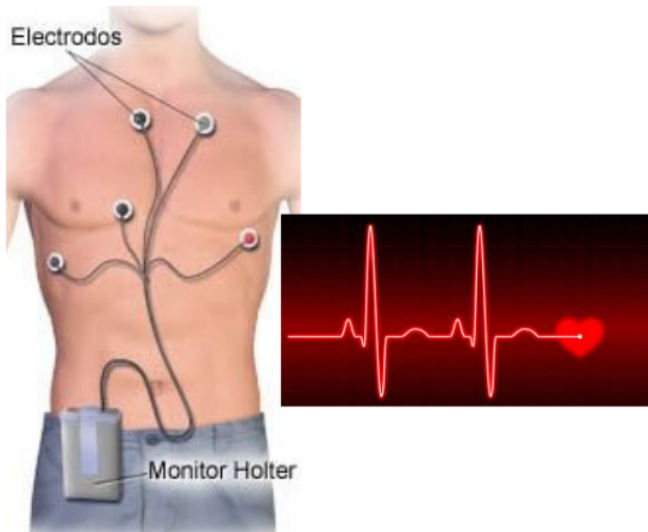
(Aulas preparadas para estudantes de Anatomia Patológica)

12 de Outubro de 2021

Conteúdos

- 1 Porque estudar Electricidade no curso de Saúde?
- 2 Carga eléctrica e estrutura da matéria
- 3 Força eléctrica: Lei de Coulomb
- 4 Campo eléctrico
- 5 Potencial eléctrico
 - Potencial de membrana - Equação de Nernst
 - Potencial de membrana - Equação de Goldman-Hodgkin-Kartz
 - Potencial de repouso
 - Potencial de acção

Porque estudar Electricidade no curso de Saúde?



Carga eléctrica e estrutura da matéria

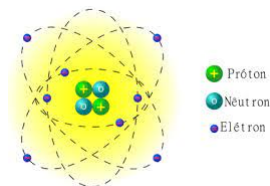


Figura 1: Modelo atómico

- Carga eléctrica é medida quantitativa de interação electromagnética.
- protão ($+e$)
- electrão ($-e$)
 $e = 1.6 \times 10^{-19}C$ (e - carga elementar)
- A unidade de carga eléctrica é Coulomb (C)

Lei de conservação da carga eléctrica

A carga eléctrica total em um sistema isolado, i.é., a soma algébrica de cargas negativas e positivas existente em certo instante, nunca varia.

Quantização da carga eléctrica

As carga eléctricas que temos na natureza são somente múltiplos da carga elementar.

$$Q = Ne \quad (1)$$

$$N = 1, 2, 3, \dots$$

Carga eléctrica e estrutura da matéria

Se um volume contém n_p protões e n_e electrões, então a carga líquida é:

$$Q = n_p e - n_e e = (n_p - n_e) e \quad [C] \quad (2)$$

Os átomos (ou moléculas), embora de princípio sendo electroneutros, podem perder ou ganhar electrões tornando-se desse modo iões positivos (catiões) ou negativos (aniões).

Vários processos concorrem para que electrização ocorra (por exemplo, a fricção), porém, para o nosso estudo podemos considerar o caso em que a molécula é submetida a um processo de dissolução aquosa.

Dissolução aquosa de NaCl: $\text{NaCl} \longrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$

Nos seres vivos, os fenómenos eléctricos estão ligados à presença de iões no plasma com maior ênfase a Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Cl^- .

Carga eléctrica: Densidades de carga

Embora a carga seja quantizada e associada a partículas discretas, ela é frequentemente considerada como estando distribuída de uma forma contínua no espaço (principalmente quando existem muitas cargas).

Existem três tipos de densidades:

① Densidade linear:

$$\lambda = \frac{dq}{dl} \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{Q}{l} \quad [C/m] \quad (3a)$$

② Densidade superficial:

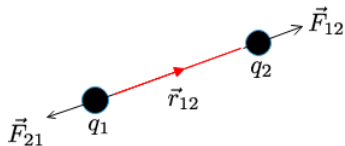
$$\sigma = \frac{dq}{dA} \quad \text{ou} \quad \sigma = \frac{Q}{A} \quad [C/m^2] \quad (3b)$$

③ Densidade Volumétrica:

$$\rho = \frac{dq}{dV} \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{Q}{V} \quad [C/m^3] \quad (3c)$$

Força eléctrica: Lei de Coulomb

\vec{F}_{12} - força que q_1 exerce sobre q_2



$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_1q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} \quad (4)$$

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$ - permissividade eléctrica do vácuo

ϵ_r - constante dieléctrica do meio

Tabela 1: Permissividades relativas

Material	ϵ_r
Água	80
lípidos	2.5
Proteínas	10

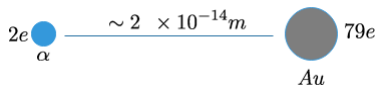
⇒ Compostos iónicos (ex: NaCl) dissolvem na água porque a força de interação reduz-se por um factor de 80.

Força eléctrica: Lei de Coulomb

A força eléctrica pode ser **atractiva** (para duas cargas de sinais opostos) ou **repulsiva** (para duas cargas de sinais iguais).

A força electrostática, mesmo para partículas pequenas, pode ser grande.

Ex: Espalhamento de Rutherford de uma partícula alfa por um núcleo de Ouro.



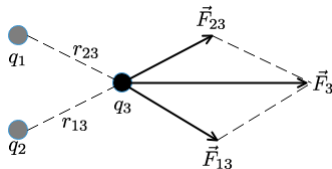
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{2e \times 79e}{(2 \times 10^{-14})^2} = 91N$$

Forças eléctricas: Princípio de superposição

Se existem N cargas ($q_1, q_2, q_3, \dots, q_N$), então a força resultante que a carga j sente pela presença de outras restantes cargas é:

$$\vec{F}_j = \sum_{i \neq j}^N \vec{F}_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \sum_{i \neq j}^N \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \hat{r}_{ij} \quad (5)$$

Exemplo:



$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$$

Campo eléctrico

Sempre que temos uma carga eléctrica ou um campo magnético variável com o tempo, estamos na presença de um campo eléctrico (\vec{E}). No caso só de presença de cargas eléctricas e/ou iões em repouso, o campo eléctrico é estático (electrostática).

$$\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q} \quad (6)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{Q}{r^2} \hat{e}_r \quad [N/C] \quad (6a)$$

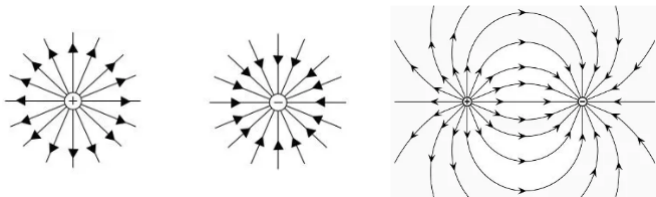


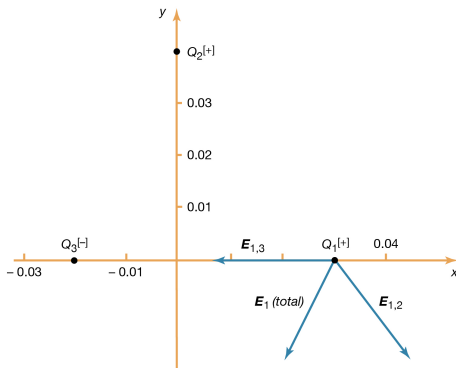
Figura 2: Linhas de campo

Campo eléctrico: Princípio de superposição

O campo eléctrico num ponto que sofre acção de várias cargas determina-se pela soma vectorial de todos os campos eléctricos originados por cada carga participante:

$$\vec{E}_r = \sum_i \vec{E}_i \quad (7)$$

Exemplo:



Potencial eléctrico

Quando uma carga é introduzida no seio de um campo eléctrico ela sofre acção desse campo e poderá se deslocar de um ponto, digamos **A**, para um outro **B**. Ao efectuar esse deslocamento significa que a força eléctrica realiza um trabalho sobre a carga.

Em cada ponto onde se encontra a carga possui uma energia potencial e, a energia potencial por unidade de carga define o potencial eléctrico (V) desse ponto.

Assim:

$$V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q} \quad (8)$$

Considerando a expressão da força electrostática (Força de Coulomb) tem-se:

$$V_A - V_B = k \frac{Q}{r_A} - k \frac{Q}{r_B} \quad (8a)$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$$

Potencial eléctrico

A diferença $V_A - V_B$ denomina-se diferença de potencial entre os pontos A e B . As distâncias r_A e r_B são as dos pontos A e B em relação ao ponto onde se localiza a carga que cria o campo eléctrico.

Na Eq.8a, admitindo-se que o ponto B encontra-se a uma distância muito grande (∞) em relação à carga Q e, considerando que o potencial no infinito é zero, o potencial eléctrico no ponto A é:

$$V_A = k \frac{Q}{r_A} \quad (9)$$

Onde V_A é o potencial eléctrico no ponto A em Volts (V), Q é a carga eléctrica em Coulomb (C) e r_A é a distância de onde se localiza a carga Q até ao ponto de medição A em metros (m).

Materiais condutores e isoladores

Os materiais diferem-se na relativa liberdade com que os portadores de carga movem-se através deles quando uma diferença de potencial é aplicado. Os materiais podem ser:

- 1 **Condutores** (a maioria dos metais, ex: Cu, Al, Ag, Au e mais)- os portadores de carga movem-se com muita facilidade (água no nosso organismo)
- 2 **Isoladores** (ex.: vidro, borracha, papel, cortiça e mais)- materiais em que os portadores movem-se com muitas dificuldades (bicamada de fosfolipídeos da membrana celular no nosso organismo)
- 3 **Semicondutores** (Ge, Si, GaAs, CdTe e mais)- materiais com propriedades intermédias às dos condutores e isoladores.

Para o nosso estudo vamos considerar os condutores e isoladores!

Capacitor de placas paralelas - sua analogia com a membrana celular

Consideremos duas superfícies condutoras paralelas carregadas com distância de separação ℓ .

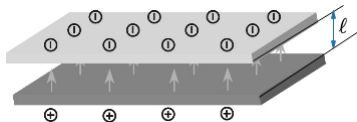


Figura 3: Capacitor de placas paralelas

Por definição:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (10)$$

Para capacitor de placas paralelas:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \kappa A}{\ell} \quad (11)$$

onde C é a capacitância em Farad (F), A é área da placa em m^2 , ℓ é a distância de separação entre as placas, ε_0 é a permissividade do vácuo e κ é a constante dielétrica do material isolante (adimensional)

Capacitor de placas paralelas - sua analogia com a membrana celular

O perfil de potencial fica:

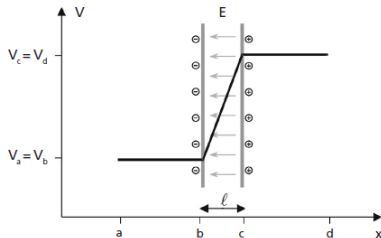


Figura 4: Perfil do potencial eléctrico através de placas carregadas

- \vec{E} está confinado no interior das placas e permanece constante
 \leadsto o potencial eléctrico varia linearmente $V_c - V_b = E\ell$
- O catião move-se da região de maior potencial para a de menor potencial.

Sempre que as cargas estiverem separadas por uma certa distância, tem-se um dipolo e há uma diferença de potencial. \leadsto Ocorre um fluxo de iões até que se atinja o equilíbrio

Capacitor de placas paralelas - sua analogia com a membrana celular

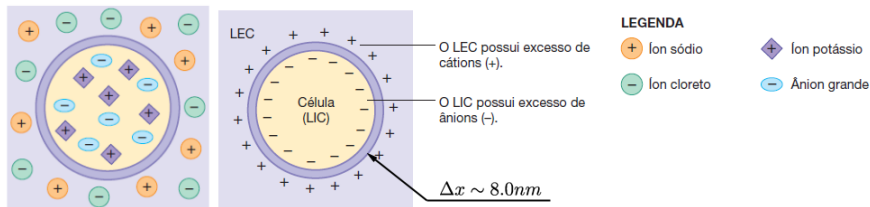


Figura 5: Distribuição de íons através da membrana celular

- Tanto o líquido intracelular (LIC) quanto o líquido extracelular (LEC) possuem íons não neutralizados - Tem-se um dipolo elétrico
- Por existir uma diferença de potencial e de concentrações dos íons¹, tem lugar dois fluxos com sentidos opostos: **difusão** ($\approx \nabla[\]$) e **deriva** ($\approx \nabla V$)

¹A combinação de gradientes elétricos e de concentração é chamada de **gradiente eletroquímico**

Potencial de membrana - Equação de Nernst

O fluxo cessa quando se atingir o equilíbrio, i.e., $\vec{j}_{dif} + \vec{j}_{der} = 0$

Assim, usando-se um único tipo de ião, a diferença de potencial entre dentro e fora da membrana celular é dada pela **equação de Nernst - Planck**:

$$V_i - V_o = -\frac{RT}{ZF} \ln \left(\frac{C_i}{C_o} \right) \quad (12)$$

Onde, V_i é o potencial no interior da membrana em Volts [V], V_o é o potencial fora da membrana em Volts [V], R é a constante universal de gás [$R = 8.314 J/(molK)$], T é a temperatura absoluta [K], Z é a valência do ião [+1 para K^{+1}], F é a constante de Faraday [$F = 9.649 \times 10^4 C/mol$], C_i é a concentração do ião dentro da membrana e, C_o é a concentração fora da membrana.

Potencial de membrana - Equação de Nernst

Tabela 2: Concentrações intra e extracelular dos principais iões em humanos

Ião	Concentração intracelular(mM) ²	Concentração extracelular(mM)
Na ⁺	12-20	145
Ka ⁺	140	4
Ca ⁺²	100	1.5
Cl ⁻	4.2	123

²M = mol/litro

Potencial de membrana - Equação de Goldman-Hodgkin-Katz

A equação de Nernst assume que a célula em questão é livremente permeável apenas pelo ião a ser estudado. Porém, as células vivas são também permeáveis a outros iões e, todos tem contributo no potencial medido.

A consideração das contribuições de todos os iões consegue-se através da Eq. de **Goldman-Hodgkin-Katz**

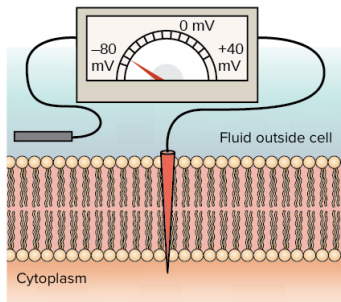
$$V_i - V_o = -\frac{RT}{F} \ln \left(\frac{[k^+]_i P_{k^+} + [Na^+]_i P_{Na^+} + [Cl^-]_o P_{Cl^-}}{[k^+]_o P_{k^+} + [Na^+]_o P_{Na^+} + [Cl^-]_i P_{Cl^-}} \right) \quad (13)$$

Os índices i e o são respectivamente referentes a dentro e fora da membrana. p é a permeabilidade desse ião em causa e, $[]$ refere a concentração.

Potencial de membrana - Potencial de repouso

O potencial de repouso é a diferença de potencial através da membrana celular de uma célula viva normal que se encontra no seu estado não estimulado.

O potencial de repouso (P_r) de muitas células é próximo ao potencial de equilíbrio do K^+ \rightsquigarrow A membrana plasmática é mais permeável a K^+



O electrodo do LEC é de referência \rightarrow escolhe-se o seu potencial igual a zero.

P_r depende do tipo de célula -
 $P_r(\text{neurônio}) \sim -30mV$ a $-90mV$

Figura 6: Medição do potencial de repouso

Potencial de membrana - Potencial de repouso

Dependendo do potencial da membrana ela pode estar polarizada, hiperpolarizada ou despolarizada.

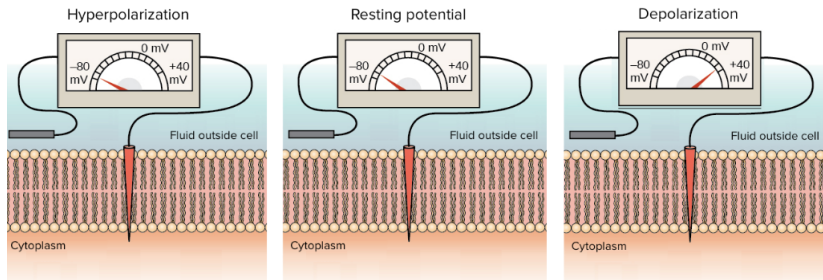


Figura 7: Estados da membrana celular em função do potencial [[Ver o link!](#) >]. Acesso em 12/10/2021.]

Os neurônios comunicam-se através de sinais elétricos que resultam dos processos de despolarização e hiperpolarização das suas membranas.

Potencial de membrana - Potencial de acção

Na ausência da perturbação externa, na membrana só se tem o potencial de repouso que, é constante com o tempo.

Porém, quando há um estímulo externo, por exemplo, o impulso eléctrico que um neurónio recebe do outro, ocorre uma variação no potencial da membrana e, o potencial existente denomina-se potencial de acção.

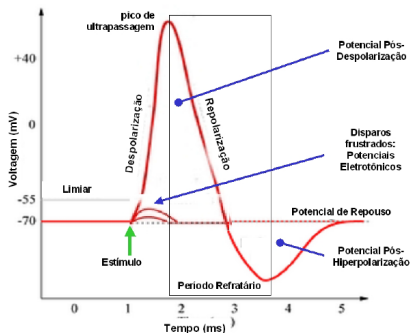


Figura 8: Potencial de acção e suas fases